
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Processus d'assemblage bois et études mécaniques - Kigumi, ou l'art des charpentiers japonais

Auteur : Bergdoll, Emma

Promoteur(s) : Duchene, Laurent

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23248>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Processus d'assemblage bois et études mécaniques - Kigumi, ou l'art des charpentiers japonais

BERDGOLL Emma

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :

Ingénieur Civil Architecte en 2025

Promoteur :

DUCHENE Laurent

Année académique : **2024 – 2025**

Remerciements

Au terme de cette recherche, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes et institutions qui ont contribué à son aboutissement.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur Laurent DUCHENE, dont l'accompagnement et les conseils m'ont été précieux tout au long de cette recherche. Son soutien a grandement contribué à la qualité et à la progression de mon travail.

Un grand merci à la Maison de la Culture du Japon à Paris, qui m'a fourni une bibliographie riche et m'a permis d'accéder à des ouvrages essentiels pour approfondir mon sujet de thèse. Leur mise à disposition de ressources a été un véritable atout dans ma recherche.

Enfin, je remercie chaleureusement Lucas Basset, qui a réalisé les prototypes avec soin et expertise. Son savoir-faire a permis de donner une dimension concrète à mes réflexions et d'expérimenter des solutions adaptées au projet.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à toutes celles et ceux qui, bien que non mentionnés explicitement, ont contribué à la réussite de ce travail.

Membre du jury

- Monsieur DUCHENE Laurent, Promoteur

Faculté des sciences appliquées, Département ArGENCo

Analyse multi-échelles dans le domaine des matériaux et structures du génie civil

Urban and Environmental Engineering

Université de Liège, Belgique

L.Duchene@uliege.be

- Monsieur ATTIA SHADY

Faculté des sciences appliquées, Département ArGENCo

Techniques de construction des bâtiments

Urban and Environmental Engineering

Université de Liège, Belgique

Shady.Attia@uliege.be

- Monsieur GOUVEIA HENRIQUES José Alexandre

Faculté des sciences appliquées, Département ArGENCo

Timber constructions

Université de Liège, Belgique

Docent, Bouwkunde - Assistant Professor, Construction Engineering

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen - Faculty of Engineering Technology

jose.gouveiahenriques@uhasselt.be

Résumé

L'essor actuel de l'architecture et des constructions en bois s'inscrit dans une dynamique visant des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement. Parmi les savoir-faire ancestraux, le Kigumi, technique japonaise d'assemblage en bois sans clous ni vis, offre une approche sophistiquée qui allie esthétique, résistance mécanique et respect des matériaux. Mais comment ces méthodes traditionnelles peuvent-elles s'inscrire dans une architecture durable contemporaine et répondre aux enjeux environnementaux actuels ? Dans ce travail, le Kigumi est exploré, son histoire, ses principes et ses techniques d'assemblage. La thèse se penchera ensuite sur le matériau central de cette approche : le bois, sur ses propriétés, sa résistance mécanique, ses vulnérabilités et son rôle spécifique dans la construction Kigumi. L'intégration des principes de l'architecture durable au travers de ces techniques traditionnelles constitue un enjeu essentiel pour une construction plus respectueuse de l'environnement. La question de l'efficacité énergétique, de l'utilisation de matériaux d'origine naturelle et de la gestion des ressources se pose comme un défi à relever pour marier tradition et modernité. Le bois, en tant que matériau clé de la construction écologique, y trouve toute sa place. Dans cette continuité, le document examine le lien entre Kigumi et architecture durable dans la littérature, en mettant en perspective les apports du modulaire, du métabolisme architectural et des nouvelles technologies de fabrication. Ce rapprochement soulève alors des problématiques au niveau de l'étude mécanique de ces assemblages, il sera alors mis en avant les méthodes de conception et d'analyse mécanique, notamment à travers de la modélisation numérique, des calculs par éléments finis et la validation des assemblages proposés. Afin de compléter les apports de cette réflexion, à une approche expérimentale est exposée à travers le prototypage d'assemblages et d'une interview d'un menuisier, seulement du point de vue de la conception. Deux prototypes ont été réalisés, l'un en bois et l'autre par de l'impression 3D, pour analyser les différences et contraintes de chaque approche. En conclusion, cette thèse rassemblera les analyses développées tout au long de l'étude, tout en ouvrant des pistes de réflexion sur l'avenir du Kigumi et son intégration dans une architecture durable.

Abstract

The current boom in wooden architecture and construction is part of a drive towards more sustainable, environmentally friendly solutions. Kigumi, the Japanese technique of assembling wood without nails or screws, is one of the most traditional methods, offering a sophisticated approach that combines aesthetics, mechanical strength and respect for materials. But how can these traditional methods fit in with contemporary sustainable architecture and meet today's environmental challenges? This thesis explores the history, principles and assembly techniques of Kigumi. The thesis then looks at the central material in this approach: wood, its properties, mechanical strength, vulnerabilities and specific role in Kigumi construction. Integrating the principles of sustainable architecture into these traditional techniques is a key factor in building that is more respectful of the environment. Energy efficiency, the use of natural materials and resource management are all challenges that need to be met if tradition and modernity are to go hand in hand. Wood, as a key material in ecological construction, has its place here. In this vein, the paper examines the link between Kigumi and sustainable architecture in the literature, putting into perspective the contributions of modularity, architectural metabolism and new manufacturing technologies. This link then raises issues in terms of the mechanical study of these assemblies, highlighting the methods of design and mechanical analysis, particularly through numerical modelling, finite element calculations and the validation of the proposed assemblies. In order to complete the contributions of this reflection, an experimental approach is exposed through the prototyping of assemblies and an interview with a joiner, only from the design point of view. Two prototypes were produced, one in wood and the other using 3D printing, to analyse the differences and constraints of each approach. In conclusion, this thesis will bring together the analyses developed throughout the study, while opening avenues for reflection on the future of the Kigumi and its integration into sustainable architecture.

Table des matières

Remerciements.....	2
Membre du jury.....	3
Résumé	4
Abstract.....	5
Table des matières	6
Table des figures	10
Table des tableaux	13
Introduction	14
Contexte	14
Problématiques	14
Chapitre 1. Kigumi.....	15
1.1 Introduction	16
1.2 Origines, développement et influence des contacts avec le continent de la charpenterie japonaise	17
1.3 Genèse de la menuiserie japonaise	22
1.4 Kiwari	22
1.5 Dōgu du charpentier, ou instruments.....	23
1.6 Les constructions.....	25
1.7 Les assemblages	29
1.7.1 Le rôle clé des assemblages en bois	29
1.7.2 Différents types de joints et techniques.....	30
Chapitre 2. Le bois	33
2.1 Propriétés.....	34
2.2 Résistance.....	35
2.3 Vulnérabilité	37
2.4 Incendies.....	37
2.5 Le bois au service du Kigumi.....	39
Chapitre 3. Étude des principes de l'architecture durable.....	41
3.1 Architecture durable	42
3.1.1 Définition	42

Table des matières

3.1.2 Principes de l'architecture durable	43
3.1.2.1 <i>Utilisation de matériaux écologiques</i>	43
3.1.2.2 <i>Efficacité énergétique</i>	43
3.1.2.3 <i>Gestion de l'eau</i>	43
3.1.2.4 <i>Conception écologique</i>	44
3.1.2.5 <i>Réduire, recycler et réutiliser les déchets</i>	44
3.1.2.6 <i>Réglementations et Normes</i>	44
3.1.2.7 <i>Sensibilisation du public et éducation</i>	44
3.1.3 Avantages.....	45
3.1.3.1 <i>Avantages environnementaux</i>	45
3.1.3.2 <i>Avantages économiques</i>	45
3.1.3.3 <i>Avantages sociaux et de santé</i>	45
3.2 Architecture modulaire	46
3.3 Enjeux contemporains européens	47
3.3.1 Initiatives	47
3.3.2 Labels et certifications	48
3.3.2.1 <i>Les certifications environnementales liées au bois (FSC, PEFC)</i>	48
3.3.2.2 <i>HQE, LEED, BREEAM</i>	49
3.3.2.3 <i>Avantages et inconvénients</i>	50
3.4 Le bois en Europe.....	51
3.5 Le bois en architecture verte	51
3.5.1 Le bois, un matériau clé pour une construction durable	51
3.5.2 Les avantages du bois dans la construction écologique	52
3.5.2.1 <i>Une empreinte carbone réduite</i>	52
3.5.2.2 <i>Les tendances actuelles en matière d'architecture en bois</i>	52
3.5.2.3 <i>Des matériaux locaux pour un impact positif</i>	53
3.5.2.4 <i>Innovations technologiques et bois</i>	53
Chapitre 4. Du Kigumi à l'architecture durable	54
4.1. Introduction	55
4.2 Architecture modulaire et durabilité.....	55
4.3 Métabolisme et outils de modélisation numérique.....	58
4.4 Les nouvelles technologies de fabrications	60
4.5 Comportement mécanique du Kigumi	63

Table des matières

Chapitre 5 : Développement de méthodes de conception et d'analyse mécanique	68
5.1 Exploration de la littérature	69
5.2 Analyse mécanique : méthodes et résultats	74
5.2.1 Objectif	74
5.2.2 Recherche de joints d'angles	75
5.2.2.1 <i>Logiciel de conception Tsugite</i>	75
5.2.2.2 <i>Assemblages d'angles traditionnels japonais</i>	76
5.2.2.3 <i>Travail de menuisier</i>	78
5.2.3 Sélection des assemblages	79
5.2.4 Modélisation	84
5.2.4.1 <i>Catia V5</i>	84
5.2.4.2 <i>Propriété du chêne</i>	84
5.2.5 Calculs par éléments finis	85
5.2.6 Résultats et analyse	87
5.2.6.1 <i>Flèches</i>	87
5.2.6.2 <i>Contraintes de von mises</i>	93
5.2.6.3 <i>Interprétation et comparaison des moments féchissants des pièces (A), (B) et (C)</i>	97
5.2.6.4 <i>Calcul des Moments des joints (D) et (E)</i>	100
5.2.7 Calculs théoriques	105
5.2.7.1 <i>Calcul pour les assemblages (A), (B) et (C)</i>	105
5.2.7.2 <i>Calcul de la flèche assemblages (D) et (E)</i>	107
5.2.8 Comparaison et discussion théorique et modèle numérique	109
Chapitre 6 : Prototypage par un menuisier	110
6.1 Prototype en essence de chêne	111
6.1.1 Cahier des charges	111
6.1.2 Coût et temps de réalisation	112
6.1.3 Processus de fabrication	112
6.1.4 Retour d'expérience et contraintes	116
6.2 Prototype en impression 3D	118
6.2.1 Cahier des charges	118
6.2.2 Fabrication	119
6.2.3 Retour d'expérience	119

Table des matières

6.3 Conclusion.....	121
Chapitre 7 : Conclusion et perspectives	122
Bibliographie.....	125

Table des figures

FIGURE 1 : PEINTURE JAPONAISE PERIODE EDO, « VUE DE YOSHIDA », D'APRES UTAGAWA HIROSHIGE 歌川廣重, UKIYO-E WOODBLOCK, TOKAIDO [4]	16
FIGURE 2 : EXEMPLE D'HABITATIONS A FOSSE [58]	17
FIGURE 3 : INTERIEUR D'UNE MAISON A FOSSE D'EPOQUE YAGOI – JAPON [58]	17
FIGURE 4 : FRISE CHRONOLOGIQUE DE L'HISTOIRE DU JAPON [7]	18
FIGURE 5 : JOINT TENON-MORTAISE [59]	19
FIGURE 6 : TEMPLE IZUMO TAISHA [60]	19
FIGURE 7 : TUMULUS EN FORME DE TROU DE SERRURE – JAPON [58]	20
FIGURE 8 : ISE JINGU, SANCTUAIRE SHINTOÏSTE [61]	20
FIGURE 9 : TEMPLE HORYU-JI [62]	21
FIGURE 10 : UN MAITRE CHARPENTIER A L'ŒUVRE [63]	23
FIGURE 11 : OUTILS TRADITIONNELS DU CHARPENTIER JAPONAIS [64]	24
FIGURE 12 : CHARPENTIER JAPONAIS DANS SON ATELIER [65]	25
FIGURE 13 : DIFFERENTES FORMES DE TSUGITE [23]	26
FIGURE 14 : ASSEMBLAGE D'ANGLE EN JOINT SHIGUCHI DE DEUX PIECES DE BOIS [67]	26
FIGURE 15 : PANNEAUX COULISSANTS (FUSUMA ET SHOJI) D'UNE MAISON TRADITIONNELLE JAPONAISE [68]	27
FIGURE 16 : NAGESHI [70]	28
FIGURE 17 : DISPOSITION DES CHEVRONS SOUS L'AVANCEE DE LA TOITURE [71]	28
FIGURE 18 : MAISON TYPIQUE ET TRADITIONNELLE JAPONAISE [72]	29
FIGURE 19 : ASSEMBLAGE AVEC UNE CLE [74]	30
FIGURE 20 : EXEMPLE DE JOINT DE BOUT (SPLICING JOINT) [25]	31
FIGURE 21 : IMAGE D'UNE JONCTION DE PIECES DANS UNE OSSATURE BOIS AVEC DES RENFORTS DE MAINTIEN [73]	32
FIGURE 22 : ANATOMIE D'UNE CHARPENTE MONOPENTE [79]	32
FIGURE 23 : JOINT D'ANGLE DE CONSTRUCTION AZEKURA [81]	34
FIGURE 24 : SHOSO-IN [82]	35
FIGURE 25 : MODULE D'ANGLE EN BOIS COMPOSITE [18]	55
FIGURE 26 : STRUCTURE CREEE AVEC UN MOTIF MODULAIRE [20]	56
FIGURE 27 : ETAPES DE LA GENERATION EN 4D D'UNE STRUCTURE [20]	58
FIGURE 28 : INTERLOCKING PATTERN [20]	59
FIGURE 29 : KAWAI TSUGITE [42]	59
FIGURE 30 : DECOUPE CNC [20]	60
FIGURE 31 : ASSEMBLAGE 2D [26]	61
FIGURE 32 : ILLUSTRATION DU SYSTEME IATPS [87]	62
FIGURE 33 : ASSEMBLAGES ETUDES PAR L'ARTICLE [25]	64
FIGURE 34 : RESULTATS DE L'EXPERIENCE POUR CHAQUE TYPE DE JOINT [25]	65
FIGURE 35 : JOINT NUKI [47]	67
FIGURE 36 : ASSEMBLAGE ETUDE DANS L'ARTICLE [44]	69
FIGURE 37 : DEFORMED GEOMETRIES OF JOINTS AT DIFFERENT STATES OF LOADING UNTIL FAILURE, AND CORRESPONDING PRINCIPAL STRESS DISTRIBUTION STATES FOR; (A) TO (C) JOINT A, (D) TO (F) JOINT C FROM THE FIGURE 36	70
FIGURE 38 : MOMENT ROTATION BEHAVIOUR OF THE FOUR SELECTED JOINTS FROM FIGURE 36	70
FIGURE 39 : JOINTS ETUDES DANS L'ARTICLE [78]	71
FIGURE 40 : EXEMPLE CONCRET DANS JOINTS UTILISES [78]	72
FIGURE 41 : ANALYSE EXPERIMENTALE [78]	73
FIGURE 42 : ANALYSE ANALYTIQUE [78]	73
FIGURE 43 : RESULTAT DE LA SIMULATION NUMERIQUE [78]	74
FIGURE 44 : EXOSQUELETTE EN BOIS D'UN CUBE [86]	74

Table des figures

FIGURE 45 : EXEMPLE DE JOINT CONÇU PAR LE LOGICIEL TSUGITE [23].....	75
FIGURE 46 : EXPLICATION DE LA CREATION DU JOINT BRIDLE PAR LE LOGICIEL TSUGITE [23]	76
FIGURE 47 : MODE GALERIE DU LOGICIEL TSUGITE [23].....	76
FIGURE 48 : JOINT D'ENFOURCHEMENT DANS LA LITTERATURE JAPONAISE [1] [2].....	77
FIGURE 49 : STRUCTURE D'UN TEMPLE JAPONAIS [2]	78
FIGURE 50 : JOINT BRIDLE [44]	78
FIGURE 51 : EXEMPLE DE JOINT REALISE PAR UN MENUISIER [88] (JOINT BRIDLE A GAUCHE).....	79
FIGURE 52 : CROQUIS REALISE A LA MAIN	80
FIGURE 53 : ASSEMBLAGE (A)	81
FIGURE 54 : ASSEMBLAGE (B)	81
FIGURE 55 : ASSEMBLAGE (C)	82
FIGURE 56 : CHOIX DES ASSEMBLAGES (D) ET (E)	83
FIGURE 57 : ASSEMBLAGE (D) ET (E) FINAL	83
FIGURE 58 : MODELE DU JOINT (E) REALISE ET ASSEMBLE DANS CATIA V5	84
FIGURE 59 : PROPRIETE DU BOIS DE CHENE [91]	84
FIGURE 60 : PROPRIETE DU BOIS DE CHENE IMPLEMENTE DANS LE LOGICIEL CATIA V5.....	85
FIGURE 61 : SCHEMA DE CAS DE CHARGES POUR UN ASSEMBLAGE EN BOIS	86
FIGURE 62 : CAS DE CHARGES SUR CATIA V5 POUR UN ASSEMBLAGE	86
FIGURE 63 : EVOLUTION DES TRANSLATIONS EN FONCTION DU MAILLAGE POUR LES ASSEMBLAGES (A), (B) ET (C)	88
FIGURE 64 : VISUALISATION DES EFFORTS SUR CATIA V5 DE L'ASSEMBLAGE (A) AVEC UN MAILLAGE DE 5MM.....	88
FIGURE 65 : VISUALISATION DES EFFORTS SUR CATIA V5 DE L'ASSEMBLAGE (B) AVEC UN MAILLAGE DE 5MM.....	89
FIGURE 66 : VISUALISATION DES EFFORTS SUR CATIA V5 DE L'ASSEMBLAGE (C) AVEC UN MAILLAGE DE 5MM	89
FIGURE 67 : RAPPEL DE L'ASSEMBLAGE (B).....	90
FIGURE 68 : VISUALISATION DE LA TRANSLATION MAX EN Z SUR CATIA V5 DE L'ASSEMBLAGE (B) AVEC UN MAILLAGE DE 25MM.....	90
FIGURE 69 : EVOLUTION DES TRANSLATIONS EN FONCTION DU MAILLAGE POUR LES ASSEMBLAGES (D) ET (E)	92
FIGURE 70 : DEFORMATION D'UNE POUTRE SELON SON CAS DE CHARGE [92]	92
FIGURE 71: VISUALISATION DES TRANSLATION MAX EN Z SUR CATIA V5 DE L'ASSEMBLAGE (E) AVEC UN MAILLAGE DE 10 MM	93
FIGURE 72 : EVOLUTION DES CONTRAINTES DE VON MISES MAXIMALES EN FONCTION DU MAILLAGE DES ASSEMBLAGES (A), (B) ET (C)	94
FIGURE 73 : EVOLUTION DES CONTRAINTES DE VON MISES MAXIMALES EN FONCTION DU MAILLAGE DES ASSEMBLAGES (D) ET (E).....	95
FIGURE 74 : CONTRAINE DE VON MISES VUE EN COUPE DANS LE PLAN XY DE L'ASSEMBLAGE (D) MAILLAGE 15MM.....	96
FIGURE 75: CONTRAINE DE VON MISES VUE EN COUPE DANS LE PLAN XY DE L'ASSEMBLAGE (E) MAILLAGE 15MM.....	96
FIGURE 76 : SECTIONS ETUDIEES	97
FIGURE 77 : SCHEMA DE LA SECTION DE POUTRE ETUDIEE	100
FIGURE 78 : REPARTITION DES CONTRAINTE EN X (EN VALEUR ABSOLUE) DE LA SECTION DE LA POUTRE A LA SORTIE DU POTEAU DE (D)	101
FIGURE 79 : REPARTITION DES CONTRAINTES EN X (GAUCHE) ET EN VALEURS ABSOLUES (DOITE) DE LA SECTION DE LA POUTRE A LA SORTIE DU POTEAU DE (E).....	103
FIGURE 80: MORCEAU DE BOIS DE CHENE UTILISE POUR LE PROTOTYPE	111
FIGURE 81 : MODELE SKETCHUP 3D DE REFERENCE DE L'ASSEMBLAGE (E).....	111
FIGURE 82 : IMPRESSION 3D (BLEUE) DU MOTIF POUR LE POTEAU	112
FIGURE 83 : UTILISATION DE LA SCIE A RUBAN POUR LA DECOUPE DES MORCEAUX	113
FIGURE 84 : UTILISATION DE LA DEGAUCHISSEUSE	113
FIGURE 85 : UTILISATION DE LA RABOTEUSE	114
FIGURE 86 : UTILISATION DE LA SCIE A FORMAT	114
FIGURE 87 : MOTIFS DE L'ASSEMBLAGE SUR LES PIECES EN BOIS	115

Table des figures

FIGURE 88 : UTILISATION DE LA MORTAISEUSE A MECHE.....	115
FIGURE 89 : FINITIONS AVEC UNE SCIE A BOIS	116
FIGURE 90 : PROTOTYPE TERMINE.....	116
FIGURE 91 : CORRECTION DU TRAVAIL DE LA MORTAISEUSE	117
FIGURE 92 : EMBOITEMENT VERTICAL DU JOINT	118
FIGURE 93 : MODELE SKETCHUP DE L'ASSEMBLAGE (B).....	118
FIGURE 94 : PIECE BLEUE EN COURS D'IMPRESSION	119
FIGURE 95 : PIECE ROUGE IMPRIMEE AVEC DU SUPPORT	120
FIGURE 96: PIECES IMPRIMEES ET EMBOITEES.....	120

Table des tableaux

TABLEAU 1 : RESULTATS DES TRANSLATIONS MAX EN Z DES ASSEMBLAGE (A) (B) ET (C)	87
TABLEAU 2 : RESULTATS DES TRANSLATIONS MAX EN Z DES ASSEMBLAGE (D) ET (E)	91
TABLEAU 3: RESULTATS DES CONTRAINTES DE VON MISES DES ASSEMBLAGE (A), (B) ET (C)	94
TABLEAU 4 RESULTATS DES CONTRAINTES DE VON MISES DES ASSEMBLAGE (D) ET (E).....	95
TABLEAU 5 : COMPARAISON DES MOMENTS DES ASSEMBLAGES (A), (B) ET (C) DANS UNE SECTION ZX	98
TABLEAU 6 : COMPARAISON DES MOMENTS DES ASSEMBLAGES (A), (B) ET (C) DANS UNE SECTION ZY	99
TABLEAU 7 : CALCUL DES MOMENTS EN FONCTION DES CONTRAINTES RELEVEES POUR CHAQUE TRANCHE	102
TABLEAU 8 : CALCUL DES MOMENTS EN FONCTION DES CONTRAINTES RELEVEES POUR CHAQUE TRANCHE	104
TABLEAU 9 : TABLEAU SYNTHETIQUE DE LA FLECHE MAX DES ASSEMBLAGES (A), (B), (C)	109
TABLEAU 10: TABLEAU SYNTHETIQUE DE LA FLECHE MAX DES ASSEMBLAGES (D), (E).....	109
TABLEAU 11: TABLEAU SYNTHETIQUE DU MOMENT DES ASSEMBLAGES (A), (B), (C)	109
TABLEAU 12: TABLEAU SYNTHETIQUE DU MOMENT DES ASSEMBLAGES (D), (E)	109

Introduction

Contexte

Les maisons traditionnelles japonaises, emblèmes d'une harmonie entre l'homme et la nature, sont le fondement de nombreux travaux de recherches. Ces habitations, chef-d'œuvre de construction et d'artisanat, illustrent la symbiose entre l'environnement et la spiritualité, incarnant le talent ancestral des artisans japonais. Leur conception minutieuse intègre les éléments naturels, tandis que les techniques de construction traditionnelles, exigeantes et précises, sont perpétuées par des artisans dévoués. Cependant, malgré leur richesse culturelle, cet artisanat est confronté à des défis modernes, tels que la préfabrication et les changements sociétaux. Pourtant, ces traditions inspirent encore des innovations contemporaines, comme l'expérimentation de structures basées sur l'art de plus de 4000 ans, le "Kigumi" et l'utilisation de la technologie numérique pour concevoir des assemblages complexes sans clous ni vis. Ces avancées cherchent à préserver l'esthétique et la durabilité des constructions en bois, tout en facilitant leur intégration dans les pratiques architecturales modernes. Ainsi, ces travaux s'inscrivent dans une volonté de perpétuer un héritage culturel tout en relevant les défis de l'avenir, offrant des solutions innovantes pour une construction durable et harmonieuse avec l'environnement.

Problématiques

Comment les techniques traditionnelles du Kigumi peuvent-elles être intégrées dans une approche moderne et durable de l'architecture ? Dans quelle mesure l'utilisation du bois et des nouvelles technologies peut-elle renforcer la pertinence de cette méthode ancestrale dans un contexte contemporain ? Comment instaurer des méthodes de conception géométrique et d'analyse mécanique pour le dimensionnement d'assemblage de structures en bois dans le cadre d'une architecture modulaire et durable, en s'inspirant de l'artisanat des charpentiers japonais ?

Ces interrogations guideront l'ensemble de cette thèse et permettront d'explorer les limites et le potentiel de cette approche hybride entre tradition et innovation.

Chapitre 1. Kigumi

Ce chapitre aborde en premier lieu l'histoire du Kigumi qui témoigne du savoir-faire ancestral des charpentiers japonais, puis son évolution à travers les âges et qui a façonné une menuiserie raffinée reposant sur des principes précis. Comment cette transformation de l'art des charpentiers a conduit à la genèse de la menuiserie japonaise et à la création du concept de Kiwari qui régit aujourd'hui les proportions des constructions. Ce chapitre mettra aussi en avant les outils traditionnels utilisés par les artisans japonais, ainsi que les édifices réalisés grâce à ces techniques. Enfin, une dernière partie présentera les jonctions complexes qui assurent la solidité et l'esthétique des structures actuelles.

1.1 Introduction

« Historiquement, le charpentier japonais traditionnel a été autant architecte et ingénieur que charpentier ou menuisier. En raison de l'importance de son rôle, il est impossible de dissocier la discussion sur la menuiserie et la charpenterie japonaises de la discussion sur l'architecture japonaise elle-même » [1]. Au Japon, la charpenterie traditionnelle s'est développée au sein de guildes familiales puissantes, protégeant jalousement leurs techniques secrètes. Certaines étaient spécialisées dans la construction de sanctuaires, de temples ou de maisons, tandis que d'autres étaient des groupes rivaux répartis dans différentes régions. Les guildes d'Osaka-Kyoto, renforcées après le transfert de la capitale impériale à Kyoto en 794, ont longtemps influencé les normes architecturales, notamment avec le modèle de Kyoto (kyōma), toujours prisé aujourd'hui [12].



Figure 1 : Peinture japonaise période EDO, « Vue de Yoshida », D'après Utagawa Hiroshige 歌川廣重, Ukiyo-e Woodblock, Tokaido [4]

Cependant, avec le déplacement du gouvernement vers Edo (Tokyo) au début de la période Edo (1603-1868), une rivalité intense s'est installée entre les charpentiers de Kyoto et ceux de la nouvelle capitale, sans qu'un groupe ne domine totalement l'autre, voir figure 1. Cette compétition a conduit à une fusion partielle des styles et à la préservation de nombreux savoir-faire grâce à des documents historiques. Malgré la disparition de nombreuses guildes, leur héritage perdure, offrant aux historiens une mine d'informations précieuses sur l'évolution de l'architecture japonaise.

1.2 Origines, développement et influence des contacts avec le continent de la charpenterie japonaise

Les premières traces de charpenterie au Japon remontent à des habitations à fosse, où une structure en bois était surélevée au-dessus d'une cavité et recouverte de chaume, comme illustré aux figures 2 et 3.



Figure 2 : Exemple d'habitations à fosse [58]



Figure 3 : Intérieur d'une maison à fosse d'époque Yagoi – Japon [58]

Dès 3000 av. J.-C., ces habitations apparaissent dans le centre de Honshu et, bien que rudimentaires, elles présentent déjà plusieurs styles distincts. Au fil des millénaires, elles se sont largement répandues, devenant une norme architecturale qui a perdurée jusqu'à la fin du XVI^e siècle. Même à cette époque, des structures temporaires inspirées de ces habitations étaient encore utilisées comme abris pour les travailleurs des rizières [1].

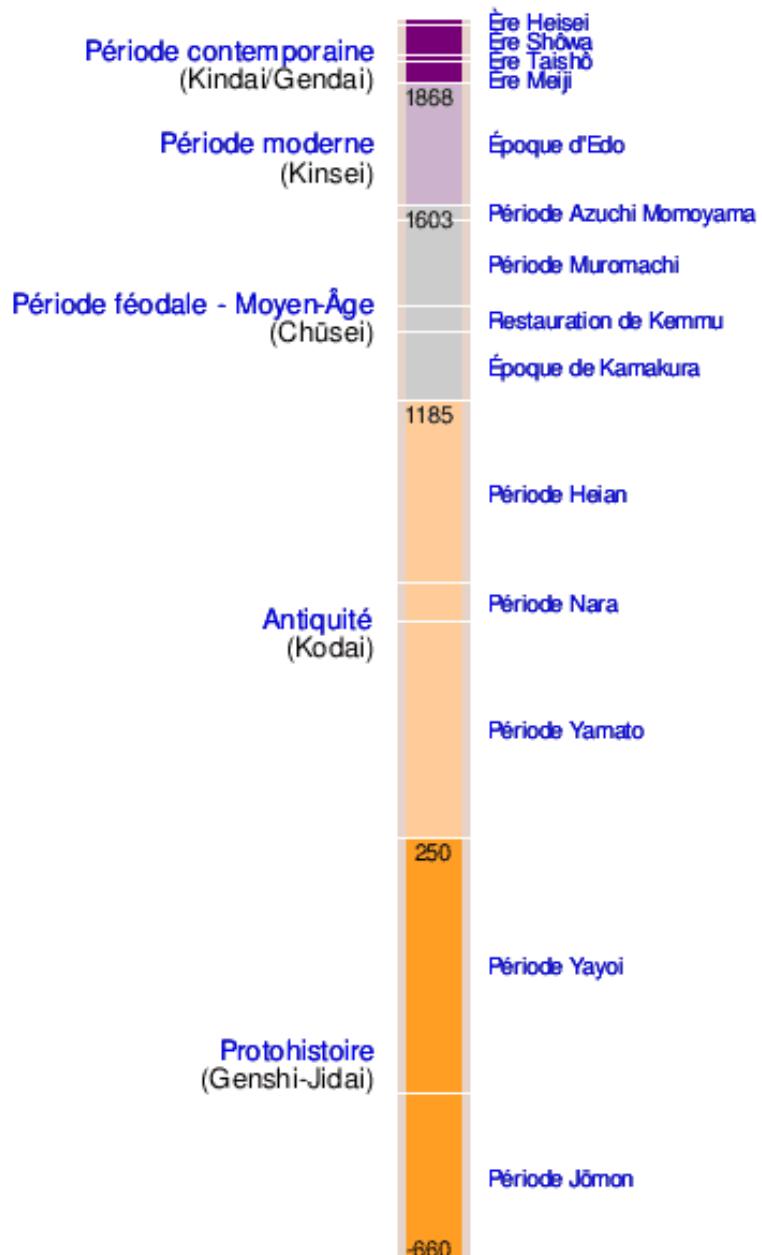


Figure 4 : Frise chronologique de l'histoire du Japon [7]

La période Yayoi (200 av. J.-C.-250 apr. J.-C.) marque une révolution majeure dans la menuiserie et l'architecture japonaises avec l'introduction du fer dans les outils, permettant aux charpentiers de réaliser des assemblages plus sophistiqués comme les tenons et mortaises, voir figure 5. La construction évolue vers des structures surélevées en bois, distinguées en cabanes de rondins entiers ou taillés, principalement utilisées pour des entrepôts et des habitations.

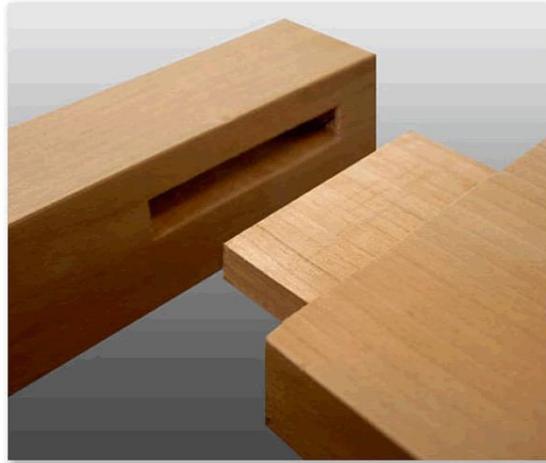


Figure 5 : Joint tenon-mortaise [59]

C'est également à cette époque que les premiers sanctuaires shintoïstes émergent, dont l'Izumo Taisha, voir figure 6, considéré comme le plus ancien sanctuaire du Japon. Par ailleurs, les premières guildes familiales de charpentiers commencent à se former, annonçant leur rôle central dans l'architecture japonaise. Enfin, vers la fin de la période, les contacts diplomatiques entre la Chine et le Japon prennent forme, influençant considérablement l'évolution des techniques architecturales [1] [12].



Figure 6 : Temple Izumo Taisha [60]

La période des Tumulus (250-552) marque une phase de consolidation politique et architecturale au Japon, sans grandes révolutions technologiques en charpenterie. Elle se distingue par la construction de vastes tombes en monticules, voir figure 7, symbolisant l'unification des États indépendants sous un pouvoir impérial.



Figure 7 : Tumulus en forme de trou de serrure – Japon [58]

Durant cette période, les habitations en bois deviennent plus courantes, incluant des palais pour l'empereur et une expansion des sanctuaires shintoïstes. L'influence croissante de la cour japonaise sur la Corée entraîne l'arrivée de charpentiers immigrés, intégrés à des guildes familiales, mais leur impact sur l'architecture locale reste limité.

L'Ise Jingū, figure 8, l'un des plus anciens sanctuaires shintoïstes, apparaît à la fin du IV^e siècle. Son architecture conserve des caractéristiques de la période Yayoi, notamment des techniques d'assemblage sans clous même si le temple est régulièrement reconstruit selon une tradition cyclique de vingt ans. Malgré les perturbations causées par les guerres civiles, ces constructions témoignent d'un savoir-faire ancestral toujours respecté.



Figure 8 : Ise Jingu, sanctuaire shintoïste [61]

La période Asuka (552-646) marque une intensification des échanges entre le Japon et le continent, aboutissant à l'introduction du bouddhisme, qui entraîne une révolution majeure dans la menuiserie et l'architecture japonaises. Avec cette nouvelle religion arrivent des charpentiers bouddhistes immigrés, porteurs de technologies inédites et d'un style architectural radicalement différent.

Les artisans japonais s'approprient rapidement ces innovations, et en 607, ils construisent le temple Hōryū-ji, figure 9, près de Nara. Bien que détruit par un incendie peu après son achèvement, il est reconstruit, donnant naissance aux plus anciennes structures en bois encore existantes, comme le Hall d'or (679) et la Pagode (693). À la fin du VII^e siècle, l'architecture des temples bouddhistes est solidement implantée au Japon. Cependant, les charpentiers ne se contentent pas de copier les styles chinois : ils les adaptent et les transforment, intégrant ces influences étrangères dans une architecture désormais typiquement japonaise.



Figure 9 : Temple Hōryū-ji [62]

1.3 Genèse de la menuiserie japonaise

L'architecture japonaise s'est développée en contraste avec celle d'autres régions du monde en raison de l'abondance de bois disponible. Contrairement à l'Europe et à la Chine, où la pierre et l'argile favorisaient l'essor de la maçonnerie, le sol volcanique du Japon offrait peu de matériaux adaptés à cette technique. En revanche, le pays possédait une immense diversité d'arbres et de plantes favorisant la construction en bois. Ainsi, les charpentiers japonais ont perfectionné la structure à poteaux et linteaux, qui est devenue la base de leur architecture, donnant naissance à des techniques sophistiquées adaptées à l'environnement et aux défis climatiques locaux. « Si c'est en Europe que l'art de la maçonnerie est le plus développé, c'est sans doute au Japon que les techniques de construction en bois sont les plus avancées. » [1]. La profusion du bois au Japon a favorisé le développement avancé de la menuiserie, entraînant une concentration quasi exclusive sur la construction en bois. Lorsque les meilleurs bois ont été exploités, les artisans ont dû travailler avec des matériaux de moindre qualité, ce qui a stimulé l'innovation dans les techniques d'assemblage et la conception d'outils adaptés. Ce défi a contribué à perfectionner l'ingénierie des joints en menuiserie, garantissant la solidité et la durabilité des structures en bois, même avec des matériaux moins favorables [12].

1.4 Kiwari

Le *kiwari*, concept japonais de proportions architecturales, repose sur l'idée de diviser le bois pour établir des dimensions harmonieuses dans la construction. Ce principe a évolué en un système formalisé, le *kiwari jutsu*, qui définit des techniques précises de conception. Bien que le terme *kiwari* soit apparu au XVII^e siècle, des notions similaires existaient bien avant, notamment dès la période de Nara (646-794) et au Moyen Âge japonais.

Ce système établit des relations proportionnelles entre les éléments structurels des bâtiments, notamment les poteaux et les toits. Les structures anciennes avaient des poteaux massifs et rapprochés, mais avec le temps, les avancées techniques et la hausse du coût des matériaux ont conduit à des poteaux plus fins et espacés, optimisant ainsi la construction tout en préservant l'esthétique et la stabilité des édifices.

Différents systèmes de *kiwari*, définissant les proportions idéales, sont développés et transmis au fil des générations. Le plus ancien, conçu avant la période Kamakura (1185-1336) par la famille Abè, maître charpentier de sanctuaires, témoigne de cette tradition. Parmi les manuels de *kiwari*, le plus célèbre est le *Shōmei*, un ouvrage en cinq volumes rédigé en 1608 par la famille Heinouchi, qui supervisait la charpenterie pour le gouvernement. Ce manuel a joué un rôle clé dans la formalisation des techniques architecturales japonaises.

De plus, les manuels kiwari ne se limitent pas à définir des normes de proportions architecturales, mais analysent aussi divers éléments structurels. Ils établissent des relations précises entre la taille des poteaux, l'espacement des chevrons et les dimensions des shōji, ces panneaux coulissants en papier translucide utilisés comme fenêtres ou portes. Ces principes garantissent une harmonie et une cohérence dans la conception des bâtiments japonais [1].

1.5 Dōgu du charpentier, ou instruments

L'essor des outils électriques a transformé les techniques de travail du bois, permettant aux charpentiers de gagner du temps et de moins se fatiguer. Malgré ces avancées, les artisans japonais continuent d'accorder une grande importance à leurs instruments, qu'ils appellent *dōgu*, un terme qui dépasse la simple notion d'outil et reflète une tradition profondément ancrée dans la « Voie de la charpenterie » [1].

Historiquement, *dōgu* désignait les instruments utilisés dans la cérémonie du thé (*sado*), et cette notion s'est étendue aux outils des charpentiers, considérés comme des éléments essentiels de leur art. Contrairement aux autres artisans qui parlent simplement d'outils, les charpentiers japonais voient leurs *dōgu* comme des instruments sacrés de leur métier. Cependant, cette vénération tend à s'effacer avec le temps, notamment parce que les maîtres charpentiers traditionnels vieillissent et que les nouvelles générations ne perpétuent pas toujours cet esprit de dévotion [12] [13]. L'origine des outils de menuiserie japonais, appelés *dōgu*, remonte aux premières haches utilisées par les bûcherons. Ces haches, très anciennes, sont similaires à celles retrouvées en Chine et en Corée, suggérant une introduction au Japon via le



Figure 10 : Un maître charpentier à l'œuvre [63]

Chapitre 1. Kigumi

continent. Les charpentiers qualifiés pouvaient réaliser des travaux minutieux avec ces outils rudimentaires. Par la suite, le ciseau et le marteau ou maillet ont été adoptés, suivis par la scie à l'âge du fer

Des scies anciennes, aux lames bien plus épaisses que celles d'aujourd'hui, sont conservées dans les collections du Hōryū-ji et du Shōsō-in, datant du VIII^e siècle, voir figure 11.



Figure 11 : Outils traditionnels du charpentier japonais [64]

Aux VII^e et VIII^e siècles, l'herminette en fer était l'outil principal des charpentiers japonais, leur permettant d'effectuer toutes les étapes du travail du bois, du dégrossissage au rabotage. Même les mortaises étaient réalisées avec une herminette et un ciseau à bois. En raison de ces outils rudimentaires, seule une fraction du bois abattu était réellement utilisable pour la construction, le reste étant perdu lors de l'habillage et de la finition [12] [13].



Figure 12 : Charpentier japonais dans son atelier [65]

Jusqu'à la période Kamakura (1185-1336), les temples aux éléments fins et délicats étaient construits uniquement avec l'herminette, la scie et quelques autres outils, car le rabot n'avait pas encore été introduit. Ce dernier ne fait son apparition au Japon qu'au début de la période Edo (1603-1868), probablement importé de Chine. Cette évolution marque un tournant dans les techniques de menuiserie, permettant une finition plus précise et une meilleure optimisation des matériaux [1].

1.6 Les constructions

Le Kigumi, ou construction en bois, repose principalement sur l'assemblage de toits et de poteaux, structurant la charpente et l'ossature des bâtiments. Avec la raréfaction du bois de qualité, les charpentiers japonais ont développé des techniques sophistiquées pour assembler des pièces courtes et relier les éléments structurels [10].

Contrairement à l'Occident, où les assemblages sont classés selon leur forme (à plat ou à recouvrement), le Japon distingue les joints selon leur fonction : tsugite (raccord) et shiguchi (connexion). Le Tsugite (継ぎ手) désigne une technique d'assemblage dans laquelle deux pièces de bois sont reliées de manière linéaire lorsqu'elles entrent en contact, voir figure 13. Le Shiguchi (仕口), quant à lui, est un terme général regroupant les méthodes d'assemblage permettant de connecter deux éléments en bois à angle droit lorsqu'ils se rencontrent. Ces techniques sont essentielles pour assurer la solidité et la stabilité des structures en bois, voir figure 14, [66].

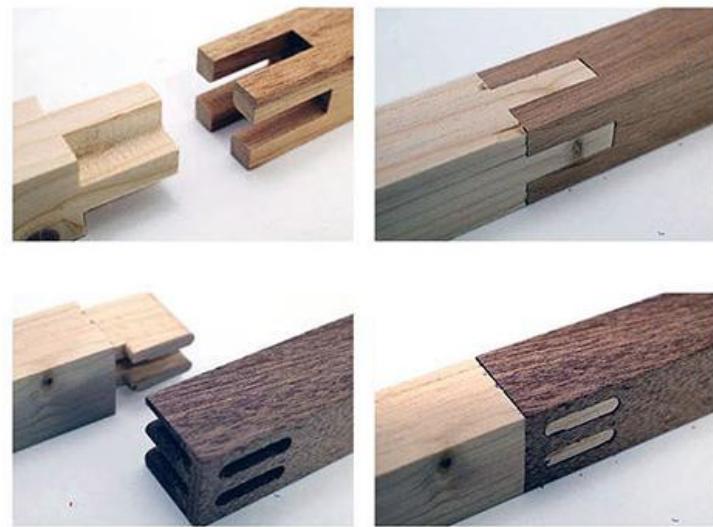


Figure 13 : Différentes formes de Tsugite [23]

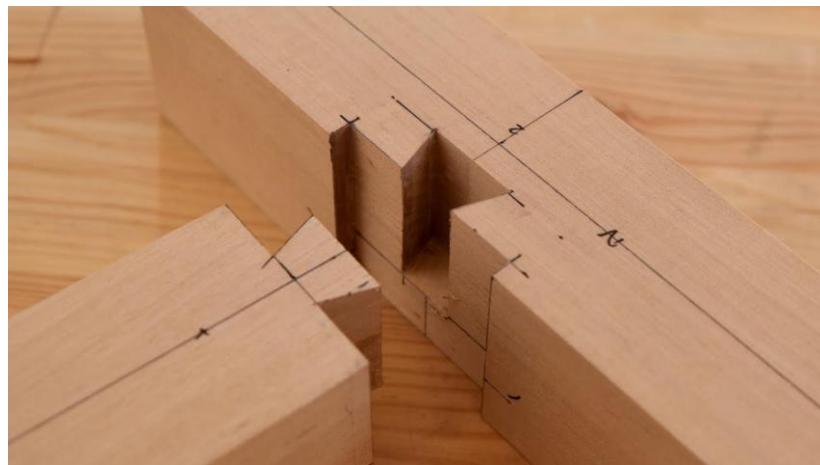


Figure 14 : Assemblage d'angle en joint Shiguchi de deux pièces de bois [67]

Cette approche permet d'assurer à la fois la solidité et l'esthétique des structures. « L'histoire, la conception et les exigences techniques très différentes de ces structures ont entraîné, entre autres, une prolifération apparemment infinie de joints, avec un total combiné de plusieurs centaines de joints distincts (un charpentier praticien de notre connaissance a estimé le nombre à environ 400 joints encore utilisés aujourd'hui) » [1]. Par ailleurs, il est important de reconnaître que c'est aussi un art complet et rigoureux car : « Un bon charpentier contemporain devrait connaître environ deux cents assemblages, y compris les variantes rencontrées lorsque deux bois se croisent, à angle droit ou en oblique. » [2].

Les chevrons jouent un rôle central dans l'architecture japonaise, soutenant les lourds toits de tuiles et contribuant à l'esthétique des bâtiments. À l'époque Kamakura (1185-1336), la répartition des chevrons servait de référence pour l'ensemble des plans de construction. Plus tard, avec l'apparition des chevrons en éventail, la planification est devenue plus précise, nécessitant des techniques avancées pour leur mise en œuvre. Cette évolution a fait du chevonnage un élément fondamental dans la conception des bâtiments japonais.

« Au total, le kiwari japonais se compose d'une ossature de plancher, d'une charpente et d'une ferme de toit » [1]. L'ossature d'un bâtiment repose sur une structure de base composée d'appuis, de poteaux et de poutres, auxquels s'ajoutent les encadrements de fenêtres et de portes. Au Japon, l'aménagement intérieur inclut non seulement des murs pleins, mais aussi des shōji et fusuma, voir figure 15, des cloisons coulissantes qui permettent de moduler l'espace. Le shōji est une paroi coulissante légère en bois et papier washi, qui laisse entrer la lumière tout en préservant l'intimité, grâce à un savoir-faire ancestral transmis sur plusieurs générations. À l'inverse, le fusuma est une cloison coulissante plus épaisse et opaque, souvent décorée, utilisée pour séparer les pièces ou servir de porte [69].



Figure 15 : Panneaux coulissants (fusuma et shōji) d'une maison traditionnelle japonaise [68]

Pour renforcer cette ossature, divers contreventements diagonaux et transversaux sont intégrés, assurant à la fois stabilité et flexibilité. Les éléments clés de la charpente sont les joints et raccords, essentiels à la solidité de l'ensemble. Certains composants horizontaux, comme les linteaux des portes extérieures, ressemblent à ceux des constructions occidentales, mais d'autres, comme les nageshi, figure 16, petites poutres placées au-dessus des fusuma et shōji, sont spécifiques à l'architecture japonaise.



Figure 16 : Nageshi [70]

Au Japon, où l'humidité est omniprésente, une ventilation efficace sous le plancher est cruciale pour préserver le bois. Cette contrainte a conduit à privilégier des fondations hautes et ouvertes. Les maisons japonaises intègrent souvent des vérandas prolongées au-delà des murs extérieurs, créant une zone intermédiaire entre intérieur et extérieur. Cette transition entre espace architectural et nature est renforcée par des éléments comme l'avant-toit profond et la disposition soigneusement réfléchie des chevrons, voir figure 17, mettant en valeur le savoir-faire des charpentiers, dont certains secrets de construction étaient transmis de génération en génération [1].



Figure 17 : Disposition des chevrons sous l'avancée de la toiture [71]

1.7 Les assemblages

1.7.1 Le rôle clé des assemblages en bois

Les assemblages en bois ont été essentiels à l'évolution des techniques de construction japonaises. Leur diversité dépend de la fonction et de l'époque du bâtiment. À l'époque Edo (1603-1867), les édifices religieux utilisaient une centaine de types d'assemblages, tandis que l'architecture moderne des habitations en emploie moins de vingt. Cependant, les temples contemporains conservent cette richesse, avec plus de cent variantes adaptées à la nature et à la position du bois [1].

Ces assemblages ont évolué pour répondre aux contraintes structurelles, permettant de mieux gérer les forces de traction et compression tout en empêchant les déformations du bois. La qualité esthétique de ces jonctions est également primordiale.

Face aux conditions climatiques du Japon, marqué par les typhons et les séismes, les charpentiers ont maximisé l'utilisation de bois longs, nécessitant une grande variété d'assemblages pour assurer la solidité des structures. Cela a conduit à une conception avancée des croisées et angles, essentielle pour maintenir la résistance des bâtiments.



Figure 18 : Maison typique et traditionnelle japonaise [72]

La rareté des grands arbres rendait difficile et peu rentable leur exploitation, poussant les scieurs à privilégier des longueurs standards. En conséquence, les grandes poutres et poteaux étaient alors fabriqués en assemblant des bois plus courts. « Si, faute de bois long, une panne de bordure est assemblée en divers endroits, les jointures doivent pouvoir supporter à peu près la même charge qu'une poutre continue » [2]. Les longues poutres ne sont donc pas indispensables dans la construction des temples japonais si les joints d'épissage, ou *tsugite*, sont bien réalisés.

1.7.2 Différents types de joints et techniques

Les poutres obliques sont couramment utilisées au Japon pour les fermes de toit, renforcées par des tenons à épaulement carré appelés *shiguchi*, qui offrent une meilleure résistance au déplacement. Les assemblages par tenons et mortaises sont variés, mais les plus utilisés appartiennent à la classe *morthey will*. Les joints doivent être conçus pour supporter la tension, la compression et la torsion des fibres du bois.

Les tremblements de terre et les typhons endommagent souvent les épissures et les joints d'assemblage des diagonales, mais les bâtiments ne s'effondrent généralement pas en raison de la rupture des poutres et des poteaux. Il est donc essentiel de concevoir ces assemblages avec soin. Les connexions entre traverses, solives et poteaux peuvent être complexes, surtout lorsque plusieurs tenons imbriqués se joignent à un seul poteau. Pour assurer leur solidité, une clé (figure 19) ou un coin est utilisé pour verrouiller ces assemblages, et dans certains cas, des faux tenons ou des tenons insérés remplacent les tenons traditionnels.



Figure 19 : Assemblage avec une clé [74]

En général, les assemblages sont renforcés par des goupilles, des chevilles, ou un adhésif. L'aspect final du joint et la compatibilité des fibres du bois sont des éléments clés à considérer, car le séchage peut affaiblir l'assemblage. Les tenons et mortaises ne sont pas toujours efficaces lorsque la transmission de contraintes ou la torsion des fibres sont des facteurs déterminants, car leur taille est souvent petite par rapport à la section transversale des éléments assemblés.

Cependant la plupart des joints nécessitent un renforcement, souvent par des vis, de l'acier, des boulons en polymère ou des éclisses en fer. Récemment, de nouvelles méthodes intégrant le fer, l'acier et des colles modernes ont été développées. Avant ces innovations, les artisans occidentaux utilisaient des colles à base de peau d'animal, tandis que les menuisiers japonais privilégiaient des pâtes de riz, des colles animales et de la laque, qui n'étaient pas assez efficaces pour des constructions majeures.

Le joint de bout est l'assemblage le plus élémentaire, voir figure 20, classé comme un joint en écharpe au Japon. Le plus simple de ces joints est le joint de bout droit, souvent coupé en biais pour augmenter la surface de contact et l'adhérence.

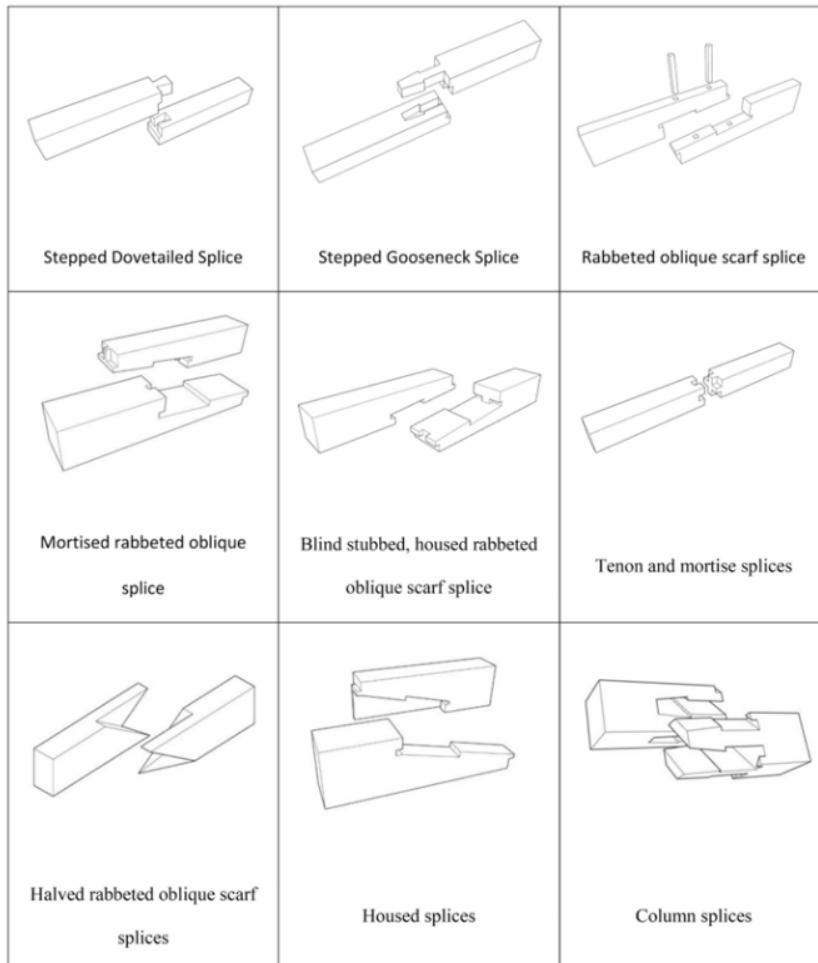


Figure 20 : Exemple de joint de bout (splice joint) [25]

Le renforcement métallique des joints de poutres est une pratique courante et efficace aujourd'hui, grâce à la disponibilité des éclisses, pinces, sangles, cornières et boulons en métal à des prix abordables, figure 21. Historiquement, le métal étant rare et coûteux au Japon, les artisans ont conçu des joints complexes sans renfort métallique. Les poutres, solives, traverses, rails et chevrons nécessitent une attention similaire dans leurs assemblages pour assurer leur solidité.



Figure 21 : Image d'une jonction de pièces dans une ossature bois avec des renforts de maintien [73]

Parmi les savoir-faire les plus préservés des charpentiers traditionnels figurent les types de joints adaptés aux intersections des entretoises et aux points de rencontre entre entretoises et chevrons, figure 22. Pour des structures en bois typiques japonaises, et avec une visée aussi bien structurelle qu'esthétique, le nombres de joints et d'assemblages a dû se diversifier.

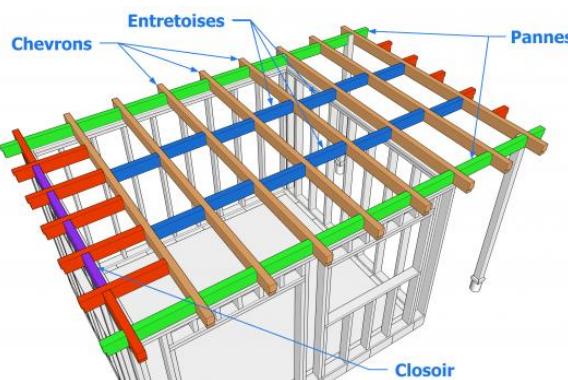


Figure 22 : Anatomie d'une charpente monopente [79]

De plus, les techniques *kiwari* permettent de répartir les chevrons de manière harmonieuse tout en préservant leur aspect naturel [1] [2] [12] [13].

Chapitre 2. Le bois

Ce chapitre explore les propriétés, la résistance et la vulnérabilité du bois, ainsi que les incendies. Il se termine par son utilisation par les artisans japonais. Le bois est un matériau naturel et vivant, dont les propriétés varient selon l'espèce et la sous-espèce. Chaque essence possède des caractéristiques spécifiques, influençant sa densité, sa dureté, sa texture, sa couleur, sa masse volumique, son grain et sa teinte. Cette diversité permet au bois d'offrir une large palette de qualités et d'ambiances adaptées aux différents usages et esthétiques recherchés.

2.1 Propriétés

Le bois, grâce à sa polyvalence et sa facilité de travail, a été privilégié depuis longtemps en architecture, notamment au Japon. Aujourd’hui les matériaux comme les alliages métalliques sont produits via des méthodes d’usinage qui conserve leur uniformité en surface (échelle de l’ordre du micromètre). Le bois quant à lui conserve des variations naturelles visibles à l’œil nu et qui influent sur sa résistance selon les tests appliqués. Par exemple, le chêne est bien plus résistant que le pin dans certains cas, mais équivalent dans d’autres. Malgré ses défauts imprévus, le bois reste un matériau structurel adaptable et largement utilisé [1].

Avant transformation, le bois est un matériau vivant qui interagit avec son environnement. Sa rétractabilité et sa dilatabilité influencent sur ses propriétés mécaniques et thermiques, avec une meilleure résistance lorsqu’il est sec. Le bois réagit donc aux variations d’humidité environnante en se contractant ou en se dilatant. Ce phénomène est particulièrement visible dans les constructions de type azekura, figure 23, comme le dépôt de soutras du temple Tōshōdai-ji ou le célèbre Shosō-in, figure 24, datant du VIIIe siècle. L’azekura-zukuri (校倉造) est un ancien style architectural japonais en bois, principalement utilisé pour la construction d’entrepôts (kura), greniers et autres bâtiments utilitaires. Son origine remonte probablement aux premiers siècles de notre ère, notamment durant les périodes Yayoi et suivantes [1] [81].

Ce type de construction se distingue par des structures en rondins de bois assemblés sans piliers verticaux, avec des sections triangulaires qui s’emboîtent aux angles pour assurer la stabilité. Généralement, ces bâtiments sont réalisés en bois de cyprès, un matériau réputé pour sa durabilité.



Figure 23: Joint d’angle de construction azekura [81]

On a longtemps prétendu qu'une humidité constante était maintenue naturellement dans les structures en azekura parce que les joints non liés s'ouvrent et se ferment à mesure que le bois se contracte ou se gonfle en réponse aux niveaux d'humidité externes. Cependant, lorsque les niveaux d'humidité à l'intérieur et à l'extérieur du Shōsō-in ont été soigneusement contrôlés et enregistrés sur une longue période, cette affirmation s'est avérée n'être rien d'autre qu'un vœu pieux. Par ailleurs, sa faible conductivité thermique en fait un matériau isolant pour des habitations et lui confère également un bon comportement face aux incendies.



Figure 24 : Shōsō-in [82]

Avec le temps, le bois vieillit et perd de sa résistance, ce qui peut entraîner l'effondrement des assemblages anciens. Il subit l'usure du temps. Par ailleurs, des températures élevées et un climat aride peuvent accélérer ce processus, provoquant la rupture aussi bien des joints anciens que des plus récents en raison d'un dessèchement excessif. En revanche, même après sa transformation, le bois conserve sa capacité à absorber du CO₂ tant que sa durée de vie dépasse plusieurs décennies. Une fois détruit ou brûlé, il libère le CO₂ accumulé au fil du temps [1].

2.2 Résistance

Le bois est un matériau de construction utilisé depuis des millénaires et demeure aujourd'hui l'un des plus répandus. Il est particulièrement privilégié en Amérique du Nord, où la majorité des habitations sont édifiées en bois. Ce matériau possède une excellente résistance à la traction. Comparé à son poids, le bois offre une résistance remarquable. À portée égale, une poutre en bois sera plus légère qu'une poutre en béton armé car sa densité est située autour des 500 kg/m³ (varie fonction des essences) contre 2400 kg/m³ pour le béton armé. Pour ce qui est de la résistance à la compression le bois est plus résistant, entre 25 et 55 MPa pour le béton armé C25/30 et entre 40 et 82 MPa pour le bois (toujours en fonction de l'essence choisie) [75] [76] [77].

En RDM une charge lourde posée sur un poteau solide ne pose pas de problème, tandis que la même charge placée au centre d'une poutre sans soutien aux extrémités peut entraîner son affaissement ou sa rupture. Cependant, si la charge est répartie uniformément, la poutre peut la supporter sans déformation. Bien que le bois soit naturellement résistant aux contraintes axiales, de tension et de compression, il reste vulnérable aux forces en torsion et de cisaillement. La direction des fibres est cruciale pour la résistance, et les gerces ou fentes dues à la sécheresse peuvent fragiliser la structure. Dans certains cas extrêmes avec un effort tranchant, une poutre peut se fendre en deux, réduisant sa stabilité et augmentant la défexion, ce qui accroît le risque de rupture. [1]

Le cisaillement longitudinal est influencé par la réduction de l'aire transversale due aux ouvertures pour les connecteurs ou aux entailles.

Etant un matériau dit anisotrope, grâce à sa structure interne composée de cellules orientées longitudinalement, le bois est très résistant à la compression axiale. Il offre également une bonne capacité en traction parallèle au fil, bien que la présence de nœuds puisse réduire cette résistance. La compression perpendiculaire au fil est plus faible que celle parallèle, souvent causée par des charges concentrées ou des contraintes aux appuis. Des plaques d'appui en acier sont utilisées pour limiter ces effets. La traction perpendiculaire au fil est généralement à éviter, car le bois y est peu résistant.

La résistance en compression oblique dépend du rapport entre la compression parallèle et perpendiculaire au fil. Les normes de calcul des charpentes en bois définissent cette relation en fonction de l'angle d'application de la charge. [80]

De plus, les structures en bois bougent lentement au fil du temps, à mesure que les joints s'ajustent. Les assemblages collés et cloués minimisent ce déplacement, contrairement aux assemblages artisanaux, qui nécessitent une anticipation des déformations lors de la construction. Un bon charpentier doit donc prévoir et compenser ces ajustements pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Divers procédés ont été développés afin d'assurer un ajustement précis des joints et de limiter leur jeu. « Lorsqu'une force extérieure est appliquée à un joint d'assemblage ou de raccordement, son énergie est souvent réduite par le frottement interne du joint » [1].

Lors d'un tremblement de terre, une structure en bois oscille et les joints alors absorbent une grande partie de l'énergie du séisme, ce qui confère aux constructions en bois une étonnante résistance à ce genre d'événements. Bien que fortement secouée, une maison en bois bâtie sur un sol stable ne résonne pas avec le séisme, évitant ainsi une amplification des vibrations. Ces structures en bois sont également plus légères par rapport au maçonnerie classique, de poids propre jusqu'à 4 fois inférieur à du béton armé. Grâce à la flexibilité et au frottement de ses joints, elle dissipe l'énergie intense des premières secousses, ce qui en fait une option de construction relativement sûre face aux tremblements de terre.

2.3 Vulnérabilité

Le bois est naturellement soumis à la décomposition par les champignons, insectes et bactéries, mais ces agents n'agissent que sous certaines conditions, comme une forte humidité et des températures élevées. Certains types de bois, comme le chêne ou le cyprès, contiennent des substances qui les rendent plus résistants aux parasites [6].

L'utilisation d'éléments métalliques dans les structures en bois peut poser des problèmes en raison de la condensation qui s'y forme, entraînant la corrosion des pièces métalliques et la pourriture du bois environnant. Des traitements préventifs sont souvent appliqués, mais leur usage excessif peut être évité en ciblant uniquement les zones exposées [2].

Le choix des essences de bois est crucial en construction. Traditionnellement, les charpentiers japonais emploient différentes essences selon la fonction des éléments. Le cyprès est apprécié pour sa résistance mécanique (45 MPa en compression) [83], tandis que les feuillus comme le chêne et l'érable sont privilégiés pour les assemblages. Des bois exotiques comme l'ébène ou le santal sont utilisés pour des finitions haut de gamme. Le bambou, quant à lui, est couramment employé pour les treillis et les lattis.

2.4 Incendies

La vulnérabilité des bâtiments en bois face aux incendies est fréquemment soulignée car cela s'avère particulièrement vrai dans les grandes villes densément peuplées. Cependant, à une époque où les villes japonaises étaient moins encombrées et les habitations espacées, les constructions en bois étaient rarement ravagées par le feu. Pour information, en 1963 c'était 94% des habitations qui étaient en bois alors que depuis la tendance vient à s'équilibrer car en 2014 le bois ne concernait plus que 55% des habitations. « La comparaison des statistiques de mortalité est beaucoup plus révélatrice : le nombre de décès enregistrés pour des incendies dans des bâtiments construits avec des matériaux incombustibles comme le béton dépasse de loin le nombre de décès enregistrés pour des incendies dans des bâtiments en bois. » [1].

Une protection efficace contre le feu repose sur des mesures préventives contre les incendies et les risques liés à l'effondrement des bâtiments. Ces dernières années, la recherche a intensifié le développement de techniques visant à renforcer la stabilité des structures en cas de feu, afin de sécuriser les opérations de sauvetage et protéger les équipes d'intervention. Toutefois, certains incendies ont entraîné des effondrements précoce, aggravant les conséquences du sinistre.

Tous les matériaux de construction, qu'ils soient combustibles ou non, subissent des altérations sous l'effet du feu. Les bâtiments en bois quant à eux conservent une résistance mécanique prolongée car le bois utilisé est ignifugé afin de respecter les normes de sécurité en vigueur. Les assemblages métalliques constituent cependant un point faible, car exposés aux flammes, ils chauffent rapidement et provoquent la rupture des structures. Même lorsqu'ils sont intégrés dans le bois, leur conductivité thermique favorise l'embrasement interne. Les experts recommandent donc de les protéger avec un revêtement en bois ou des plaquettes ignifugées. En revanche, les assemblages exclusivement en bois offrent une meilleure tenue face aux incendies et prolongent la résistance mécanique des édifices [1].

Le bois s'enflamme entre 300° et 500° C, avec une surface pouvant atteindre 1100° C. Cependant, la carbonisation ralentit la propagation du feu grâce à son effet isolant. Sa faible conductivité thermique limite aussi la transmission de chaleur à l'intérieur des poutres. L'élimination progressive de l'humidité renforce la solidité du bois, compensant en partie la destruction des couches extérieures. Ces particularités expliquent pourquoi les nouvelles réglementations privilégient les assemblages exclusivement en bois pour améliorer la résistance des bâtiments face aux incendies. En comparaison, l'acier, qui conduit très bien la chaleur, voit ses propriétés mécaniques diminuer dès 800°C, compromettant fortement la stabilité des bâtiments à ossature métallique. De plus, les escaliers en acier deviennent rapidement impraticables en raison de la chaleur, tandis que ceux en bois peuvent être refroidis plus facilement. Ainsi, malgré son inflammabilité apparente, la construction en bois offre une meilleure résistance aux incendies que les structures métalliques. La construction en bois ne doit pas être écartée à la légère sous prétexte que son matériau principal est inflammable [1] [2].

Dans ces conditions, les éléments métalliques rougissent et diffusent leur chaleur aux structures environnantes, favorisant l'inflammation ou la déformation des autres parties du bâtiment. À l'inverse, les constructions en bois offrent une résistance au feu de plus de quatre-vingt-dix minutes, une durée qui peut être prolongée par l'utilisation de bois dur. Il est préférable d'opter pour des pièces de grande section plutôt qu'une quantité importante de bois à faible épaisseur [2].

Pour limiter les risques, le bois d'œuvre doit être soigneusement préparé : raboté, chanfreiné et exempt de fentes, ce qui peut être obtenu par un abattage hivernal et une coupe adaptée. De plus, certaines méthodes de construction améliorent la protection contre les incendies, notamment en maintenant une distance minimale de trois mètres entre les murs porteurs et en limitant la hauteur des ouvertures à trois mètres par étage.

De plus, le feu se propage plus rapidement dans les espaces confinés et de faible volume, car le bois ne s'enflamme pas directement au contact des flammes, mais sous l'effet de l'échauffement. La chaleur rayonnante diminue avec la distance au foyer, mais si les murs sont trop rapprochés, l'incendie peut gagner l'ensemble de la pièce en peu de temps. Dans les pièces à plafond haut, un effet de cheminée se produit : l'air chaud monte, intensifiant l'apport en oxygène et accélérant la combustion [2].

2.5 Le bois au service du Kigumi

Bien que l'abondance du bois ait favorisé son utilisation dans la construction, d'autres facteurs ont également influencé ce choix. La fréquence des typhons et des tremblements de terre a rendu la construction en bois plus adaptée, car sa légèreté et ses joints flexibles lui permettent d'absorber les chocs, contrairement aux structures en pierre ou en brique. En cas de tremblement de terre, les assemblages utilisés dans la construction en bois jouent un rôle similaire à celui des amortisseurs, permettant aux bâtiments de mieux absorber les secousses. Cette flexibilité structurelle, propre aux constructions en bois, leur confère une résistance accrue aux séismes, contrairement aux édifices en pierre ou en brique, qui restent rigides et donc plus vulnérables aux forces terrestres. Comme mentionné précédemment, les assemblages entièrement en bois assurent également une meilleure stabilité face aux incendies et renforcent la durabilité des structures [12] [13].

Le bois est sensible à l'humidité, ce qui peut être un avantage ou un inconvénient selon son utilisation. Après l'abattage, son taux d'humidité diminue progressivement, influencé par les conditions de séchage. Le bois destiné aux constructions traditionnelles est souvent séché naturellement pendant plusieurs années pour stabiliser son taux d'humidité et éviter les déformations. Certaines essences, comme le cyprès japonais (hinoki), sont laissées à maturer afin d'améliorer leur résistance et leurs propriétés antibactériennes [84]. Cette variation peut affecter l'ajustement des joints en menuiserie, car le bois gonfle lorsqu'il absorbe l'humidité et se contracte lorsqu'il sèche. Les artisans exploitent ce phénomène en séchant le bois à un taux très bas avant l'assemblage, permettant aux joints de se resserrer naturellement en absorbant l'humidité ambiante. Cette propriété est essentielle pour garantir des assemblages solides et durables.

De plus, le bois indigène japonais, comme le pin, le cèdre et le cyprès, possède une résistance naturelle aux bactéries, champignons et insectes, et les termites locaux sont peu destructeurs, ce qui a contribué à la préservation des bâtiments en bois à travers les siècles. Ces caractéristiques ont fait du bois un matériau privilégié pour l'architecture japonaise, garantissant à la fois durabilité et adaptation aux conditions environnementales. Grâce aux précipitations abondantes et aux températures estivales élevées, les conifères japonais ont développé une croissance rapide et une qualité exceptionnelle, idéale pour la construction.

Conscients de cette richesse, les dirigeants japonais ont soutenu des projets de reboisement, notamment durant la période Edo (1603-1868), assurant ainsi la pérennité des ressources forestières. Ces initiatives reflètent la profonde vénération des Japonais pour les arbres, considérés comme des éléments sacrés de leur environnement. En tant que pionniers de la charpenterie avancée et de la gestion forestière, le Japon porte une responsabilité non seulement envers ses propres artisans et écologistes, mais aussi envers les générations futures au-delà de son territoire [1] [3].

Chapitre 2. Le bois

Enfin, le bois, grâce à sa faible conductivité thermique, maintient une température stable et agréable en toute saison, restant chaud au toucher même en hiver. Dans les climats humides comme celui du Japon, il offre un avantage supplémentaire : contrairement aux bâtiments en pierre ou en marbre qui retiennent l'humidité et deviennent inconfortables, les structures en bois absorbent naturellement l'humidité ambiante. Avec sa faible conductivité thermique le bois limite également le phénomène de condensation et améliore ainsi le confort intérieur. Ces propriétés font du bois un matériau particulièrement adapté à l'architecture japonaise [1].

Chapitre 3. Étude des principes de l'architecture durable

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les besoins et les évolutions de l'architecture durable et modulaire en Europe, en prenant en compte les réglementations en vigueur ainsi que les préférences locales. Cette étude s'articule autour de plusieurs axes : l'essor de l'architecture durable et modulaire, les défis contemporains liés à la construction, les initiatives européennes visant à promouvoir des pratiques responsables, ainsi que l'intégration du bois comme matériau clé dans ces nouvelles approches architecturales.

3.1 Architecture durable

3.1.1 Définition

En 2025, le secteur du bâtiment sera responsable de près de 40 % des émissions mondiales de CO₂, un chiffre qui souligne l'urgence de repenser nos méthodes de construction et de rénovation. L'architecture durable ne se limite pas à une réponse aux défis environnementaux : elle constitue une opportunité de transformer nos habitats et nos villes.

Ce concept repose sur une approche intégrant des dimensions écologiques, sociales et économiques. Il s'agit de gérer efficacement les ressources, de minimiser l'impact environnemental et de garantir un cadre de vie sain et harmonieux. À mesure que les enjeux climatiques deviennent plus pressants, l'architecture durable s'affirme comme une solution essentielle pour réduire les émissions de CO₂, préserver les ressources naturelles et améliorer la qualité de vie. Luis Garrido en 2010, a défini l'architecture durable comme "celle qui répond aux besoins de ses occupants, à tout moment et partout, sans compromettre le bien-être et le développement des générations futures" [5], [52] [53].

L'utilisation de matériaux durables, les principes bioclimatiques et la réhabilitation écologique offrent des solutions concrètes pour réduire l'impact environnemental des bâtiments. Au travers de sept piliers de l'architecture durable, une nouvelle vision de la construction s'installe de nos jours :

- Utilisation de matériaux écologiques
- Efficacité énergétique
- Gestion de l'eau
- Conception écologique
- Réduire, recycler et réutiliser les déchets
- Réglementations et Normes
- Sensibilisation du public et éducation

3.1.2 Principes de l'architecture durable

3.1.2.1 Utilisation de matériaux écologiques

Les matériaux renouvelables jouent un rôle crucial dans l'architecture durable. Le bois certifié, le bambou et le chanvre sont des ressources biodégradables qui proviennent de filières responsables. Leur utilisation contribue à limiter l'impact environnemental tout en assurant une qualité et une durabilité optimales. De même, les matériaux recyclés, comme le verre, les métaux et les briques récupérées, permettent de réduire les déchets liés à la construction et de minimiser l'empreinte carbone des bâtiments [5] [52] [53].

3.1.2.2 Efficacité énergétique

L'isolation thermique est essentielle pour garantir des températures agréables à l'intérieur des bâtiments tout en réduisant la consommation énergétique. Des matériaux comme la laine de mouton, la ouate de cellulose et les panneaux en fibres de bois offrent d'excellentes performances en matière d'isolation écologique. Par ailleurs, l'intégration des énergies renouvelables constitue un levier majeur pour diminuer la dépendance aux combustibles fossiles. Les panneaux solaires, les éoliennes domestiques et les systèmes géothermiques permettent de produire une énergie propre et durable, favorisant une transition énergétique vers des bâtiments passif.

L'objectif est d'optimiser l'usage et la conservation de l'énergie en garantissant une isolation performante. L'intégration de brise-soleil et de persiennes à lames orientables améliore aussi l'efficacité énergétique en régulant naturellement la température intérieure, réduisant ainsi les besoins en climatisation et chauffage [5] [52] [53].

3.1.2.3 Gestion de l'eau

La récupération des eaux de pluie est une solution efficace pour optimiser la consommation d'eau des bâtiments. Les systèmes dédiés permettent de collecter et d'utiliser cette ressource naturelle pour l'arrosage, les chasses d'eau ou encore certains usages domestiques. En complément, la réduction de la consommation d'eau passe par l'installation de dispositifs économies comme les aérateurs de robinet, les douches à faible débit et les toilettes à double chasse. Ces équipements, simples à mettre en œuvre, ont un impact considérable sur la gestion responsable des ressources en eau [5].

3.1.2.4 Conception écologique

L'architecture durable encourage une intégration harmonieuse du bâti avec son environnement naturel. La préservation de la biodiversité, l'utilisation de plantations adaptées au climat et la création d'espaces verts participent à un cadre de vie plus sain et agréable. L'orientation du bâtiment joue également un rôle fondamental dans la régulation thermique naturelle. Une implantation réfléchie permet de maximiser les apports solaires en hiver et de limiter la chaleur excessive en été, garantissant un confort optimal tout en réduisant les besoins énergétiques.

3.1.2.5 Réduire, recycler et réutiliser les déchets

La gestion responsable des déchets est un élément essentiel de l'architecture durable. En favorisant la réduction, le recyclage et la réutilisation des matériaux, il est possible de limiter l'impact environnemental des constructions. Le carton et le métal, notamment, sont de plus en plus intégrés dans les processus de production pour être recyclés et réemployés, contribuant ainsi à une économie circulaire efficace. Il est également crucial de veiller à la non-contamination des matériaux afin de préserver la santé des occupants et garantir un cadre de vie sain [53].

3.1.2.6 Réglementations et Normes

Les projets d'architecture durable doivent s'adapter aux réglementations et normes en vigueur, qui peuvent varier selon les régions. La collaboration avec des experts en construction écologique est essentielle pour assurer une mise en œuvre conforme aux exigences légales et aux standards environnementaux.

3.1.2.7 Sensibilisation du public et éducation

Informier le public et les professionnels sur l'importance de l'architecture durable est une étape cruciale pour encourager son adoption. Des campagnes de sensibilisation et des programmes de formation peuvent jouer un rôle fondamental dans la diffusion des bonnes pratiques et l'intégration progressive de ces principes dans les projets de construction.

3.1.3 Avantages

3.1.3.1 Avantages environnementaux

L'architecture durable joue un rôle clé dans la réduction de l'empreinte carbone des bâtiments. En favorisant une gestion efficace des ressources et l'intégration de technologies vertes, elle permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre et de minimiser l'impact sur l'environnement. De plus, l'utilisation de matériaux renouvelables et recyclés contribue à la conservation des ressources naturelles, évitant ainsi une surexploitation et réduisant les déchets issus de la construction [5] [52] [53].

3.1.3.2 Avantages économiques

Les constructions écologiques offrent des bénéfices financiers considérables. Leur conception écoénergétique permet de diminuer la consommation d'énergie, entraînant une réduction significative des coûts à long terme pour les occupants. Par ailleurs, les bâtiments durables possèdent une valeur accrue sur le marché immobilier, grâce à leur faible coût opérationnel et leur alignement avec les exigences environnementales modernes.

3.1.3.3 Avantages sociaux et de santé

L'architecture durable contribue à améliorer la qualité de l'air intérieur en intégrant des matériaux non toxiques et des méthodes de construction réduisant l'exposition aux polluants. Cette approche garantit un environnement plus sain pour les occupants. De plus, elle prend en compte des éléments essentiels tels que la lumière naturelle, la ventilation et la présence d'espaces verts, favorisant ainsi le bien-être et le confort quotidien des habitants.

3.2 Architecture modulaire

L'architecture modulaire repose sur l'assemblage de modules préfabriqués, conçus comme des unités autonomes pouvant être combinées et modifiées en fonction des besoins. Grâce à leur facilité de montage et de démontage, ces éléments offrent une grande flexibilité, permettant de réorganiser un bâtiment sans perturber sa structure ni nécessiter une reconstruction complète.

Cette approche facilite la conversion des espaces, par exemple en transformant un bâtiment commercial en bureaux ou en logements. Elle est également idéale pour la conception d'infrastructures publiques à capacité variable, telles que les hôpitaux ou les écoles, où les besoins évoluent avec le temps [85].

Face aux défis contemporains, les ingénieurs et architectes doivent concevoir des bâtiments optimisant l'utilisation des ressources. La finesse de conception des modules permet une exploitation plus efficace des surfaces, surpassant ainsi les performances des constructions conventionnelles. En matière d'aménagement intérieur, la construction modulaire facilite la création de vastes espaces ouverts, sans cloisons intermédiaires gênantes. Les piliers d'angle peuvent être intégrés comme éléments structurants ou dissimulés dans les murs latéraux, offrant une esthétique épurée et une meilleure optimisation de l'espace. Comparés aux structures en béton, les bâtiments modulaires présentent des piliers plus fins, améliorant ainsi la flexibilité architecturale [6].

L'architecture modulaire offre une grande liberté de conception aux architectes, leur permettant de réaliser des plans sans contrainte liée aux étages. Grâce à cette approche, presque tous les projets d'immeubles de grande envergure peuvent être adaptés à une conception modulaire. Bien que la trame horizontale repose sur un cadre fixe, elle peut être ajustée avec souplesse pour répondre aux besoins spécifiques du projet. Toutefois, les dimensions maximales des modules restent limitées par leur transportabilité, ce qui impose certaines contraintes logistiques.

L'alignement et l'empilement des modules selon une trame orthogonale permettent de concevoir des bâtiments visuellement attractifs. Cette approche séduit particulièrement les architectes adeptes des formes épurées et du style Bauhaus. En exploitant pleinement les possibilités offertes par la construction modulaire, il devient possible d'intégrer des éléments architecturaux tels que des oriels, des balcons et des loggias en porte-à-faux, enrichissant ainsi la diversité des façades et des volumes.

La conception modulaire offre une flexibilité architecturale comparable à celle des méthodes traditionnelles. Elle permet d'intégrer des vitrages de grande surface, des crépis sur systèmes composites d'isolation thermique, ainsi que des façades suspendues et ventilées en bois, métal, céramique ou verre.

Grâce à son adaptabilité, l'architecture modulaire se distingue par son esthétique moderne et harmonieuse, sans compromis sur la qualité. Les architectes exploitent pleinement ses possibilités, notamment en intégrant des loggias et des balcons en porte-à-faux, ou en jouant sur la disposition décalée des modules pour enrichir la dynamique visuelle des bâtiments [6].

3.3 Enjeux contemporains européens

3.3.1 Initiatives

Face aux défis contemporains tels que la transition énergétique, les crises sanitaires et les impacts écologiques du secteur du bâtiment, l'architecture du XXe siècle fait l'objet de nouvelles réflexions. Ces interrogations concernent les formations, les doctrines et les pratiques architecturales, tout en stimulant des initiatives scientifiques visant à approfondir la connaissance historique et technique des constructions de cette période. Parallèlement, des actions militantes émergent pour intégrer ces enjeux dans les politiques de préservation et de transformation du patrimoine bâti.

Le colloque international organisé par le ministère de la culture française, met en lumière la diversité des approches adoptées à travers l'Europe pour valoriser et préserver l'architecture du XXe siècle. Selon les contextes culturels, économiques et sociaux propres à chaque pays, les stratégies varient entre transformation, entretien et patrimonialisation des édifices. L'intégration des considérations écologiques et énergétiques devient un élément central dans ces démarches, soulignant l'importance d'une approche durable et adaptée aux enjeux actuels [11].

Bien que l'architecture du XXe siècle puisse sembler homogène à première vue, les solutions mises en œuvre pour sa préservation restent spécifiques à chaque contexte. Le colloque vise à favoriser la coopération entre experts et institutions afin de constituer un groupe de recherche dans le cadre du programme européen New European Bauhaus (NEB 2025). L'objectif est de développer des stratégies d'intervention cohérentes et durables, adaptées aux défis environnementaux et patrimoniaux de demain.

3.3.2 Labels et certifications

3.3.2.1 *Les certifications environnementales liées au bois (FSC, PEFC)*

Le bois est un matériau incontournable dans la construction durable, offrant des avantages écologiques, esthétiques et pratiques. Pour garantir qu'il provient de sources responsables, des certifications environnementales comme le Forest Stewardship Council (FSC) et le Programme for the Endorsement of Forest Certification (PEFC), assurent que le bois est issu de forêts gérées de manière durable. Ces labels garantissent que l'exploitation forestière respecte des critères environnementaux, sociaux et économiques, contribuant ainsi à la préservation des écosystèmes et de la biodiversité.

Choisir du bois certifié permet de réduire l'impact écologique de la construction tout en soutenant une gestion forestière raisonnée. Grâce à sa capacité à séquestrer le CO₂, le bois joue un rôle clé dans la lutte contre le changement climatique en absorbant le carbone tout au long de sa croissance. Par ailleurs, il participe à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en remplaçant des matériaux plus énergivores comme le béton ou l'acier. Son utilisation favorise ainsi des constructions à faible empreinte carbone et plus respectueuses de l'environnement.

L'intégration du bois dans les projets de construction est encouragée par de nombreuses normes et réglementations thermiques à travers le monde. En France, par exemple, la Réglementation Thermique (RT) incite à privilégier des matériaux à haute performance énergétique, et le bois répond parfaitement à ces critères grâce à sa capacité à limiter les ponts thermiques. Cette efficacité permet d'améliorer l'isolation des bâtiments et de réduire leur consommation énergétique.

Toutefois, l'utilisation du bois peut être soumise à certaines restrictions, notamment dans les zones à risque élevé d'incendie. Certains codes du bâtiment imposent des traitements spécifiques pour le rendre ignifuge, garantissant ainsi une meilleure sécurité pour les occupants. Ces contraintes nécessitent une expertise technique et une adaptation aux normes locales afin d'assurer la conformité des constructions en bois [10].

3.3.2.2 HQE, LEED, BREEAM

Les certifications internationales HQE (Haute Qualité Environnementale), LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) et BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) permettent d'évaluer la performance environnementale des bâtiments. Grâce à ses propriétés durables et son faible impact écologique, le bois joue un rôle clé dans l'obtention de ces labels. En tant que matériau renouvelable et recyclable, il contribue à la réduction de l'empreinte carbone des constructions et favorise une approche plus respectueuse de l'environnement.

La certification HQE garantit qu'un bâtiment, un quartier ou une infrastructure répond aux exigences de la ville durable. Elle repose sur une approche globale et multicritère, équilibrant respect de l'environnement, qualité de vie et performance économique. HQE sert aussi de feuille de route stratégique, optimisant coûts, délais et gestion des risques durant la construction et l'exploitation. Associée à la marque NF, elle évolue grâce aux cadres de référence de l'Alliance HQE-GBC et aux retours d'expérience. Son attribution repose sur des audits indépendants, assurant transparence et crédibilité, avec un système de management au cœur du dispositif [8].

La certification LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), créée en 1998 par le US Green Building Council, est un label écologique qui valorise l'architecture durable et les bâtiments respectueux de l'environnement. Elle évalue la performance globale des constructions, au-delà des seuls matériaux utilisés. Chaque jour, environ 200 000 mètres carrés de bâtiments obtiennent cette certification à travers le monde. LEED s'applique aussi bien aux nouvelles constructions qu'aux projets de rénovation et couvre une large gamme de bâtiments, allant des immeubles de bureaux aux logements, en passant par les infrastructures logistiques et institutionnelles. Chaque projet doit répondre aux standards définis par la certification [9].

La certification BREEAM mesure l'impact environnemental d'un bâtiment en évaluant plusieurs aspects, tels que l'efficacité énergétique, la gestion de l'eau, les émissions de gaz à effet de serre, la qualité de l'air intérieur, l'utilisation de matériaux durables et le traitement des déchets. Selon ses performances, un bâtiment peut obtenir différents niveaux de certification, de "Pass" à "Outstanding". Cette certification s'applique à divers types de bâtiments, qu'ils soient résidentiels, commerciaux, industriels, éducatifs ou dédiés à la santé [9].

3.3.2.3 Avantages et inconvénients

HQE (Haute Qualité Environnementale)

- + Possibilité d'adapter les exigences en fonction du projet, avec une sélection ciblée des priorités techniques.
- + Définition de critères spécifiques selon la nature du bâtiment (bureaux, logements, etc.).
- Processus de certification complexe et chronophage, nécessitant des vérifications et justifications approfondies.
- La démarche HQE doit être intégrée dès la conception du projet, sans possibilité de certification après construction [89].

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method)

- + Certification possible à différents stades du cycle de vie du bâtiment, qu'il soit en conception ou déjà existant.
- + Évolution continue des critères pour s'adapter aux progrès techniques et aux changements législatifs.
- Différentes catégories de certification disponibles selon le niveau de durabilité atteint (Gold, Silver, etc.).
- Évaluation reposant sur 8 catégories de critères différentes toutes prises en compte pour l'attribution d'une note et donc d'un niveau de labélisation
- Un seul critère parmi les 8 concerne le bien-être des occupants [89].

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)

Prise en compte équilibrée des dimensions environnementales, sociales et économiques, avec une notation par catégorie plutôt qu'un score global.

- + Exigences modulées selon le pays dans lequel le projet est réalisé, pour une meilleure adéquation aux contextes locaux.
- + Approche axée sur la durabilité globale du bâtiment, au-delà de son empreinte écologique immédiate.
- Pondération unique des critères, sans distinction selon le type de bâtiment. [89].

3.4 Le bois en Europe

En Europe centrale et septentrionale, la diversité des bois utilisés en construction est relativement restreinte. L'épicéa, bien que polyvalent, reste peu durable, mais sa solidité le rend de plus en plus prisé pour les fenêtres, au détriment du pin, qui, malgré sa résistance mécanique d'environ 50 MPa, a tendance à se déformer sous l'effet du soleil. Le mélèze, rare dans la région, se distingue par sa grande élasticité et sa résistance à la pourriture, bien que sa croissance lui confère souvent une forme courbée.

Le sapin, caractérisé par une forte humidité et de larges cernes, est difficile à travailler en raison de son contre-fil et de ses taches brunâtres. Peu apprécié des menuisiers et charpentiers, il est néanmoins cultivé pour sa croissance rapide et son enracinement solide, même dans des conditions difficiles. Le sapin de Douglas, quant à lui, présente des inconvénients notables : son poids élevé et ses branches dures compliquent le rabotage. Cependant avec les équipements et recherches actuels, ces inconvénients peuvent être négligés.

Le chêne reste l'essence la plus polyvalente en charpenterie, notamment pour les éléments soumis à des contraintes importantes. Les menuisiers utilisent également certaines espèces de feuillus, en particulier des arbres fruitiers. Contrairement aux artisans japonais, qui emploient une grande variété d'essences, les constructeurs européens privilégient une sélection limitée afin de minimiser les tensions dues aux variations de retrait du bois [2].

3.5 Le bois en architecture verte

3.5.1 Le bois, un matériau clé pour une construction durable

Face aux défis environnementaux, le secteur de la construction se tourne vers des solutions plus durables. Le bois s'impose comme un choix privilégié grâce à ses qualités écologiques, sa faible empreinte carbone et son intégration harmonieuse dans l'architecture moderne. Son utilisation favorise des bâtiments alliant durabilité, efficacité énergétique et esthétique.

L'essor du bois local dans la construction durable reflète une volonté de valoriser les ressources disponibles tout en réduisant l'impact écologique. Ce matériau, longtemps sous-estimé, offre des avantages économiques et environnementaux significatifs. En combinant tradition et innovation, il permet de concilier respect de l'environnement et développement territorial.

Autrefois éclipsé par le béton et l'acier, le bois retrouve aujourd'hui une place centrale dans l'architecture contemporaine. Son retour s'explique par une prise de conscience croissante des enjeux écologiques et par sa capacité à répondre aux exigences d'une construction plus verte et responsable. L'architecture engagée témoigne d'une volonté de créer des bâtiments qui respectent l'identité locale et l'environnement [54] [55] [56] [57].

3.5.2 Les avantages du bois dans la construction écologique

L'utilisation du bois local en architecture allie durabilité, performance énergétique et impact écologique réduit, favorisant ainsi une construction respectueuse de l'environnement.

3.5.2.1 Une empreinte carbone réduite

Le bois, en tant que matériau renouvelable, joue un rôle essentiel dans la réduction des émissions de CO₂. Durant sa croissance, l'arbre absorbe le dioxyde de carbone et le stocke dans ses fibres, contribuant ainsi à limiter l'impact environnemental de sa transformation.

La fabrication de matériaux tels que l'aluminium et le béton requiert une grande quantité d'énergie, entraînant des émissions significatives de gaz à effet de serre. À l'inverse, le bois, moins énergivore à produire, limite l'impact environnemental tout en s'intégrant harmonieusement dans la bio architecture et les constructions durables. Grâce à son empreinte écologique réduite et à son rôle de puits de carbone, le bois s'impose comme une alternative durable aux matériaux conventionnels [54] [55] [56] [57].

3.5.2.2 Les tendances actuelles en matière d'architecture en bois

Les constructions en bois suscitent un intérêt croissant dans l'architecture moderne. Le village des athlètes des JO de Paris 2024 illustre cette tendance en intégrant largement le bois, affirmant ainsi une volonté de bâtir des espaces durables et adaptés aux enjeux actuels. Les solutions telles que le bardage en bois brûlé, inspiré de méthodes ancestrales, démontrent comment la tradition peut rencontrer l'innovation pour un résultat durable [54] [55] [56] [57].

3.5.2.3 Des matériaux locaux pour un impact positif

L'utilisation de bois local contribue à dynamiser l'économie régionale tout en limitant l'impact environnemental lié au transport. Opter pour du bois provenant de forêts à gestion responsable, tel que celui labellisé FSC ou PEFC, garantit que les ressources forestières sont exploitées de manière pérenne.

Aussi, des initiatives basées sur l'économie circulaire se développent, visant à minimiser les déchets et à maximiser la réutilisation des matériaux [54] [55] [56] [57].

3.5.2.4 Innovations technologiques et bois

Les avancées technologiques ont renforcé l'utilisation du bois dans l'architecture durable, en améliorant sa résistance, sa durabilité et son impact écologique. Les traitements modernes protègent le bois contre les agressions extérieures, tandis que le bois lamellé-croisé (CLT) permet la construction de bâtiments de grande hauteur. Le Building Information Modeling (BIM) optimise la conception et réduit les déchets, et l'intégration des technologies vertes améliore l'efficacité énergétique des structures en bois. Ces innovations font du bois un matériau polyvalent et écologique, essentiel à la construction durable [57].

Chapitre 4. Du Kigumi à l'architecture durable

L'intégration du Kigumi dans l'architecture contemporaine, notamment via les technologies numériques et modulaires, ouvre de nouvelles perspectives pour des constructions durables, adaptables et résistantes. Cette approche allie tradition et innovation, offrant ainsi des solutions adaptées aux défis architecturaux modernes. Ce chapitre est un état de l'art sur la recherche de l'intégration du Kigumi au sein de la construction contemporaine.

4.1. Introduction

L'essor des auxiliaires d'assemblage métalliques dans la construction en bois a débuté avec l'introduction des techniques d'ingénierie pour les grands immeubles. Dans les années 1950, la pénurie de logements a favorisé l'apparition d'éléments en tôle, supplantant progressivement les assemblages traditionnels en bois. Ces composants métalliques, faciles à poser et à calculer, ont simplifié le travail des artisans, entraînant une migration des ouvriers vers l'industrie.

Cependant, leur coût de production n'est pas toujours inférieur à celui des assemblages en bois, et leur impact environnemental est significatif en raison de la forte consommation énergétique de l'industrie métallurgique. À l'inverse, les assemblages en bois, issus d'une longue tradition, exploitent intelligemment les propriétés du matériau, bien que leur conception soit plus complexe. La validation de ces assemblages repose davantage sur des méthodes expérimentales que sur des calculs strictement arithmétiques [2].

4.2 Architecture modulaire et durabilité

Dans la littérature aujourd'hui, le bois est avant tout mis en avant comme un matériau de construction important et surtout durable, en tant que matériau de construction renouvelable il a un grand potentiel pour les futures constructions écologiques. La technologie modulaire en bois composite permet une construction rapide et efficace sans nécessiter de machines de levage. Les modules peuvent être fabriqués dans des ateliers de petite taille ou dans de grandes usines de transformation du bois, figure 25, [18] [27].



Figure 2. Angular composite wooden modules.

Figure 25 : Module d'angle en bois composite [18]

L'utilisation de motifs modulaires révèle son importance dans les assemblages imbriqués, figure 26, ou dans le secteur de la construction, en particulier pour la conception de bâtiments démontables et avec la réutilisation des éléments structurels. Lors de la construction d'édifices en bois, l'assemblage sur site représente une part importante du travail et des coûts notamment, la fabrication de structures modulaires représente un gain considérable [20]. Par ailleurs, en termes de praticité d'usage des motifs modulaires, l'article [30] relate de l'assemblage d'une structure réalisé par des non-professionnels, démontrant la facilité avec laquelle les composants peuvent être montés sans compétences artisanales avancées.



Figure 26 : Structure créée avec un motif modulaire [20]

Cependant, un inconvénient majeur de ces connecteurs standards est qu'ils sont irréversibles. En effet, à la fin de la vie d'une construction et dû à la standardisation de certains modules, les assemblages sont souvent détruits, envoyés à la décharge ou bien à l'incinérateur. Cette fin de vie de matériau a donc un impact significatif sur l'environnement. Pour ce faire une idée de l'impact que peut avoir le secteur de la construction sur l'écologie, on a en 2017 un peu moins de 70 % des déchets produit en France qui proviennent de ce secteur. De plus, sur les matériaux utilisés, la France en 2016 représente jusqu'à 7 % des émissions de gaz à effet de serre sur une échelle mondiale [26] [34] [31].

Pour ainsi dire, il est important de limiter les impacts environnementaux et d'utiliser des ressources renouvelables dans le domaine de l'architecture et de la construction. Le bois, en tant qu'élément clé, offre certains avantages avec un impact environnemental moins négatif par rapport aux ressources non renouvelables comme le béton qui est encore très utilisé de nos jours. Utiliser le bois comme matériau de base, malgré ses caractéristiques limitées, et en s'appuyant sur le concept de "modularité", permettrait différentes formes de structures pouvant être obtenues en répétant un module de base afin de répondre aux intentions du projet mené par l'architecte. L'idée derrière ces structures modulaires, serait une standardisation de ces modules afin de développer un système structurel modulaire universel. L'utilisation de modules standardisés au lieu de solutions personnalisées et coûteuses permet d'obtenir des économies d'échelle grâce à la simplification du processus de conception. Enfin, une efficacité économique

serait possible notamment au niveau des coûts de production. Ces différents aspects conduisent à une réduction globale des coûts de constructions et donc à un édifice moins cher qui peut être largement utilisée et dupliqué [32] [36] [40].

On peut également parler de la construction algorithmique qui est un processus de conception ou de modélisation basé sur des algorithmes, c'est-à-dire des suites d'instructions logiques permettant de générer, transformer ou optimiser des formes, des structures ou des systèmes. Son utilisation liée avec des matériaux d'origine naturel et renouvelables comme le bois permet de maintenir la productivité tout en respectant la durabilité [22]. Les réductions de l'énergie intrinsèque rendues possibles par la construction en bois sont de plus en plus précieuses à mesure que les densités urbaines augmentent et que les technologies de construction avancent vers une consommation d'énergie opérationnelle nette qui tendent vers zéro. La conception des connexions dans les structures en bois est cruciale pour la performance structurelle globale [24].

Ainsi les structures de cadre en bois préfabriquées peuvent être produites en masse et la compétitivité du bois par rapport à des matériaux inorganiques standards comme l'acier ou le béton se fait sur sa flexibilité et sa production rapide [35] [41]. Toujours sur l'aspect financier, l'article [46] explore le concept de l'économie circulaire dans le contexte de la menuiserie en bois pouvant être durable. L'idée est d'utiliser des résidus de bois provenant de processus de production industrielle d'une entreprise du secteur des produits d'hygiène ou bien de nettoyage. L'article [48] quant à lui se concentre sur une démarche de minimisation du gaspillage total. Les résultats montrent aujourd'hui que l'optimisation des motifs de découpe et de la longueur des ébauches permet de réduire considérablement le gaspillage sur la productivité des pièces.

En conclusion, la collaboration interdisciplinaire entre architectes, ingénieurs et fabricants est évidemment primordiale pour favoriser l'innovation, la qualité et l'efficacité des produits (matériaux, bâtiments, design...). Cet échange encourage l'exploration des potentialités de conception en combinant les connaissances traditionnelles et numériques afin de développer des solutions innovantes et adaptées aux besoins actuels [43].

4.3 Métabolisme et outils de modélisation numérique

Historiquement, le concept de "Métabolisme" a été présenté en 1960 pour intégrer la culture de l'architecture traditionnelle japonaise avec le modernisme. Ce concept visait à l'origine à créer une architecture modulaire, adaptable, compatible et transformable. Les architectes du mouvement Métaboliste se sont inspirés des structures traditionnelles en bois du Japon, qui utilisent des pièces entrelacées sans clous ni vis pour faciliter l'assemblage et le démontage [22] [19] [14] [37]. En s'inspirant de ce courant architecturale, différentes recherches ont été menées en se concentrant sur la conception de ces assemblages.

Par exemple, des chercheurs de l'université de Tokyo ont créé et mis au point un logiciel : le Tsugite. Il est à destination des menuisiers et des ébénistes maîtrisant la modélisation 3D et l'usage des CNC (ie : Computer Numerical Control) pour découper les pièces des assemblages. Ce logiciel permet la réalisation d'assemblages complexes en bois à tenons et mortaises sans recours aux clous et aux vis [37].

L'article [20], lui, fait état du concept de Kigumi en proposant un outil numérique qui peut générer des motifs imbriqués en 3D mais aussi analyser les conditions d'intersections des différents éléments modélisés. Le projet comprend également le développement d'un plugin pour Rhinoceros 3D, un logiciel largement utilisé en architecture et en design paramétrique. Ce plugin permet aux concepteurs de générer automatiquement des structures imbriquées, d'évaluer la faisabilité de leur assemblage et d'animer le processus de montage en 4D. Ce programme génère un motif tridimensionnel imbriqué, analyse les conditions d'intersection entre les éléments et fournit instantanément des instructions d'assemblage sous forme d'animation. En plus des structures imbriquées, il peut également examiner des assemblages génériques définis par des contraintes de contact planaires. En intégrant des paramètres de construction réels, cet outil offre un potentiel d'évolution vers une simulation automatisée en 4D.

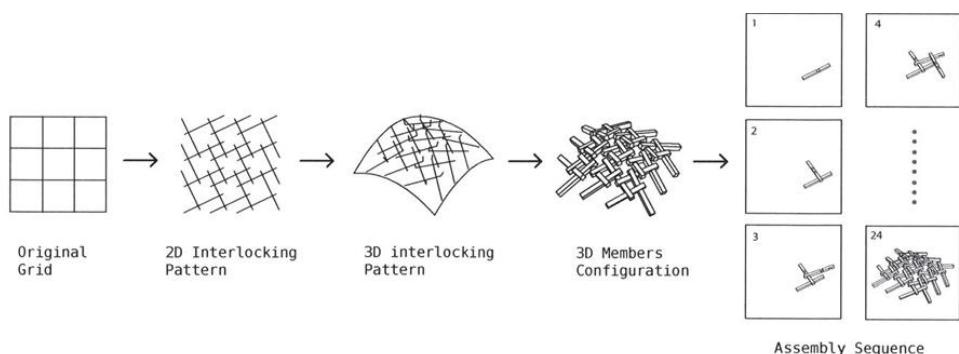


Fig. 4.1
Steps to Construct Interlocking
Frames

Figure 27: Etapes de la génération en 4D d'une structure [20]

L'animation interactive offre une visualisation précise des étapes d'assemblage, figure 27, permettant aux architectes et aux ingénieurs d'anticiper d'éventuelles difficultés et d'ajuster leur conception en conséquence.

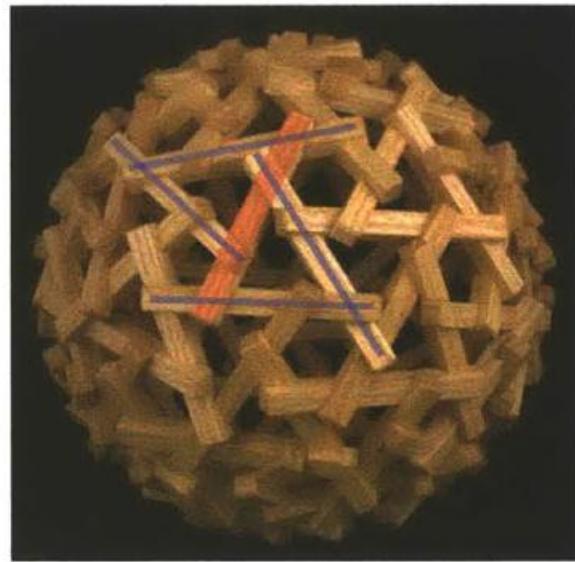


Figure 28 : Interlocking pattern [20]

L'intégration de ce plugin dans Rhinoceros 3D et son extension Grasshopper permet aux concepteurs de tester en temps réel différentes configurations et d'analyser la séquence d'assemblage avant la fabrication. Le module de simulation 4D génère une animation du montage. En soit, procéder de cette façon apporte une avancée significative en combinant la géométrie computationnelle, l'optimisation algorithmique et la simulation numérique pour améliorer la conception des structures en bois imbriquées [20] [7]. Une approche computationnelle pour la conception et la fabrication de structures en bois imbriquées permet une optimisation de leur assemblage. En effet, le contexte moderne actuel fait que la fabrication via outils numériques et l'automatisation prennent une place croissante dans le domaine de l'architecture.

Une étude s'est aussi penchée sur une méthode pour créer des joints reconfigurables. On cite par exemple le joint de Kawai tsugite, figure 29, qui peut être configuré dans 3 directions orthogonales et dont il est question dans l'article [42]. L'article [42] constate également que la reconfigurable des joints Kawai tsugite orthogonaux à deux composants peut uniquement se faire entre les configurations en I et en L.

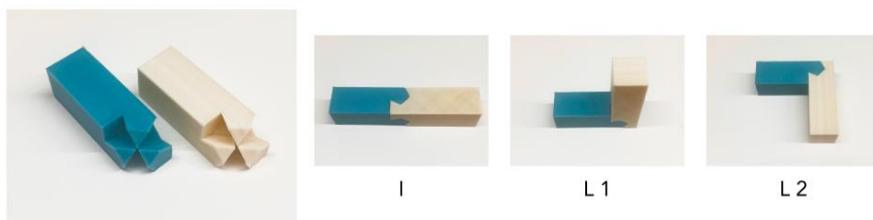


Figure 29 : Kawai tsugite [42]

Avec ces nombreux outils numériques, on se pose la question de l'interopérabilité entre les logiciels de modélisation numérique et les outils de conception structurelle. L'article [34] étudie la conception paramétrique (PD) et la conception générative (GD) en tenant compte de l'interopérabilité fournie par les outils BIM. La recherche vise à proposer des procédures qui aident à résoudre les problèmes de PD et de GD, et à comprendre les avantages de l'automatisation des processus à travers des algorithmes génératifs et paramétriques. Il conclut que l'application de la conception paramétrique et générative dans la conception de structures complexes améliore l'efficacité et la précision du processus de conception. L'interopérabilité des outils BIM avec les méthodologies PD et GD permet une collaboration plus étroite entre les architectes et les ingénieurs, réduisant ainsi le temps et l'effort nécessaires pour réaliser des projets de conception complexes.

4.4 Les nouvelles technologies de fabrications

Hormis les logiciels vus précédemment, un lien étroit existe entre techniques traditionnels et les techniques modernes d'usinage, de production ou bien conception. De nouveaux outils technologiques représentent une avancée majeure dans le domaine du design paramétrique, ouvrant de nouvelles perspectives pour la construction et la fabrication, notamment grâce aux technologies comme la découpe laser, les machines CNC (ie : Computer Numerical Control) et l'impression 3D [16] [17] [29] [30] [40] [41].

Il faut garder en tête qu'un modèle 3D finalisé peut se révéler impossible à assembler en raison de contraintes géométriques qui bloquent certaines pièces. Identifier les ensembles ou éléments qui assurent un assemblage viable est donc primordial. Afin d'y remédier, l'utilisation d'un algorithme génétique permettrait d'explorer un grand nombre de combinaisons en évaluant différentes solutions et en sélectionnant progressivement les plus optimales. Parallèlement à ça, des graphes directionnels de blocage pourraient être utilisés pour analyser les contraintes de contact entre les éléments, permettant de déterminer quels éléments peuvent être retirés ou ajoutés à chaque étape du montage. Cette approche assure ainsi que chaque configuration testée puisse être assemblée de manière séquentielle sans risque de blocage par la suite [20].

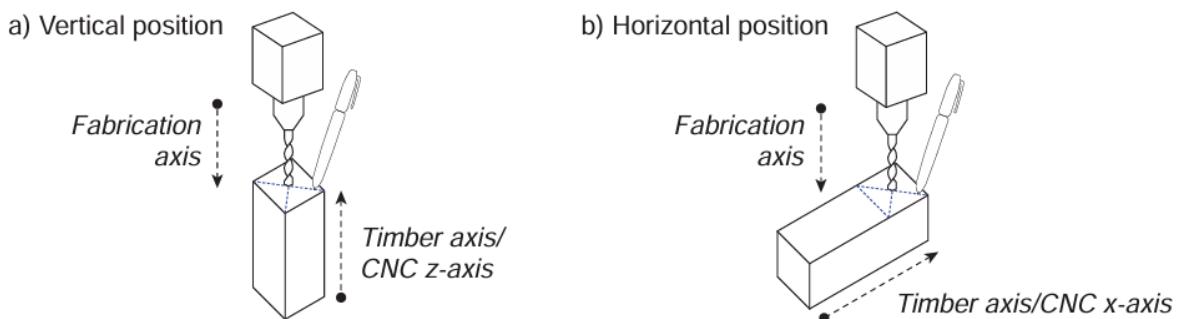


Figure 30 : Découpe CNC [20]

Les éléments ainsi conçus, peuvent être usinés à l'aide d'une machine CNC à cinq axes équipée d'une fraise à bout plat. Ce nombre d'axes impose donc des limitations sur les formes d'entailles réalisables, et nécessite une optimisation des géométries d'intersection entre les différentes pièces. Par exemple, certaines configurations d'encoches peuvent être impossibles à fraiser sans générer des zones inaccessibles pour l'outil de découpe qui interviendra par la suite. Une analyse précise des intersections entre les éléments permet donc de filtrer les configurations incompatibles avec la fabrication numérique et de sélectionner celles qui respectent les contraintes d'usinage. L'application des concepts de planification géométrique d'assemblage à l'architecture est initialement développée en robotique et en ingénierie mécanique, ici elle est transposée à la conception architecturale afin d'optimiser le processus de fabrication et de montage [21][22] [37].

Pour une fabrication optimale d'éléments en bois, on peut utiliser une méthode de génération automatique d'assemblages séquentiels imbriqués en 2D, figure 31. La génération automatique d'assemblage est une approche qui permet de simuler et d'intégrer toutes les caractéristiques géométriques nécessaires à l'intégrité structurelle dans l'élément lui-même. Pour exemple, les résultats de l'article [26] montrent que la méthode permet de générer des assemblages imbriqués qui peuvent être assemblés pour toute combinaison prescrite de translations et de rotations. Les assemblages ainsi générés sont constitués de pièces polygonales qui s'emboîtent de manière séquentielle, permettant un montage et démontage facile selon les mouvements prescrits. Il met en avant la conception générative qui est basée sur des règles formelles et offre une nouvelle approche pour la conception d'assemblages imbriqués en 2D.

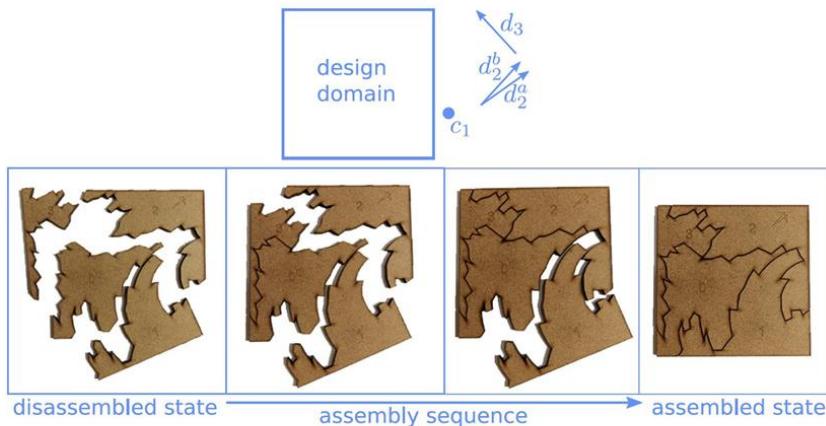


Figure 1- The top row is our tool's input: the disassembling motions are given by the location of a centre of rotation, a cone of translation and a single direction of translation. Bottom row: the fabricated raw output and an assembly sequence.

Figure 31 : Assemblage 2D [26]

L'industrie du bâtiment en structure bois rencontre une tendance croissante vers les outils de la numérisation et de l'automatisation. En effet, les structures de cadre en bois préfabriquées peuvent être produites en masse sur des lignes d'assemblage robotiques, augmentant ainsi la productivité [34]. Pour exemple, le système IATPS (ie : Integrally Attached

Timber Plate Structures) consiste à assembler des panneaux en bois connectés uniquement par des joints en bois inspirés de la menuiserie japonaise traditionnelle, voir figure 32 [35].

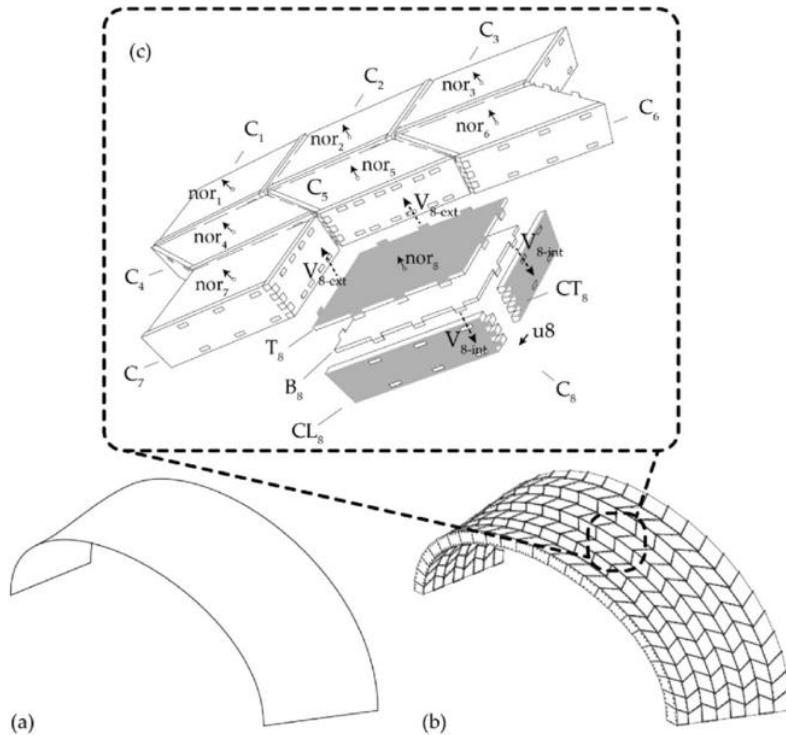


Figure 32 Illustration du système IATPS [87]

L'article [45] met en avant une base de données sur les assemblages en bois, intégrant à la fois des connexions traditionnelles et contemporaines. Cette initiative vise à préserver et à élargir le patrimoine en créant une plateforme en ligne open-source pour documenter les jonctions en bois. L'objectif est de fusionner l'artisanat traditionnel avec les innovations technologiques et numériques en conception et en fabrication. Ainsi les principaux défis rencontrés dans la fabrication, notamment avec les limitations des outils CNC, ont été surmontés par l'adaptation des conceptions de joints.

4.5 Comportement mécanique du Kigumi

Comme vu dans les chapitres précédents, les assemblages complexes en bois sont depuis longtemps un élément essentiel de l'architecture et de la construction japonaise. La menuiserie Kigumi est une technique qui utilise des joints emboîtés pour connecter des pièces de bois sans utiliser de clous, de vis ou d'autres fixations [27] [35] [50]. Pour ainsi dire, ses encoches spécifiques ne nécessitent pas d'éléments de fixation mécaniques tels que des vis ou des clous. Cette technique d'assemblage repose uniquement sur la géométrie des éléments afin d'assurer la stabilité de la structure finale. Un des défis majeurs de ce type de construction est que si la configuration géométrique peut être conçue numériquement, elle ne garantit pas nécessairement la faisabilité de l'assemblage. Un aspect fondamental du projet de conception des structures en bois imbriquées est l'intégration de contraintes de fabrication dans le processus de conception [20].

Dans l'article [22], l'ingénieur civil japonais Ikeda souligne également l'importance de l'adaptabilité et de la résistance mécanique de ces structures, il s'inspire notamment de la nature pour créer des motifs irréguliers et uniformes.

L'objectif principal est donc de développer un cadre de conception basé sur les performances pour la géométrie des assemblages. Une simple étude paramétrique montre que la rigidité du joint peut être maximisée en ajustant les paramètres géométriques lors de la conception [24].

Dans les faits, les joints de menuiserie traditionnels permettent de joindre les éléments en bois de manière durable, sans nécessiter d'adhésifs ou de métal. L'objectif de cette étude, présenté dans l'article [25], est d'examiner la performance mécanique en flexion de différents types de joints obliques en pin.

Il faut d'abord noter que le format limité du bois scié implique l'utilisation de structures discontinues nécessitant des joints, voir figure 33, pour augmenter leurs portées efficaces. Pour assurer leur fonction structurelle, ces joints doivent présenter des caractéristiques adéquates de résistance, de flexibilité, de dureté et d'apparence, qui dépendent principalement des propriétés mécaniques du type de bois et de l'objectif du joint.

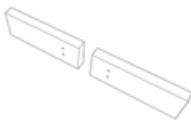
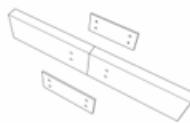
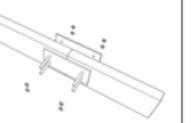
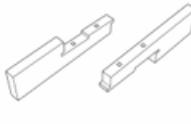
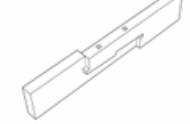
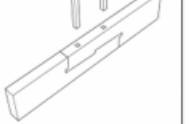
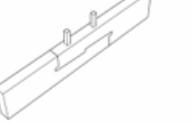
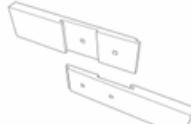
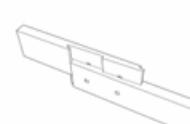
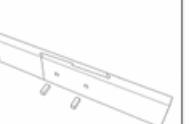
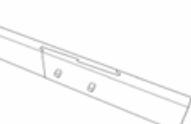
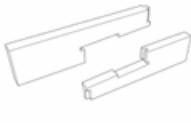
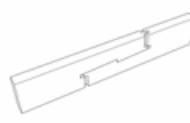
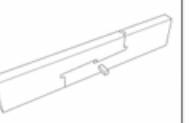
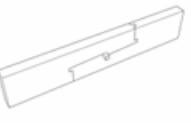
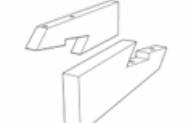
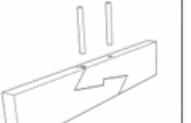
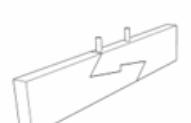
Splice type	Assembly sequence			
	a)	b)	c)	d)
MC				
ROSS				
ROVS				
MROS				
OSDP				

Figure 33 : Assemblages étudiés par l'article [25]

L'étude [25] a donc suivi la propagation des fissures dans chaque poutre sous différentes charges jusqu'à atteindre la charge maximale. Les premières fissures sont apparues à 50 % de la charge maximale, principalement autour de la zone de contact des assemblages en bois, là où les contraintes de cisaillement et de flexion étaient les plus élevées.

Les fissures responsables de la rupture des assemblages obliques se sont concentrées dans la zone centrale de la poutre, à proximité des joints discontinus induits par la géométrie des assemblages. À mesure que la charge augmentait, les fissures se propageaient dans la même direction que les discontinuités des joints ou selon une orientation où la résistance du bois atteignait ses limites.

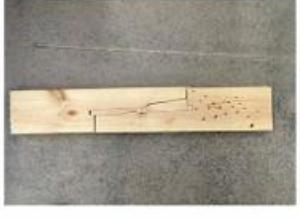
Types of splice	Failure mode
Without splice – Control (C)	
Metallic connector (MC)	
Rabbeted Oblique Scarf Splice (ROSS)	
Rabbeted Oblique Vertical Splice (ROVS)	
Mortised Rabbeted Oblique Splice (MROS)	
Oblique Splice Diamont Point (OSDP)	

Figure 34 : Résultats de l'expérience pour chaque type de joint [25]

L'analyse des fissures, figure 34, a montré que les assemblages en bois assuraient un transfert mécanique efficace des contraintes par contact et friction, contrairement aux connecteurs métalliques, qui transmettent les efforts par flexion, écrasement ou cisaillement et empêchent le démontage sous des conditions extrêmes. Cette étude suggère que, sous des charges normales, la performance structurelle des assemblages en bois est proche de celle des poutres solides, et que leur efficacité dépend fortement de leur géométrie. Les résultats de cette étude montrent que les joints obliques en bois peuvent offrir une performance mécanique satisfaisante, mais leur résistance en flexion est généralement inférieure à celle des échantillons solides.

Malgré ces éléments structurels forts, l'utilisation du bois et d'assemblages pour la construction de bâtiments à plusieurs étages ou de grandes salles peut être plus difficile en raison des limites du matériau comme avance l'article [32] sur le cas de structures à grandes portées.

Les analyses expérimentales présentées précédemment ne suffisent pas à l'étude du comportement mécanique des assemblages bois-bois. D'autres articles explorent des analyses numériques en parallèle.

Par exemple, l'article [33] examine des maisons à portique historiques. Il explore leur origine, leur structure et l'état actuel de leurs toitures. Une analyse mécanique de la structure à l'aide d'une méthode de calcul est donc nécessaire. Les modèles numériques des fermes de toit sont définis et analysés à l'aide de la méthode des éléments finis (FEA).

L'étude utilise l'analyse de la sensibilité globale avec la méthode de l'expansion du chaos polynomial pour étudier l'influence des incertitudes dans les propriétés des matériaux du bois, telles que le module de Young et le coefficient de frottement, ainsi que la hauteur de la section transversale des poutres. Le chaos polynomial (PC), est une méthode permettant de représenter une variable aléatoire sous forme de fonction polynomiale d'autres variables aléatoires. Les polynômes utilisés sont orthogonaux par rapport à la distribution de probabilité conjointe de ces variables. Ici, le terme "chaos" fait référence à la nature aléatoire du processus, et non à une dynamique chaotique. Les résultats montrent que la variabilité de la hauteur des poutres a l'impact le plus significatif sur la déflexion maximale du toit. Ainsi, une mesure précise de la géométrie est essentielle pour planifier la conservation et la restauration de ces structures historiques [33].

Deux approches pour la modélisation par éléments finis sont appliquées : un modèle de poutre et un modèle solide. Les modèles sont utilisés pour analyser l'influence des paramètres incertains sur le comportement mécanique de la structure du toit [33] [40]. Pour bien respecter ces étapes, les futurs travaux incluront l'optimisation topologique des performances structurelles et l'extension de l'espace de conception pour inclure des formes plus complexes [37]. Comme l'utilisation de l'effet de "tension-compression" inspiré des techniques traditionnelles japonaises dont il est mention dans l'article [38]. La validation expérimentale des modèles numériques et l'optimisation des paramètres de sortie sont essentielles afin de maximiser les avantages de cette méthode. [40].

Pour ce qui est de la rigidité rotationnelle dans les connexions d'assemblages en bois, on cite dans l'article [47] en particulier le joint Nuki, figure 35, utilisé dans les structures en bois historiques. L'étude présentée ici est un modèle analytique pour prédire le comportement des joints Nuki et des tests expérimentaux afin de calibrer ces prédictions avec une charge linéaire pour mesurer la rotation du joint.

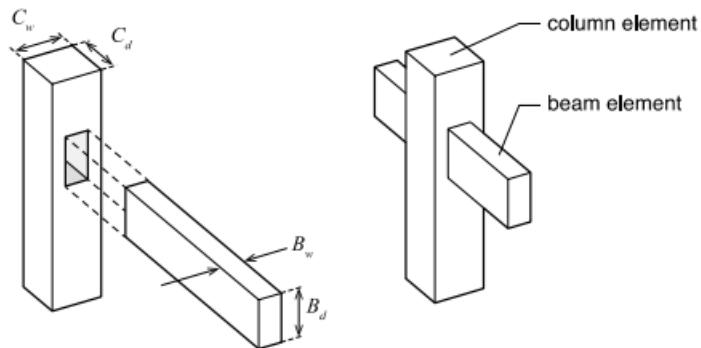


Figure 35 : Joint Nuki [47]

Il est possible d'étudier le comportement structurel de ces joints toujours à l'aide de la méthode des éléments finis vu plus tôt. En résumé l'article étudie les performances structurelles des assemblages traditionnels en bois imbriqués résistants aux moments, c'est-à-dire un assemblage capable de transférer des moments, pour la construction de bâtiments modernes, en utilisant des techniques de modélisation numérique pour comprendre leur comportement structurel et leur potentiel d'application [44].

Pour finir sur ce chapitre, il est important de noter que la relation entre la forme et la performance des connexions par assemblage reste inexplorée dans la majorité des constructions en bois modernes. Les travaux existants se concentrent principalement sur l'analyse des géométries traditionnelles des joints [24].

Chapitre 5 : Développement de méthodes de conception et d'analyse mécanique

Ce chapitre vise à développer une méthode de conception géométrique et d'analyse mécanique en intégrant les principes du Kigumi pour les structures en bois. Après une analyse approfondie de la littérature existante du chapitre précédent, et des recherches sur la caractérisation structurelle, une proposition d'assemblage sera conçue pour répondre aux besoins établis. Le choix du joint d'angle, basé sur des techniques telles que le bridle joint et le tsugite, s'appuiera sur des références issues de la littérature et des démonstrations pratiques. Enfin, une analyse mécanique approfondie permettra d'évaluer la résistance et la performance de ces assemblages via une étude par éléments finis. Les résultats de cette étude seront ensuite discutés.

5.1 Exploration de la littérature

L'article [44] examine la performance structurelle des assemblages traditionnels en bois résistants aux moments, en mettant l'accent sur les techniques japonaises et chinoises. Il explore les techniques modernes de modélisation numérique appliquées aux assemblages en bois, notamment l'analyse par éléments finis, qui permet d'évaluer le comportement mécanique des assemblages étudiés.

L'étude se concentre sur quatre types d'assemblages interconnectés, figure 36, et intégrés dans une structure de bâtiment moderne. Ces assemblages de bout (ref Chapitre 4.5) sont ainsi analysés en tenant compte des défaillances matérielles et des non-linéarités géométriques. L'objectif étant de comprendre leur capacité structurelle et leur rigidité en rotation.

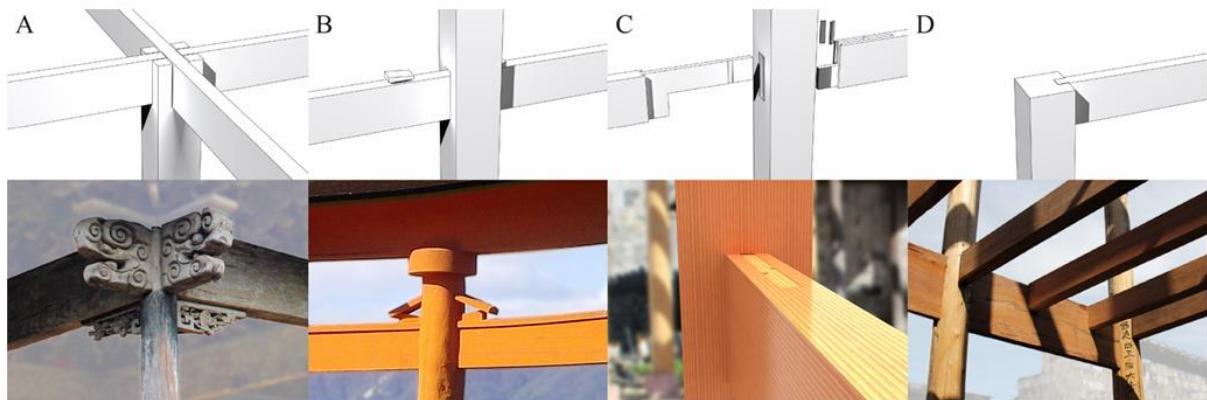


Figure 36 : Assemblage étudié dans l'article [44]

Les résultats montrent que certains assemblages offrent une meilleure résistance et une plus grande stabilité, tandis que d'autres présentent des faiblesses nécessitant des ajustements.

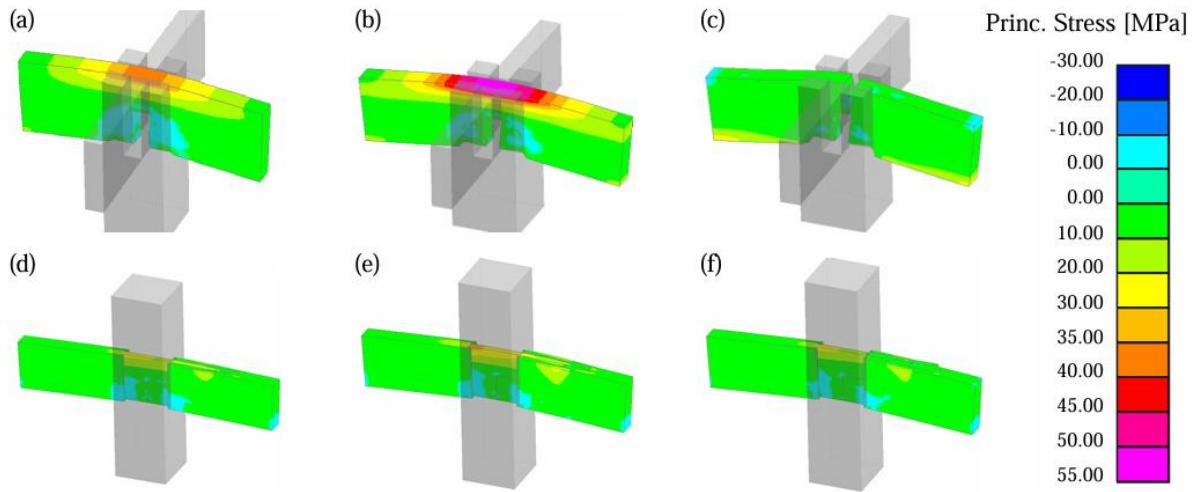


Figure 37 : Deformed geometries of joints at different states of loading until failure, and corresponding principal stress distribution states for; (a) to (c) joint A, (d) to (f) joint C from the figure 36

L'étude présentée par l'article [44] analyse la performance structurelle de quatre types d'assemblages traditionnels en bois résistants aux moments, en utilisant la modélisation par éléments finis. Les résultats de la figure 37 montrent que l'assemblage B offre la meilleure rigidité en rotation grâce à la continuité du bois à travers la colonne, tandis que l'assemblage A présente une rigidité plus faible et une rupture plus fragile pour une résistance mécanique équivalente. L'assemblage C atteint une capacité moindre et se déconnecte sous contrainte, tandis que l'assemblage D affiche une faible rigidité et un comportement proche d'une articulation. Ces observations permettent de mieux comprendre le comportement mécanique des assemblages et ouvrent la voie à une classification adaptée à la construction moderne [44].

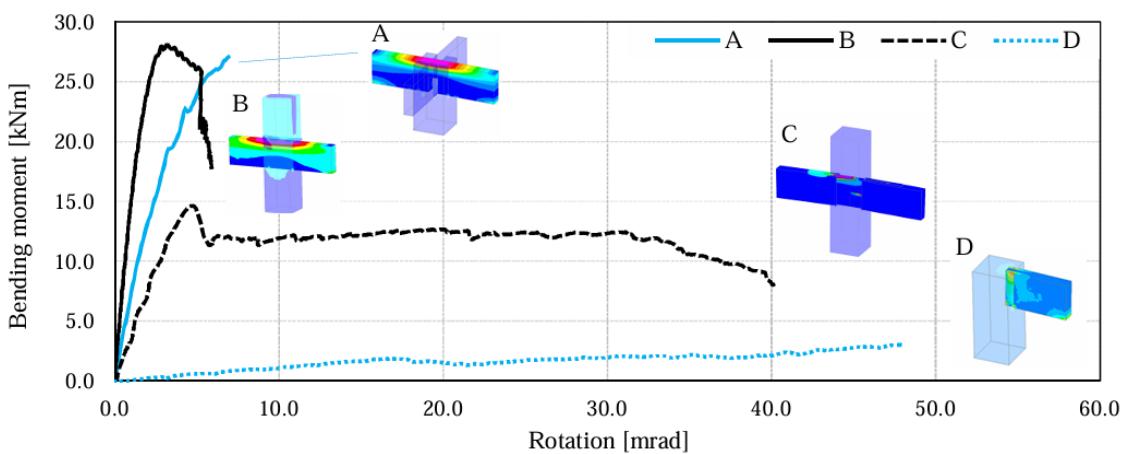


Figure 38 : Moment Rotation behaviour of the four selected joints from figure 36

L'article [78] présente un état des lieux des connaissances sur les assemblages de charpenterie écharpe (scarf) et de bout (splice), figure 39, utilisés dans les structures en bois historiques. Il examine leur comportement statique, leur rôle dans la transmission des forces et leur influence sur la stabilité des bâtiments anciens.

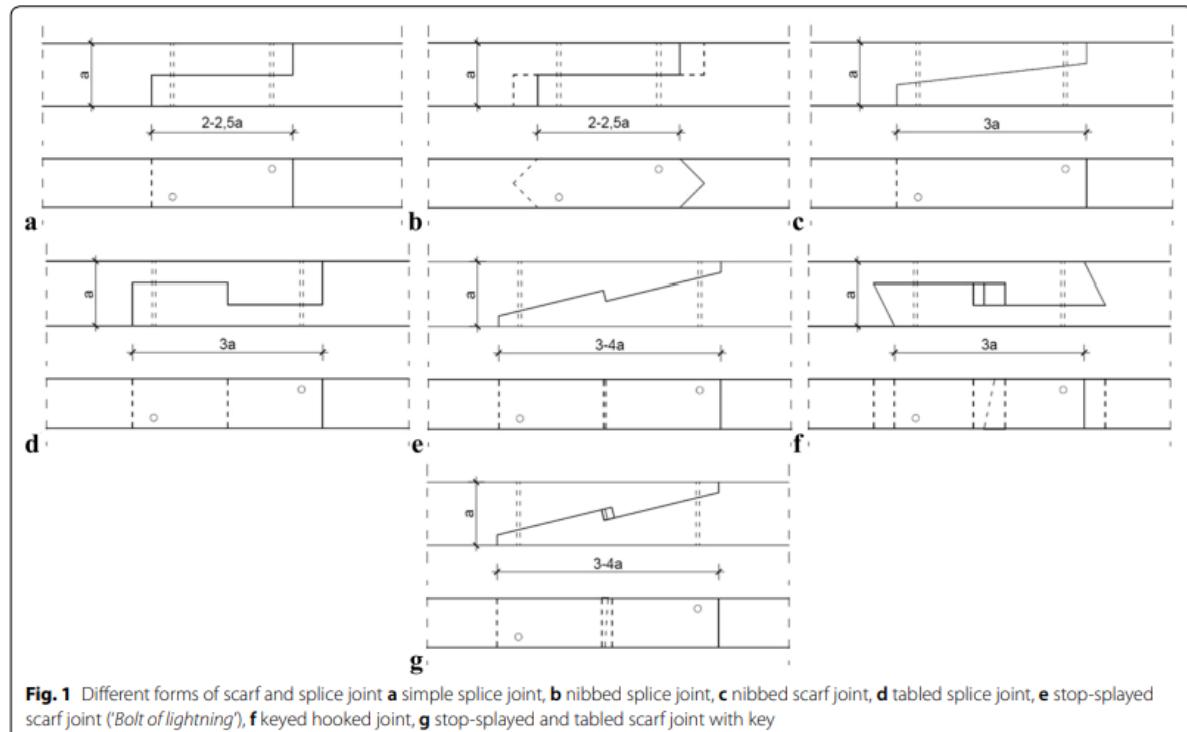


Figure 39: Joints étudiés dans l'article [78]

L'étude de l'article [78] met en évidence la diversité des assemblages, figure 40, et leur évolution au fil du temps, en fonction des contraintes mécaniques et des besoins architecturaux. Elle souligne également le manque de directives précises pour leur conception et leur renforcement, nécessitant des recherches approfondies.



Fig. 3 Examples of joints in existing building structures: **a** Church in Kargowa—stop-splayed scarf joint, **b** Church in Skepe—plain splice joint, **c** Church in Skepe—plain key joint, **d** Palace in Zagan—splice joint, **e** Czocha Castle—stop-splayed scarf joint, **f** historical building in Italy (photo: author)

Figure 40 : Exemple concret dans joints utilisés [78]

L'analyse des assemblages écharpe (scarf) et de bout (splice) repose sur trois approches principales décrites ci-dessous :

- **Analyse expérimentale**

Cette méthode implique des tests physiques réalisés sur des assemblages en laboratoire afin d'observer leur comportement sous différentes charges. Parmi ces essais, on retrouve les tests de flexion, qui permettent de mesurer la résistance et la rigidité des assemblages soumis à une charge, ainsi que les tests de cisaillement, qui évaluent les contraintes internes et les modes de rupture. La corrélation d'image numérique est également utilisée pour suivre les déformations en temps réel et mieux comprendre l'évolution de la structure.

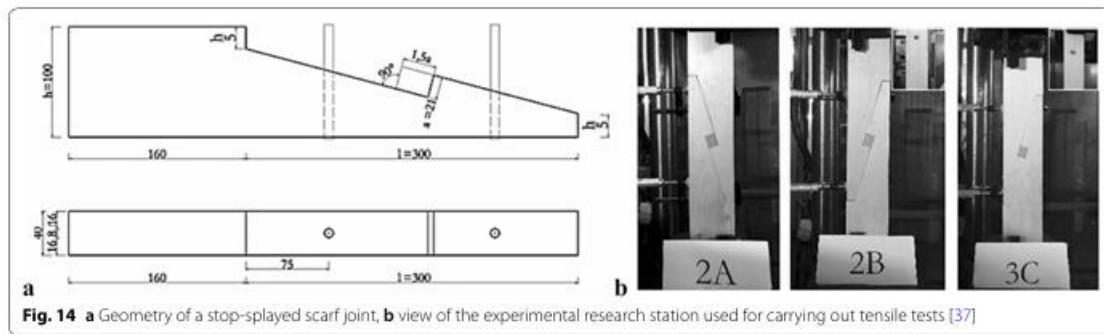


Figure 41 : Analyse expérimentale [78]

• Analyse analytique

L'approche analytique repose sur des modèles mathématiques qui permettent de prédire le comportement des assemblages. Cette méthode comprend le calcul des contraintes et des déformations, basé sur les équations de la mécanique des structures, ainsi que la modélisation des efforts internes, qui sert à estimer la capacité portante des joints. Elle inclut également l'application des théories de Johansen, qui aident à évaluer la résistance des connexions assemblées par chevilles ou tenons.

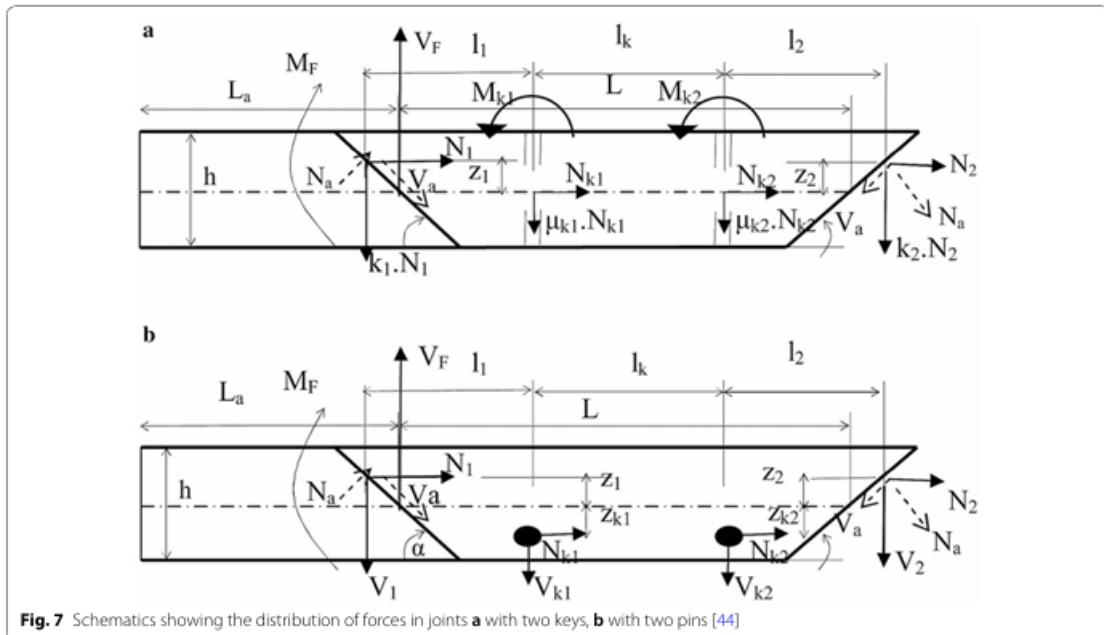


Figure 42 : Analyse analytique [78]

• Analyse numérique

Les simulations numériques permettent d'étudier le comportement des assemblages sans avoir besoin de réaliser des tests physiques. Elles reposent sur des outils tels que la méthode des éléments finis (FEM), qui modélise avec précision les contraintes et déformations. Ces simulations permettent également d'analyser les modes de rupture afin d'anticiper les zones de

faiblesse des assemblages. Enfin, elles facilitent l'optimisation des géométries, en ajustant les paramètres structurels pour améliorer la performance mécanique des joints.

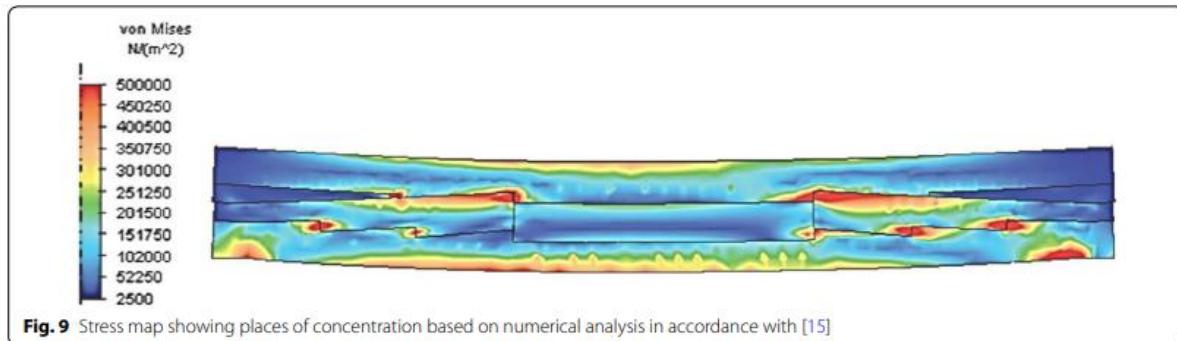


Figure 43 : Résultat de la simulation numérique [78]

Ces différentes méthodes sont souvent combinées pour obtenir une vision complète du comportement des assemblages et ainsi proposer des solutions adaptées à leur renforcement.

5.2 Analyse mécanique : méthodes et résultats

5.2.1 Objectif

L'objectif de ce document est de mettre en avant une solution pour répondre aux besoins et contraintes de l'architecture durable. Pour cela, une solution est d'imaginer un module structurel en bois, aux dimensions standards, qui s'assemblerait par des joints s'inspirants du Kigumi, comme imaginé sur la figure 44. L'assemblage de ce module se ferait alors au niveau des angles de la structure. La suite de ce travail se concentrera alors sur des joints d'angle.



Figure 44 : Exosquelette en bois d'un cube [86]

5.2.2 Recherche de joints d'angles

5.2.2.1 Logiciel de conception Tsugite

L'article [23], explore la conception de joints inspirés du Kigumi. L'article présente Tsugite, un système interactif pour la conception et la fabrication de joints en bois utilisés dans les structures à ossature bois. La fabrication manuelle de tels joints est complexe et peut prendre du temps.

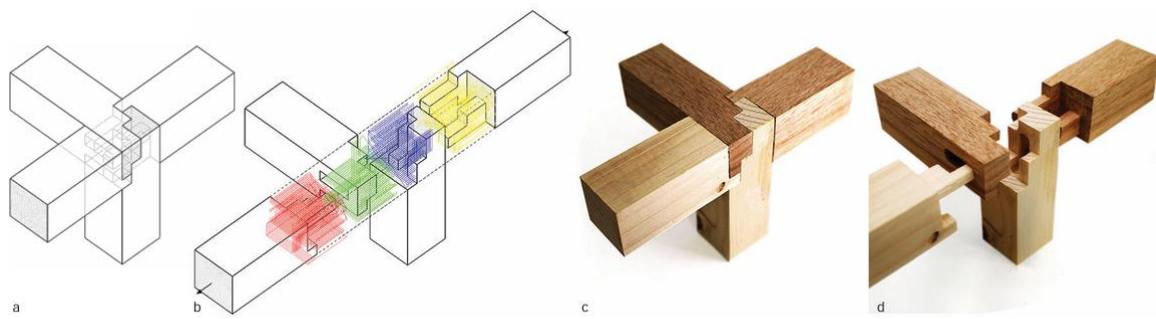
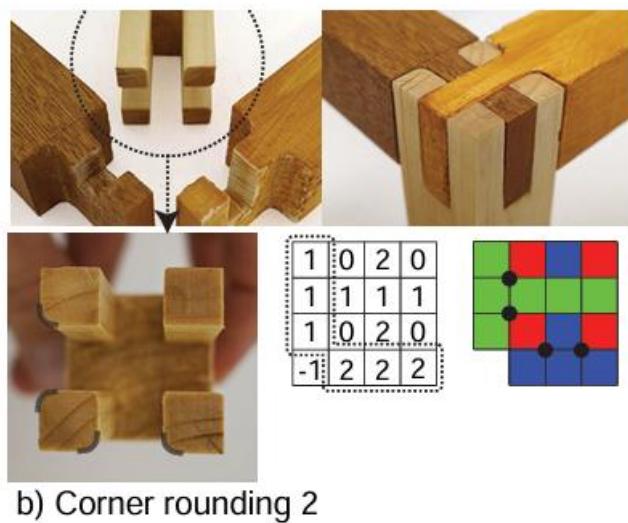


Figure 1. Connecting four timbers designed and CNC-fabricated using the Tsugite system. a) Interface screenshot of closed joint. b) Interface screenshot of open joint with a preview of milling paths. c) Fabricated joint closed. d) Fabricated joint open.

Figure 45 : Exemple de joint conçu par le logiciel Tsugite [23]

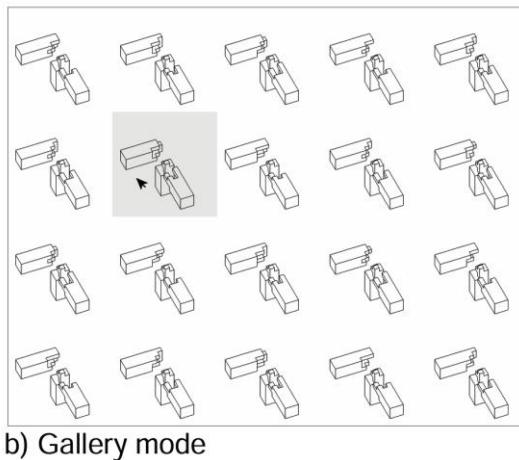
Tsugite utilise une grille 3D de voxels comme espace de conception, permettant une analyse géométrique efficace et une recherche combinatoire. L'interface comprend deux modes : l'édition manuelle et la galerie. En mode édition manuelle, l'utilisateur édite un joint et reçoit des suggestions et un retour graphique en temps réel. En mode galerie, l'utilisateur peut visionner et sélectionner des joints faisables précalculés.



b) Corner rounding 2

Figure 46 : Explication de la création du joint bridle par le logiciel Tsugite [23]

Parmi les illustrations de l'article, l'attention est donc portée sur les joints d'angles. Plusieurs géométries sont proposées, et seront utilisées en tant qu'inspiration pour le choix d'assemblages étudiés dans la suite de ce travail.



b) Gallery mode

Figure 47 : Mode galerie du logiciel Tsugite [23]

5.2.2.2 Assemblages d'angles traditionnels japonais

Dans les livres [1] et [2], les joints à enfourchements sont présentés. L'assemblage d'angle repose sur un principe fondamental : la fourche, dans laquelle une pièce de bois vient s'insérer. Ce procédé, utilisé depuis les premières constructions en bâtons en Europe septentrionale, connaît aujourd'hui un regain d'intérêt dans l'architecture moderne.

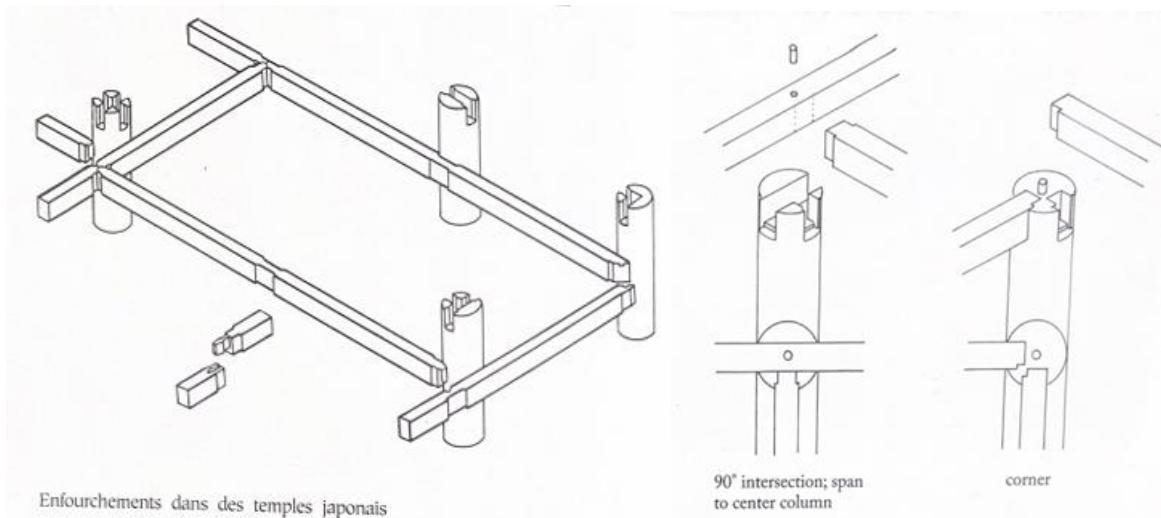


Figure 48 : Joint d'enfourchement dans la littérature japonaise [1] [2]

L'enfourchement simple consiste à réaliser des entailles dans les montants afin d'y loger les traverses.

Pour les temples au Japon des colonnes et poutres de liaison pénétrantes étaient fréquemment utilisées. L'ensemble de la structure repose sur vingt colonnes périphériques et six colonnes internes. Ces éléments sont solidement reliés par des poutres de liaison pénétrantes réparties sur quatre niveaux : à la base, à hauteur de taille, à mi-hauteur du mur et au sommet des colonnes.

Les colonnes internes ne sont pas renforcées par des liaisons à la base (en bleue) ni à hauteur de taille (en rose), voir figure 49. Pour les colonnes périphériques, la plupart des liaisons de base sont insérées dans des entailles profondes à l'extrémité inférieure. Celles situées aux ouvertures des portes sont installées légèrement au-dessus du sol, laissant un espace.

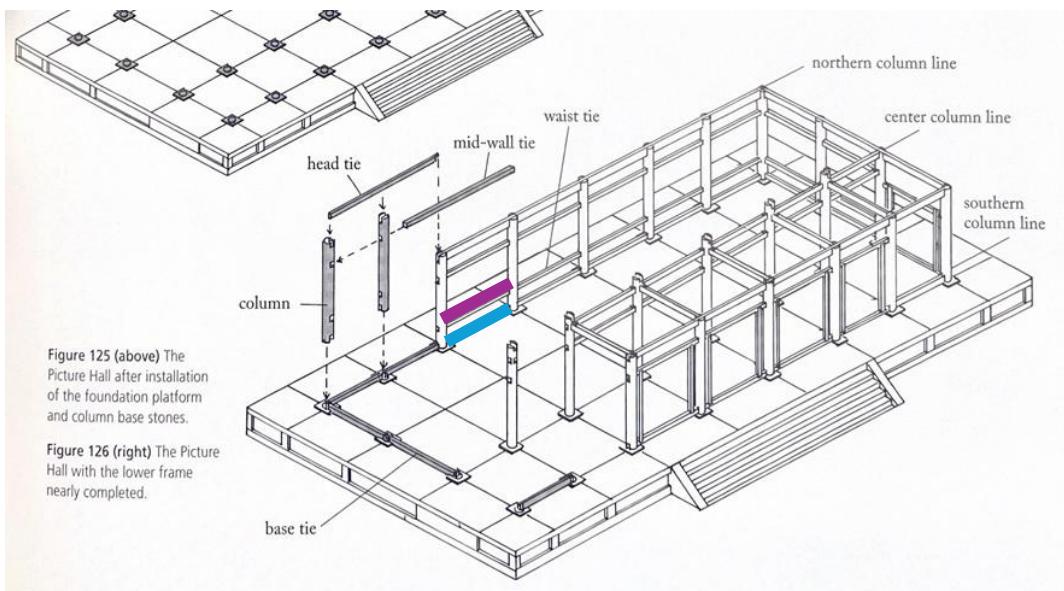


Figure 49 : Structure d'un temple japonais [2]

Les poutres de base, reposant directement sur la fondation, ont été placées en premier. Les colonnes ont ensuite été positionnées au-dessus, maintenues temporairement par des cales en bois, avec l'aide d'une petite grue.

Après cela, les poutres de mi-hauteur et les encadrements de porte ont été installés selon les besoins et maintenus par des coins de serrage. Enfin, les poutres supérieures ont été insérées dans des encoches situées à l'extrémité des colonnes.

L'article [44] décrit lui aussi une géométrie de joint à enfourchement dans son étude, aussi appelé joint bridle.

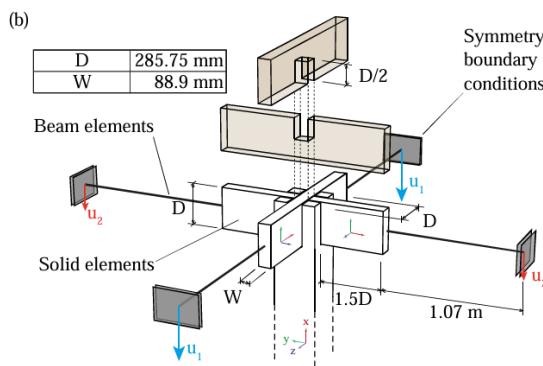


Figure 50 : Joint bridle [44]

5.2.2.3 Travail de menuisier

Lors des recherches, des vidéos d'assemblage de menuisier ont été visionnées. Certains joints proposés ont été sélectionnés pour la réalisation de ce de cette étude.[88]

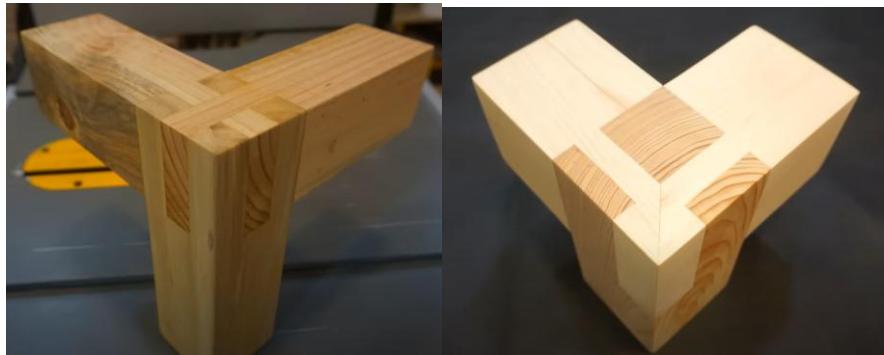


Figure 51 : Exemple de joint réalisé par un menuisier [88] (joint bridle à gauche)

5.2.3 Sélection des assemblages

En s'inspirant des types d'assemblages vus précédemment, 5 propositions ont été faites et seront utilisées dans la suite du travail. Les trois premières propositions ont été réalisées en reprenant le principe et la méthode de conception du Tsugite [23].

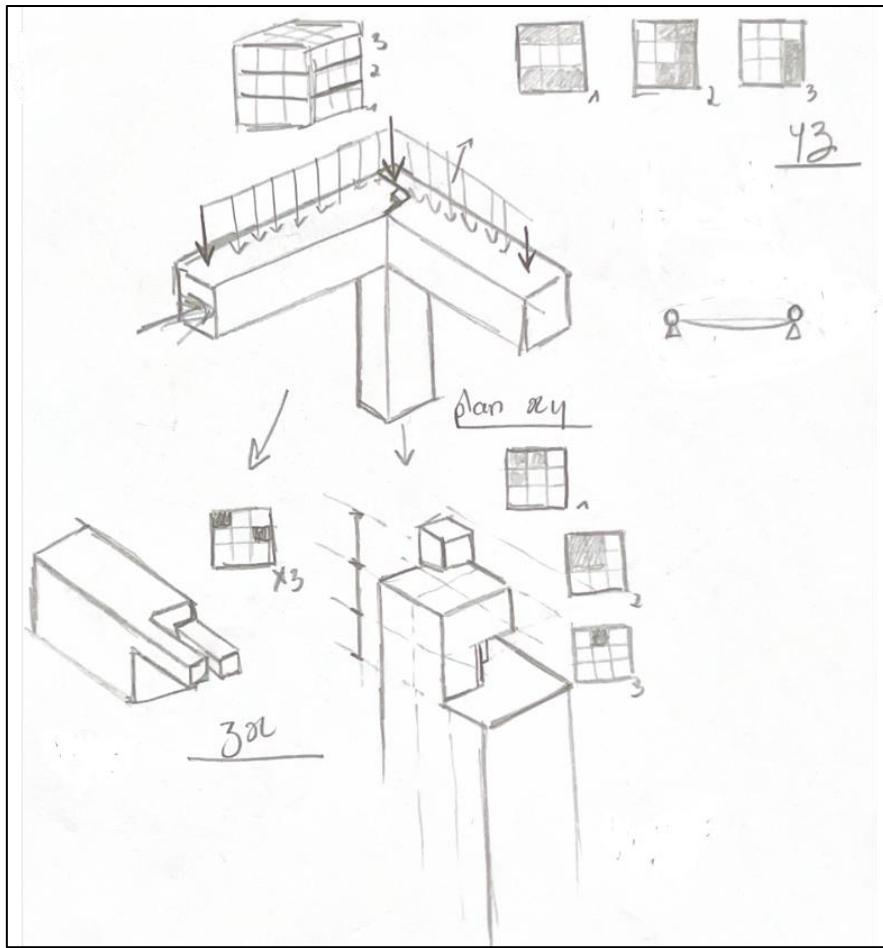


Figure 52 : Croquis réalisé à la main

La figure ci-dessus reprend le travail de réflexion du premier joint. Le principe s'articule autour du découpage d'un cube par 3 en trois directions, x, y et z. Chaque morceau du joint est conçu pour être complémentaire aux 2 autres.

Ces propositions ont été sujettes à une première analyse d'observation, visant à solutionner des problèmes potentiels pour la suite de l'analyse mécanique. Le second assemblage correspond donc à une version améliorée du premier, et le troisième est une amélioration du second.

On retrouve alors le premier assemblage (A), illustré sur la figure suivante, un assemblage à trois pièces (en rouge, bleu et jaune) de type joint en T à embrèvements.

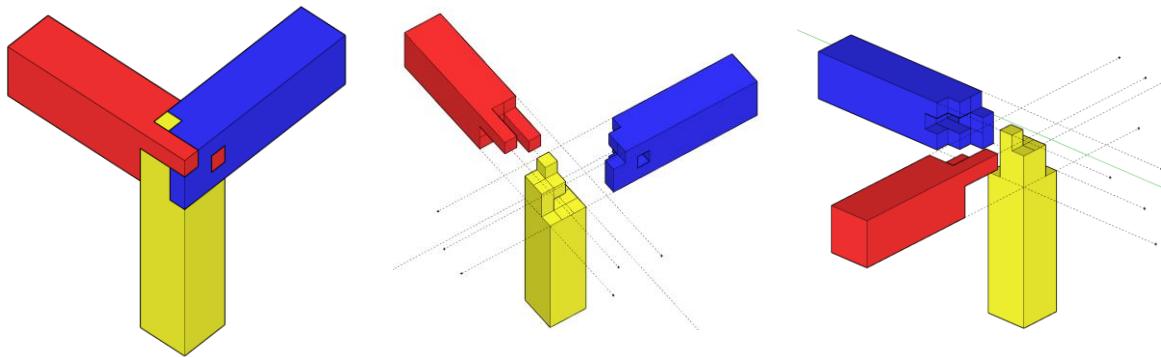


Figure 53 : Assemblage (A)

On remarque cependant quelques faiblesses au niveau de cet assemblage. On peut faire l'hypothèse que l'absence de connexion rigide entre les pièces rouge et bleue autorise un mouvement de pivot autour de l'axe longitudinal d'elles-mêmes. Si par exemple, l'on applique une charge verticale répartie sur la poutre rouge, cela pourrait induire alors un moment de torsion. En changeant la configuration de cet assemblage au niveau des connexions de la pièce rouge et bleue on pourra essayer de déterminer la déformation qui s'est faite dans la suite de l'étude.

On peut faire l'hypothèse que les queues d'aronde inversées (ou entailles imbriquées) dans les pièces rouge et bleue ne suffisent pas à verrouiller complètement leur rotation, en particulier si un jeu ou une déformation se manifeste.

Une seconde proposition (B) est alors faite pour améliorer ces potentiels défauts, une modification axée sur la pièce rouge, qui se répercute alors sur la pièce bleue. Aucune modification n'a été apportée sur la pièce jaune.

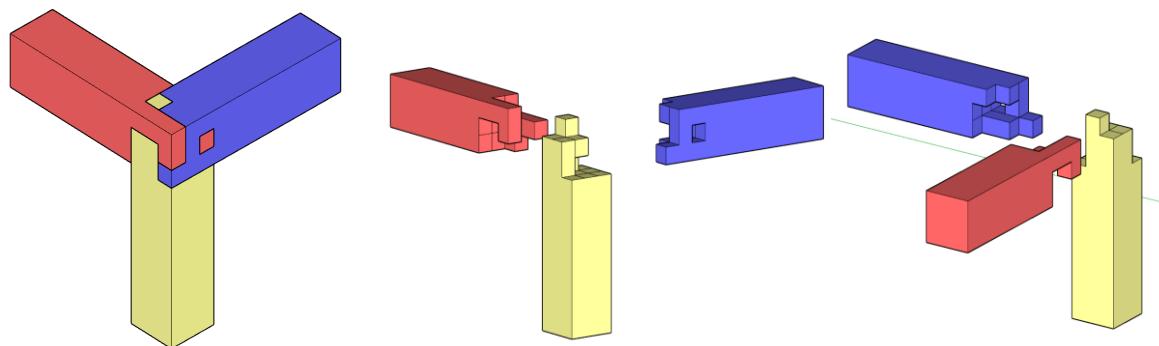


Figure 54 : Assemblage (B)

La pièce rouge est désormais emboîtée dans la pièce jaune et bleue, avec une entaille en L inversé, pour renforcer l'emboîtement et bloquer des degrés de liberté. On peut supposer que

l'emboîtement renforcé et l'ajustement élargi entre les pièces rouge et bleue améliorent la transmission des efforts horizontaux et augmentent la résistance à l'arrachement. Cette hypothèse pourra être analysé dans la suite de l'étude.

Cependant, la pièce rouge paraît toujours sensible à la rupture au niveau du L. La dernière proposition (C), corrige quant à elle cette faiblesse. Des modifications ont été réalisées sur les pièces jaune et rouge seulement.

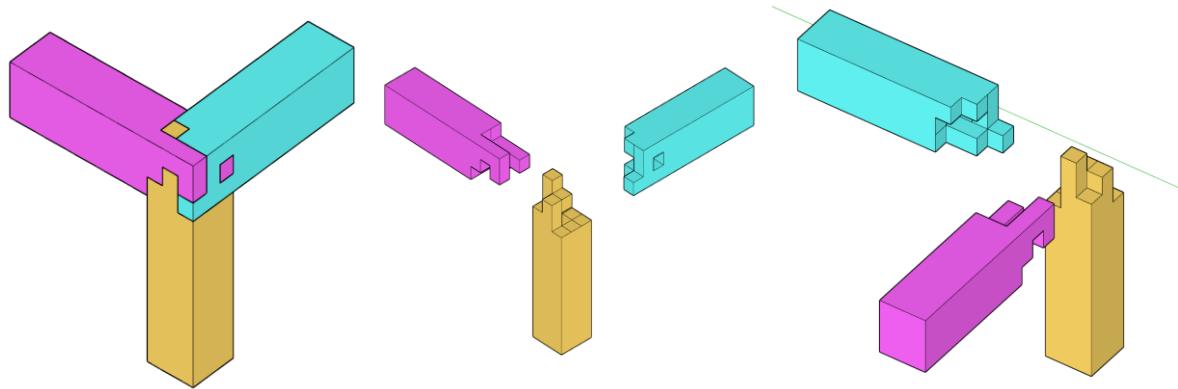


Figure 55 : Assemblage (C)

La pièce jaune centrale intègre désormais une double encoche latérale verticale, assurant un emboîtement plus profond et renforçant la stabilité des éléments horizontaux (rose et turquoise). Ce dispositif pourrait limiter la rotation des poutres.

L'encoche en pied-de-biche sur la poutre rose (à gauche) permet un verrouillage géométrique, empêchant tout déplacement latéral. Grâce à cette conception, la pièce rose est solidement maintenue tant sur le plan vertical qu'horizontal, garantissant une meilleure tenue sous charge.

Par ailleurs, ces types de joints sont très complexes à réaliser, de par leur géométrie et leur faisabilité. Pour cela, deux autres types de joints vont être étudiés en s'inspirant cette fois-ci de modèles plus réalistes, tirés de la littérature notamment.

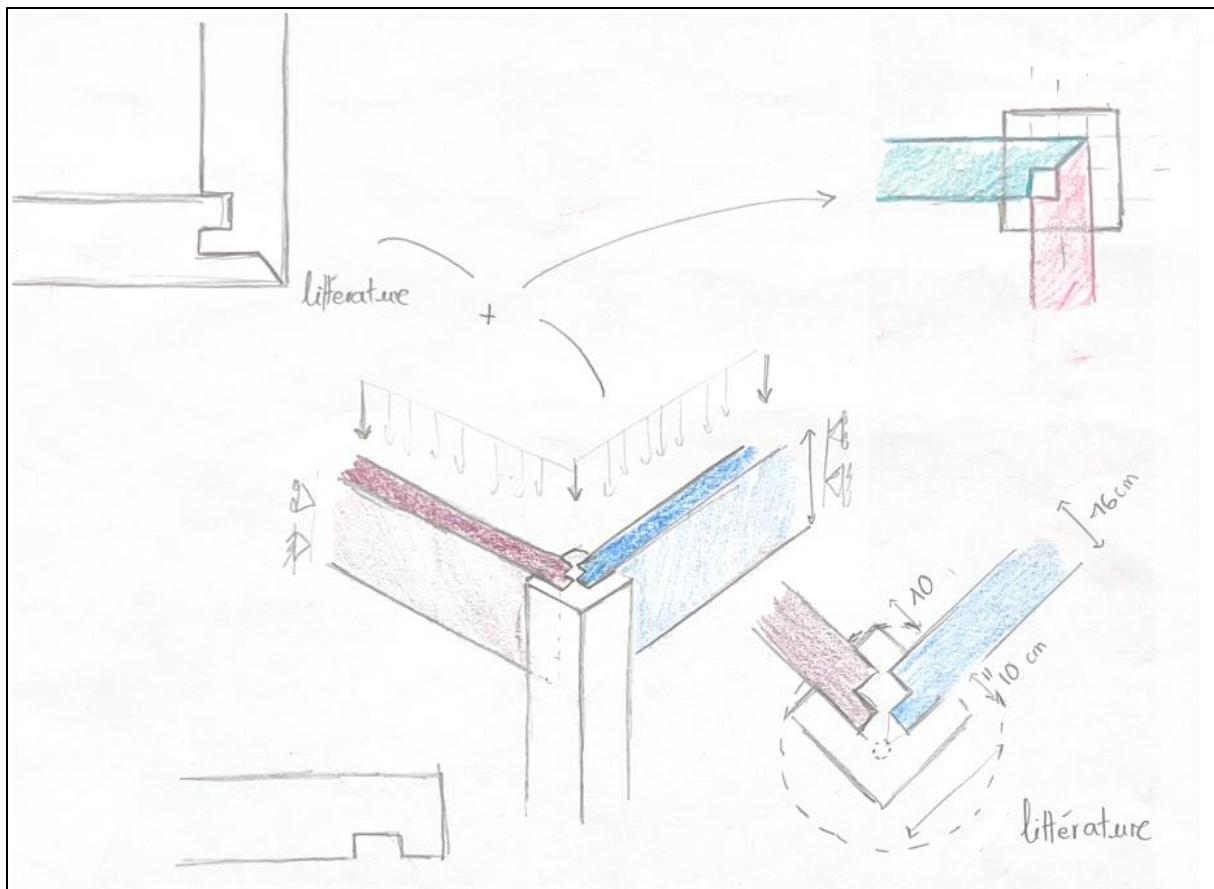


Figure 56 : Croquis des assemblages (D) et (E)

Les deux figures ci-dessous montrent le choix des assemblages (D) et (E).

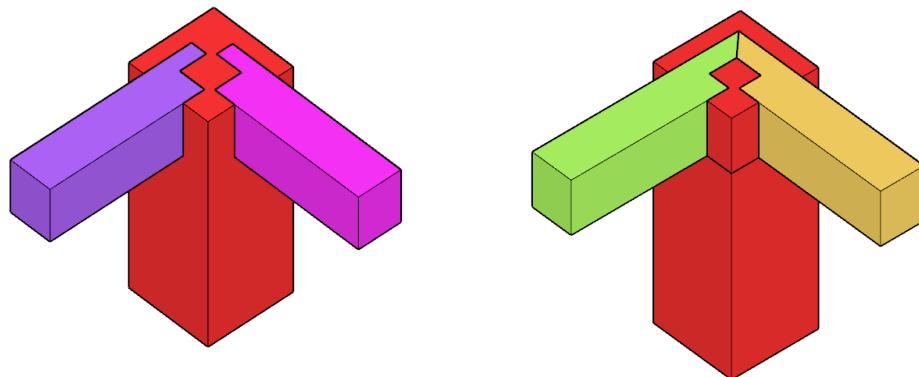


Figure 57 : Assemblage (D) et (E) finaux

5.2.4 Modélisation

5.2.4.1 Catia V5

Le logiciel CATIA V5 a été choisi pour réaliser l'ensemble de l'étude structurelle du projet. CATIA V5 est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Il permet la modélisation paramétrique en offrant la possibilité de créer des pièces et des assemblages tout en intégrant des contraintes intelligentes pour une conception précise. Il propose des outils avancés pour la conception mécanique, facilitant le développement de structures, de mécanismes et de systèmes complexes. De plus, il intègre des fonctionnalités de simulation et d'analyse, permettant aux ingénieurs de vérifier les performances des modèles avant leur fabrication, optimisant ainsi le processus de conception et réduisant les erreurs de production.

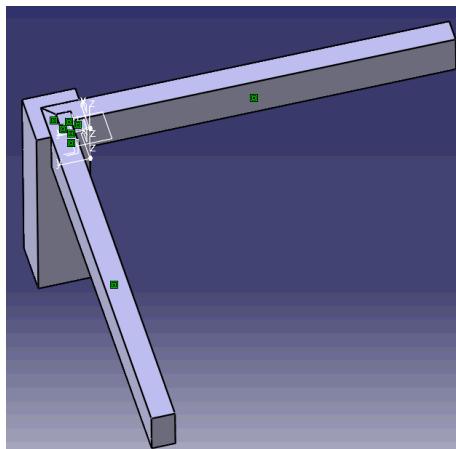


Figure 58 : Modèle du joint (E) réalisé et assemblé dans CATIA V5

5.2.4.2 Propriété du chêne

Pour la suite de l'étude, différents paramètres sont pris en compte, notamment le matériau choisi pour la simulation et ses propriétés. Comme énoncé dans les chapitres précédents, l'étude sera faite sur du bois, en particulier l'essence de chêne, utilisé par les Japonais pour les assemblages grâce à ses propriétés hautes de résistance et de durabilité, car c'est un bois dense.

MASSE VOLUMIQUE	entre 700 et 800 Kg/m ³ (bois mi-lourd à lourd)
MODULE DE YOUNG	12 500 à 13 500 MPa en moyenne
DURETÉ MONNIN	3,5 à 4,2 N/mm (bois mi-dur à dur)
STABILITÉ	Moyenne

Figure 59 : Propriété du bois de chêne [91]

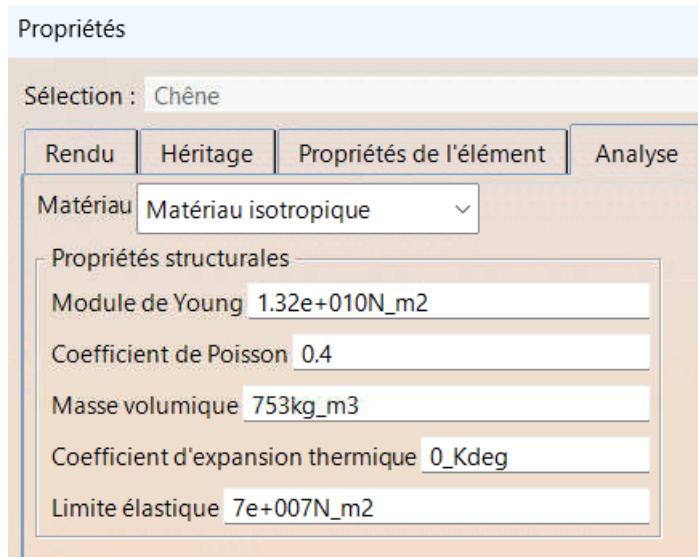


Figure 60 : Propriété du bois de chêne implémenté dans le logiciel CATIA V5

Les valeurs ci-dessus ont été implémentée dans le logiciel. Plusieurs études ont été analysées afin de mettre en avant les propriétés élastiques du bois de chêne, y compris le coefficient de Poisson. Dans une étude [90], les coefficients de Poisson ont été mesurés dans les plans longitudinal-radial, radial-tangential et longitudinal-tangential, avec des valeurs de $VLR = 0.48 \pm 0.11$, $VRT = 0.34 \pm 0.05$ et $VRL = 0.32 \pm 0.06$. La valeur choisie ici est de 0.4, car le bois est un matériau isotrope, son coefficient Poisson ne pouvant pas dépasser 0.5.

5.2.5 Calculs par éléments finis

À la suite de la modélisation, les différentes parties des joints ont été assemblées dans CATIA *Assembly Design* en intégrant des contraintes de contacts surfaciques entre les différentes pièces. Par simplification, le modèle dessiné correspond à une demi-poutre, par un plan de symétrie.

Pour les calculs par éléments finis, l'atelier CATIA *Generative Structural Analysis* a été utilisé. L'assemblage ouvert, différentes contraintes vont être appliquées au modèle pour la simulation. Les conditions aux limites du modèles doivent être associée pour les calculs.

Tout d'abord, la pièce « poteaux » de tous les assemblages est encastrée en bas. Une charge répartie de 10000 N ($q/2$) est ensuite appliquée verticalement sur les trois pièces pour simuler une charge d'un plancher posé au-dessus de la structure, qui reprend aussi des charges permanentes et d'exploitation liées à un bâtiment. De plus, les contraintes mises précédemment, sont associées à des connexions de contact. Ces connexions permettent de simuler un comportement plus réaliste entre des composants, en laissant du jeu possible et un coefficient de frottement qui est pris en compte dans les calculs (0.3). Enfin, pour que le modèle corresponde au cas de charge étudié, c'est-à-dire une poutre sur 2 appuis simples, la translation

dans la longueur de la poutre est bloquée pour simuler un appui à rouleaux, et ainsi permettre le déplacement vertical de la poutre. Les figures suivantes expliquent le cas de charge modélisé.

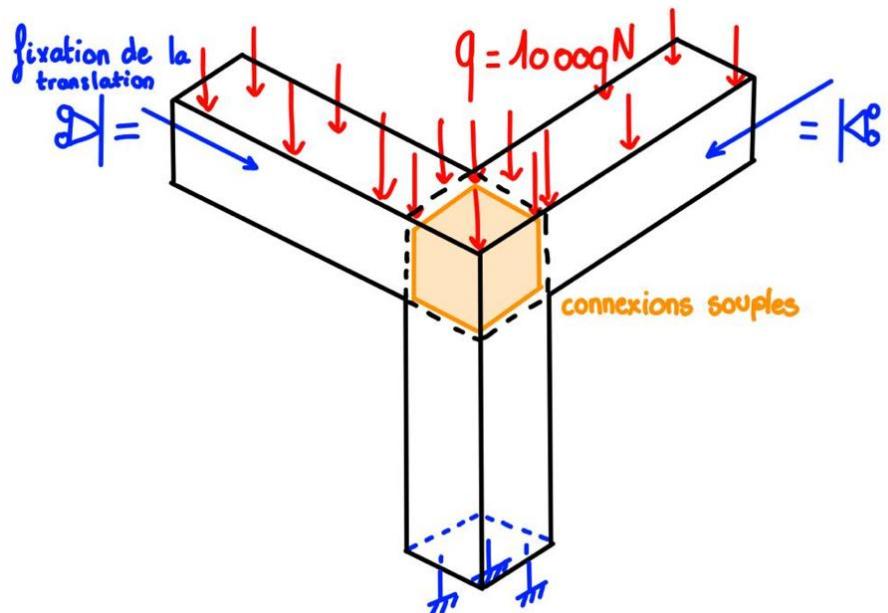


Figure 61 : Schéma de cas de charges pour un assemblage en bois

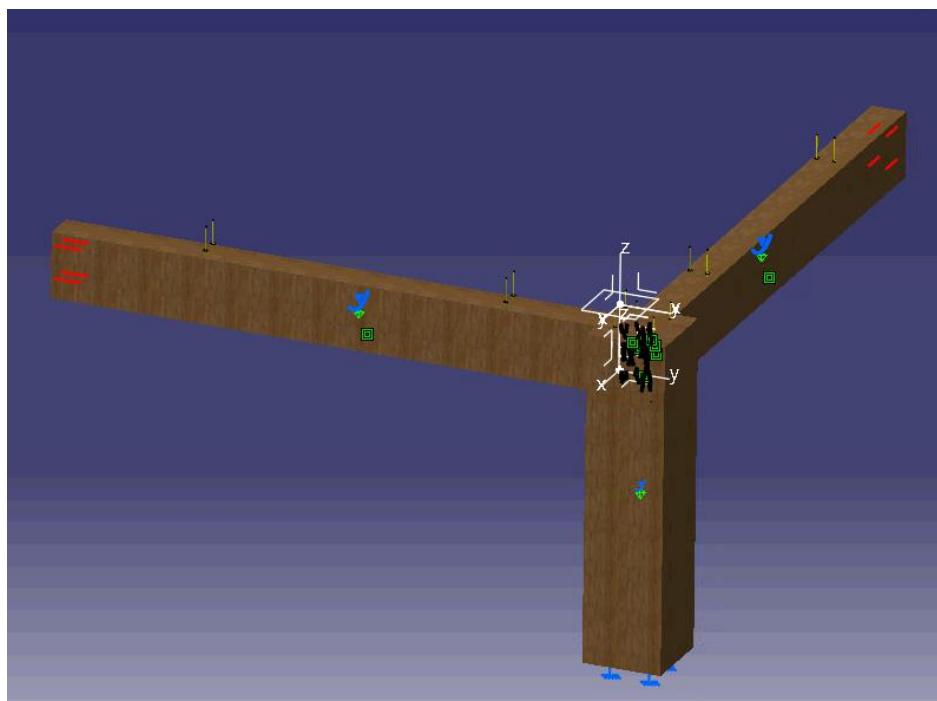


Figure 62 : Cas de charges sur CATIA V5 pour un assemblage

Pour affiner les résultats, les simulations ont été réalisées avec des maillages différents. Pour les assemblages (A), (B) et (C), le poteau et les poutres ont des sections de 30 cm par 30cm. Pour les deux assemblages, la section de poteau est de 36x36cm et pour les poutres de 16x30cm.

5.2.6 Résultats et analyse

5.2.6.1 Flèches

Assemblages (A), (B) et (C)

Le tableau suivant met en avant l'évolution des translations maximales en Z de chaque assemblage avec une convergence de maillage.

TRANSLATION MAX en Z = Flèche (mm)			
Visualisation dans CATIA (maillage 25mm)			
Maillage (mm) / Joints	A	B	C
5	1,2	1,52	0,918
10	1,16	1,45	0,891
25	1,14	1,33	0,861
40	1,09	1,21	0,819
60	0,954	1,02	0,744
80	0,926	0,9	0,664
Nombres d'éléments			
Maillage 5mm	4240634	4250003	4261713
Maillage 10 mm	667700	669278	670786
Maillage 25 mm	113667	113778	113493
Maillage 40 mm	38473	38474	38594
Maillage 60 mm	12949	12943	12967
Maillage 80 mm	5726	5765	5642

Tableau 1 : Résultats des translations max en Z des assemblage (A) (B) et (C)

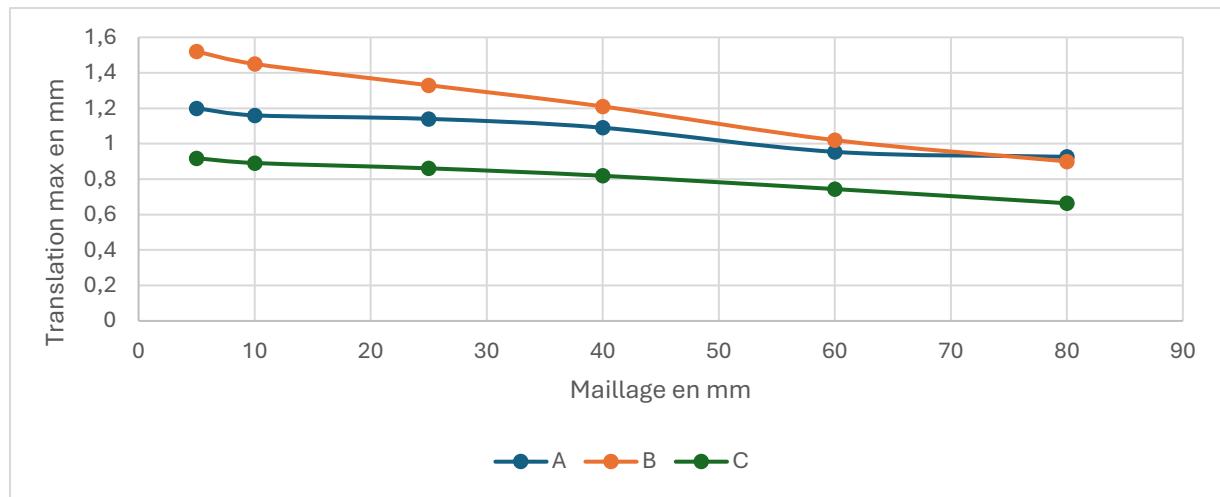


Figure 63 : Evolution des translations en fonction du maillage pour les assemblages (A), (B) et (C)

D'après la figure 63 ci-dessus, qui constitue étude de convergence du maillage, la courbe verte (C) représente l'assemblage le plus rigide, avec une déformation maximale de 0,918 mm pour un maillage de 5 mm. À l'inverse, la courbe B (orange) correspond à l'assemblage le plus flexible, affichant une flèche de 1,52 mm à maillage équivalent. La courbe A (bleue) se situe entre les deux, avec une déformation de 1,2 mm à 5 mm de maillage.

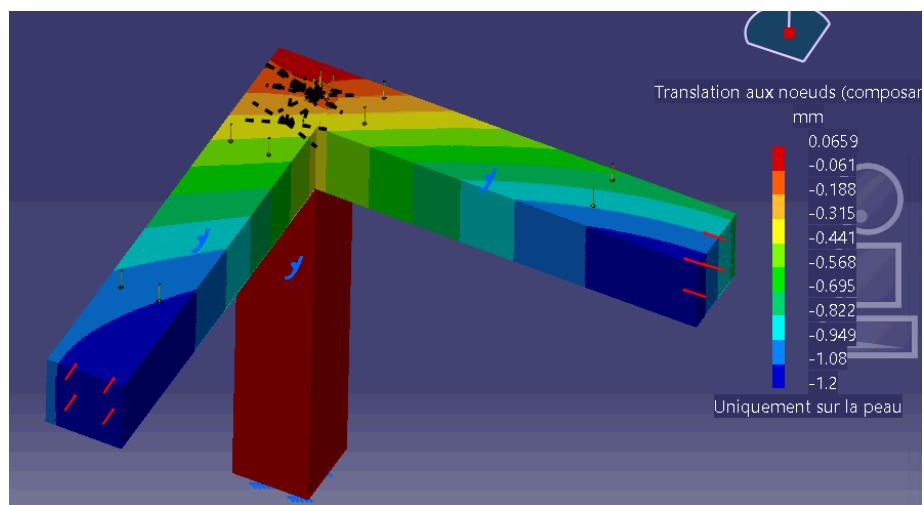


Figure 64 : Visualisation des efforts sur CATIA V5 de l'assemblage (A) avec un maillage de 5mm

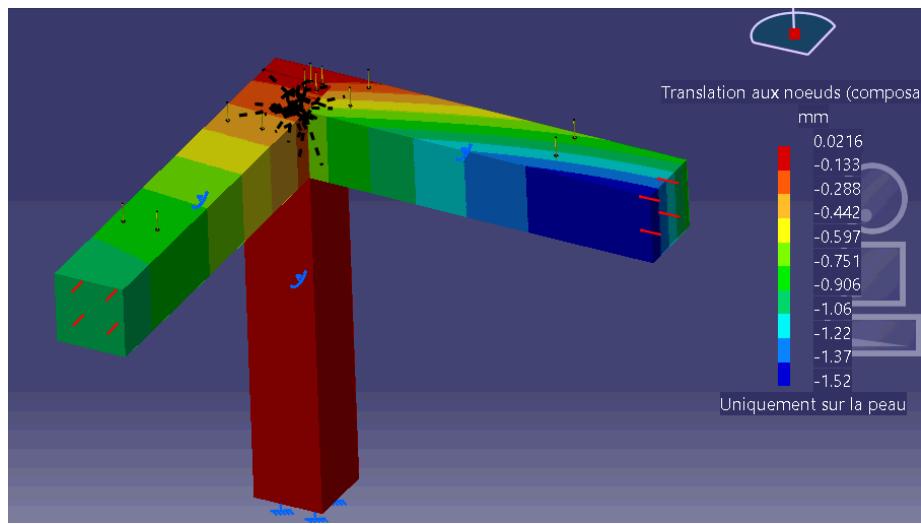


Figure 65 : Visualisation des efforts sur CATIA V5 de l'assemblage (B) avec un maillage de 5mm

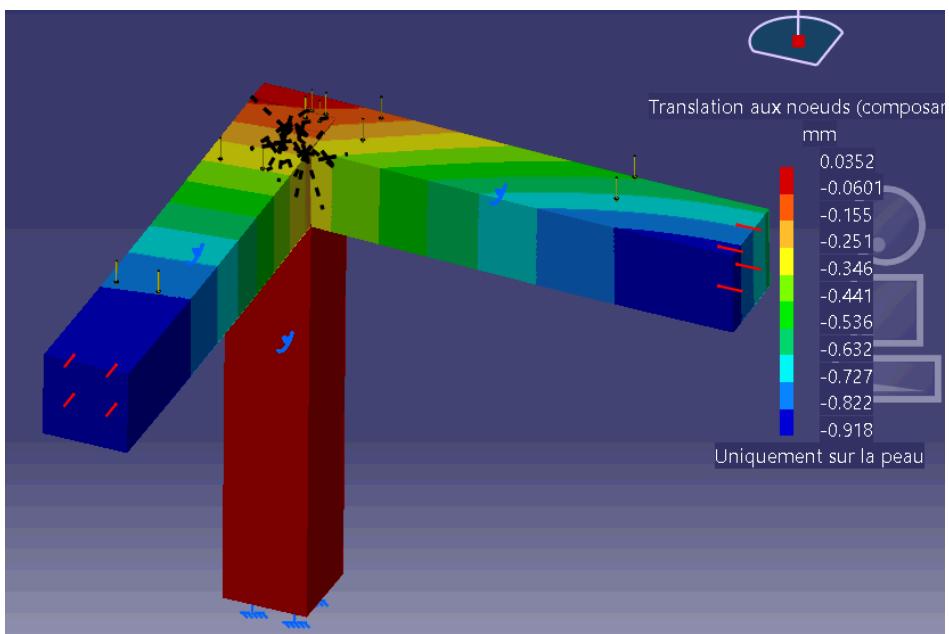


Figure 66 : Visualisation des efforts sur CATIA V5 de l'assemblage (C) avec un maillage de 5mm

La figure 64 correspond au premier assemblage proposé, on remarque que les deux poutres subissent une rotation dans leur axe longitudinal. Pour la figure 65, assemblage (B), on peut noter que la poutre de gauche (pièce bleue) subit moins de rotation, car le gradient des translations est presque perpendiculaire à la poutre par rapport à la figure 64. Cependant la flèche est supérieure, on passe de 1.2mm à 1.52mm, mais seulement sur la poutre de droite (pièce rouge). Une contrainte a été résolu mais cela implique une plus grande déformation de la pièce. Enfin le dernier assemblage (C), figure 66, on remarque que la rotation de la poutre de droite est aussi toujours présente, et celle de gauche est toujours résolue. Cependant la flèche a été

améliorer, on passe cette fois-ci de 1.52mm à 0.918mm. Cet assemblage semble être le plus performant d'un point de vue des translations selon l'axe Z.

De plus l'image ci-dessus semble bien démontrer la rotation de la pièce rouge lorsqu'on lui applique une charge, sur l'assemblage (B). Si la pièce n'en subissait pas, on ne verrait pas apparaître la face inférieure de la poutre sur la figure 68.

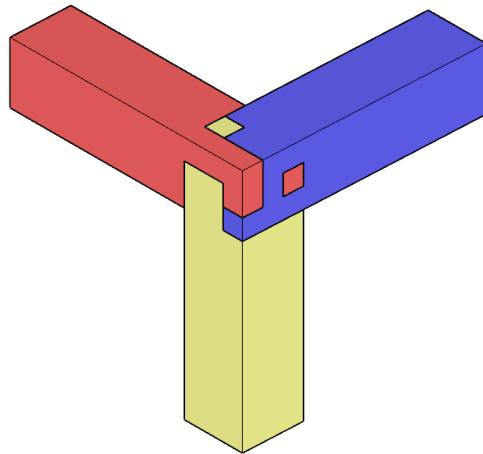


Figure 67 : Rappel de l'assemblage (B)

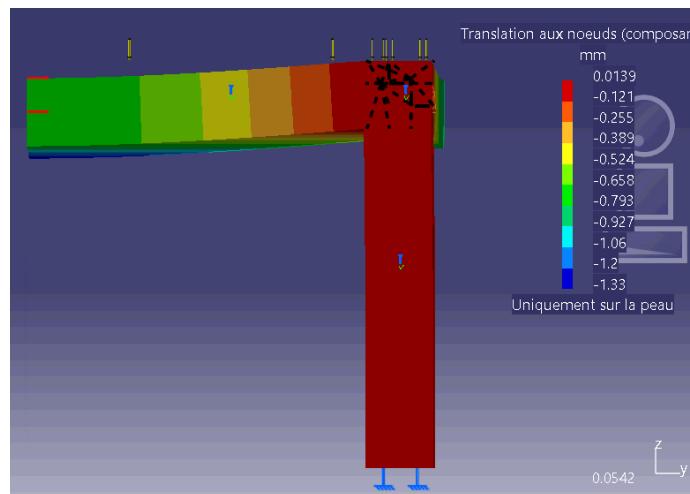


Figure 68 : Visualisation de la translation max en Z sur CATIA V5 de l'assemblage (B) avec un maillage de 25mm

Assemblages (D) et (E)

TRANSLATION MAX en Z = Flèche (mm)			
Visualisation dans CATIA (maillage 15mm)			
Maillage (mm) / Joints	D	E	
5		5.31	5.13
10		5.28	5.08
25		5.15	4.95
40		5.1	4.89
60		4.86	4.65
80		4.56	4.12
Nombres d'éléments			
Maillage 5mm		4745042	4694878
Maillage 10 mm		995866	1004628
Maillage 25 mm		101862	101171
Maillage 40 mm		36586	35916
Maillage 60 mm		16137	15961
Maillage 80 mm		5734	5300

Tableau 2 : Résultats des translations max en Z des assemblage (D) et (E)

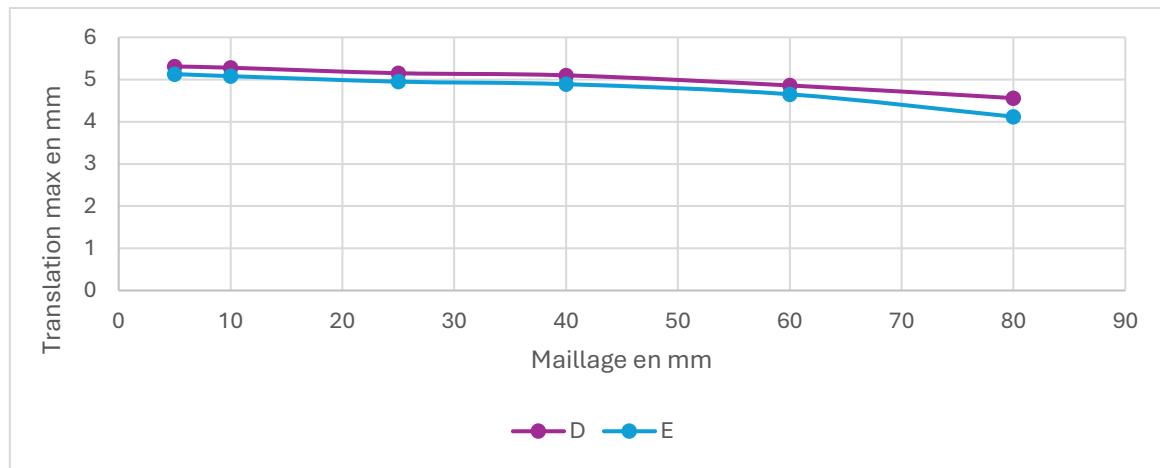


Figure 69 : Evolution des translations en fonction du maillage pour les assemblages (D) et (E)

D'après le graphique ci-dessus, qui constitue étude de convergence du maillage, la courbe turquoise (E) représente l'assemblage le rigide, avec une déformation maximale de 5.13 mm pour un maillage de 5mm. À l'inverse, la courbe (D) rose, correspond à l'assemblage le plus flexible, affichant une flèche de 5.31 mm à maillage équivalent.

Pour rappel, voici la forme que doit avoir une poutre en fonction de son cas de charge [92].

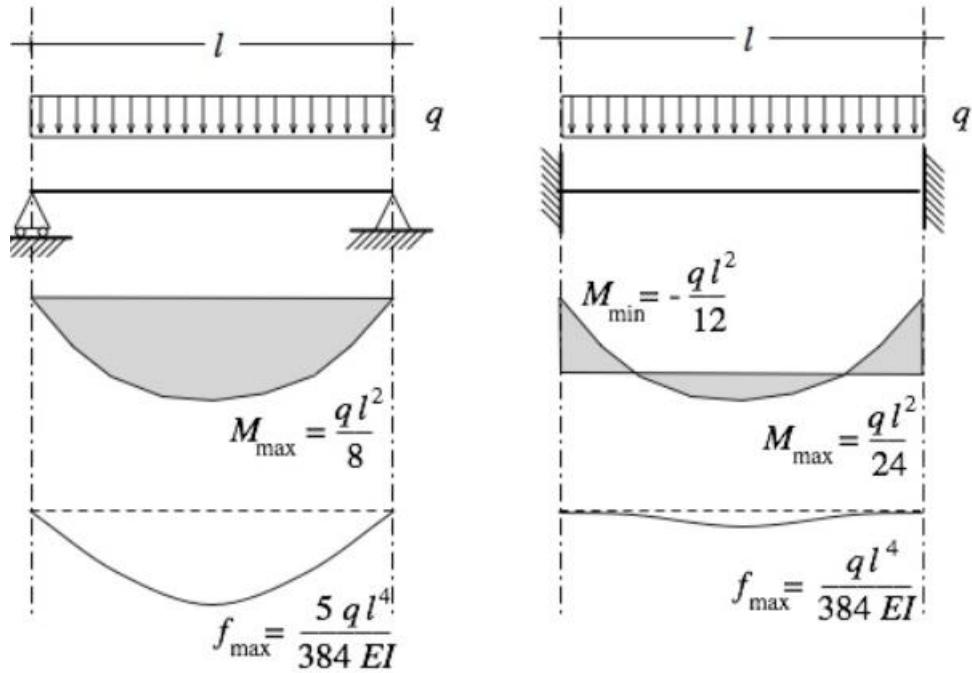


Figure 70 : Déformation d'une poutre selon son cas de charge [92]

Sur la figure 71, on observe le comportement de déformation de l'assemblage (E), maillage 10mm. On remarque que sa déformation correspond au cas de la poutre simplement appuyée, même si au niveau du joint, son comportement pourrait tendre vers celui d'une poutre doublement encastrée. L'hypothèse que les assemblages ont un comportement qui se situe entre celui des deux cas présentés à la figure 70, va être approfondis dans la suite de l'étude.

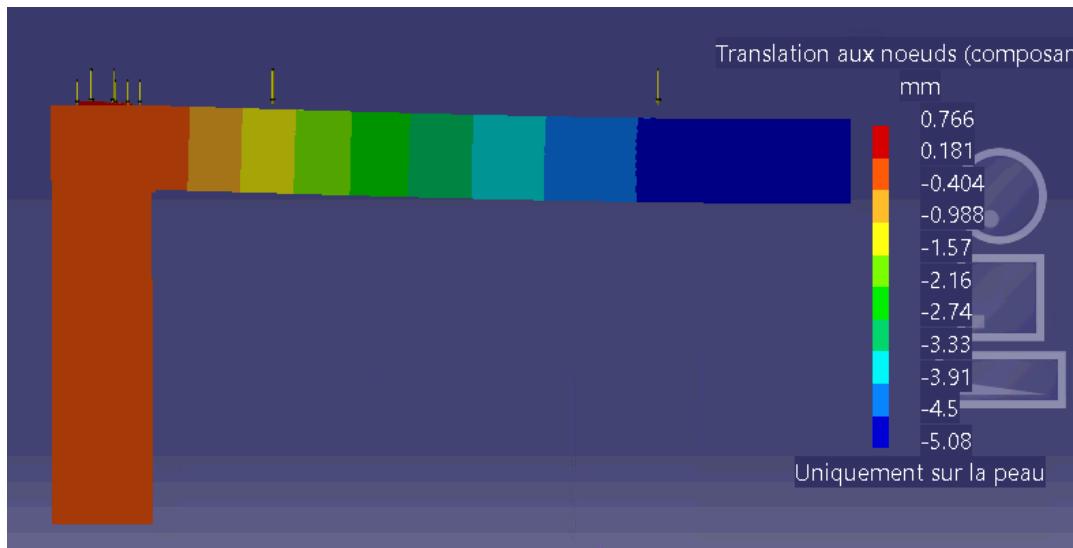


Figure 71: Visualisation des translations maximales en Z sur CATIA V5 de l'assemblage (E) avec un maillage de 10 mm

5.2.6.2 Contraintes de von mises

Dans CATIA V5, notamment dans le module *Generative Structural Analysis*, le calcul et l'affichage des contraintes de von Mises reposent sur une approche spécifique. Le logiciel applique la théorie de la contrainte équivalente de von Mises, qui permet de convertir un état de contrainte multiaxial en une valeur scalaire unique. Cette valeur est ensuite comparée à la limite d'élasticité du matériau pour évaluer le risque de rupture.

La formule de von Mises est calculée sur chaque nœud ou élément du maillage, en fonction des paramètres d'affichage choisis. Le niveau de raffinement du maillage influence directement la précision des résultats, offrant une meilleure résolution dans les zones critiques de la structure.

La contrainte équivalente est déterminée à partir des contraintes principales en un point donné, permettant de simplifier un état de contrainte tridimensionnel en une valeur scalaire unique.

Cette approche facilite la comparaison de l'état de contrainte local avec une limite matérielle, telle que la limite élastique (Re), pour évaluer la résistance du matériau.

$$Re > \sigma_{vm}$$

Dans notre cas $Re = 7.10^7 \text{ N/m}^2$.

Assemblages (A), (B) et (C)

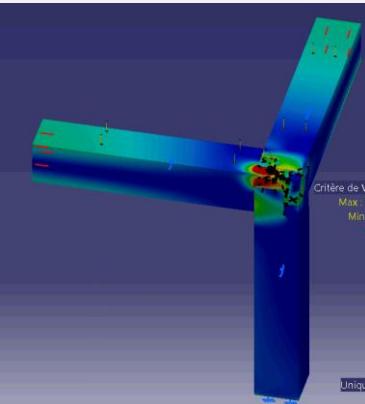
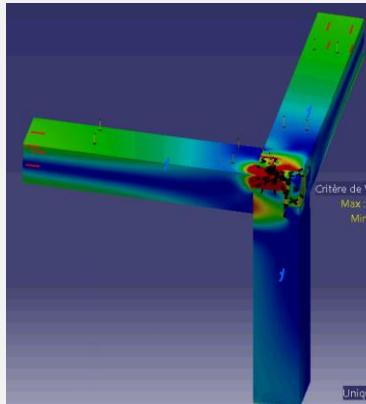
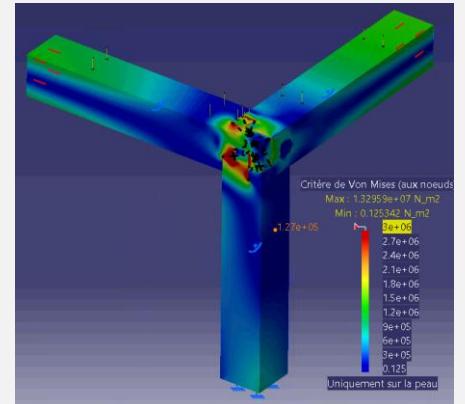
CONTRAINTE VON MISES MAX (en MPa)			
Visualisation dans CATIA (maillage 15mm)			
Maillage (mm) / Joint	A	B	C
5	12	14,8	13,3
10	9,62	10,6	10,5
25	7,6	7,45	7,9
40	6,9	8,5	7,56
60	6,1	8,73	5,37
80	4,36	4,3	6

Tableau 3: Résultats des contraintes de von Mises des assemblage (A), (B) et (C)

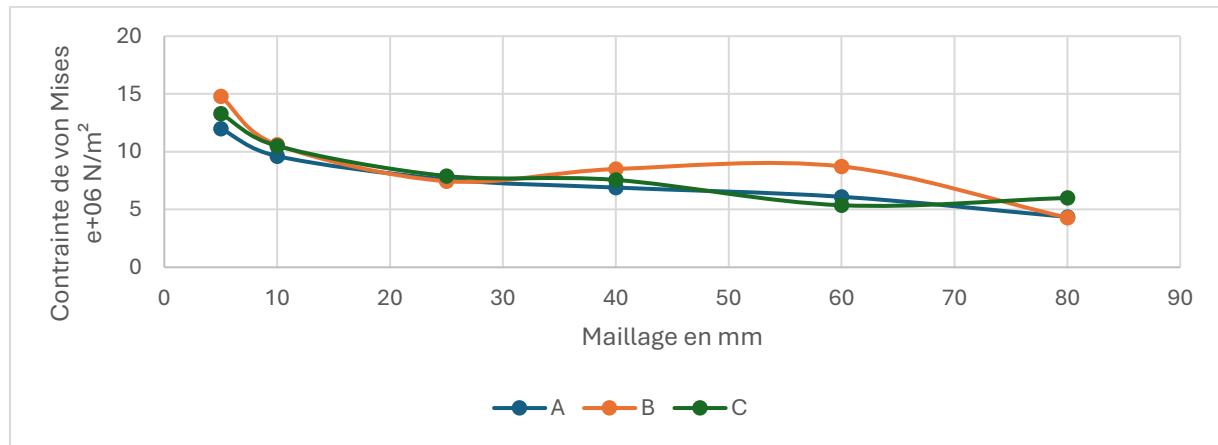


Figure 72 : Evolution des contraintes de von Mises maximales en fonction du maillage des assemblages (A), (B) et (C)

Il est montré ici que pour les assemblages A, B et C lorsque le maillage diminue les contraintes de von Mises tendent vers la même valeur. La non-convergence des valeurs avec la diminution du maillage, correspond à un cas de formes avec angle droit, ce qui correspond au modèle. Par lecture graphique, il est indiqué que cette valeur tend vers 13 MPa.

Cette valeur reste tout de même inférieure à Re (ie = 70 MPa), il n'y a donc pas de rupture du matériau dans aucun des assemblages proposés. Les assemblages (C) et (A), d'après le graphique ci-dessus, semblent être ceux qui subissent le moins de contraintes.

Assemblages (D) et (E)

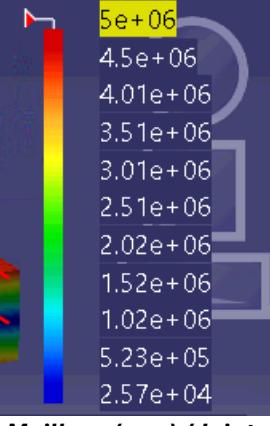
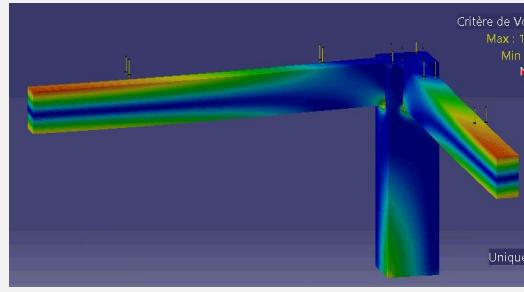
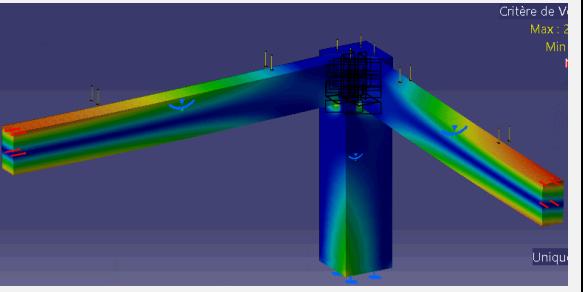
CONTRAINTE VON MISES MAX (en MPa)			
Visualisation dans CATIA (maillage 15mm)			
			
Maillage (mm) / Joint	D	E	
5		25	20,65
10		17	30
25		11	14
40		23	14
60		13	8,5
80		9,3	4,73

Tableau 4 Résultats des contraintes de Von Mises des assemblage (D) et (E)

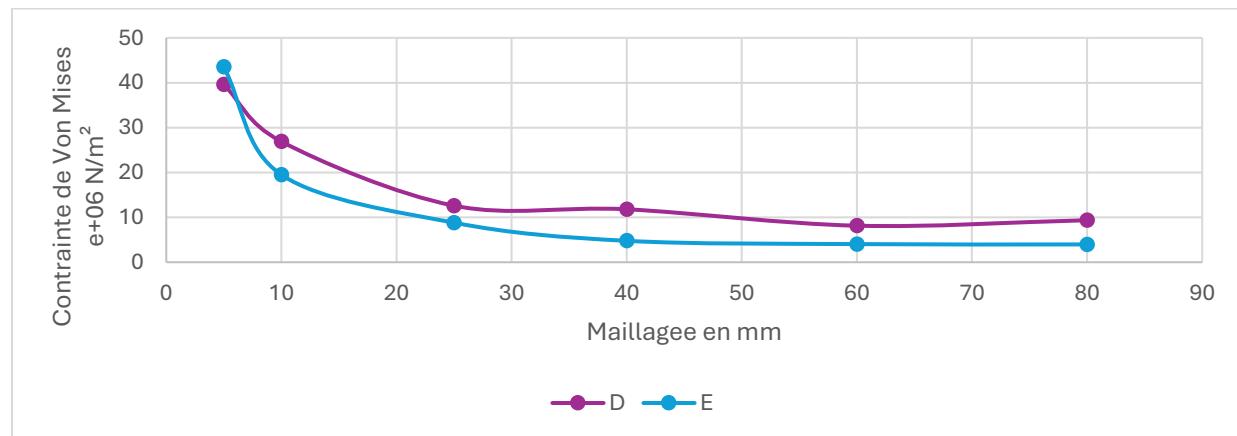


Figure 73 : Evolution des Contraintes de von mises maximales en fonction du maillage des assemblages (D) et (E)

Il est montré ici que pour les assemblages D et E lorsque le maillage diminue les contraintes de von Mises tendent vers la même valeur. La non-convergence des valeurs avec la diminution du maillage, correspond à un cas de formes avec angle droit, ce qui correspond au modèle. Par lecture graphique, il est indiqué que cette valeur tend vers 40 MPa au maillage le plus petit. Cette valeur reste tout de même inférieure à Re (ie = 70 MPa), il n'y a donc pas de rupture du matériau. L'assemblage (E), d'après le graphique ci-dessus, semble être celui qui subit le moins de contraintes.

Une coupe dans section du poteau, au niveau du bas des poutres a été réalisée pour comprendre la répartition des contraintes dans les assemblages. On remarque sur les figures 74 et 75, que les contraintes ne se concentrent pas au même endroit, dans l'assemblage D elles sont situées sur les poutres alors que pour le E elles se situent aussi au niveau du poteau.

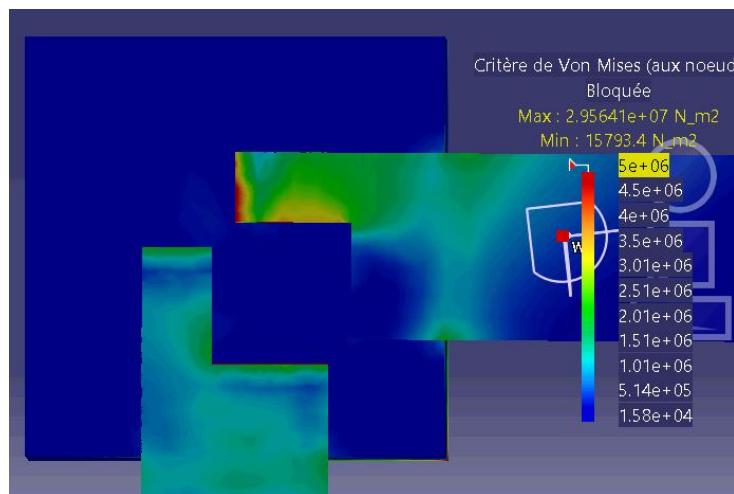


Figure 74 : Contrainte de von Mises vue en coupe dans le plan XY de l'assemblage (D) maillage 15mm

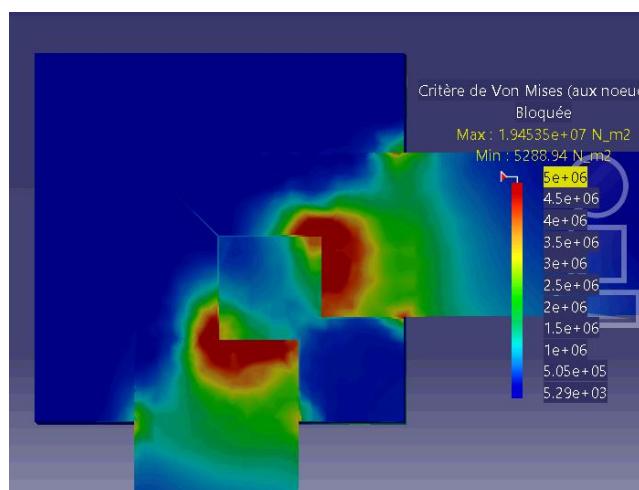


Figure 75: Contrainte de von Mises vue en coupe dans le plan XY de l'assemblage (E) maillage 15mm

5.2.6.3 Interprétation et comparaison des moments féchissants des pièces (A), (B) et (C)

Dans cette partie, une vérification des moments dans les poutres est effectuée. Deux coupes dans la section des poutres ont été réalisées, figure 76. Cela a pour objectif de déterminer si le modèle simulé correspond au cas d'une poutre simplement appuyée sur deux appuis (moment nul), ou bien si elle est encastrée, ou alors il se trouve à mi-chemin. La visualisation des contraintes en x au niveau des figures dans les tableaux 5 et 6, suggère l'hypothèse de la présence de moment dans les poutres, et donc d'un encastrement.

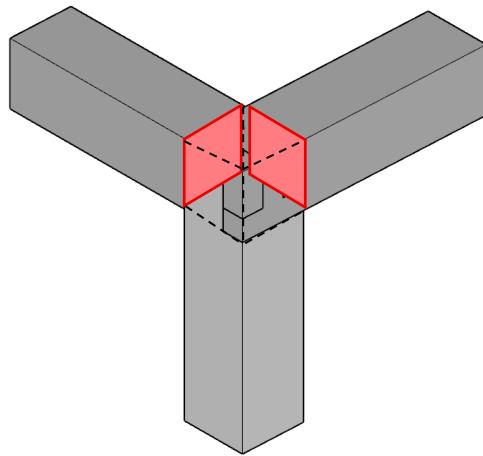


Figure 76 : Sections étudiées

Une poutre sollicitée en flexion pure est soumise seulement à des contraintes normales (tension et compression) car en fléchissant (pliant) une partie des fibres de la poutre (supérieures ou inférieures) est soumise à de la compression et l'autre partie à de la tension. Tandis qu'une poutre sollicitée en flexion simple est soumise aussi à des contraintes normales mais aussi à des contraintes de cisaillement (dû à l'effort tranchant) [93].

La contrainte normale en flexion pour n'importe quelle poutre est :

$$\sigma = \frac{M \times y}{I}$$

Où :

- M : moment de flexion maximum (en valeur absolue)
- y : distance de l'axe neutre à l'extrémité la plus éloignée de la section
- I : moment d'inertie par rapport à l'axe neutre

Il est alors possible d'écrire :

$$M = \frac{\sigma \times I}{y}$$

Avec : $I = \frac{b \times h^3}{12}$ donc $M = \frac{b \times h^2}{6} \times \sigma$ car $y = \frac{h}{2}$

Dans notre cas :

- $b = 30\text{cm}$
- $h = 30\text{cm}$
- La contrainte σ est extraite des modèles (valeurs aux nœuds) Catia pour les calculs, et exprimée par les images dans les tableaux pour chaque cas étudié.

Assemblage / Contraintes perpendiculaire s à la section	A	B	C
Section ZX Valeur principale			
Section ZX Valeur absolue			
Contrainte max (valeurs aux nœuds)	$\sim 0.35 \text{ MPa}$	$\sim 0.45 \text{ MPa}$	$\sim 0.27 \text{ MPa}$
Moment calculé max	1.57kNm	2.025kNm	1.215kNm

Tableau 5 : Comparaison des moments des assemblages (A), (B) et (C) dans une section ZX

Cette comparaison permet de mettre en avant les contraintes et moments dans la pièce rouge des trois assemblages. On remarque que l'ajout d'une entaille en L dans l'assemblage (B) a peut-être réduit la rotation, mais les contraintes ont augmenté au niveau de son raccord à sa base, et donc le moment le moment est lui aussi augmenté.

En revanche l'ajustement apporté dans l'assemblage (C) montre que les contraintes se sont réparties dans la pièce (image des valeurs absolues), et que le moment maximum a presque été divisé de moitié.

On s'intéresse maintenant à la pièce bleue.

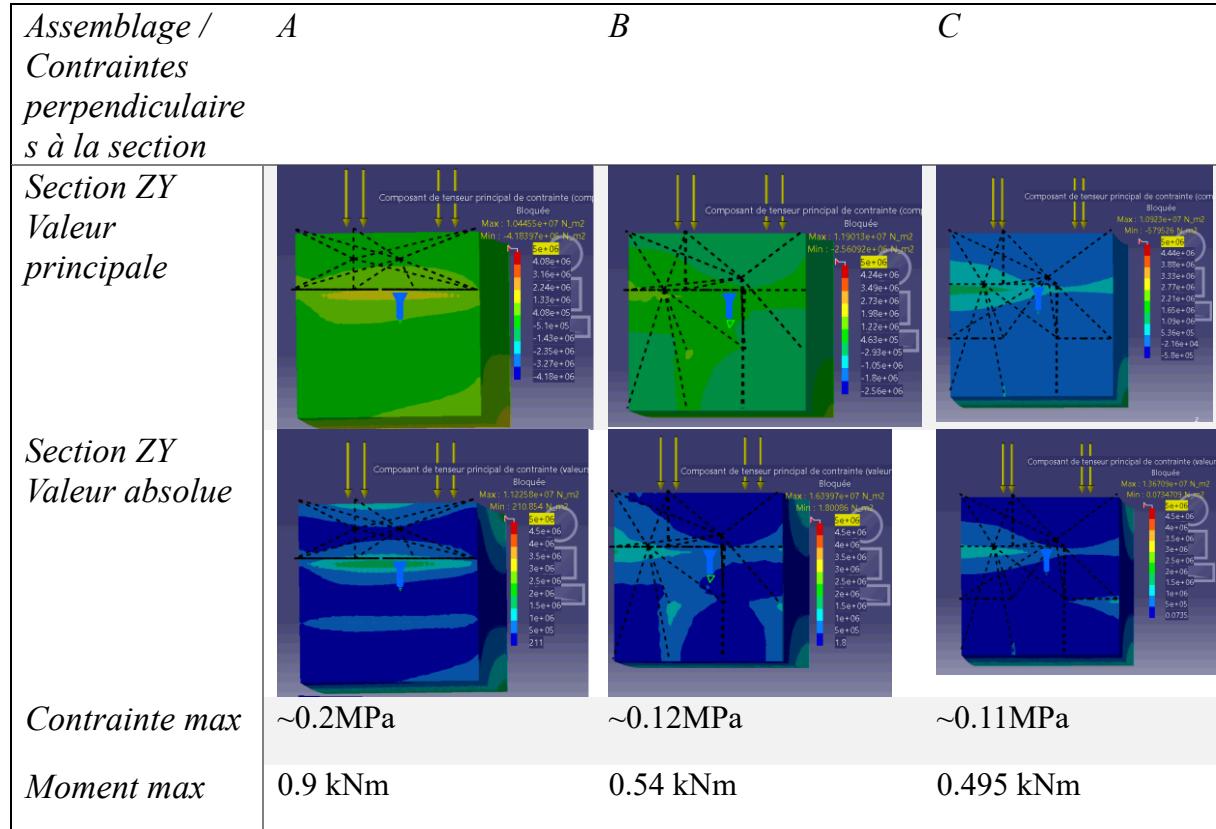


Tableau 6 : Comparaison des moments des assemblages (A), (B) et (C) dans une section ZY

Cette comparaison permet de mettre en avant les contraintes et moments dans la pièce bleue des trois assemblages. On remarque que l'ajout les modifications de l'assemblage (B) a peut-être réduit la rotation, et les contraintes diminuées au niveau de son raccord à sa base, et donc le moment est lui aussi diminué. En revanche l'ajustement apporté dans l'assemblage (C) montre que les contraintes se sont réparties dans la pièce (image des valeurs absolues), le moment étant encore diminué. L'assemblage (C) semble encore une fois être celui qui apporte les meilleurs résultats.

5.2.6.4 Calcul des Moments des joints (D) et (E)

Dans cette partie, une vérification des moments dans les poutres est effectuée. Une coupe dans la section des poutres (en rouge sur la figure 77), a été réalisée. Cela a pour objectif de déterminer si le modèle simulé correspond au cas d'une poutre simplement appuyée sur deux appuis (moment nul), ou bien si elle est encastrée, ou si cela correspond à un assemblage semi-rigide. La visualisation des contraintes en x au niveau des figures 78 et 79, suggère l'hypothèse de la présence d'un moment dans la poutre, et donc d'un encastrement.

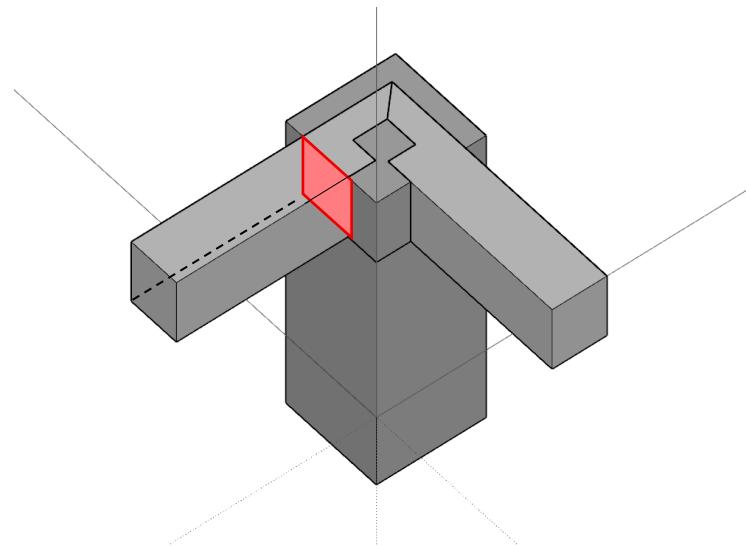


Figure 77 : Schéma de la section de poutre étudiée

Assemblage (D)

Pour le calcul du moment fléchissant M à partir de la répartition réelle des contraintes en x , on reprend les données de base ainsi que les valeurs récoltées lors de l'analyse par éléments finis :

- Section : $0,16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$
- Contraintes principales en N/m^2
 - $\sigma_x \text{ max} \approx 3,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 3,5 \text{ MPa}$
 - $\sigma_x \text{ min} \approx 485 \text{ N/m}^2$

Répartition visiblement non linéaire : la contrainte est plus forte en bas (donc en compression) et faible en haut (traction faible), figure 78 (Image de droite, valeur absolue).

Formule du moment fléchissant à partir de la contrainte normale dans une section :

$$M = \int_A \sigma_x (y) \cdot y \cdot dA$$

Une approximation de la contrainte est prise par tranches horizontales C, et il y est intégré numériquement :

$$M \approx \sum_i \sigma_{xi} \cdot y_i \cdot \Delta A$$

Où :

σ_{xi} = contrainte en x moyenne dans la tranche i,

y_i = position verticale de la tranche par rapport à la fibre neutre (axe horizontal central),

$\Delta A = b \cdot \Delta y$, Aire d'une partie de la section, de largeur b et de hauteur Δy .

Une découpe de la hauteur (30 cm) en 6 tranches de 5 cm est faite avec :

- Centre à $\pm 0,15$ m \rightarrow axe neutre à $y = 0$
- Tranches centrées à $y = \{-0.125, -0.075, -0.025, +0.025, +0.075, +0.125\}$ m

Il est donc maintenant possible d'approximer les valeurs de contrainte sur chaque tranche à partir d'une récolte de valeur à un nœud correspondant à la tranche étudiée, image de gauche.

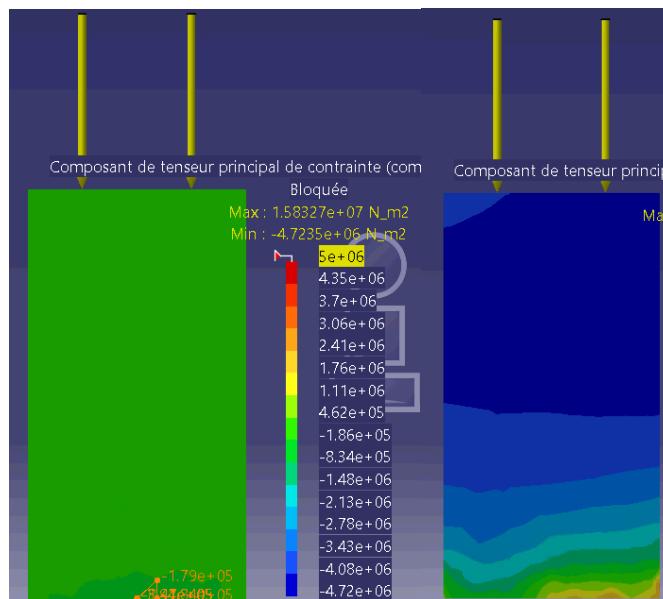


Figure 78 : Répartition des contraintes en x (en valeur absolue) de la section de la poutre à la sortie du poteau de (D)

Contribution des moments M_i :

Avec $b = 0,16 \text{ m}$, $\Delta y = 0,05 \text{ m}$, $\Delta A = b \cdot \Delta y = 0,008 \text{ m}^2$

$$M_i = \sigma_i \cdot y_i \cdot \Delta A$$

Il faut également penser à convertir σ en $\text{Pa} = \text{MPa} \times 10^6$

Tranche	$\sigma_i (\text{MPa})$	$y_i (m)$	$M_i = \sigma_{xi} \cdot y_i \cdot \Delta A (\text{Nm})$
1 (bas)	~ - 0.145	-0.125	+ 145 Nm
2	~ - 0.031	-0.075	+ 18.6 Nm
3	~ - 0.011	-0.025	+ 2.2 Nm
4	~ 0.019	+0.025	+ 3.8 Nm
5	~ 0.125	+0.075	+ 7.5 Nm
6 (haut)	~ 0.315	+0.125	+ 315 Nm

Tableau 7 : Calcul des moments en fonction des contraintes relevées pour chaque tranche

$$M_{total} = 145 + 18.6 + 2.2 + 3.8 + 7.5 + 315 = 492.1 \text{ Nm}$$

Soit :

$$M_{encastrement} = 0.49 \text{ kNm}$$

Assemblage (E)

De même pour le calcul du moment fléchissant M de l'assemblage (E), à partir de la répartition réelle des contraintes en x , on reprend les données de base ainsi que les valeurs récoltées lors de l'analyse par éléments finis :

- Section : $0,16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$
- Contraintes principales en N/m^2
 - $\sigma_{x max} \approx 2.41 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 2.41 \text{ MPa}$
 - $\sigma_{x min} \approx 485 \text{ N/m}^2$

Répartition visiblement non linéaire : la contrainte est plus forte en bas (donc en compression) et faible en haut (traction faible), figure 79 (Image de droite, valeur absolue).

De même que pour le cas précédent, une approximation de la contrainte est prise par tranches horizontales C, et il y est intégré numériquement :

$$M \approx \sum_i \sigma_{xi} \cdot y_i \cdot \Delta A$$

Où :

σ_i = contrainte moyenne dans la tranche i,

y_i = position verticale de la tranche par rapport à la fibre neutre (axe horizontal central),

$$\Delta A = b \cdot \Delta y$$

Une découpe de la hauteur (30 cm) en 6 tranches de 5 cm est faite avec :

- Centre à $\pm 0,15$ m → axe neutre à $y = 0$
- Tranches centrées à $y = \{-0.125, -0.075, -0.025, +0.025, +0.075, +0.125\}$ m

Il est donc maintenant possible d'approximer les valeurs de contrainte sur chaque tranche à partir d'une récolte de valeur à un nœud correspondant à la tranche étudiée.

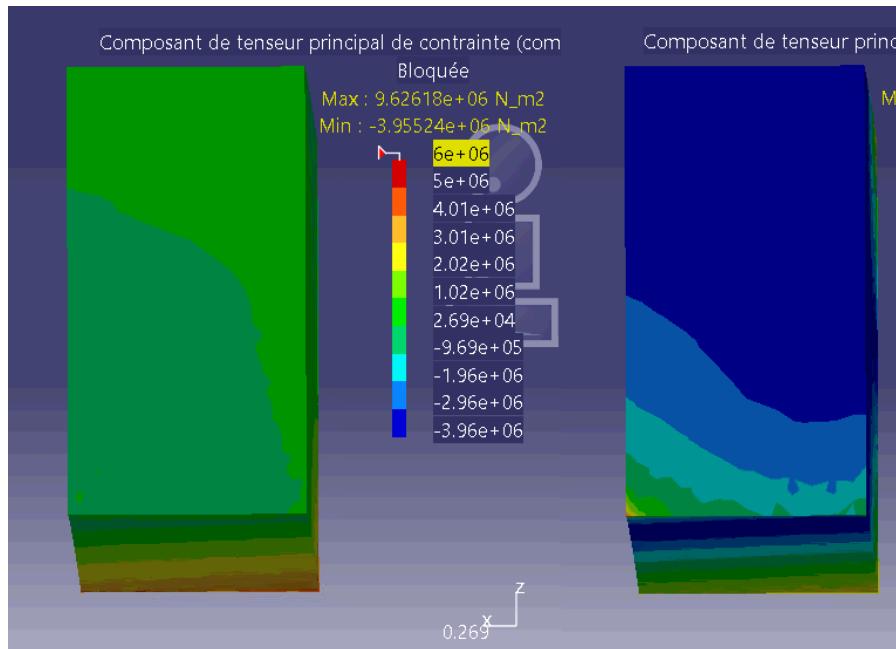


Figure 79 : Répartition des contraintes en x (gauche) et en valeurs absolues (droite) de la section de la poutre à la sortie du poteau de (E)

Contribution des moments M_i :

Avec $b = 0,16$ m, $\Delta y = 0,05$ m, $\Delta A = b \cdot \Delta y = 0,008$ m²

$$M_i = \sigma_i \cdot y_i \cdot \Delta A$$

Il faut également penser à convertir σ en $\text{Pa} = \text{MPa} \times 10^6$

<i>Tranche</i>	$\sigma_i (\text{MPa})$	$y_i (m)$	$M_i = \sigma_i \cdot y_i \cdot \Delta A (\text{Nm})$
1 (bas)	~ - 0.43	-0.125	+ 430 Nm
2	~ - 0.012	-0.075	+ 7.2 Nm
3	~ - 0.042	-0.025	+ 8.4 Nm
4	~ 0.034	+0.025	+ 6.8 Nm
5	~ 0.24	+0.075	+ 14.4 Nm
6 (haut)	~ 0.28	+0.125	+ 280 Nm

Tableau 8 : Calcul des moments en fonction des contraintes relevées pour chaque tranche

$$M_{total} = 430 + 7.2 + 8.4 + 6.8 + 14.4 + 280 = 746.8 \text{ Nm}$$

Soit :

$$M_{encastrément} = 0.75 \text{ kNm}$$

En comparaison avec l'assemblage précédent, le moment est supérieur cela indique que l'assemblage (E) est plus « encastré » que l'assemblage (D).

5.2.7 Calculs théoriques

5.2.7.1 Calcul pour les assemblages (A), (B) et (C)

Valeurs utiles

- $Q = 20000\text{N}$ soit $q = Q/L = 5555.56 \text{ N/m}$, la charge appliquée aux poutres
- $L = 3.6 \text{ m}$, longueur de la poutre
- $E = 1.32 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, le module de Young du chêne
- $b = 0.3\text{m}$, largeur de la poutre
- $h = 0.3\text{m}$, hauteur de la poutre

Cas 1 : Flèche d'une poutre sur 2 appuis simples

Le moment d'inertie de la poutre, qui dépend de ses dimensions, est donné par la formule :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Ainsi :

$$I = \frac{0.3 \times (0.3)^3}{12} = 0.000675 \text{ m}^4$$

La flèche maximale d'une poutre appuyée aux deux extrémités sous charge uniformément répartie est donnée par :

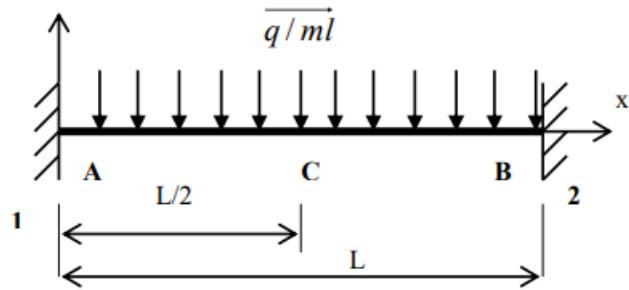
$$f_{max} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Substituons les valeurs :

$$f_{max} = \frac{5 \times 5555.56 \times (3.6)^4}{384 \cdot 1.32 \times 10^{10} \times 0.000675} \approx 1.36 \text{ mm}$$

Ainsi par le calcul, la valeur de la flèche maximale de la poutre sous cette charge est d'environ 1.36mm.

Cas 2 : Flèche d'une poutre doublement encastrée



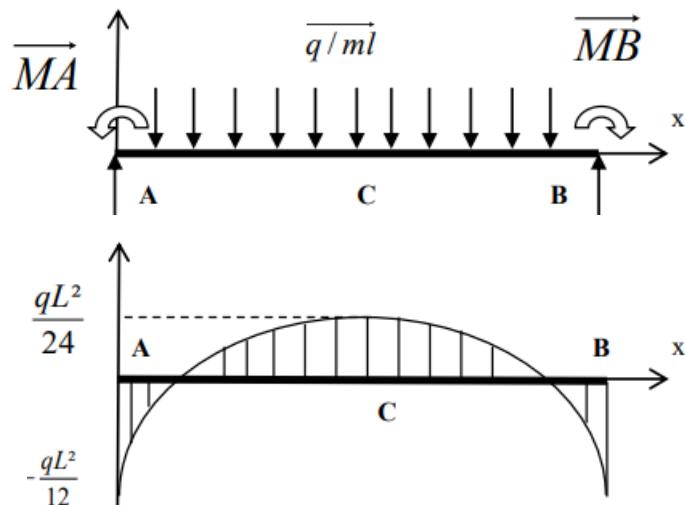
Pour une poutre doublement encastrée, la formule de la flèche maximale sous charge uniformément répartie est :

$$f_{max} = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Après application numérique :

$$f_{max} = 0.272 \text{ mm}$$

Cas 3 : Calculs du moment induit dans le cas 2



Dans le cas d'une poutre doublement encastrée, la formule du moment fléchissant M_f en $x=0$ de l'assemblage est :

$$M_f = \frac{q \cdot L^2}{12}$$

Après application numérique on obtient :

$$M_f = -\frac{5555.6 \times 3.6^2}{12} = -6.1 \text{ kNm}$$

5.2.7.2 Calcul de la flèche assemblages (D) et (E)

Valeurs utiles

- $Q = 20000\text{N}$ soit $q = Q/L = 4000 \text{ N/m}$, la charge appliquée aux poutres
- $L = 5 \text{ m}$, longueur de la poutre
- $E = 1.32 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, le module de Young du chêne
- $b = 160 \text{ mm}$, largeur de la poutre
- $h = 300 \text{ mm}$, hauteur de la poutre

Cas 1 : Flèche d'une poutre sur 2 appuis simples

Le moment d'inertie de la poutre, qui dépend de ses dimensions, est donné par la formule :

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Ainsi :

$$I = \frac{0.16 \times (0.3)^3}{12} = 0.00036 \text{ m}^4$$

La flèche maximale d'une poutre appuyée aux deux extrémités sous charge uniformément répartie est donnée par :

$$f_{max} = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Substituons les valeurs :

$$f_{max} = \frac{5 \times 4000 \times (5)^4}{384 \times 1.32 \times 10^{10} \cdot 0.00036} \approx 6.86 \text{ mm}$$

Ainsi par le calcul, la valeur de la flèche maximale de la poutre sous cette charge est d'environ 6.86mm. Ce calcul est essentiel pour vérifier la déformabilité et assurer la fiabilité de la structure.

Cas 2 : Flèche d'une poutre doublement encastrée

Pour une poutre doublement encastrée, la formule de la flèche maximale sous charge uniformément répartie est :

$$f_{max} = \frac{q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Après application numérique :

$$f_{max} = 1.37 \text{ mm}$$

Cas 3 : Calculs du moment induit dans le cas 2

Comme vu pour les assemblages précédents, dans le cas d'une poutre doublement encastrée, la formule du moment fléchissant M_f en $x=0$ de l'assemblage est :

$$M_f = -\frac{q \cdot L^2}{12}$$

Après application numérique on obtient :

$$M_f = -\frac{4000 \times 5^2}{12} = -8.3 \text{ kNm}$$

5.2.8 Comparaison et discussion théorique et modèle numérique

Tableau récapitulatif des résultats obtenus :

	Théorique 2 appuis simple	Théorique double encastrement	A	B	C
Flèche en mm	1.360	0.272	1.200	1.520	0.918

Tableau 9 : Tableau synthétique de la flèche max des assemblages (A), (B), (C)

	Théorique 2 appuis simple	Théorique double encastrement	D	E
Flèche en mm	6.86	1.37	5.31	5.13

Tableau 10: Tableau synthétique de la flèche max des assemblages (D), (E)

	Théorique 2 appuis simple	Théorique double encastrement	A	B	C
Moment en kNm	0	- 6.1	1.57	2.025	1.215

Tableau 11: Tableau synthétique du moment des assemblages (A), (B), (C)

	Théorique 2 appuis simple	Théorique double encastrement	D	E
Moment en kNm	0	- 8.3	0.49	0.75

Tableau 12: Tableau synthétique du moment des assemblages (D), (E)

Les résultats précédents montrent que les poutres d'assemblages se situent entre un cas de poutre sur deux appuis et un cas de poutres encastrées aux extrémités, en effet la valeur des flèches dans le modèle numérique est légèrement inférieure pour la plupart des cas. L'existence d'un moment montre déjà que ces poutres ne correspondent pas à la simplification d'un modèle simplement appuyé mais entre appui simple et d'un double encastrement, soit un assemblage semi-rigide. Les valeurs de ces moments permettent de confirmer les résultats précédents, car ceux-ci ne correspondent pas aux valeurs théoriques calculées au préalable, mais se situent entre les deux. Les assemblages (C) et (E) semblent donc être les deux assemblages les plus performants car leur flèches et contraintes de von Mises sont les plus faibles, ils semblent le plus s'apparentés à un assemblage semi-rigide.

Chapitre 6 : Prototypage par un menuisier

Ce chapitre présente la réalisation par un menuisier de deux prototypes, celui de l'assemblage (E) en bois et celui de l'assemblage (B) en impression 3D. Les prochaines sections détaillent le cahier des charges, le coût, les méthodes de fabrication ainsi que le retour d'expérience sur chacun de ces prototypes de la part du professionnel chargé de cette mission.

6.1 Prototype en essence de chêne

6.1.1 Cahier des charges

Le prototype de l'assemblage (E) a été conçu à partir de bois en chêne massif, figure 80, un bois naturellement imputrescible et riche en tanins, ce qui élimine la nécessité d'un traitement spécifique. La structure est composée d'un poteau de 8×8 cm d'une longueur de 20 cm, ainsi que de 2 traverses de 19 cm de long avec une section de 4×5 cm.



Figure 80: Morceau de bois de chêne utilisé pour le prototype

Afin de faciliter la fabrication, un modèle 3D SketchUp côté a été utilisé comme référence figure 81. Une impression 3D du motif (face supérieure de l'assemblage, figure 82) a permis de vérifier si les proportions étaient respectées et ainsi d'assurer une cohérence dans l'assemblage.

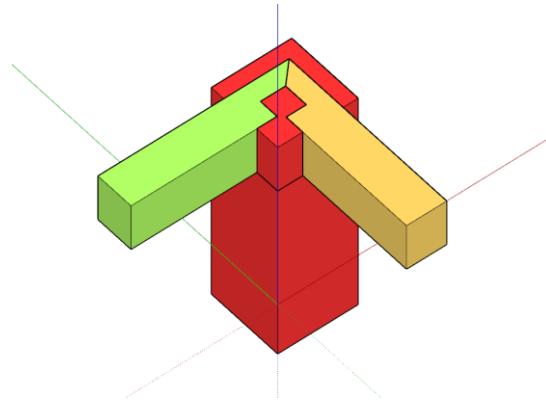


Figure 81 : Modèle SketchUp 3D de référence de l'assemblage (E)

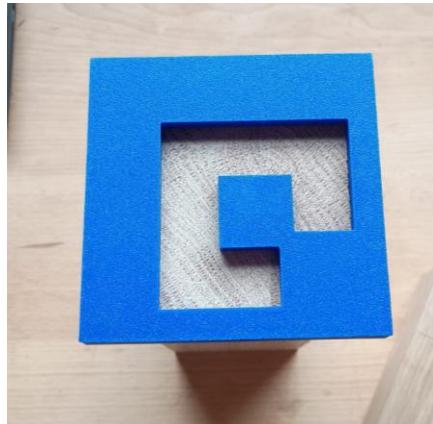


Figure 82 : Impression 3D (bleue) du motif pour le poteau

6.1.2 Coût et temps de réalisation

Le coût du matériau s'élève à 1300 €/m³, ce qui, pour une section totale de 50 × 20 × 6 cm, représente un coût de 7,80 € pour le prototype. Voici la répartition du temps de travail total de 4h, en fonction des divers éléments de l'assemblage :

- Traverses : les deux réalisées en 1h30, leur fabrication a été facilitée par la simplicité et la symétrie des pièces, permettant une mécanisation efficace. La finition a été réalisée au ciseau à bois.
- Poteau : plus compliqué à fabriquer, il a nécessité 2h30 de travail, notamment en raison de la coupe principale réalisée avec une mortaiseuse à mèche (trou de 5 cm) et des finitions ajustées au ciseau, car la précision de la machine était insuffisante pour un rendu parfaitement régulier.

6.1.3 Processus de fabrication

Le mode opératoire a suivi plusieurs étapes clés impliquant différentes machines :

1. La scie à ruban, figure 83, a été utilisée pour le débit initial des morceaux de bois. Elle a permis de réaliser des coupes précises et droites, tout en minimisant les pertes de matière. Le principal avantage de cette machine réside en sa capacité à travailler des épaisseurs importantes, ce qui était essentiel pour découper le poteau et les traverses du prototype.



Figure 83 : Utilisation de la scie à ruban pour la découpe des morceaux

2. La dégauchisseuse, figure 84, a été employée pour obtenir deux faces de références perpendiculaires. Cette étape était cruciale afin d'assurer une planéité parfaite et garantir que les pièces s'assembleront correctement. Elle a également permis d'éliminer les irrégularités naturelles présentes sur le bois.



Figure 84 : Utilisation de la dégauchisseuse

3. La raboteuse, figure 85, est intervenu après la dégauchisseuse dans le but d'ajuster les faces parallèles et obtenir une section carrée parfaite. Elle a assuré une épaisseur homogène sur toutes les pièces, facilitant ainsi l'assemblage à venir et améliorant la précision des emboîtements.



Figure 85 : Utilisation de la raboteuse

4. La scie à format, figure 86, a été utilisée pour réaliser les feuillures et les coupes à 45° sur les traverses. Elle a offert une grande précision dans les angles et garantit un ajustement optimal des pièces lors du montage.



Figure 86 : Utilisation de la scie à format

5. Les motifs de l'assemblage ont alors été reportés sur les différentes pièces travaillées, figure 87.

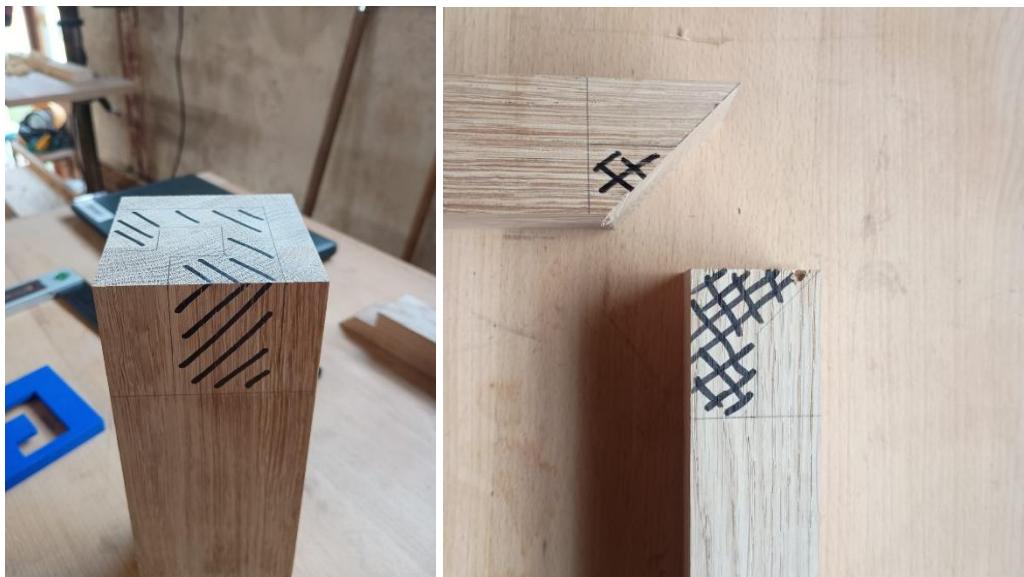


Figure 87 : Motifs de l'assemblage sur les pièces en bois

6. La mortaiseuse à mèche, figure 88, a été employée afin de creuser les trous de 5 cm, nécessaires à l'assemblage du poteau. Bien que rapide, cette machine présentait une précision limitée, nécessitant des ajustements manuels au ciseau à bois pour obtenir une finition parfaite.



Figure 88 : Utilisation de la mortaiseuse à mèche

7. Les finitions ont été réalisées à l'aide d'une scie à bois, figure 89, et d'un marteau, permettant d'affiner les ajustements et de garantir un emboîtement fluide des pièces. Cette étape servait à corriger les petites imperfections laissées par les machines précédemment vues et assurer une solidité optimale de l'assemblage.



Figure 89 : Finitions avec une scie à bois

6.1.4 Retour d'expérience et contraintes

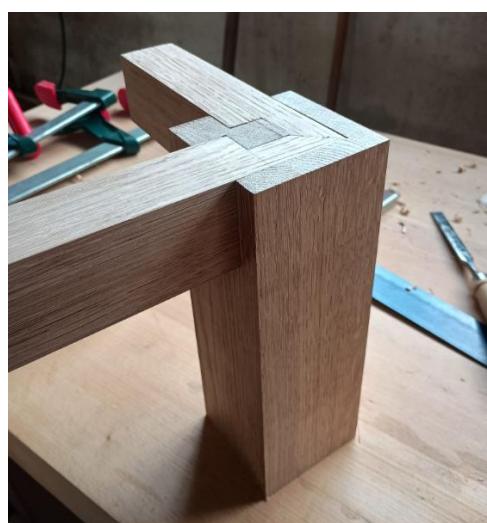


Figure 90 : Prototype terminé

La partie la plus complexe à produire a été le poteau, principalement en raison de son échelle réduite, qui a rendu l'usinage plus difficile. Une réalisation à plus grande échelle pourrait simplifier le travail. De plus, le manque d'équipement spécialisé, notamment une mortaiseuse à bédane, a limité la précision de certaines sections carrées. L'emboîtement des pièces s'est fait sans difficulté, bien que quelques ajustements au ciseau à bois aient été nécessaires, figure 90, sur la partie basse creusée par la mortaiseuse, dont la précision était limitée.



Figure 91 : Correction du travail de la mortaiseuse

Le degré de précision des machines utilisées était de l'ordre du millimètre, ce qui a influencé la résistance de l'assemblage, un facteur crucial en menuiserie. L'ajustement manuel a alors permis d'améliorer la finition et la stabilité de l'ensemble.

Enfin, le ressenti général est que la fabrication du prototype a été facile, avec une bonne qualité d'assemblage et une facilité de démontage. De plus, il a été possible d'emboîter les éléments dans deux directions, latéralement et par le dessus, figure 92, offrant une flexibilité supplémentaire dans le montage.

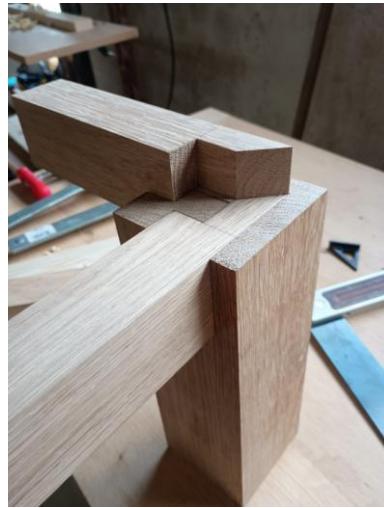


Figure 92 : Emboîtement vertical du joint

6.2 Prototype en impression 3D

6.2.1 Cahier des charges

Le prototype a été conçu à une échelle réduite, avec des pièces de base $3,7 \times 3,7$ cm. Le modèle 3D a été réalisé sur SketchUp, figure 93, tandis que l'impression 3D a été effectuée avec le logiciel Bambu Studio.

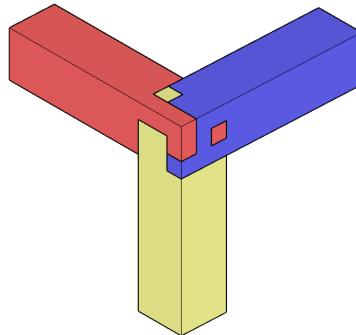


Figure 93 : Modèle SketchUp de l'assemblage (B)

Bambu Studio est un logiciel de découpage open-source, optimisé pour les imprimantes 3D de Bambu Lab. Il offre une interface intuitive et des algorithmes avancés de tranchage, garantissant une impression fluide et précise. Ce logiciel permet également de gérer les paramètres d'impression et d'optimiser la qualité des pièces imprimées.

Le matériau utilisé est du filament PLA (Polylactic Acid), il s'agit un polymère biodégradable dérivé de ressources renouvelables comme l'amidon de maïs notamment. Il est

apprécié pour sa facilité d'impression, sa bonne rigidité et sa stabilité dimensionnelle, ce qui le rend idéal pour les prototypes nécessitant une précision élevée.

6.2.2 Fabrication

Chacune des pièces a nécessité environ 1h30 d'impression, figure 94, avec une précision de l'ordre du millimètre, garantissant un ajustement optimal des éléments lors de l'assemblage.



Figure 94 : Pièce bleue en cours d'impression

6.2.3 Retour d'expérience

L'emboîtement des pièces a pu se faire sans difficulté, offrant ainsi une bonne stabilité et une bonne tenue une fois les pièces assemblées. Un léger ponçage a été nécessaire sur les zones de supports d'impression, figure 95, afin d'obtenir une surface parfaitement lisse et d'éviter tout jeu entre les pièces.

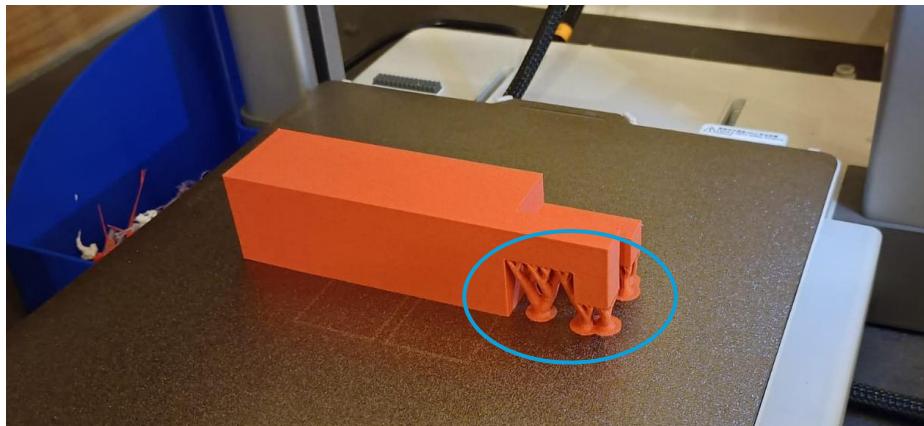


Figure 95 : Pièce rouge imprimée avec du support

Le prototype de l'assemblage B n'a pas été réalisé en bois, car sa petite échelle aurait rendu compliqué sa fabrication et augmenté le risque de rupture des éléments lors de la découpe et de l'assemblage.

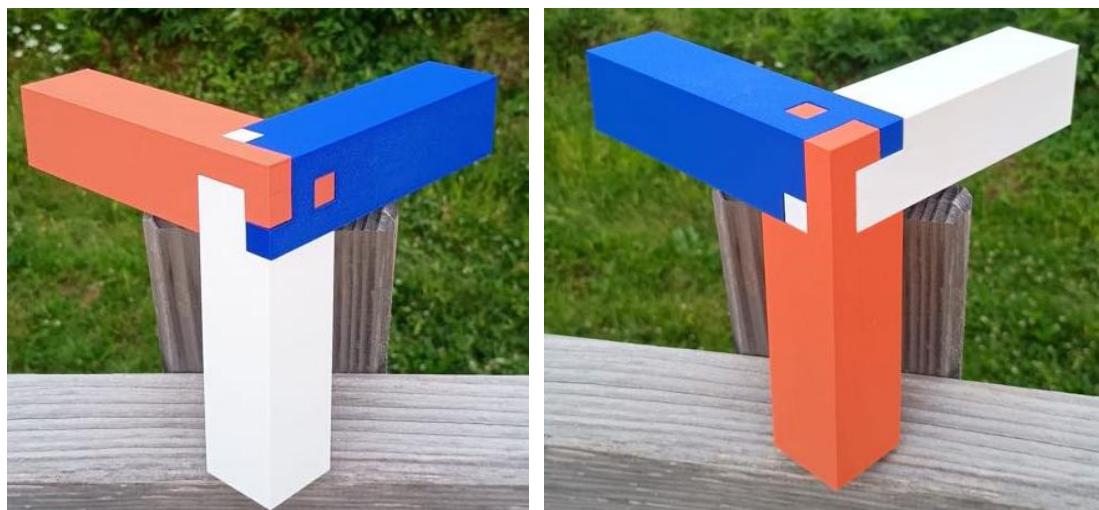


Figure 96: Pièces imprimées et emboitées

6.3 Conclusion

Deux prototypes ont été fabriqués afin d'étudier les différentes méthodes de fabrication possible : l'un est en chêne massif, réalisé des techniques traditionnelles de menuiserie, et l'autre est construit via impression 3D, utilisant du filament PLA.

Le prototype en chêne privilégie la solidité et la durabilité, impliquant des outils de menuiserie pour obtenir des assemblages précis. Son coût, temps de fabrication et contraintes ont été analysés afin d'optimiser les méthodes artisanales.

À l'inverse, le prototype imprimé en 3D offre une approche rapide et précise, facilitée par des logiciels comme SketchUp et Bambu Studio. Il permet de tester des assemblages à petite échelle avant une éventuelle production en bois.

Cette étude met en évidence les choix de matériaux, défis techniques et innovations apportées par les nouvelles technologies, offrant une comparaison des méthodes de fabrication utilisées.

Chapitre 7 : Conclusion et perspectives

Ce chapitre final reprend l'ensemble des points essentiels de cette étude et ses résultats. Il constitue une réponse aux problématiques grâce au travail effectué et, les perspectives que le Kigumi apporte.

L'intégration des techniques traditionnelles du Kigumi dans une approche moderne et durable de l'architecture repose sur une synergie entre savoir-faire ancestral et innovations technologiques. Le Kigumi, en tant que méthode d'assemblage sans clous ni vis, offre une alternative écologique aux systèmes de construction conventionnels, favorisant ainsi la réduction des déchets et la réutilisation des matériaux. Son application dans l'architecture contemporaine permet de concevoir des structures modulaires et évolutives, qui sont donc adaptées aux enjeux environnementaux et aux besoins changeants des espaces urbains.

L'utilisation du bois, matériau renouvelable et à faible empreinte carbone, renforce la pertinence du Kigumi dans un contexte durable. Grâce aux nouvelles technologies, telles que la modélisation numérique, la fabrication assistée par ordinateur (CNC) et l'impression 3D, il est désormais possible d'optimiser les assemblages en bois, garantissant une précision accrue et une résistance mécanique améliorée. Ces avancées permettent de réinterpréter les principes du Kigumi pour les adapter aux exigences contemporaines, notamment en matière de performance structurelle et énergétique.

Cependant, l'analyse mécanique des assemblages Kigumi reste un domaine peu exploré en recherche. En effet, contrairement aux structures métalliques et en béton largement étudiées, les assemblages en bois reposent sur des principes de friction, compression et emboîtement, rendant leur modélisation plus complexe. Peu de références existent sur les méthodes de calcul précises adaptées à ces systèmes, et les outils numériques actuels ne prennent pas toujours en compte les spécificités du Kigumi. La nécessité de développer des modèles numériques avancés, combinant simulations par éléments finis et validations expérimentales, afin de mieux comprendre le comportement des assemblages sous différentes contraintes paraît évident et a été exploré en grande partie dans cette étude. Cette approche permet d'optimiser le dimensionnement des structures en bois dans une architecture modulaire et durable, en s'inspirant du savoir-faire des charpentiers japonais et en intégrant des techniques de fabrication numérique.

Malgré ses nombreux avantages, le Kigumi présente certaines limites. Sa mise en œuvre nécessite une expertise artisanale qui peut être difficile à transmettre à grande échelle. De plus, bien que les nouvelles technologies facilitent la fabrication des assemblages, elles ne remplacent pas totalement le savoir-faire traditionnel. En outre, la complexité de certains éléments rendrait difficile leur fabrication simplement avec les outils numériques actuels et sans une intervention humaine. Enfin, la résistance mécanique des assemblages Kigumi, bien que performante, peut être inférieure à celle des connexions métalliques dans certains contextes, nécessitant des études approfondies pour garantir leur fiabilité dans des applications modernes.

Une analyse de cycle de vie des assemblages Kigumi pourrait être utile pour identifier leurs limites lors de montages et démontages successifs. En effet, sous l'effet des charges appliquées, le bois subit des déformations progressives qui peuvent altérer la précision et la résistance mécanique des connexions au fil du temps. Étudier cette évolution permettrait d'optimiser leur conception pour garantir une meilleure durabilité et adaptabilité des structures.

Chapitre 7 : Conclusion et perspectives

En ouvrant la voie à une architecture durable et innovante, le Kigumi offre une alternative précieuse aux méthodes de construction conventionnelles. Son intégration dans les pratiques contemporaines pourrait non seulement préserver un savoir-faire ancestral, mais aussi inspirer de nouvelles approches en ingénierie et en conception architecturale. L'avenir du Kigumi réside dans une collaboration entre tradition et technologie, permettant de repenser la construction en bois sous un prisme écologique et performant.

Bibliographie

- [1] Seike, K., Takenaka, K., & Kunii, A. (1977). The art of Japanese joinery (G. B. Sansom, Trans.). Weatherhill. Traduction DeepL du texte anglais de l'ouvrage original japonais.
- [2] Graubner, Wolfram, (2002). Assemblage du bois : L'Europe et le japon face à face (Dourdan : Edition H.Vial)
- [3] Chatelot, P. (2025, 13 janvier). Les 7 Piliers de l'architecture durable. *Energie Climat*. Consulté à l'adresse <https://www.constructiondurable.net/7-piliers-design-durable-architecture-eco-responsable/>
- [4] « Vue de Yoshida », d'après Utagawa Hiroshige 歌川廣重, Ukiyo-e Woodblock, Tokaido. (s. d.). Consulté à l'adresse https://www.1stdibs.com/fr/art/estampes-et-%C3%A9ditions/estampes-paysage/utagawa-hiroshige-ando-hiroshige--vue-de-yoshida-dapr%C3%A8s-utagawa-hiroshige-%E6%AD%8C%E5%B7%9D%E5%BB%A3%E9%87%8D-ukiyo-e-woodblock-tokaido/id-a_14078622/
- [5] Comprendre l'Architecture Durable : Maison Écologique et Économie. (2024, août 12). Consulté à l'adresse <https://archilibre.org/comprendre-larchitecture-durable-pour-une-maison-ecologique-et-economie/Gradhermetic> (n.d.). *Architecture et design durable*. Gradhermetic.
- [6] Architecture modulaire - Définition et FAQ | ProContain. (n.d.). Consulté à l'adresse <https://www.procontain.com/fr/faqs/questions-architecture/>
- [7] Dondon Media. (2021). *Histoire du Japon : Frise chronologique*. Dondon Media.
- [8] Certification BREEAM : Qu'est-ce que c'est et comment l'obtenir ? (n.d.). Consulté à l'adresse <https://fr.wessling-group.com/fr/certification-breeam-des-batiments-quest-ce-que-cest-et-comment-lobtenir>
- [9] Thomasrambaud. (2023, 23 mai). LEED certification, ce qu'il faut savoir | Article. Consulté à l'adresse <https://www.batiadvisor.fr/leed-certification/Matériauthèque>. (n.d.). *Propriétés du bois*. Matériauthèque.
- [10] Johana. (2023, 6 mai). Tout sur l'art étonnant du travail du bois japonais traditionnel. Consulté à l'adresse <https://amoreuxdubois.com/travail-traditionnel-japonais>
- [11] Klein, R., Mastrorilli, A., Barrère, C., & Daessle, C. (2024). Perspectives européennes pour l'Architecture du XXème siècle : enjeux, méthodes, outils. Université de Lille.
- [12] Brown, Azby, *The genius of Japanese carpentry : Secrets of an ancient craft*. Tokyo; Rutland, Vt.; Singapore: Tuttle Publishing, 2013.
- [13] Coaldrake, William Howard, *The way of the Carpenter : Tools and Japanese architecture*, Pennsylvanie, Weatherhill, 1990.
- [14] Thérisien, C. L. (2023, 14 juillet). Les propriétés de densité, résistance, conductivité du bois. Consulté à l'adresse <https://materiautheque.fr/bois/proprietes-du-bois/>
- [15] Hozumi, Y., Wakita, T., Doki, A., Takaguchi, H., Inden, T., Umezu, S., & Miyazu, Y. (2024). 3D Printed Joining System Inspired by Traditional Japanese Wooden Joinery for ISRU. ICCEPM 2024 - The 10th International Conference on Construction Engineering and Project Management, Sapporo, Japan.
- [16] Baudisch, P., Silber, A., Kommana, Y., Gruner, M., Wall, L., Reuss, K., Heilman, L., Kovacs, R., Rechlitz, D., & Roumen, T. (2019). Kyub: A 3D Editor for Modeling Sturdy

Bibliographie

- Laser-Cut Objects. In 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Proceedings (CHI 2019), May 4–9, 2019, Glasgow, Scotland, UK. ACM.
- [17] Shahabian, A., & Bari, O. (2017). This Satisfying Algorithm Combines Japanese-Inspired Joints to Generate Any Form. *Archdaily*
- [18] Yudin, V. (2018). Architecture and construction of low-rise buildings from composite wooden modules. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 451, 012130.
- [2]
- [19] Mead, C. (2024). *The Hypospace of Japanese Architecture*. University of New Mexico Press.
- [20] Tai, A. S.-C. (2012). Design for assembly: A computational approach to construct interlocking wooden frames (Thèse de maîtrise, Massachusetts Institute of Technology).
- [21] Sato, J. (n.d.). Development of Kigumi joinery to create 'naturalness'.
- [22] Ikeda, Y. (2019). *Digital construction of timber "metabolism"*. In F. Bianconi & M. Filippucci (Eds.), *Digital wood design* (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 24). Springer Nature Switzerland AG.
- [23] Yazdanpanah Abdolmaleki, P., & Daneshfar, E. (2011). Ethical and traditional concerns in contemporary Japanese design. *Asian Culture and History*, 3(1).
- [24] Fang, D., & Mueller, C. (2018). Joinery connections in timber frames: Analytical and experimental explorations of structural behavior. In C. Mueller & S. Adriaenssens (Eds.), *Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design* (pp. [pages à ajouter]). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- [25] Rodríguez-Grau, G., Marín-Uribe, C. R., García-Giraldo, J. M., & Estay, C. (2022). Flexural strength characterisation of oblique radiata pine splice joints. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 1010-1019.
- [26] Gilibert, P., Baverel, O., & Mesnil, R. (2021). Rule-based generative design of translational and rotational interlocking assemblies. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures: Inspiring the Next Generation*.
- [27] Allner, L., Reinsberg, P., & Sato, J. (2019). Interlocking spaces: A structural prototype inspired by Kigumi architecture. In C. Lázaro, K.-U. Bletzinger, & E. Oñate (Eds.), *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019: Form and Force* (pp. 1-7). Barcelona, Spain: International Association for Shell and Spatial Structures.
- [28] Hojda, O. (2020). Japan and Modern Architecture, 1945–1970. Discourse in the mid-20th-century Europe. *Acta Universitatis Carolinae*, 2, 195-205.
- [29] Leen, D., Veuskens, T., Luyten, K., & Ramakers, R. (2019). *JigFab: Computational Fabrication of Constraints to Facilitate Woodworking with Power Tools*. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'19)*, 12 pages.
- [30] Yabe, T., Khajehee, A., Kimura, S., Tanaka, S., Iwamoto, K., Ito, K., Yamanaka, R., Sumitomo, E., & Ikeda, Y. (2023). *Kigumi Shelf by Data-Driven Circular Saw: Integrated Development of Design, Construction, and Tool for Digital Handcraft*.

Bibliographie

- Proceedings of the 28th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), 159-168.
- [31] Shaffer, M. (2025). Derived from the (Japanese) Tea House: Exploring and Recontextualizing Modularity, Materiality, Resourcefulness, and Craft through Design/Build. Department of Architecture, The Pennsylvania State University .Proceedings of the 3rd Building Beyond Borders Symposium, 6-7 February 2025, Hasselt, Belgium.
 - [32] Kuda, D., & Petříčková, M. (2021). *Modular timber gridshells*. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering, 1(28), 72-79, Department of Engineering, Faculty of Architecture - Brno University of Technology, Poříčí 273/5, 639 00 Brno, Czech Republic.
 - [33] Zybała, T., Szepietowska, K., Bukal, G., & Lubowiecka, I. (2022). Portico Farmhouses of the Vistula Delta: Architecture, Current State and Finite Element Modelling of Timber Roof Truss under Material and Cross-section Uncertainty. International Journal of Architectural Heritage, 16(12), 1885-1906.
 - [34] Quispe, L., & Ulloa, W. (2021). *Application of BIM Tools in Parametric and Generative Design for the Conception of Complex Structures*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1203, 022070.
 - [35] Rogeau, N., Tiberghien, V., Latteur, P., & Weinand, Y. (2020). *Robotic insertion of timber joints using visual detection of fiducial markers*. Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020).
 - [36] Clancey, G. (2021). The way we build: Craft, innovation, and sustainability in Japanese house carpentry. *HoST - Journal of History of Science and Technology*, 15(2), 63-87., Dept. of History and Asia Research Institute, National University of Singapore, Singapore
 - [37] Larsson, M., Yoshida, H., Umetani, N., & Igarashi, T. (2020). Tsugite: Interactive Design and Fabrication of Wood Joints. In *UIST '20: Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Association for Computing Machinery.
 - [38] Kitagawara, A., Imperadori, M., Kuwabara, R., Brunone, F., & Matsukawa, M. (2019). *Wooden Byobu. From Architectural Façade to Sculpture*. In F. Bianconi & M. Filippucci (Eds.), Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Nature Switzerland AG.
 - [39] Iyer, R., Dogan, M. D., Larsson, M., & Igarashi, T. (2025). XR-penter: Material-Aware and In Situ Design of Scrap Wood Assemblies
 - [40] Lehner, P., Pařenica, P., Juračka, D., & Krejsa, M. (2025). Numerical analysis of 3D printed joint of wooden structures regarding mechanical and fatigue behaviour. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 71, 151-163.
 - [41] Abdullah, M. E. Z., Hamid, N. H. A., Jaafar, J., Anwar, M. F. M., & Sukri, S. N. D. (2023). FLUX 2.0: Sustainable Furniture Production with Modular 3D Printed Joinery System. *BIO Web of Conferences*, 73, 05007.
 - [42] Maruyama, A., Shen, I.-C., Larsson, M., & Igarashi, T. (2024). *Designing Reconfigurable Joints*. In SIGGRAPH Asia 2024 Technical Communications (SA Technical Communications '24), December 03-06, 2024, Tokyo, Japan. ACM.

Bibliographie

- [43] Ali, A. K. (2016). Paradoxical Territories Between Traditional and Digital Crafts in Japanese Joinery.
- [44] Moradei, J., Brütting, J., Fivet, C., Sherrow-Groves, N., Wilson, D., Fischer, A., Ye, J., & Cañada, J. (2018). Structural Characterization of Traditional Moment-Resisting Timber Joinery. *Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design*.
- [45] Salzberger, M., Scheeder, T., Waters, J. J., & Hemmerling, M. (2024). Timber Joinery Database: Documenting and designing traditional and contemporary wood-wood connections in a teaching environment utilizing an online OER platform. *Proceedings of eCAADe 2024*.
- [46] Oliveira, M. A., Rocha, L. L., Azevedo, F. P. M., Veroneze, G. D. M., & Cardoso, A. (2023). The Circular Economy in the Perspective of Sustainable Joinery: Product Development and Design. In L. Pereira et al. (Eds.), *IDEAS 2022: DS1* (pp. 211-220). Springer Nature Switzerland AG.
- [47] Fang, D. L., Mueller, C. T., Brütting, J., Fivet, C., & Moradei, J. (2025). Rotational stiffness in timber joinery connections: Analytical and experimental characterizations of the Nuki joint. *IDEAS 2022: DS1*
- [48] Mustakerov, I. C., & Borissova, D. I. (2014). One-dimensional cutting stock model for joinery manufacturing. *Advances in Information Science and Applications*, 51-55.
- [49] Shaffer, M. (2025). Derived from the (Japanese) tea house: Exploring and recontextualizing modularity, materiality, resourcefulness, and craft through design/build.
- [50] Hiranpruek, N. (2024). Action before perfection: The characteristics of diverse approaches to mastering traditional Thai carpentry. *SPAFA Journal*.
- [51] Ren, C. (2021). Making modern knowledge of traditional carpentry in China and Japan: Myth, reality and transmission. *HoST - Journal of History of Science and Technology*, 15(2), 34-62.
- [52] *Comprendre l'Architecture Durable : Maison Écologique et Économie*. (2024, août 12). Archi Libre. Consulté à l'adresse : <https://archilibre.org/comprendre-larchitecture-durable-pour-une-maison-ecologique-et-economie/>
- [53] *Qu'est-ce que l'architecture durable ?* (2025, Juin 10). Consulté à l'adresse : <https://www.gradhermetic.com/fr/node/3310>
- [54] *Vers une architecture durable : le recours croissant au bois pour une construction écologique et harmonieuse – Comptoir Bois*. (s. d.). Consulté à l'adresse : <https://comptoirdesboislocaux.fr/reglementations-de-construction/vers-une-architecture-durable-le-recours-croissant-au-bois-pour-une-construction-ecologique-et-harmonieuse/>
- [55] Chatelot, P. (2024, 20 novembre). Architecture durable : réinventer le bâtiment avec le bois. *Energie Climat*. Consulté à l'adresse : <https://www.constructiondurable.net/architecture-durable-reinventer-le-batiment-avec-le-bois/>
- [56] *L'Utilisation du Bois Local dans l'Architecture : Le Parcours Inspirant d'une Architecte Engagée – Comptoir Bois*. (s. d.). Consulté à l'adresse :

Bibliographie

- <https://comptoirdesboislocaux.fr/construction-ecologique/lutilisation-du-bois-local-dans-larchitecture-le-parcours-inspirant-dune-architecte-engagee/>
- [57] Parent, M., & Parent, M. (2024, 22 janvier). *Innovation en construction bois : vers une architecture durable et avant-gardiste*. Maison Rondin. Consulté à l'adresse : <https://www.maison-rondin.com/innovation-en-construction-bois-vers-une-architecture-durable-et-avant-gardiste/>
- [58] *L'HISTOIRE DE NOTRE MONDE – Antiquité – JAPON*. (s. d.). consulté à l'adresse : <https://www.science-technologie.com/lhistoire-de-notre-monde-antiquite-japon/>
- [59] Tips, H. (2024, 24 octobre). *The complete guide to mortise and tenon joint types*. Consulté à l'adresse : Handyman Tips. <https://handymantips.org/mortise-and-tenon-joint/>
- [60] *Izumo Taisha - Le grand sanctuaire de Shimane*. (s. d.-b). Kanpai. Consulté à l'adresse : <https://www.kanpai.fr/izumo-taisha>
- [61] *Ise Grand Shrine (Ise Jingu)*. (2025, 4 mai). Japan Reference. Consulté à l'asresse : <https://jref.com/articles/ise-grand-shrine-ise-jingu.556/>
- [62] Ushigyu_Maj. (2024, 4 mai). *Explore the Timeless Wonder of Hōryū-ji Temple : A Journey to Nara& # 8217 ; s Ancient World Heritage Site*. More About Japan. Consulté à l'adresse : <https://moreaboutjapan.com/horyuji/>
- [63] Msika, P. (2023, 26 décembre). *Écologie : le « b.a.-bois » des charpentiers japonais - La Perle*. La Perle -. Consulté à l'adresse : <https://laperle-paris.com/exposition/ecologie-et-environnement-le-b-a-bois-des-charpentiers-japonais/>
- [64] *L'histoire de l'architecture traditionnelle en bois au Japon* (2025, mars 20). Consulté à l'adresse : <https://www.kanpai.fr/kobe/musee-outils-charpentier-takenaka-carpentry-tools>
- [65] *Le charpentier*. Consulté à l'adresse : <https://en.muzeo.com/art-print/le-charpentier/stillfried-andersen>
- [66] ThemeGrill. (2021, 27 janvier). *japanese joinery techniques~継ぎ手 (Tsugite) and 仕口 (Shiguchi) – 翠紅舎-Suikoushya-*. Consulté à l'adresse : <https://suikoushya.com/2021/01/27/tsugite-and-shiguchi/>
- [67] *Japanese Joinery - Ari Shiguchi*. (2020, , novembre 7) Consulté à l'adresse <https://www.youtube.com/watch?v=uNJjzuAyJPQ>
- [68] *Arquitectura japonesa : fusuma, shōji, amado y shitomi*. (s. d.). consulté à l'adresse : <https://culturajapon.blogspot.com/2013/05/arquitectura-japonesa-fusuma-shoji.html>
- [69] Shoji. (2019, 16 décembre). *Quelles différences entre un Shoji et un Fusuma* ? Shoji Menuiserie. Consulté à l'adresse : <https://shoji-menuiserie.com/quelles-differences-entre-un-shoji-et-un-fusuma/>
- [70] System, J. A. A. A. N. U. (s. d.). *JAANUS / nageshi*. Consulté à l'adresse : <https://www.aisf.or.jp/~jaanus/deta/n/nageshi.htm>
- [71] Limited, A. (s. d.). *Symbole de maison traditionnelle de toit Banque de photographies et d'images à haute résolution - Alamy*. Alamy. Consulté à l'adresse : <https://www.alamyimages.fr/photos-images/symbole-de-maison-traditionnelle-de-toit.html?sortBy=relevant>

Bibliographie

- [72] Mélanie. (2023, 27 juin). *Maison japonaise : les particularités d’ ; une maison typique et traditionnelle du Japon*. My Little Bazar. Consulté à l’adresse : <https://www.mylittlebazar.com/maison-japonaise-particularites-maison-traditionnelle/>
- [73] Connexions pour assemblage des charpentes bois. (s. d.). Simpson Strong-Tie. Consulté à l’adresse : <https://www.simpson.fr/fr-FR/gammes-de-produits/connexions-pour-assemblage-des-charpentes-bois>
- [74] Tourelle, L. (2021, 29 mars). Plongez dans l’ ; art incroyablement passionnant de la menuiserie japonaise en bois. *CyClope*. Consulté à l’adresse : <https://www.cyclope.ovh/plongez-dans-lart-incroyablement-passionnant-de-la-menuiserie-japonaise-en-bois/>
- [75] Propriétés du bois | *Calculs Eurocodes*. (s. d.). consulté à l’adresse : <https://www.calculs-eurocodes.com/materiaux/bois>
- [76] Propriétés mécaniques du bois I (2025, janvier 10). Consulté à l’adresse : https://www.lignum.ch/files/_migrated/content_uploads/Propri%C3%A9t%C3%A9s_m%C3%A9caniques_du_bois_01.pdf
- [77] Etude de la norme « béton » (norme NF EN 206-1). Consulté à l’adresse : http://www.ac-grenoble.fr/lycee/roger.deschaux/documents/Cours/Formulaires/Cisaillement/Etude%20de%20la%20norme_Beton_EN206-1.pdf
- [78] Karolak, A., Jasieńko, J., & Raszczuk, K. (2020). **Historical scarf and splice carpentry joints: State of the art**. *Heritage Science*, 8(1), 1-19.
- [79] Calcul de la section des chevrons d’une toiture. Consulté à l’adresse : <https://www.artofit.org/image-gallery/550283648234221429/anatomie-d-une-charpente-de-toiture-monopente-les-guides-de-la-construction-bois>
- [80] Détails de conception, durabilité et protection : propriétés mécaniques. (s. d.). Cecobois. Consulté à l’adresse : <https://cecobois.com/details-de-conception-durabilite-et-protection/proprietes-mecaniques/>
- [81] Azekura-zukuri - *Wikiwand*. (s. d.). consulté à l’adresse : <https://www.wikiwand.com/en/articles/Azekura-zukuri>
- [82] 天平文化 | 世界の歴史まつぶ。 (2021, 20 juin). 世界の歴史まつぶ。 Consulté à l’adresse : <https://sekainorekisi.com/glossary/%E5%A4%A9%E5%B9%B3%E6%96%87%E5%C9%96/>
- [83] Rapport d’exercice sur l’étude préliminaire du *Cupressus sempervirens* (Cyprès de méditerranée ou commun) (2023, mars 28). Consulté à l’adresse : https://dimensionbois.com/assets/Rapport_d_exercice_sur_l_etude_prelimininaire_du_cypres.pdf?utm_source=chatgpt.com
- [84] Les savoir-faire, les techniques et les connaissances traditionnels liés à la conservation et à la transmission de l’architecture en bois au Japon - UNESCO Patrimoine culturel immatériel. (s. d.). consulté à l’adresse : <https://ich.unesco.org/fr/RL/les-savoir-faire-les-techniques-et-les-connaissances-traditionnels-lies-a-la-conservation-et-a-la-transmission-de-l-architecture-en-bois-au-japon-01618>

Bibliographie

- [85] *Découvrez l'architecture modulaire !* (s. d.). consulté à l'adresse :
<https://journeesarchitecture.culture.gouv.fr/actualites/dcouvrez-l-architecture-modulaire>
- [86] *Description du système IATP.* Consulté à l'adresse :
https://www.researchgate.net/figure/Description-of-the-IATP-system-a-the-target-surface-associated-with-a-free-form-shape_fig3_343038867
- [87] *Open frame wooden cube on black | Premium Photo.* (2020, 27 janvier). Freepik. Consulté à l'adresse : https://www.freepik.com/premium-photo/open-frame-wooden-cube-black_6678873.htm?epik=dj0yJnU9enVHMVRhR3IKckw2Qld3aDN4Rk44MDFHWkxJZUJPd18mcD0wJm49S2RLbjh0bDJ2SVExcWdWNTV1LXdSQSZ0PUFBQUFBR2hBV1A0
- [88] Celal Ünal. (2023, 16 avril). *10 Woodworking joints / Corner wood joining techniques* [Vidéo]. YouTube. Consulté à l'adresse :
<https://www.youtube.com/watch?v=v62jMY6-CqQ>
- [89] Reiter, S. (2023). *Cours ARCH2007-2 : Conception architecturale et urbanisme durable*
- [90] *Coefficient de Poisson du bois de chêne.* (s. d.). consulté à l'adresse :
https://coefficient.galerie-creation.com/_s/coefficient-de-poisson-du-bois-de-chene/1181173/#google_vignette
- [91] *Les essences des bois de France – Le Chêne.* Consulté à l'adresse :
https://preferezlesboisdefrance.fr/wp-content/uploads/2018/02/BF_chene.pdf
- [92] Calculateur. (2012, 9 mai). *POUTRE BETON ENCASTREE.* CIVILMANIA. Consulté à l'adresse : <https://www.civilmania.com/topic/14969-poutre-beton-encastree/>
- [93] Calculateur. (2012, 9 mai). *POUTRE BETON ENCASTREE.* CIVILMANIA.
<https://www.civilmania.com/topic/14969-poutre-beton-encastree/>