

Maxim Andrist

L'assemblage au cœur du projet architectural

L'assemblage traditionnel Ari-kake pour
l'élaboration d'une structure en bois



Énoncé théorique de master en architecture

L'assemblage au cœur du projet architectural

L'assemblage traditionnel Ari-kake pour l'élaboration
d'une structure en bois

Maxim Andrist

EPFL Lausanne
2020/2021

Travaux encadrés par :

Directeur Pédagogique et professeur responsable de l'énoncé théorique

Yves Weinand

Laboratoire de construction en bois

Professeur

Jean-Louis Scartezzini

Laboratoire d'énergie solaire et de physique de bâtiment

Maître EPFL

Petras Vestartas

Laboratoire de construction en bois

Table de matières

Table de matières	vi
Chapitre 1 Introduction	7
1.1 Pourquoi réintroduire un assemblage qui ne s'utilise plus ?	8
1.2 Le développement de l'assemblage Ari-kake	10
1.3 La conception assistée par ordinateur du joint	11
Chapitre 2 La géométrie	14
2.1 La géométrie de l'assemblage Ari-kake, la logique des lignes de coupe	14
2.2 La séquence d'assemblage	17
2.3 Variation des sections des bois	18
2.4 Contraintes géométriques de la découpe par les machines à commande numériques	21
Chapitre 3 Prototypage	25
3.1 Séquence de découpe manuelle	25
3.2 Séquence de découpe numérique	25
3.3 Modèle découpé manuellement	26
3.4 Modèle produit à l'aide des outils numériques	30
Chapitre 4 Applications pratiques de l'assemblage Ari-kake	35
4.1 Structure en bois massif	37
4.1.1 Le fonctionnement de la structure	39
4.2 Structure à ossature bois avec des panneaux de contreventement	44
4.2.1 La composition de la structure	45
4.2.2 Séquence de montage	48
4.3 Structure avec du bois rond	50
4.4 Structure avec du bois massif et des poutres de support courbés en bois lamellé-collé	54
Chapitre 5 Conclusion	56

Chapitre 1 Introduction

Au cours des dernières décennies le bois a regagné de la popularité en tant que matériau de construction. Ceci est partiellement dû à une certaine prise de conscience écologique des acteurs de la construction. Et d'autre part cette popularité est influencée par une diversification et une amélioration des techniques de construction en bois.

Le bois en tant que matériau de construction possède des qualités extraordinaires. En plus d'être renouvelable et abondant, il stocke du CO₂ jusqu'à son incinération ou sa décomposition naturelle. Il nécessite peu d'énergie pour une transformation en un élément constructif. Grâce à sa faible masse volumique le bois peut être préfabriqué à un niveau élevé, transporté efficacement jusqu'au site de construction et y être assemblé rapidement¹. Ces qualités font du bois le matériau par excellence pour la construction au XXI^e siècle.

La construction contemporaine en bois se compose d'une quantité de techniques largement supérieure à la construction traditionnelle en bois. Un seul bâtiment peut regrouper en soi les techniques d'ossature-bois, de charpente traditionnelle, de poutres en bois lamellé-collé, de dalles en bois lamellé-croisé, de panneaux recomposés, OSB, MDF, contreplaqué. Cette diversité permet de répondre aux exigences des différentes fonctions du bâtiment mais augmente la complexité de la construction. Cela se traduit par une difficulté à hiérarchiser les composants de la structure et à les harmoniser pour en former un ensemble cohérent. La qualité structurelle et visuelle qui en découle s'avère inférieure à celle d'une architecture simple et basique, employant une diversité de matériaux et de techniques réduite.

Les assemblages dans la construction en bois sont au cœur de cette question. Actuellement les assemblages sont souvent réfléchis au dernier moment et s'adaptent à la structure au lieu de la générer. Les structures actuelles sont assemblées à l'aide d'entailles basiques et renforcées par des connecteurs métalliques, par exemple des auxiliaires en métal, des vis, des clous et des boulons. Les connecteurs permettent de fixer toute sorte d'éléments ensemble, sans préparer les bois en avance. Cette manière de travailler permet de concevoir des structures sans se soucier des solutions de connexion au stade de la conception. Cela présente un gain de temps dans la phase de conception du projet mais crée des problèmes de connexion des éléments lors de la phase du chantier. Les solutions sont alors trouvées sur le site avec des défauts parfois visibles, des incohérences architecturales, ainsi que des nœuds d'une apparence moins élégante.

Le domaine des assemblages a connu une perte de qualité et de savoir-faire depuis que l'industrialisation a démocratisé les connecteurs métalliques. Auparavant la technique de l'assemblage était à la base de la conception du bâtiment. Sans la possibilité de s'appuyer sur les qualités mécaniques des connecteurs métalliques, les structures étaient pensées en fonction de ce qu'il est possible de réaliser avec un tel assemblage. Les structures étaient par conséquent simples à monter et démonter, les connexions bien hiérarchisées, et les nœuds d'une esthétique difficilement égalée autrement.

¹FRIDHOLM Mathias. «The age of wooden high-rises.» Swedish Wood. 2009. Consultation: Octobre 2020.

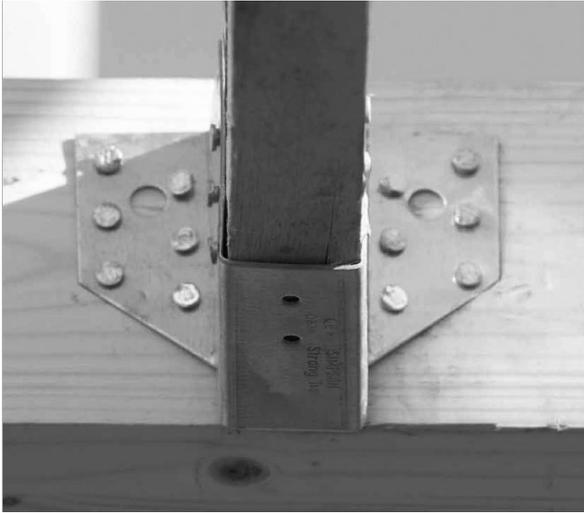


Figure 1 Un sabot métallique, tiré du catalogue de connexions Simpson strong tie



Figure 2 Exemple de connexion sans connecteurs réalisé par Chalets Mossaz

Concevoir un bâtiment à partir d'un assemblage permet de réduire la diversité des méthodes de connexion et d'harmoniser les différents corps du bâtiment en question. Selon Wolfram Graubner l'assemblage est un détail qui influence la géométrie des poutres qui constituent la structure². L'assemblage ne devrait donc pas être uniquement une solution au problème de connexion mais devrait conditionner la conception de l'ensemble de la structure. Cette méthode permet de hiérarchiser et de clarifier les relations entre la structure primaire et secondaire, entre les éléments constructifs tels que la toiture et les parois ou entre un espace et un autre.

Pour répondre aux exigences de notre société et environnementales actuelles il est nécessaire de réfléchir non seulement à la réalisation d'un bâtiment mais également à son évolution future. Un ouvrage doit pouvoir s'adapter aux changements de situations dans lesquelles il se trouve, faute de quoi il sera démoli si son affectation n'est plus désirée. Lors de l'évolution du plan de quartier, un bâtiment doit être facilement transformable pour correspondre aux nouveaux besoins. Un espace peut être agrandi, diminué ou transformé plus facilement dans une structure conçue pour le démontage que dans une conception sans réflexion sur cette étape de la vie du bâtiment. Si dans la phase de conception d'une structure on pense dès le début à la manière dont les pièces s'assemblent, le démontage et le remplacement des pièces en devient naturellement plus simple.

Il est donc important de restreindre la diversité des matériaux, des éléments mais aussi des techniques d'assemblages qui sont utilisés dans un bâtiment. Réduire au minimum les types d'assemblage rend la réalisation plus simple et cohérente.

1.1 Pourquoi réintroduire un assemblage qui ne s'utilise plus ?

Certains assemblages traditionnels, bien que disparus faute de leur réalisation minutieuse, forment des nœuds polyvalents qui peuvent générer un système constructif. Dans les meilleurs des cas il est possible de concevoir l'intégralité d'une structure avec un assemblage unique.

L'histoire de l'architecture en bois a connu plus de 600 assemblages en bois. Pourtant très peu s'utilisent encore de nos jours. La plupart des assemblages sont quasiment disparus du métier de charpentier à cause de la complexité de leur réalisation manuelle. Avec l'essor de l'industrialisation, la rapidité et le coût de la fabrication des pièces sont devenus les facteurs majeurs de la réussite, ce qui a conduit à une sélection de joints rapides à réaliser et à un abandon de tous les autres.

² GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P. 8.

Dans certains domaines où les couts et le temps de réalisation ne sont pas les critères principaux, la culture des assemblages traditionnels a été maintenue. C'est le cas des temples japonais ou des meubles de production artisanale. Dans les autres domaines de construction en bois les connexions entre les poutres se font à travers les coupes simples et les blocages à vis, clous ou boulons. Dans des charpentes de grande envergure, on a souvent recours aux auxiliaires en métal qui pénètrent dans le bois et se bloquent grâce aux boulons.

L'usage des auxiliaires en métal et des moyens de fixation tel que vis et boulons peut détériorer la stabilité de l'assemblage et sa valeur esthétique. De ce fait il y a un grand intérêt pour l'architecture à retrouver l'usage des assemblages traditionnels bois sur bois.

Une conception de projet à base d'assemblage est possible grâce à certains assemblages traditionnels « oubliés ». Leurs qualités géométriques et structurelles permettent leur réitération aux différents nœuds d'une structure. Les formes des assemblages n'ont pas été développées pour une fonction déterminée, et il ne va pas de soi que tel assemblage doit être appliqué à tel endroit d'une construction.³ Il est donc possible d'adapter les nœuds d'une structure à la logique de certains assemblages.

C'est le cas de l'assemblage à mi-bois entaillé au quart de l'épaisseur à queue d'aronde avec épaulement, appelé « Ar-kake » au Japon. Cet assemblage lie 2 poutres dans un même plan et une poutre dans le plan perpendiculaire. Il a une capacité d'accueillir 3 ou même 4 pièces de bois. Cette qualité le rend polyvalent et capable de générer des géométries variables au sein d'une construction. Le nom européen de l'assemblage en question étant compliqué, c'est le nom japonais Ari-kake qui sera utilisé tout au long de ce texte.



Figure 3 Les pièces qui constituent l'assemblage Ari-kake

La force de cet assemblage est dans la combinaison des qualités bénéfiques des assemblages mi-bois, à queue d'aronde, tenon mortaise, et avec épaulement. En combinant ces éléments au même endroit cet assemblage tire la meilleure partie de cette cohésion. Il permet de transmettre toutes les forces qui passent par ce nœud, bloque les poutres dans toutes les directions et laisse intacte une grande partie de l'épaisseur de la poutre de support. Il peut recevoir des sections identiques ou des sections variables. Cet assemblage n'a pas de lignes de coupe visibles et est ainsi de grande pureté. Il ne nécessite pas de pièces externes, comme des

³ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P. 16

clous, boulons, chevilles et auxiliaires métalliques. Il possède une logique de montage et démontage simple. Il peut être adapté à la fabrication numérique. Sa géométrie d'origine est modifiable, elle peut être reconfigurée pour s'adapter aux différentes techniques de construction, telles que construction en ossature bois, bois massif, bois rond, structure triangulée.



Figure 4: L'assemblage Ari-kake dans son état complet

1.2 Le développement de l'assemblage Ari-kake

L'assemblage Ari-kake est constitué de deux catégories d'assemblages dont l'histoire de développement est différente. Ces deux types d'assemblages sont la queue d'aronde et le tenon-mortaise.

L'histoire de la queue d'aronde

Selon l'ouvrage *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, réalisé par Viollet-le-Duc c'est surtout dans les ouvrages de charpente que la queue d'aronde a été employée pendant le moyen âge. Les entrants des fermes dans les charpentes de combles des XIII^e, XIV^e et XV^e siècles sont généralement assemblés dans les sablières doubles en queue d'aronde et à mi-bois afin d'arrêter la poussée des chevrons portant ferme et reposant sur ces sablières d'un entrant à l'autre.

L'histoire du tenon et mortaise

Selon le *Archeological Institute of America* la première utilisation de l'assemblage tenon mortaise remonte à 7000 avant J.C, découvert sur une structure d'un puit préservé à travers le temps. L'assemblage tenon mortaise n'était plus vu jusqu'à l'empire romain. Cet assemblage basique était découvert dans diverses régions du monde, y compris en Chine et au Japon, à des périodes différentes de l'Age néolithique.

Les assemblages à queue d'aronde sont apparus beaucoup plus tardivement que l'assemblage à tenon-mortaise. Ceci est lié au développement des outils utilisés pour fabriquer le joint. Le tenon et la mortaise se fabriquaient avec des outils à refend – la hache, la plane, la cognée – des outils qui apparaissent dès les temps

les plus reculés⁴. La découpe de l'aronde, par contre nécessite l'utilisation des scies, outil apparu plus récemment. Le développement tardif des scies est dû à la difficulté du travail du bois contraire au sens du fil.

C'est difficile de remonter à l'origine de l'assemblage *Ari-kake*, dans sa pleine forme, mais étant composé de ces 2 éléments il ne pouvait exister qu'après l'arrivée de la queue d'aronde. L'assemblage était surtout aperçu dans la tradition japonaise lors de la jonction des pannes sablières avec les montants et les poutres du comble⁵.

1.3 La conception assistée par ordinateur du joint

Faute des coûts élevés, la fabrication habituelle avec les outils manuels n'est plus adaptée à la réalisation des assemblages traditionnels. La fabrication assistée par ordinateur des assemblages présente une solution viable pour réduire les coûts de la fabrication. En plus elle permet de concevoir les assemblages rapidement et précisément. Elle présente une alternative à la fabrication manuelle là où cette dernière requiert beaucoup de temps. Par conséquent, l'essor des machines à commandes numériques redonne un deuxième souffle aux assemblages traditionnels⁶.

La fabrication automatique des assemblages s'est développée à la fin du XXème siècle dans le secteur de la construction en bois. Les années 1980 ont vu apparaître les premières machines de production automatique d'assemblages (Figure 5). Ces machines sont pilotables par ordinateur et permettent de concevoir certains types d'assemblages, par exemple les coupes en bec d'oiseau, les tenons-mortaises, mi-bois.⁷ Mais c'est surtout au cours du XXIème siècle, avec la démocratisation de la robotique que les assemblages traditionnels ont retrouvé du potentiel dans le domaine de construction. La popularité grandissante de la conception assistée par ordinateur liée à celle des machines numériques telles que fraiseuse pilotable par ordinateur (CNC) ont permis le développement des nouvelles idées d'utilisation des assemblages.



Figure 5: Première machine de découpe pour le bois pilotable par ordinateur Hundegger P8 (1985)

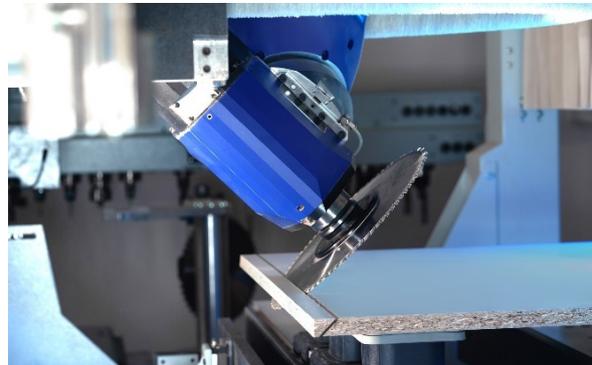


Figure 6: Lame de scie circulaire pour une machine CNC

Cette nouvelle façon de voir la fabrication des éléments en bois est une véritable prouesse pour l'architecture, qui change dans certains cas les habitudes des métiers de construction. C'est le cas notamment du pavillon du Théâtre de Vidy, dont la technique de construction en panneaux pliés assure parallèlement la structure porteuse et le parement. Grâce à la géométrie pliée formée par les panneaux et aux connexions bois/bois par emboîtement cette structure permet de couvrir une portée de 20m sans pilier intermédiaire et sans recourir aux connecteurs métalliques. Dans le cadre de ce projet la préfabrication à l'usine permet de

⁴ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P.10.

⁵ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P.121.

⁶ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002.

⁷ ROBELLER Christopher. Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures. EPFL Lausanne, 2015, P. 13.

limiter la durée du chantier à 12 mois ainsi que limiter le budget à 2,8 millions de francs pour un salle de spectacle de 450m².



Figure 7: Pavillon de Vidy : Montage d'un élément préfabriqué



Figure 8: Pavillon de Vidy : assemblage par emboitement

Design of Robotically Fabricated Timber Frame Structures, un projet de recherche réalisé par le laboratoire Robotic Fabrication Laboratory (RFL) de l'EPFZ examine la fabrication et l'assemblage d'une structure en ossature à l'aide des technologies robotiques. Les poutres de bois massif sont découpées à la CNC et positionnées à leurs emplacements respectifs à l'aide de deux bras robotiques. Cette méthode permet un assemblage précis de géométries non-planaires⁸.



Figure 9: Prototype de RFL assemblé par des bras robotiques

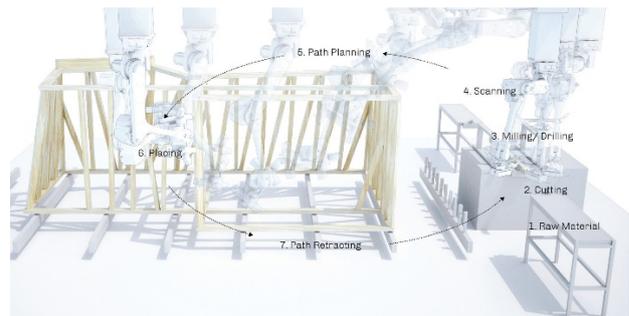


Figure 10: Séquence de fabrication du pavillon

Wikihouse, une plateforme ouverte au public, propose une méthode constructive avec des panneaux usinés à la CNC dans le but de rendre la construction de maisons habitables accessible aux personnes à bas revenu. Elle donne accès à une technologie de design CAO et aide à trouver un atelier d'usinage CNC pour la fabrication des panneaux constructifs. Finalement c'est libre à chacun d'assembler les panneaux et réaliser les finitions.

⁸ ADEL A., THOMA A., HELMREICH M., GERMAZIO F., KOHLER M.. Design of Robotically Fabricated Timber Frame Structures. ETH Zürich, 2017.



Figure 11: Les fondations d'un projet Wikihouse, construit lors du London Design Festival



Figure 12: Assemblage et montage des éléments sur place

Malgré les avantages de la CAO, il faut aussi considérer ses cotés négatifs. Mis appart le sentiment nostalgique de certains envers le remplacement du travail manuel par des machines, il y a des inconvénients pratiques et financiers. Cette technologie est récente et peine à convaincre l'industrie à grande échelle dans le domaine de la construction. Des nombreux ateliers de charpenteries ou de menuiseries ne sont pas prêts à investir leur argent dans la fabrication numérique. Acquérir des machines et des logiciels est un investissement difficile à rentabiliser et apprendre à maîtriser le processus de la conception assistée demande du temps. Cet investissement se rentabilise plus vite si l'utilisation de cette technologie est fréquente. Autrement dit, les ateliers ne seront intéressés par la CAO qu'en cas de projets entièrement réalisés avec. En revanche s'il s'agit d'un outil parmi d'autres pour la réalisation d'une certaine tâche, alors cela ne vaudra pas la peine, car le processus de préparation ne sera pas plus rapide tandis que l'apprentissage sera long et l'investissement sera lourd.

Chapitre 2 La géométrie

2.1 La géométrie de l'assemblage Ari-kake, la logique des lignes de coupe

L'assemblage Ari-kake est une géométrie complexe qui réunit les éléments des assemblages de queue d'aronde, des assemblages à tenon-mortaise et le principe de l'épaulement. Chaque élément a une tâche particulière au sein de l'ensemble.

Dans ce chapitre les composants de l'assemblage sont traités et illustrés séparément. La plupart des informations sur le dimensionnement de la queue d'aronde sont recueillis à partir de l'ouvrage Dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois.⁹

La queue d'aronde est un tenon avec des bords latéraux coupés en biais, qui deviennent plus mince vers l'intérieur de la poutre. Cette coupe permet à l'assemblage de résister à la traction. Elle exclut donc tout étirement de l'assemblage. Dans notre cas la poutre de plancher travaille en traction, elle tire à la poutre de support. C'est donc la queue d'aronde qui maintient la solive en place. Les proportions de la queue d'aronde varient selon le domaine d'utilisation et la pièce découpée. Le rapport entre la largeur inférieure de la queue et la largeur totale de la pièce varie entre 1/3 et 4/5. Dans des assemblages à queue d'aronde unique il n'y a qu'une découpe dans la pièce de support, donc la largeur inférieure de la queue peut être grande, d'où le rapport pouvant aller jusqu'à 4/5. En revanche, dans des assemblages à connexion multiple tel que Ari-kake la queue d'aronde ne peut pas être aussi large, sinon la poutre principale perdrait trop d'épaisseur. La proportion 1/3 est donc privilégiée. La queue d'aronde est à mi-bois, cela signifie que sa hauteur fait $\frac{1}{2}$ de la hauteur de la solive. L'angle de la découpe latérale de l'aronde est traditionnellement de 78° . Avant l'apparition des rapporteurs d'angle, les bâtisseurs utilisaient le rapport de 1cm en largeur contre 5cm en longueur pour tracer les lignes obliques des assemblages à queue d'aronde. Même que cet angle peut varier entre 70° et 90° degrés, c'est celui de 78° qui est le plus fréquemment utilisé.

La queue d'aronde se déporte facilement car les plans d'appuis de l'aronde sont petits. Un gauchissement ou un fléchissement du bois suffisent pour provoquer le déportement de l'aronde. Ce déportement peut être résolu en ajoutant un épaulement.¹⁰

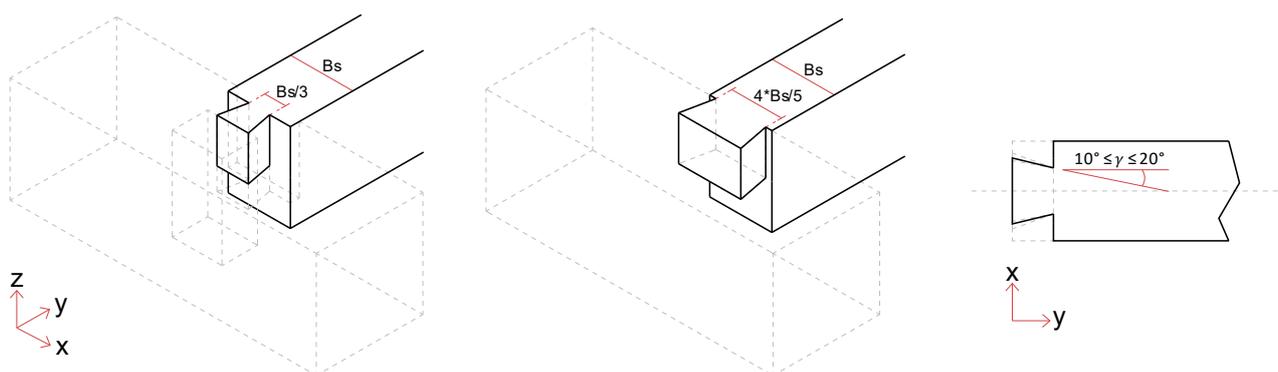


Figure 13: A gauche : queue d'aronde de proportion 1/3 de la largeur de la solive ; au centre : queue d'aronde de proportion 4/5 de la largeur de la solive ; à droite : fourchette d'angle de la coupe oblique.

Un épaulement de la queue d'aronde aide à tenir l'assemblage en place en prévenant les gauchissements et déportements. Malgré une faible profondeur de l'épaulement cet élément est un important pour

⁹ ALLAIS Maxime, KUPFERLE Frank, ROSSI Frédéric. Dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois, Conformément aux eurocodes. C4CI : Consultants Construction Innovation, Mundolsheim, 2015.

¹⁰ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P. 58.

l'assemblage Ari-kake. Il augmente les surfaces de contact entre la solive et la poutre porteuse, autrement limité aux surfaces inclinées de l'aronde. Par la surface de contact horizontale, l'épaulement prend une partie des charges de compression. Par les surfaces de contact latérales il améliore la résistance de la solive au gauchissement du bois, soulageant ainsi les efforts dans l'aronde. La profondeur de l'épaulement est égale au 1/12 de la largeur de la poutre porteuse. Une partie de la hauteur de la poutre principale doit rester intacte sous l'épaulement afin de partiellement reprendre les efforts de compression. La hauteur de l'épaulement vaut $\frac{3}{4}$ de la hauteur de la solive.

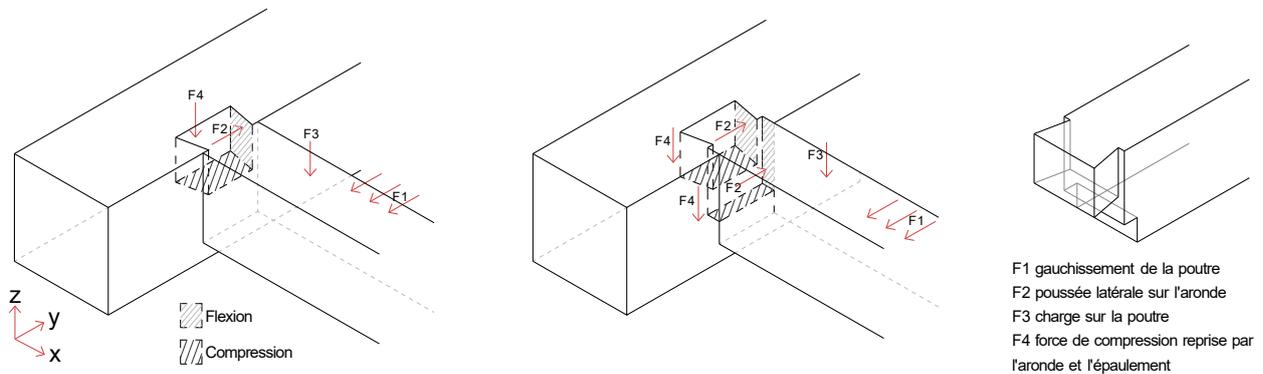


Figure 14: Les forces verticales et latérales qui agissent sur la queue d'aronde et l'épaulement.

La partie tenon de l'assemblage Ari-kake sert à maintenir le montant en place mais ne transmet pas les efforts de compression. Encastré verticalement, les tenons servent à soutenir des poutres qui subissent des charges latérales et à empêcher leur gauchissement. Le tenon correspond généralement au tiers de la section courante du montant. L'effort de compression est transmis par les flancs de la pièce, donc par les 2 tiers restants.¹¹ La largeur du tenon est égale à la largeur du montant dans la version du tenon ordinaire. Dans la version du tenon à épaulement la largeur du tenon est réduite. La version du tenon à épaulement renforcé possède une surface de contact oblique avec la mortaise, à l'emplacement de l'épaulement¹².

Le tenon doit être suffisamment long pour stabiliser le montant dans la mortaise mais le plus court possible pour ne pas trop affaiblir la poutre. Il n'y a pas de proportion unique pour la profondeur du tenon ou de la mortaise, elle varie en fonction de l'utilisation, des méthodes, ainsi que des outils pour les réaliser. Si la mortaise est traversante et le tenon traverse la poutre, cela augmente les surfaces de contact et la résistance au gauchissement. Cela s'avère également avantageux s'il s'agit des poutres exposées à l'humidité, car une mortaise traversante permet à l'humidité accumulée dans l'assemblage de s'évacuer par le bas. En revanche si la mortaise n'est pas traversante cela préserve mieux la résistance initiale de la poutre porteuse. Dans ce cas le tenon qui s'insère dans la mortaise ne doit pas toucher le fond. Ainsi lors du retrait du bois de travers le tenon ne va pas buter contre le fond de la mortaise.¹³ La profondeur de la mortaise dépasse généralement la profondeur du tenon de 5-10mm. Dans notre cas la hauteur du montant sera déterminée par la profondeur de la mortaise multipliée par 0.95. La hauteur de la mortaise sera égale à la hauteur de la solive, ainsi le tenon aura une longueur suffisante mais laissera de la matière intacte dans la section de la poutre de support.

¹¹ GREZEL J. Les assemblages, manuel de la charpente en bois n°9. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, Paris 1950, P 19.

¹² CASEROTTO J. «Assemblages à tenons et mortaises.» Menuiserie-caserotto. 2010. Consultation: Octobre 2020.

¹³ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002.

La géométrie de l'assemblage Ari-kake, la logique des lignes de coupe

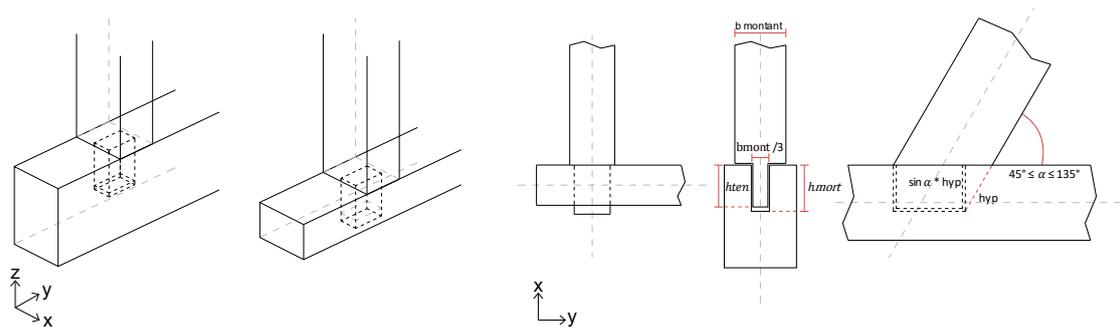


Figure 15 : Détail du tenon-mortaise

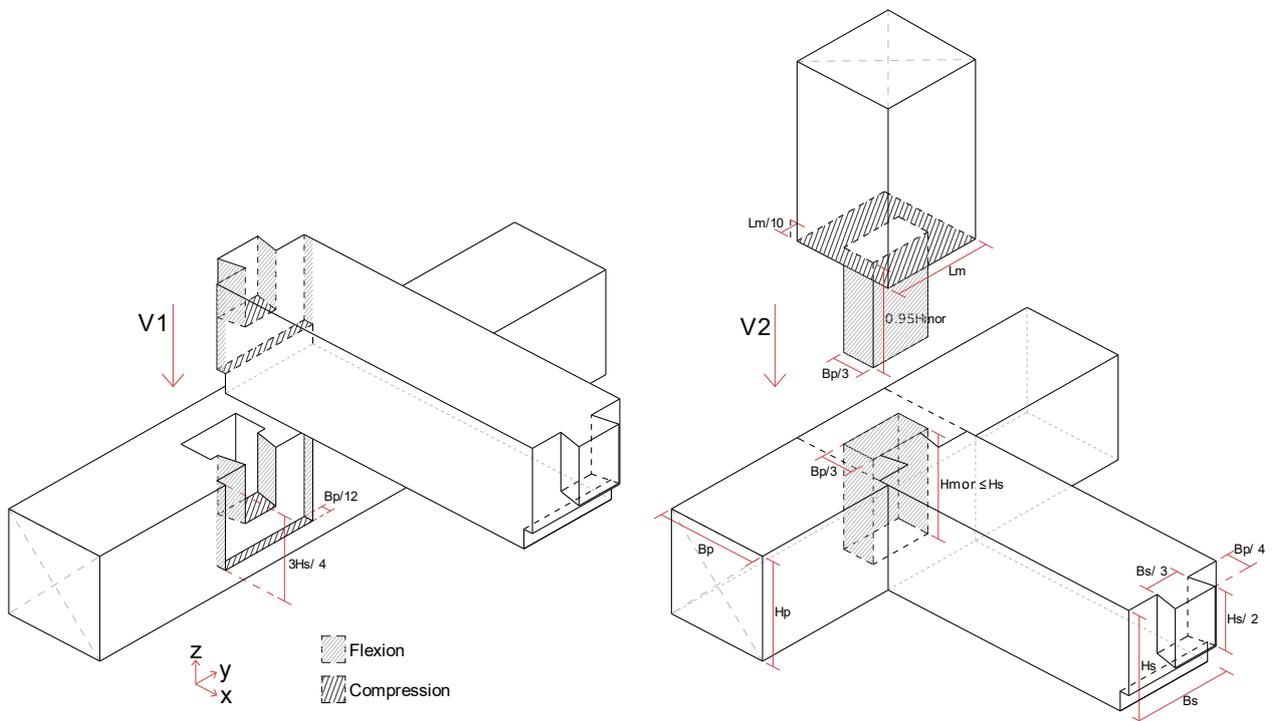


Figure 16: Vecteurs d'insertion et les proportions

Largeur Mortaise	1/3 De B Poutre
Profondeur Mortaise	H Solive
Largeur Tenon	L Mortaise
Hauteur Tenon	H Mortaise * 0.95
Hauteur Epaulement	3/4 De H Solive
Base Queue D'aronde	1/3 De B Solive
Profondeur Queue	1/4 De B Poutre
Hauteur Queue	1/2 H Solive
Epaulement Tenon	1/10 De L Montant
Profondeur Epaulement	1/12 De B Poutre
Angle Queue	1cm/5cm (78°)

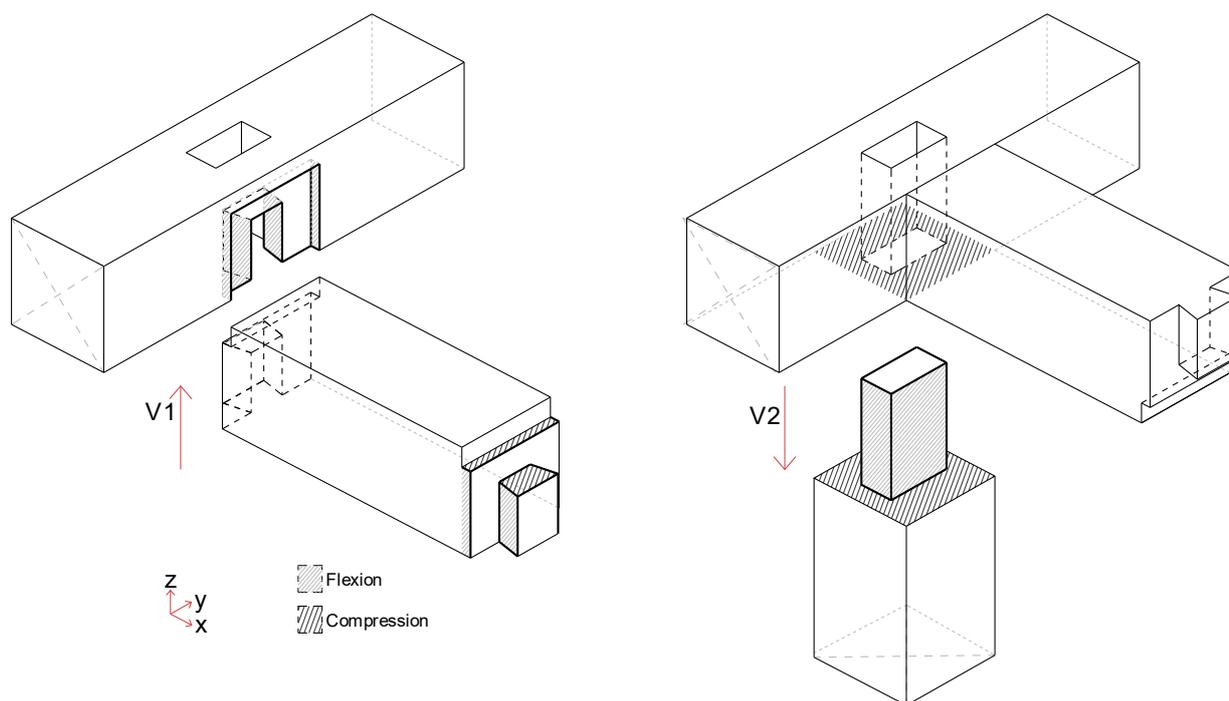


Figure 17: Le montant se trouve sous les poutres. Dans ce cas il est nécessaire de joindre en premier lieu les poutres et ensuite positionner les deux poutres assemblées sur le montant.

2.2 La séquence d'assemblage

Une des particularités de l'assemblage Ari-kake est que le montant recouvre la queue d'aronde grâce à son épaulement. Ceci empêche le gauchissement de la queue d'aronde et renforce ainsi le nœud. Il existe des assemblages similaires à Ari-kake sans le recouvrement par le montant, par exemple l'assemblage *Kabuto-ari-otoshi*.¹⁴ Dans ce dernier la queue d'aronde se trouve à l'opposé de la poutre par rapport au montant et n'est donc pas bloquée verticalement. Avec le gauchissement de la poutre la queue d'aronde risque de ressortir de la contre-queue et se fragiliser. Ceci démontre l'importance du blocage vertical de la solive par le montant.

La séquence d'insertion des poutres qui se rencontrent dans le nœud est faite en deux étapes. Les deux vecteurs d'insertion v_1 et v_2 sont perpendiculaires à l'entaille de la mortaise et de la contre-queue, à savoir verticaux et de même direction.

Dans sa variante originale cet assemblage ne permet que deux positions. Le montant peut être en dessus de la poutre ou sous la poutre, ce qui implique une rotation de la solive à 180° selon l'axe y . La séquence d'assemblage varie en fonction du cas. Dans le premier cas la solive est insérée dans la poutre préfixée et par la suite vient le montant. Dans le second cas le montant est fixé préalablement. La poutre et la solive sont connectées hors du nœud et acheminées vers le tenon du montant. (Figure 17)

Cet assemblage n'est pas conçu pour un endroit spécifique de la structure, il peut être utilisé dans des situations variées en changeant de géométrie. Il peut recevoir un plus grand nombre de poutres, sous des angles divers. Pourtant, les vecteurs d'insertion restent toujours perpendiculaires à l'entaille de la mortaise.

¹⁴ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P.122

2.3 Variation des sections des bois

Les sections des poutres de support, des poutres de plancher et des montants de paroi varient en fonction des charges qui leur sont appliquées, des portées des poutres, des entraxes entre les poutres, ainsi que de la flèche admissible du système de poutraison. La section des solives dépend des charges permanentes et d'exploitation du plancher, ainsi que de l'entraxe entre les solives. Plus les charges et l'entraxe des solives sont grandes, plus la section est grande. La section de la panne sablière est fonction des efforts transmis par les solives et de l'entraxe entre les points d'appuis vers lesquels les efforts sont acheminés, sans oublier leur propre poids. La section des poteaux varie en fonction de leur hauteur, de leur entraxe, des charges dans les pannes, ainsi que de la méthode de contreventement.

Afin de répondre aux différentes demandes des projets de construction en bois, les usines d'équarrissage proposent un large choix des sections standardisées de bois. Il est intéressant d'analyser l'adaptation des différentes dimensions de poutres de bois à l'assemblage Ari-kake. Malgré la relation proportionnelle entre les éléments de l'assemblage Ari-kake aux dimensions des poutres, certaines combinaisons panne/solive pourraient être inadaptées à cet assemblage, et par conséquent devraient être évitées. Ainsi l'assemblage génère sa propre liste des combinaisons panne/solive/montant et aide ainsi à choisir parmi les différentes propositions venant des catalogues industriels.

Une des conditions de l'assemblage est d'affaiblir le minimum la poutre de support. Les lignes de découpe de l'assemblage Ari-kake sont proportionnelles à la poutre de support, à la poutre de plancher et au montant, ce qui engendre des rapports entre la surface enlevée / surface intacte différents pour les poutres de support. Avec la réduction de la surface intacte le nœud de connexion s'affaiblit. Et comme la stabilité de la structure dépend de la stabilité des connexions entre les poutres, il est important de choisir des combinaisons panne/solive avec un rapport élevé entre la surface intacte et la surface totale de la poutre de support.

Le tableau (Fig.18) regroupe une sélection de plusieurs sections proposées dans les catalogues tel que chez Getaz-Miauton ou Corabois¹⁵. Les dimensions des poutres de plancher sont organisées par colonnes et les dimensions des poutres de support par rangées. Leur croisement montre les combinaisons d'une panne de dimension x et d'une solive de dimension y . Le montant s'adapte toujours à la largeur L_1 de la panne et la largeur L_2 de la solive. Les éléments de l'assemblage, c'est-à-dire le tenon, la mortaise, la queue d'aronde, la contre-queue et l'épaulement, varient selon leurs proportions à la poutre de support et à la poutre de plancher selon le tableau des proportions. Ainsi les longueurs, largeurs et profondeurs des éléments de l'assemblage sont différentes pour chaque combinaison. La surface intacte et la surface découpée de la panne résultent de ces modifications et montrent des rapports $S_{\text{intacte}}/S_{\text{totale}}$ propre à chaque combinaison.

¹⁵ N.N. Charpente Bois massif. Corabois-Charpente. Consultation: Novembre 2020.

N. N. Liste de prix : Bois Massif. Getaz-miauton. Consultation: Novembre 2020.

Sections des poutres de plancher

Sections des poutres de plancher

80 x 160

80 x 200

160 x 220

240 x 240

240 x 320

Sections des poutres de support

Sections des poutres de support

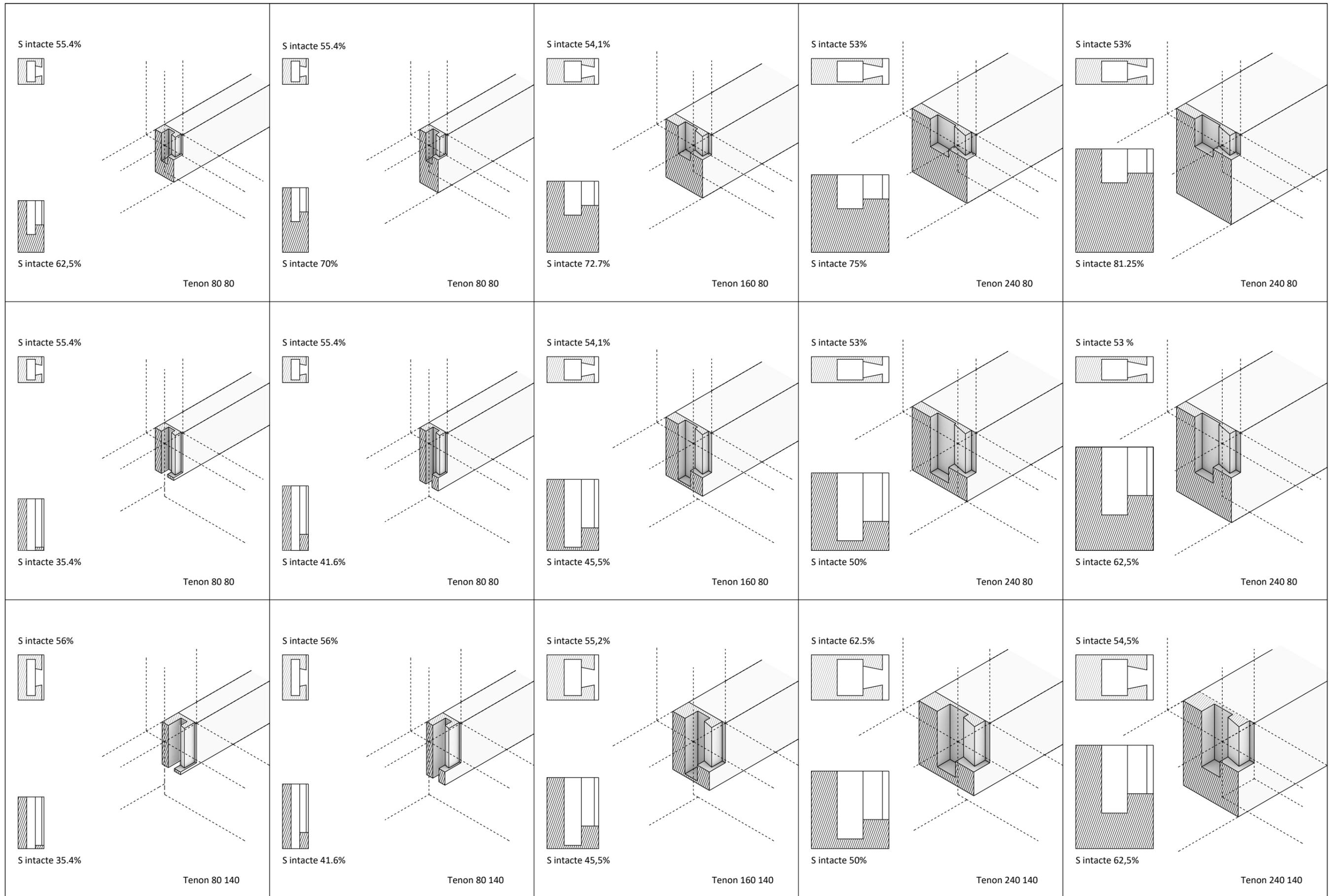


Figure 18: Tableau illustrant des variation de sections des poutres de support et des poutres de plancher

2.4 Contraintes géométriques de la découpe par les machines à commande numériques

Dans un projet comportant des multiples pièces identiques la fabrication numérique accélère le processus de la préfabrication. En revanche s'il s'agit d'une grande variété de géométries à découper, la fabrication numérique perd de son efficacité. Ceci est dû à la préparation des algorithmes qui contrôlent la découpe robotique. La création d'un algorithme pour un assemblage peut être longue et la plupart du temps ne réussit pas du premier coup. Plusieurs tests doivent être conduits avant de procéder aux coupes finales. Par contre, une fois que les codes sont corrects, ils seront valables pour toutes les coupes suivantes.

Les contraintes de précision diffèrent entre la méthode de la découpe à la main et aux machines à commande numérique.

Lors de la découpe des assemblages de façon manuelle, la précision est requise tout le long du processus de découpe. Le traçage des lignes de coupe est déterminant pour la suite. Le résultat du façonnage des poutres risque également de ne pas correspondre aux attentes.

Dans la fabrication numérique c'est le positionnement des poutres qui nécessite des efforts de précision. Si la poutre est bien positionnée sur le support de découpe et bien serrée, la découpe robotique n'aura pas d'erreurs de précision. La préparation numérique ne devrait pas poser de problèmes de précision, grâce à la finesse du dessin vectoriel. Par conséquent le seul défi de précision est l'ajustement de la position de la poutre. Les coordonnées de la position de la poutre dans l'espace de travail doivent correspondre à celles définies informatiquement. S'il y a une erreur de positionnement, la CNC ou le robot ne vont pas le reconnaître et le résultat sera faussé.

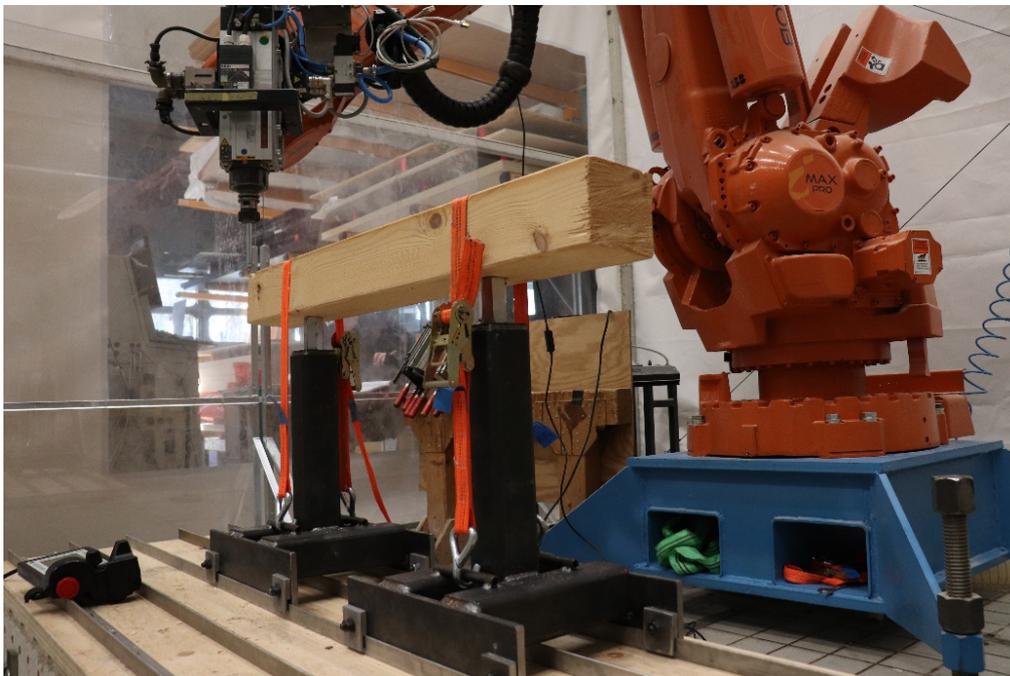


Figure 19 : Les supports de la découpe sont rattachés aux rails qui elles sont rattachées à un bloc en béton fixé au sol.

Lors du fraisage ou sciage le robot génère une forte vibration dans la poutre de bois qui se transmet vers le support. Ces vibrations doivent être maîtrisées pour ne pas déstabiliser la fixation de la poutre au support.

L'usinage numérique peut se faire via une machine à commande numérique (CNC) ou un robot de découpe. Les deux types de machines fonctionnent principalement avec deux outils : une scie circulaire et une fraise. La fraise est utilisée pour des entailles qui ne traversent pas la largeur du bois tandis que la scie est utilisée pour des coupes linéaires.

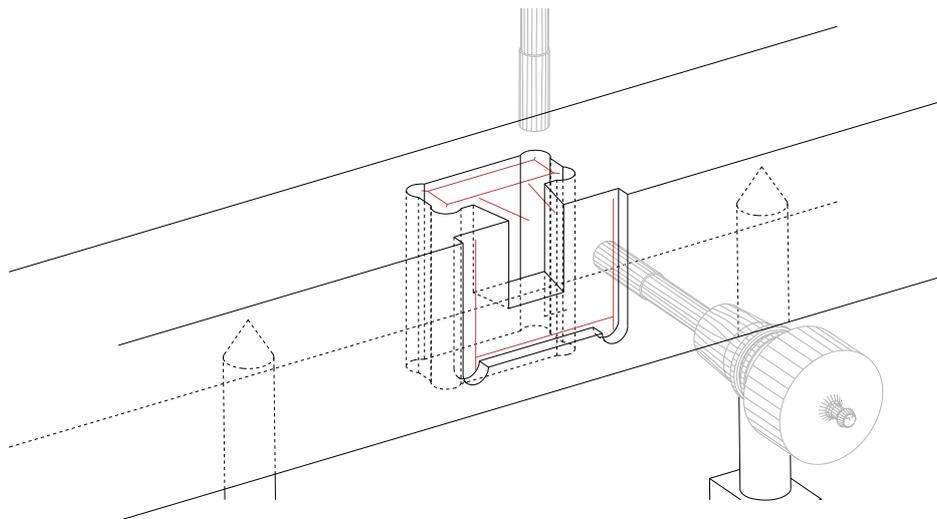


Figure 20 : Le parcours d'usinage de la fraise

Les entailles creusées par une fraise doivent prendre en considération le diamètre de la fraise. Dans le cas d'un joint tenon-mortaise de base rectangulaire il faut prévoir des chanfreins sur les arrêtes verticales de la découpe pour que le tenon puisse pénétrer dans la mortaise. Deux techniques de chanfreins sont possibles : prolonger les extrémités des parcours d'usinage d'une distance égale au rayon de la fraise ; chanfreiner les coins à 45° en s'éloignant des deux axes d'usinage perpendiculaires (Figure 20).

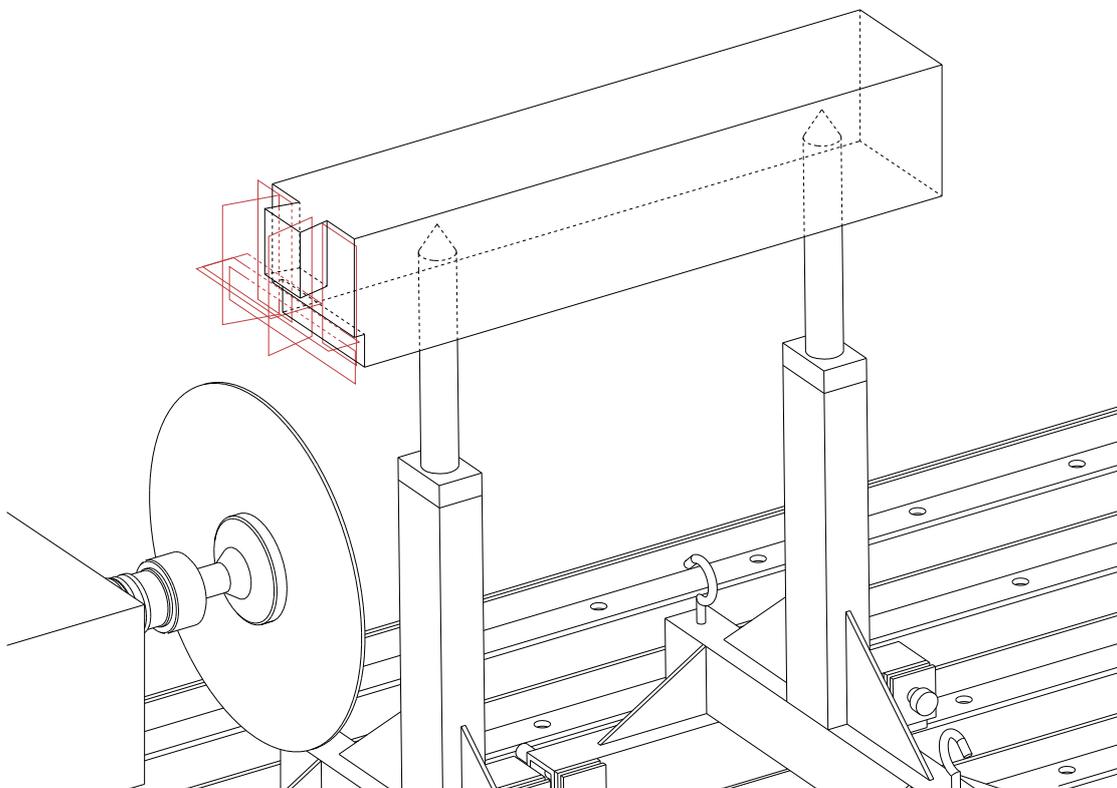


Figure 21 : Le parcours d'usinage de l'aronde et de l'épaulement à la scie circulaire

Les entailles traversantes aux extrémités des poutres sont idéalement sciées à la scie circulaire. L'épaisseur de la lame de scie circulaire est inférieure au diamètre de la fraise, c'est donc plus simple de faire des coupes précises. Une scie circulaire s'use moins vite qu'une fraise, donc changer d'outil permet de préserver leur durée de vie.

Une dernière contrainte consiste en l'espace dédié pour l'usinage à la CNC ou au robot. Si une entaille doit être découpée sur les quatre flancs, la poutre devra être surélevée pour permettre au bras robotique sous la poutre. Les endroits de fixation du morceau de bois à son support doivent être décalés des entailles à découper, autrement la lame ou la fraise vont rencontrer la fixation sur leur passage.

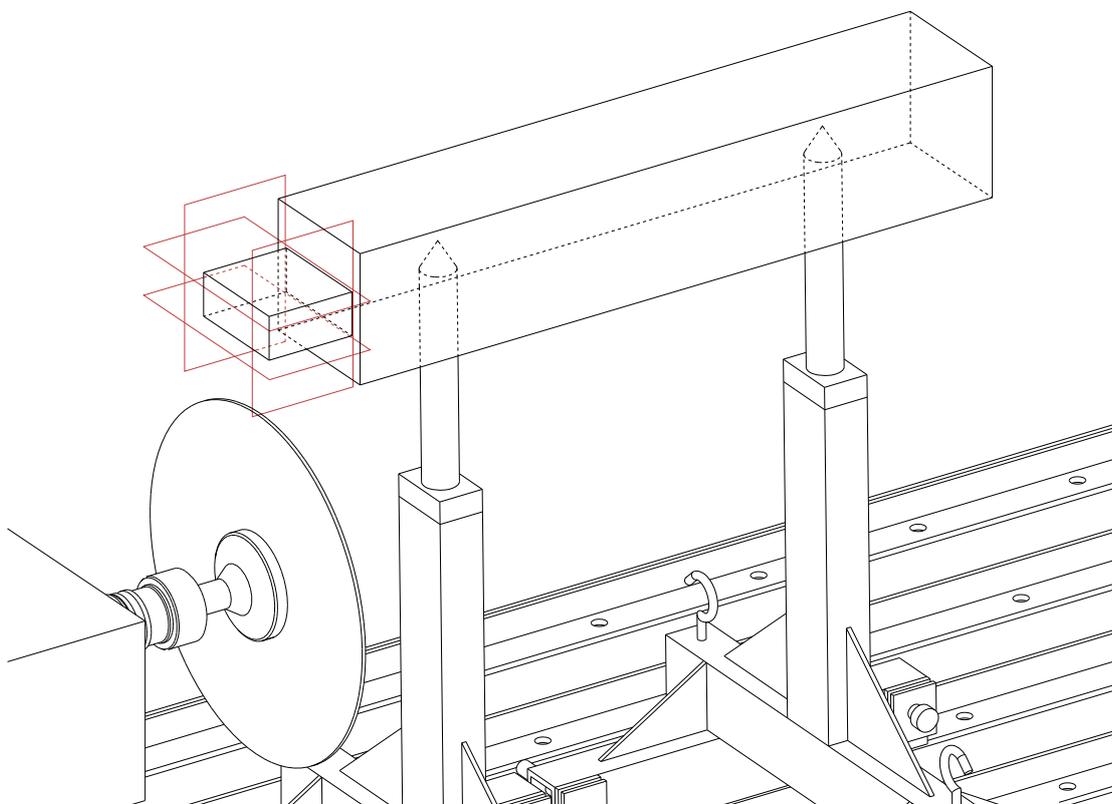


Figure 22 : Le parcours d'usinage du tenon à la scie circulaire

Chapitre 3 Prototypage

Il est très intéressant de comparer les deux manières de fabriquer l'assemblage Ari-kake, la fabrication traditionnelle, à la main et sans machines électriques quelconques, et la fabrication assistée par ordinateur. Cela permet d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement et d'estimer le temps nécessaire à la fabrication et la précision de l'assemblage. Découper l'assemblage manuellement avant de passer à l'étude de la version numérique aide à comprendre et visualiser le fonctionnement des fils du bois, les différences liées au sens de la coupe, les épaisseurs coupées et restantes. Après tout, la fabrication à la main permet de s'imaginer le processus de construction artisanal des siècles passés.

Le prototype fabriqué grâce à la CNC/robot montre le processus de l'usinage de la pièce, l'importance du positionnement correct sur la table de découpe ainsi que les adaptations géométriques liées à l'outil utilisé. Le prototypage d'une pièce unique montre le ratio entre le temps de conception assistée par ordinateur, le temps nécessaire au maniement des pièces et le temps de fabrication de l'assemblage.

Au cours de cette recherche 2 prototypes ont été réalisés.

3.1 Séquence de découpe manuelle

La séquence de découpe manuelle est la suivante : premièrement le tenon est coupé et la mortaise creusée, deuxièmement une entaille est faite dans la poutre de support pour épauler la poutre secondaire. Finalement une queue d'aronde est découpée dans la poutre secondaire et la contre-queue dans la poutre principale.

Si la mortaise est aménagée avant le reste, alors la réalisation de la contre-queue sera plus simple.¹⁶ Pour cette raison c'est impératif de creuser la mortaise au début du processus.

La réalisation du tenon n'a pas d'influence sur le reste du processus. Il est envisageable de réaliser la mortaise en premier et de tracer le tenon selon la mortaise. Autrement l'inverse est également possible, de scier d'abord le tenon et ensuite tracer puis creuser la mortaise.

La réalisation de l'entaille à mi-bois pour l'épaulement précède la contre-queue.

3.2 Séquence de découpe numérique

Lors du processus de découpe numérique les étapes qui nécessitent le plus de temps sont les changements et positionnements des poutres sur la table de découpe. Pour diminuer le temps de fabrication, plusieurs éléments peuvent être usinée simultanément. Ainsi un algorithme complet peut se charger de la fabrication des 3 poutres qui constituent le nœud.

Lors du fraisage numérique la mortaise et la contre-queue sont réalisées en une seule étape, car elles se trouvent dans le même plan. L'étape suivante consiste en le fraisage de l'entaille à mi-bois dans l'axe perpendiculaire.

Le tenon du montant peut être soit fraisé soit scié au disque.

La poutre secondaire peut également être sciée ou fraisée. Néanmoins il serait préférable de la scier car la scie est plus fine et laissera moins traces. Dans les pièces où la matière à enlever est conséquente le fraisage userait rapidement la fraise, ce qui n'est pas le cas de la scie. Pour préserver la durée de vie des outils il vaut mieux utiliser la scie quand c'est possible et la fraise seulement dans les endroits dans lesquels la scie ne peut pas aller.

¹⁶ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois : L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P 121.

3.3 Modèle découpé manuellement

Pour une personne sans expérience en menuiserie ou charpenterie le processus de fabrication de cet assemblage nécessite entre 6 et 8 heures. Pour une précision maximale de l'assemblage les artisans japonais utilisent les scies à denture alternées et disposées en lignes droites car ils offrent une surface de coupe nettement meilleure.¹⁷ Les scies « européennes » sont plus épaisses car la denture de la scie est légèrement inclinée vers l'extérieur. L'épaisseur de la découpe avec une telle scie est entre 1 et 2 mm. Pour éviter un jeu de 2mm dans l'assemblage c'est important d'appuyer la scie du côté intérieur de la surface à découper. En revanche cette scie avec une denture épaisse coupe plus facilement et rapidement le bois. Elle est donc privilégiée pour la découpe du tenon.

La contre-queue a deux surfaces à découper, qui ne sont pas grandes mais nécessitent beaucoup de précision. Elles sont donc sciées avec une petite scie à denture alternée.

Pour la découpe de ce prototype 2 ciseaux à bois, de 8mm et de 12mm d'épaisseur sont utilisés pour creuser et un ciseau à bois large pour marquer le périmètre de la matière à enlever. Les ciseaux à bois doivent être régulièrement aiguisés pour garantir la précision du travail.

Pour accomplir la découpe manuelle il faut également un marteau, un rapporteur d'angle, un couteau de traçage, des sert-joints, une lime et une scie à lame fine.



Figure 23: Les outils utilisés pour la découpe manuelle de l'assemblage Ari-kake

La découpe du tenon n'a pas présenté de problèmes de précision grâce au traçage des lignes de coupe sur les 3 côtés de la pièce à découper. L'épaisseur du tenon doit être précisément égale à l'épaisseur de la mortaise. La profondeur du tenon, en revanche, doit être plus petite que la profondeur de la mortaise, par conséquent ici une marge d'erreur de 1-2mm est permise et n'a pas de conséquence sur la stabilité de l'assemblage.

¹⁷ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P. 35.



Figure 24: La partie tenon découpée dans le montant



Figure 25: La mortaise et la contre-queue

La profondeur de la mortaise doit dépasser celle du tenon de 5mm. Pour vérifier la profondeur creusée il faut régulièrement insérer une règle et reporter la valeur sur le tenon. Si on creuse trop profondément, la poutre de support serait inutilement affaiblie.

Pour creuser précisément avec le ciseau à bois, il suffit de marquer le périmètre de l'entaille préalablement. Un ciseau à bois large est utilisé pour marquer le périmètre et un ciseau à bois fin pour creuser le bois. Cette méthode est lente mais précise.

La réalisation de la queue nécessite des efforts de précision considérables. Pour la réaliser il faut enlever de l'épaisseur sur 3 côtés de la poutre. Pour ce faire la première étape consiste à enlever la partie sous la queue, en laissant l'épaisseur de la queue. Ensuite on procède aux coupes latérales jusqu'au traçage de la queue. Finalement on coupe la queue avec l'angle de 78°.

Par manque de précision la coupe perpendiculaire a été sciée trop profondément, dépassant de 2mm les traçages pour la queue, ce qui a affaibli la queue. Lors du premier test d'insertion de la queue dans la contre-queue un fragment de bois s'est détaché.

Le sciage de la partie inférieure de la poutre secondaire est, en revanche, très simple à réaliser et ne présente pas de problèmes de précision. La découpe se fait sur toute la largeur de la poutre et sur des petites profondeurs.



Figure 26: L'aronde et l'épaulement de la secondaire

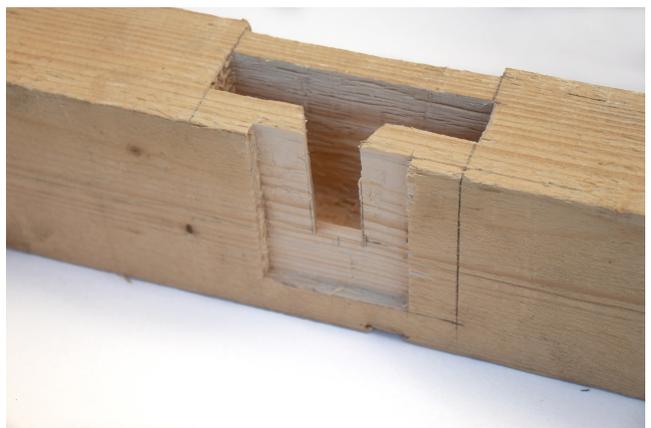


Figure 27 L'entaille pour l'épaulement réalisé sur la poutre de support

La réalisation de l'épaulement est une partie rapide. Il faut tracer les gabarits de la poutre secondaire qui marquera la zone à enlever. Le traçage des limites de la surface à enlever peut se faire au couteau ou au ciseau à bois. Ensuite l'épaisseur nécessaire est enlevée au ciseau à bois.

La découpe de la contre-queue est la partie la plus problématique du processus. L'angle des arrêtes latérales est de 78°. Ceci nécessite une manipulation précise des outils lors du traçage des lignes de coupe. Malgré des efforts pour être précis, on a dû tracer la ligne avec quelques dixièmes de degrés d'imprécision ce qui se traduit en une orientation non perpendiculaire de la poutre secondaire par rapport à la poutre de support.

Cette erreur de précision peut être évitée grâce à une meilleure expérience de métier et aux outils de traçage de plus grande précision. Néanmoins le risque de l'erreur persiste même dans le domaine artisanal de la menuiserie ou de la charpenterie. Une imprécision sur une arrête de 2 cm de longueur a des plus grandes répercussions sur la poutre de plusieurs mètres de longueur. Dans la charpenterie il y a certainement des échecs de découpe qui rendent des pièces de bois inutilisables. Cela produit des déchets et des augmentations des coûts de production.

Le montant s'insère dans la mortaise grâce à la frappe au marteau. Une fois au bout, le montant bloque efficacement la poutre secondaire, comme espéré.



Figure 28: Première étape : insertion de l'aronde dans la contre-queue



Figure 29: Première étape achevée



Figure 30: Deuxième étape : insertion du tenon dans la mortaise

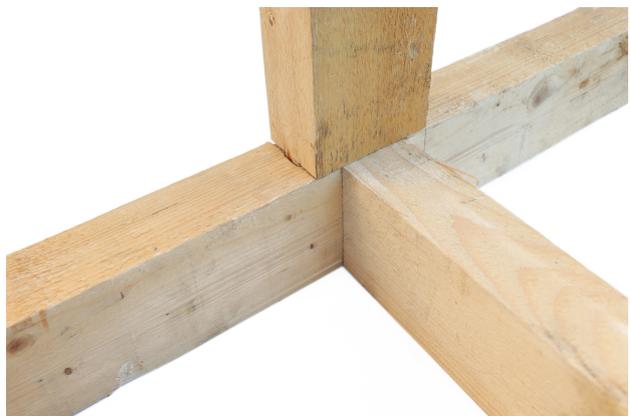
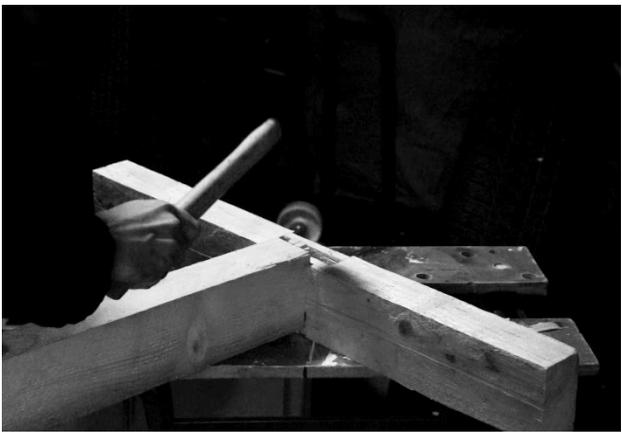
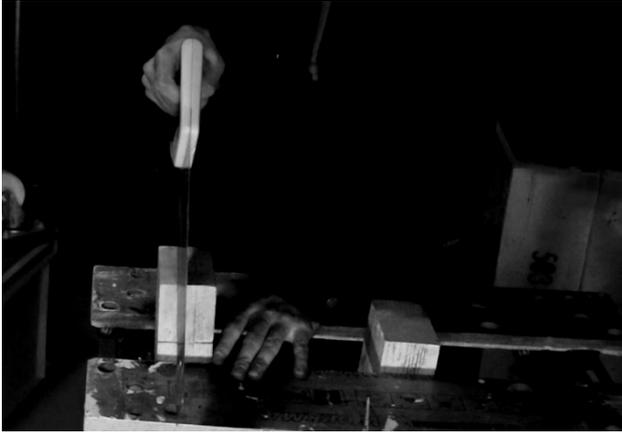


Figure 31: Assemblage complet

Modèle découpé manuellement



3.4 Modèle produit à l'aide des outils numériques

Nous avons envisagé 2 méthodes de découpe pour le prototype de l'assemblage Ari-kake produit à l'aide des outils numériques. Le laboratoire Ibois possède deux technologies : une machine à commande numérique et un robot de découpe. Nous avons opté pour le robot, car il a davantage d'axes de rotation que la CNC et permet de positionner les outils sous l'élément à découper. Les outils utilisés par le robot sont une lame de scie circulaire et une fraise de diamètre 18mm.

Ce modèle est produit à l'aide de Petras Vestartas. Dans le cadre de ses recherches il crée des algorithmes pour Grasshopper qui permettent de simplifier la conception numérique des assemblages. Il a conçu l'algorithme pour la découpe de l'assemblage Ari-kake. Cet algorithme permet de programmer et visualiser au préalable la séquence de découpe du fraisage et du sciage.

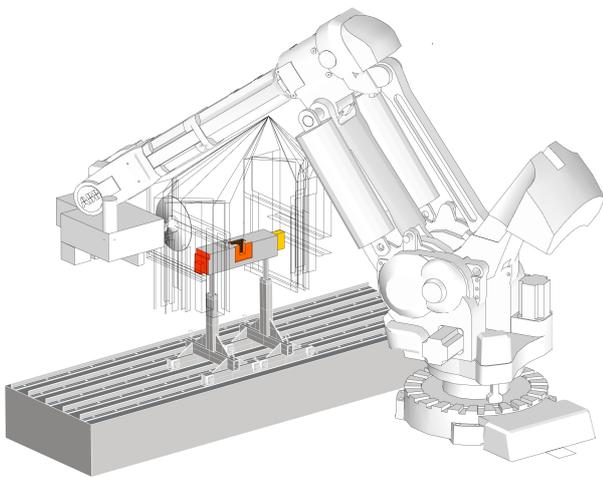


Figure 32 : Visualisation de la séquence de sciage avec la scie circulaire

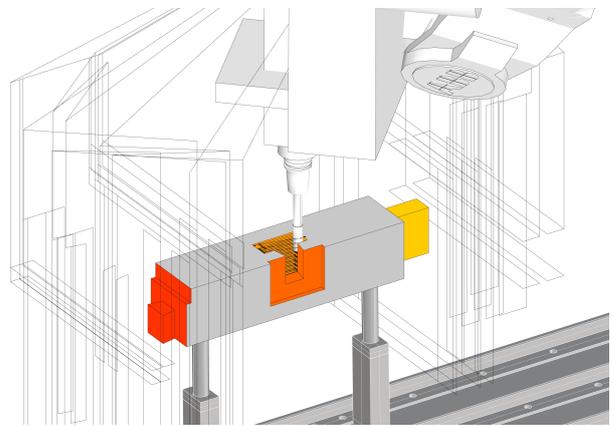


Figure 33 : Visualisation de la séquence de fraisage avec la fraise

Une fois que l'algorithme Grasshopper est adapté aux dimensions de l'assemblage voulu, il est nécessaire de bien fixer la poutre sur le support de découpe. Nous avons percé des trous dans le bois afin de positionner la poutre sur des tiges métalliques avant de renforcer avec des sangles. Il y aurait aussi une possibilité de fixer la poutre sur des profils U avec des sert-joints, ce qui éviterait de faire des trous dans le bois.

Malgré l'équarrissage d'une poutre en bois, il faut calibrer les coordonnées numériques avec les surfaces de la poutre. Les flancs d'un morceau de bois peuvent avoir des imperfections avec le temps. La fixation de la poutre sur le support de découpe est rarement parfaitement horizontale. Si la calibration n'a pas lieu, la découpe ne sera pas adaptée à la géométrie actuelle de l'objet. La calibration se fait manuellement. On doit placer une pointe de transmission des coordonnées le plus proche possible de la surface du bois sur les 4 coins de la poutre. Une seconde vérification peut être faite avec un scan 3d de la poutre à l'aide d'un scanner positionné sur le bras robotique.



Figure 34 : Calibration des coordonnées spatiales

Avant d'arriver au résultat final plusieurs tests sont nécessaires. La première fois qu'un code est exécuté il y a presque toujours une erreur. Dans notre cas certains angles des entailles, qui doivent être arrondis pour laisser entrer les arrêtes des contreparties, n'étaient pas arrondis. Lors du sciage avec la scie circulaire certains dépassement des lignes de coupe sont apparus sur l'aronde et le tenon. Après l'ajustage de l'algorithme la deuxième découpe ne présentait plus aucun défaut. La précision des prototypes que nous avons réalisés à l'aide des outils numériques est supérieure à celle du prototype manuel.

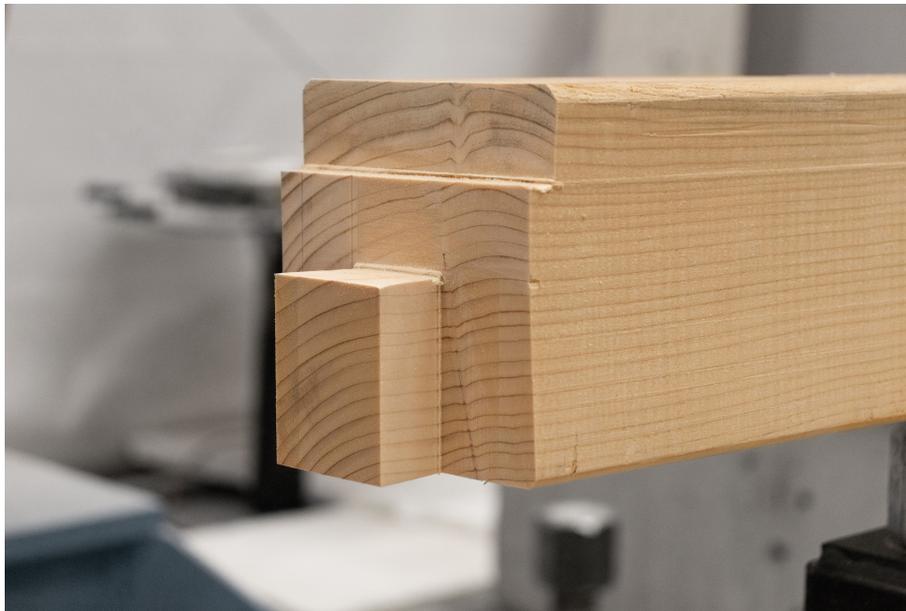


Figure 35 : Le résultat final de l'aronde et de l'épaulement



Figure 36 : Le résultat final du tenon

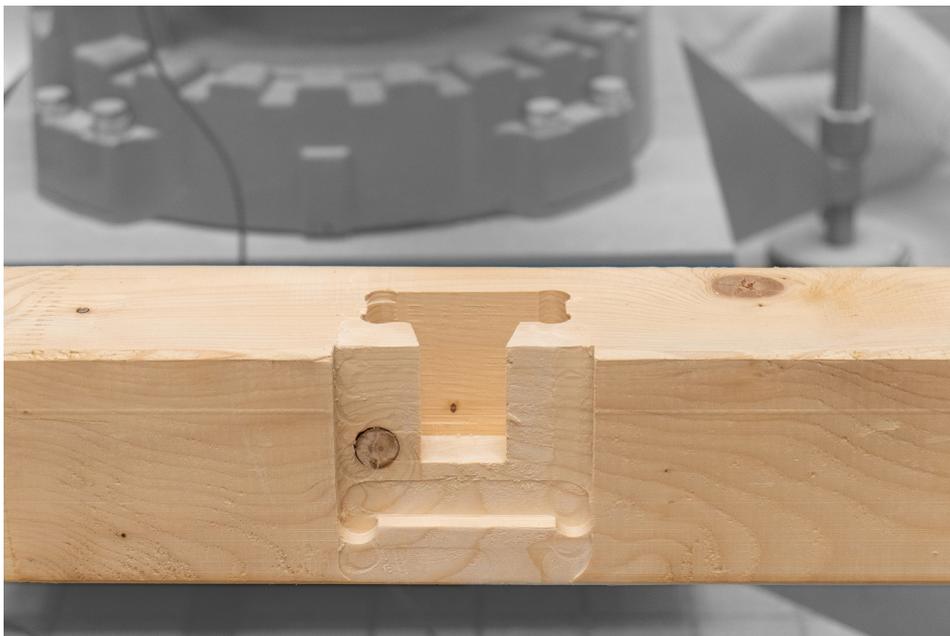


Figure 37 : Le résultat final de la contre-queue et de la mortaise

Le temps qui nous a été nécessaire pour la réalisation de ce prototype dépasse la durée de la fabrication manuelle du même assemblage. Le développement de l'algorithme et son ajustage sont les étapes du processus qui prennent le plus de temps. La calibration de la surface de découpe est également une étape supplémentaire par rapport à la découpe manuelle. En revanche l'absence de l'étape de traçage des lignes de coupe et de l'étape de placement des guides de coupe raccourcissent le processus de l'usinage robotique par rapport à son équivalent manuel. Finalement, l'étape du sciage et du fraisage sont inévitablement plus rapides que à la main.

Ceci démontre que la fabrication numérique est efficace lorsque le projet prévoit un grand nombre de pièces identiques mais perd de l'efficacité quand une structure est composée d'éléments variables.

Modèle produit à l'aide des outils numériques

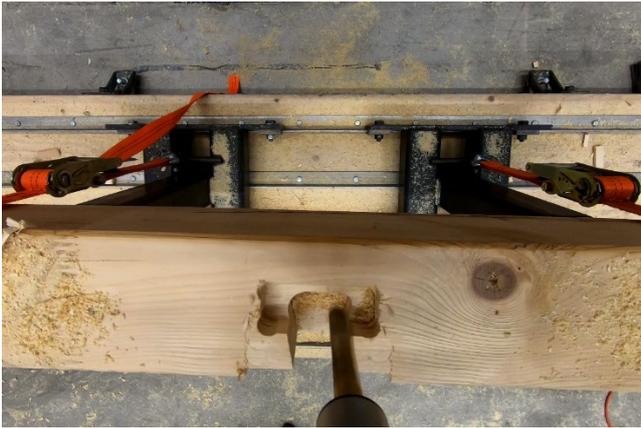


Figure 38: Deuxième étape : insertion du tenon dans la mortaise

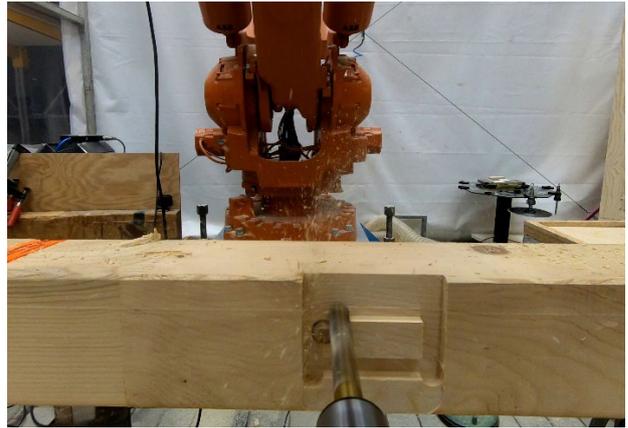


Figure 39: Assemblage complet

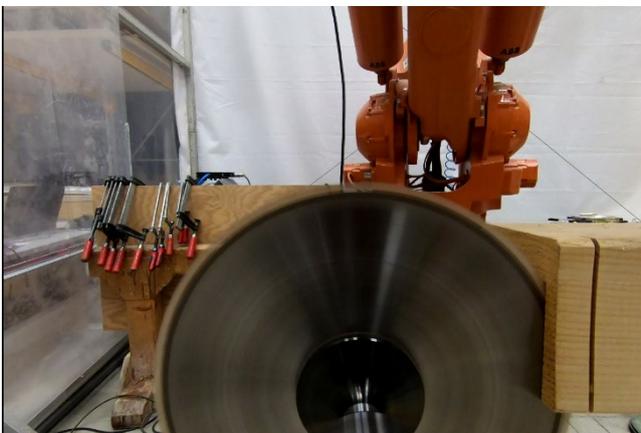


Figure 40: Deuxième étape : insertion du tenon dans la mortaise

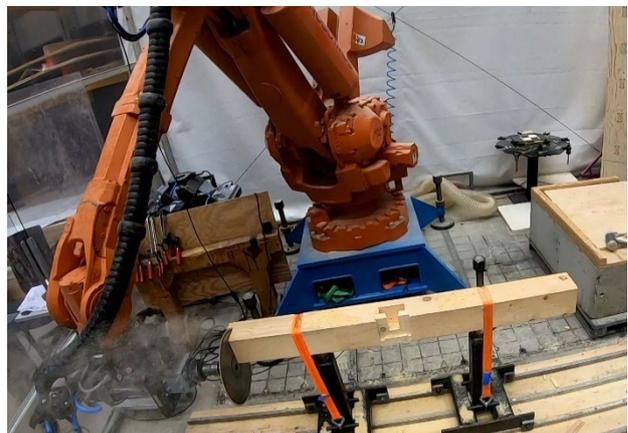
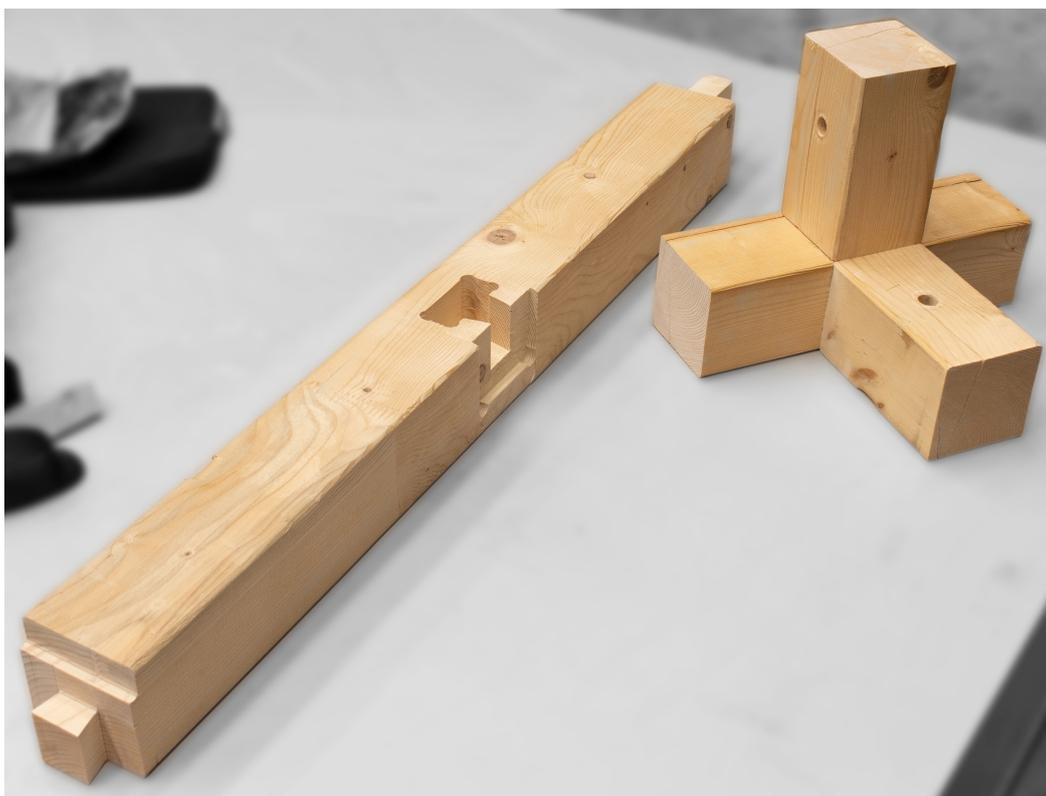


Figure 41: Assemblage complet



Chapitre 4 Applications pratiques de l'assemblage Ari-kake

Traditionnellement les pannes sablières des maisons japonaises sont fréquemment assemblées au Ari-kake, maintenues en place par le montant.¹⁸ Dans cette configuration le montant est placé en dessous de la panne sablière. La solive est maintenue en place par la queue d'aronde et l'épaulement mais n'est pas bloquée sur son flanc supérieur. La contre fiche appuie sur la solive du plancher proche de l'assemblage Ari-kake et pousse la solive vers le bas. De cette façon l'aronde n'a aucune possibilité de sortir de la contre-queue.

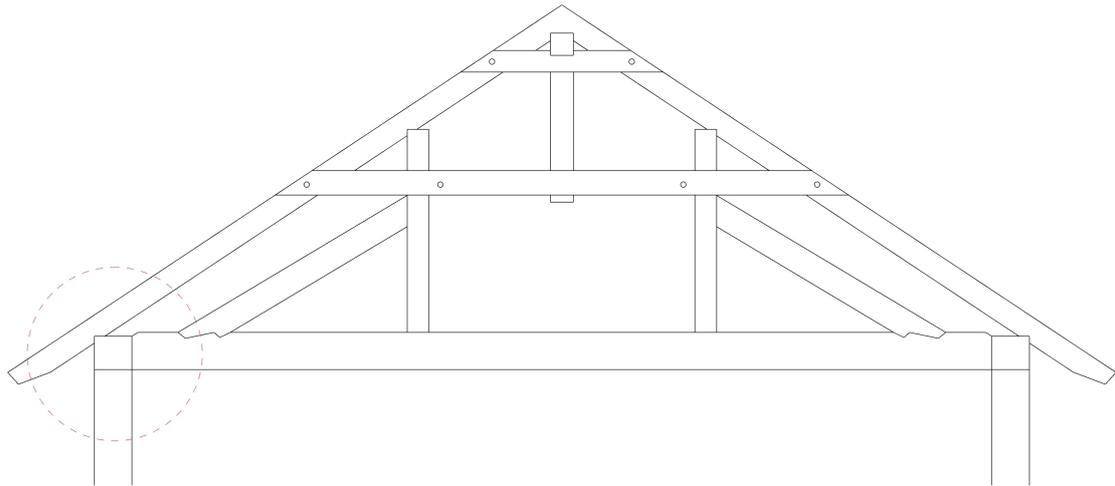


Figure 42: Charpente traditionnelle à panne : La ferme à entrain retroussé et poinçons latéraux

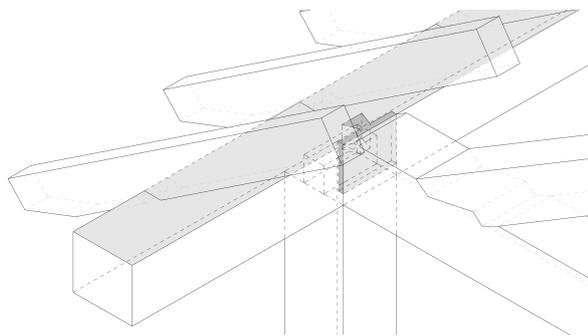


Figure 43 : détail queue d'aronde

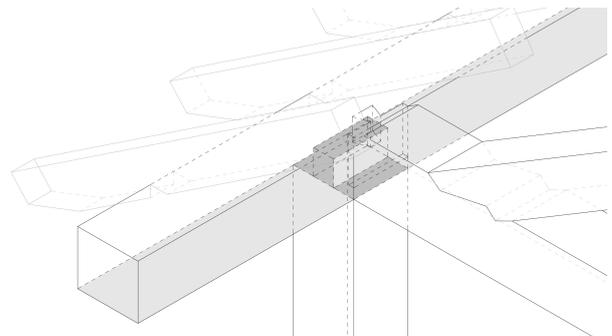


Figure 44: détail tenon mortaise

Dans la construction contemporaine, l'assemblage Ari-kake peut être utilisé de deux manières. La première option consiste à combiner les joints Ari-kake avec des joints à vis. Dans ce cas l'assemblage Ari-kake serait réintroduit dans l'architecture de la même façon que dans les traditions constructives japonaises, c'est-à-dire dans les liaisons entre les montants, les pannes et les solives. Ce nœud se répète dans de nombreux endroits d'une charpente moderne. Les charpentiers pourraient prédécouper les poutres concernées à l'atelier grâce au robot et les amener sur le chantier avec le reste des pièces pour la charpente. Ces nœuds seraient assemblés grâce à Ari-kake tandis que les liaisons restantes seraient assemblées à la façon contemporaine, avec des vis et clous.

¹⁸ GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002, P 121.

Malgré les intérêts évoqués dans le chapitre 1.3 cette option hybride contenant des nœuds Ari-kake et des nœuds vissés, elle ne représente aucun avantage pour les charpentiers. En effet, cette option ajoute de la complexité sans en enlever en contrepartie. Plus de la moitié des nœuds de la charpente ne seront pas concernés et devront être réfléchis, préparés et assemblés de façon habituelle. En revanche pour une petite partie des nœuds assemblés au Ari-kake les charpentiers devront posséder et maîtriser les technologies numériques nécessaires et procéder à la découpe robotique des poutres en question. L'option hybride est donc inefficace et ne sera pas retenue par les charpentiers.

En revanche, l'utilisation de l'assemblage Ari-kake ne devrait pas être limitée à certains nœuds de la charpente classique. Cet assemblage permet de lier des poutres avec 3 axes différents. Il transmet les forces de tension et compression. Ces atouts rendent cet assemblage polyvalent. Si on élimine son inconvénient majeur, qui est le temps de fabrication, Ari-kake peut être utilisé pour assembler toute la structure d'une maison habitable.

En assemblant toute la structure avec le joint Ari-kake on se limite à un seul type de connexion. Les processus de fabrication et de montage seraient ainsi grandement simplifiés, car l'intégrité des pièces seraient préfabriquées par le robot à l'atelier. Dans ce cas la découpe robotique est efficace et présente un gain de temps sur le processus de préparation. Le processus de construction serait également facilité, car la logique de montage serait la même pour les différentes pièces. Les poutres seraient séparées en catégories identifiables par leur longueur et la géométrie à leurs extrémités. Finalement, une maison construite de telle façon pourrait se construire sans pièces métalliques et réduire son empreinte carbone jusqu'au plus petit détail.

L'utilisation d'un assemblage unique pose également des contraintes et pousse à faire certains compromis. Le processus de la conception sera plus long, car le raccordement entre la structure et les couches de l'enveloppe nécessitent une réflexion approfondie dès le départ. Certains éléments architecturaux ne peuvent pas s'assembler à l'Ari-kake et devront se connecter au reste par un assemblage différent, ce qui engendre une logique de connexion supplémentaire. Une augmentation du nombre de logiques d'assemblages rend le montage de la structure plus complexe. Par conséquent s'il n'est pas possible de tout réaliser avec une connexion unique, le choix des techniques doit être minimal afin d'engendrer une structure aussi pure et simple que possible.

Les chapitres suivants présentent des démonstrateurs théoriques de la faisabilité de la méthode de conception architecturale par l'assemblage Ari-kake. Il s'agit d'un espace avec une largeur de 300cm, une longueur de 600cm et une hauteur de façade de 300cm. Le tout est couvert par une toiture à 2 pans. Les deux dimensions étant des multiples de 12, la section du bois qui en résulte est de 12cm par 12cm. La section est carrée afin de simplifier la structure.

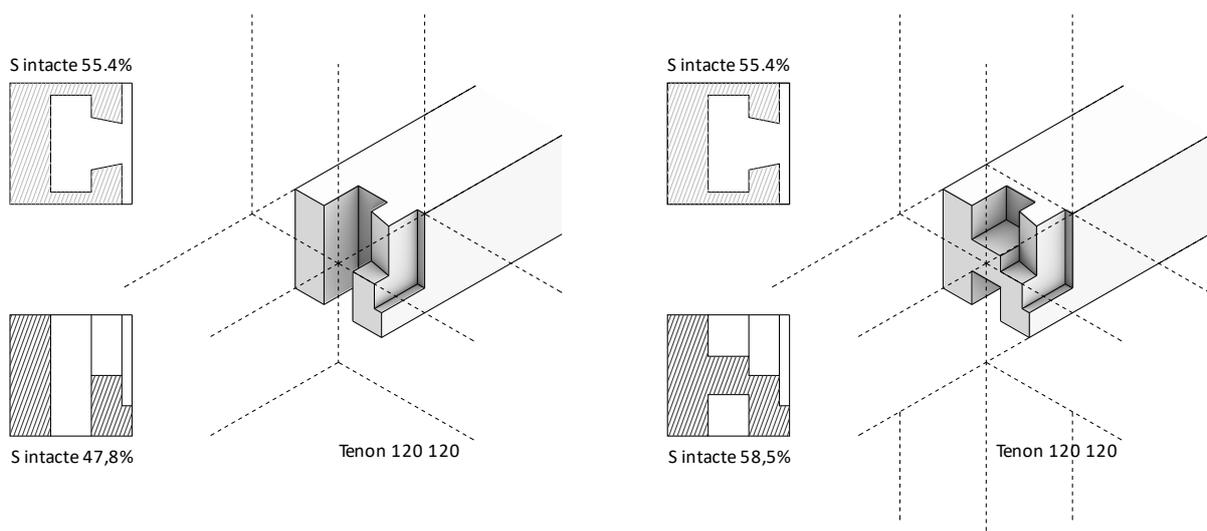


Figure 45 : La section du bois choisie pour la structure des modèles analysés

4.1 Structure en bois massif

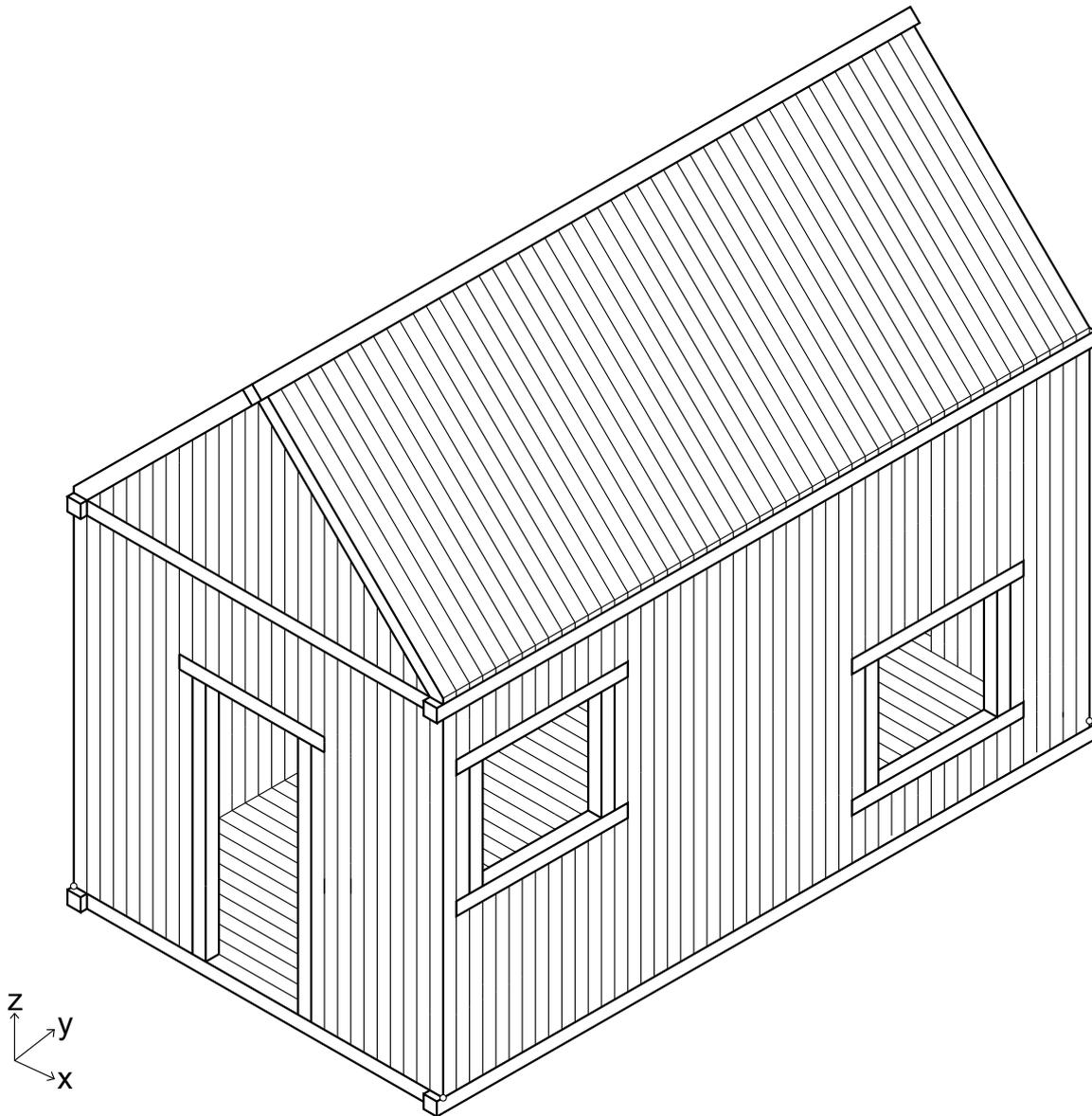


Figure 46 Axonométrie d'une maison en bois massif conçue avec l'assemblage Ari-kake

Cette variante présente une structure conçue avec un seul type d'assemblage, Ari-kake, et une seule section carrée de poutres. Le but de cette démonstration est de montrer la simplicité constructive d'une telle conception.

L'utilisation de l'assemblage Ari-kake est bien adaptée pour la conception d'une maison en bois massif. Il peut connecter des planchers en bois massifs avec des parois solides par l'intermédiaire d'une poutre porteuse qui les accueille et les stabilise. Les chevrons de la toiture sont assemblés aux pannes sablières et faitière par l'assemblage Ari-kake également. Dans cette variante l'inclinaison de la toiture doit être de 45° pour respecter l'angle de 90° entre les chevrons d'un pan et de l'autre. L'inclinaison du toit peut varier mais c'est dans cette configuration là que la géométrie l'assemblage entre les chevrons reste identique à celle de l'assemblage entre le plancher et la paroi.

Les planchers, les parois, ainsi que les pans de toiture sont constitués de poutres posées une à côté de l'autre. La répétition de rangées de montants, de solives et de chevrons engendre une structure étanche et auto-

contreventée. La structure est composée de modules qui combinent les éléments dans le même plan vertical, à savoir les poutres du plancher inférieur et du plancher des combles, les montants de chaque côté du plancher, ainsi que les 2 chevrons face à face (Figure 47). Les modules sont rattachés au système par l'intermédiaire des 5 traverses qui lient le tout ensemble.

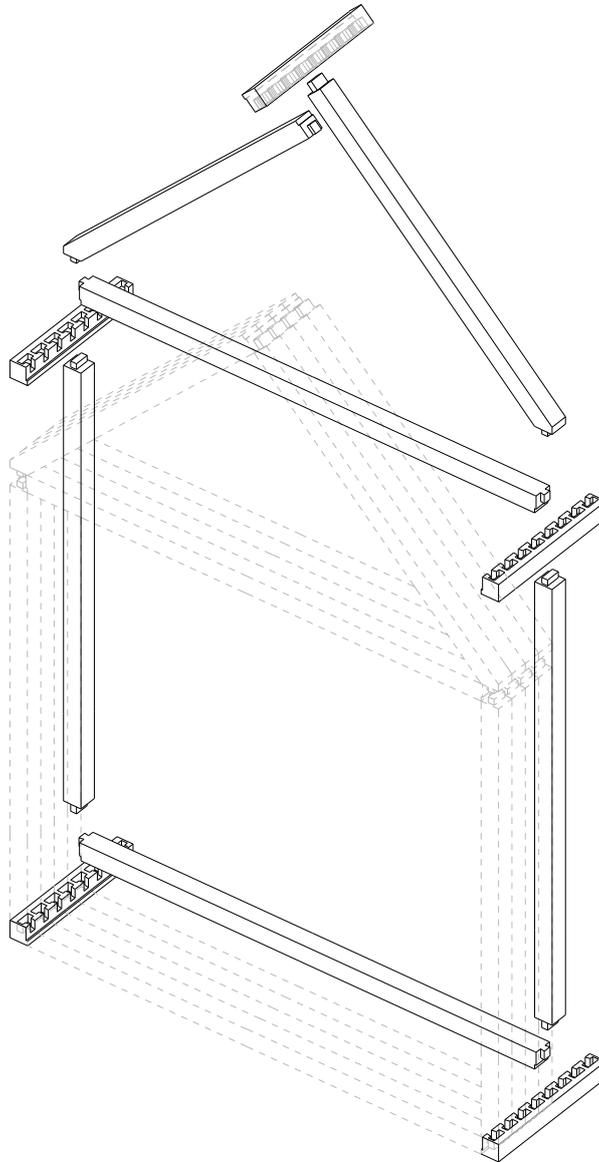


Figure 47 Module vertical

Cette version en bois massif ne présente pas d'isolant thermique. Ce serait difficile ou même impossible de joindre une couche d'isolation à la paroi massive sans utiliser d'autres moyen de fixation. Le choix de ne pas inclure l'isolation se justifie par la volonté de maintenir la pureté du système Ari-kake. Bien que la déperdition thermique d'un mur en bois massif ne soit pas suffisante pour des climats sévères, le bois solide isole assez bien pour être adapté aux climats tendres. La valeur U du mur en bois massif de 12 centimètres d'épaisseur sans isolation supplémentaire varie selon le bois choisi, et sera à 1.1 pour le chêne et le hêtre, et à 0.9 pour l'épicéa.

4.1.1 Le fonctionnement de la structure

Comme évoqué précédemment le module est constitué de poutres dans le même plan vertical. Les traverses sont en revanche dans le plan horizontal. Elles ne sont pas porteuses, leur rôle principal est de lier et stabiliser les modules verticaux. Elles font le lien entre les planchers en tension et les parois qui travaillent en compression.

Les étapes de montage sont décrites dans l'illustration 48. Le processus de montage est hiérarchisé de bas vers le haut et toutes les insertions sont verticales appart pour la panne faitière.

La première étape du montage consiste à insérer toutes les poutres qui forment le sol dans la traverse par l'intermédiaire des arondes (V1). Les montants des parois sont ensuite fixés aux traverses inférieures par les tenon-mortaises, bloquant ainsi les poutres du plancher (V2). Les traverses supérieures sont ensuite posées sur les montants des parois par l'intermédiaire des mortaises (V3). Le plancher des combles est inséré dans les traverses supérieures (V4). Les pignons triangulaires doivent être installés avant de positionner les chevrons. Les montants des pignons sont fixés dans les mortaises aménagées dans les poutres aux extrémités du plancher des combles (V5). Les deux rangées de chevrons sont fixées aux traverses supérieures et maintenues par des cales (V6 et V7). Finalement la panne faitière est insérée dans les chevrons avec un vecteur d'insertion à 45° par rapport à la verticale (V8). Elle stabilise ainsi les chevrons et les cales peuvent être enlevées.

Structure en bois massif

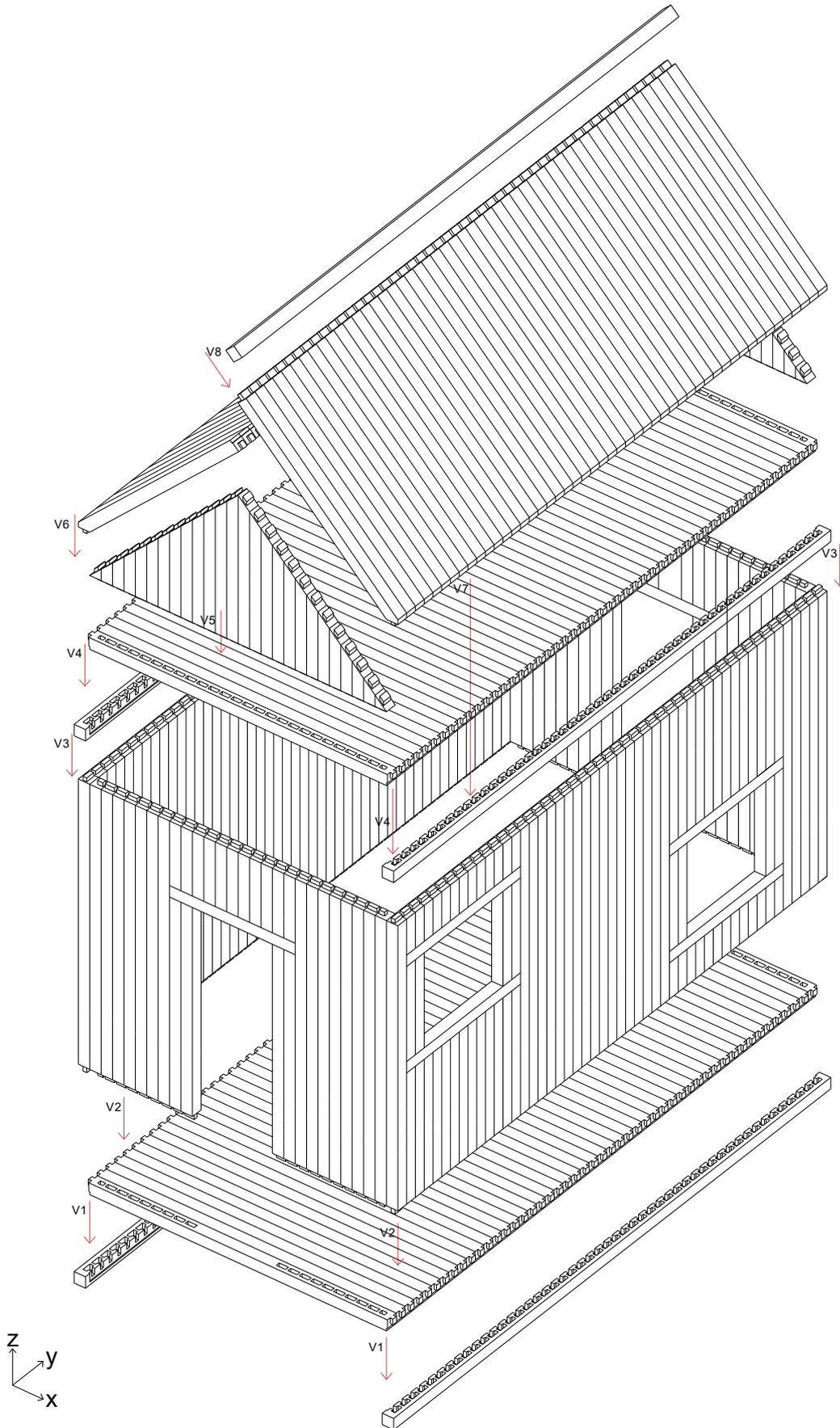


Figure 48 Etapes de montages et vecteurs d'insertion des pannes, planchers, façades et toit.

La géométrie du nœud entre la traverse inférieure, la poutre du plancher et le montant de la paroi est un assemblage Ari-kake ordinaire (Figure 49). Mais à cause de la répétition des poutres du plancher, l'entaille de l'épaulement court sur toute la longueur de la poutre de support. Dans cette configuration il n'y a donc pas d'épaulement latéral et l'arête de la poutre n'est plus épaulée par la traverse. Par ailleurs, l'épaulement latéral n'a plus d'utilité dans un système où les poutres sont agencées une à côté de l'autre, car elles empêchent le gauchissement naturellement.

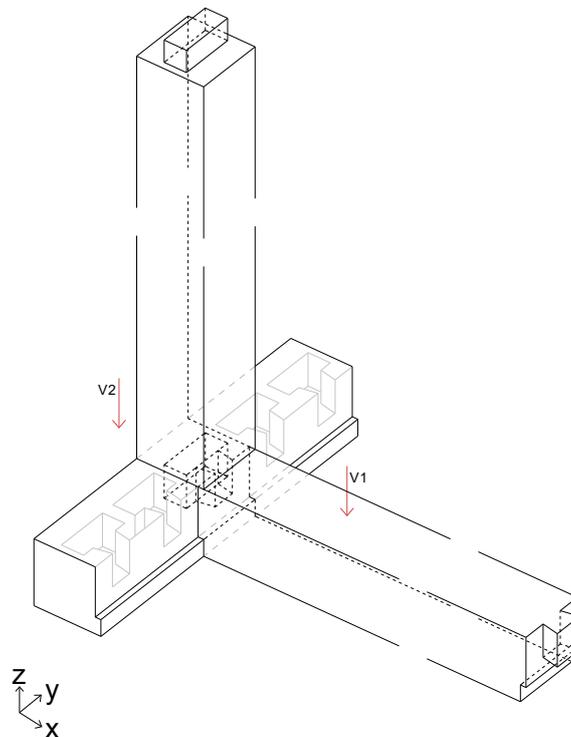


Figure 49 Traverse, poutre du sol et montant de la paroi

La géométrie de l'assemblage entre le montant de la paroi, la traverse supérieure, la poutre du plancher des combles et le chevron (Figure 50), ne correspond pas à la géométrie de l'assemblage Ari-kake ordinaire. Ce nœud accueille une poutre supplémentaire qui est le chevron. La traverse est constituée de deux mortaises, sur des flancs opposés de la poutre. La mortaise inférieure accueille le tenon du montant de la paroi et la mortaise supérieure reçoit le tenon aménagé dans le chevron. Dans ce nœud la poutre du plancher est bloquée par le chevron.

Ce nœud influence la hauteur du tenon, qui serait répercutée sur les autres nœuds dans le but d'avoir des dimensions uniques dans les assemblages. Comme ce nœud se répète tous les 12 cm sur la traverse les mortaises qui y sont aménagées enlève beaucoup de matière à la poutre. Afin de maintenir une certaine résistance de la traverse, il faut maintenir une épaisseur de bois non-découpée sur toute la longueur de la traverse. Ceci signifie que le tenon ne doit pas dépasser 1/3 de la hauteur de la poutre pour en laisser 1/3 intacte. La hauteur de la mortaise est donc de 4cm.

La géométrie de l'assemblage entre les chevrons et la panne sablière est un assemblage Ari-kake ordinaire, tourné à 45° (Figure 51). Le vecteur d'insertion est également tourné de 45°. L'arête d'un chevron est bloquée par l'épaulement du tenon du chevron opposé.

Structure en bois massif

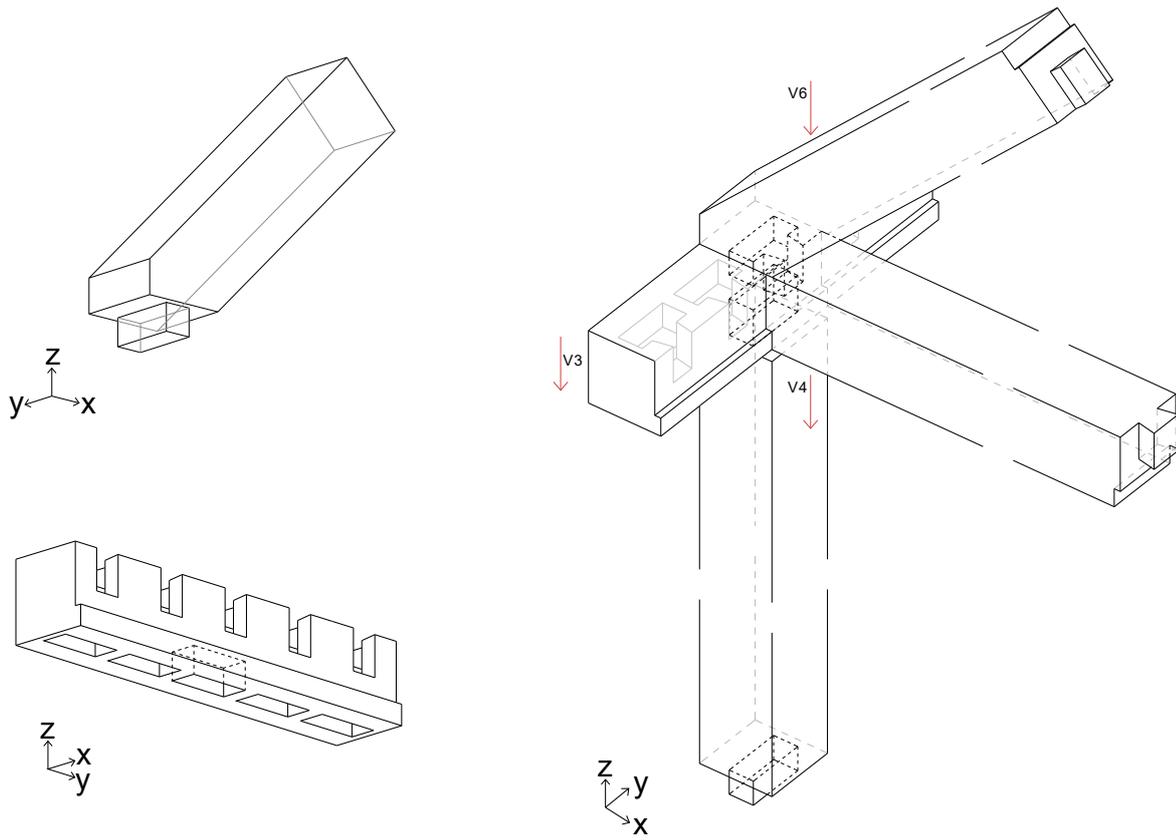


Figure 50 Montant, traverse supérieure, poutre du plancher des combles et un chevron

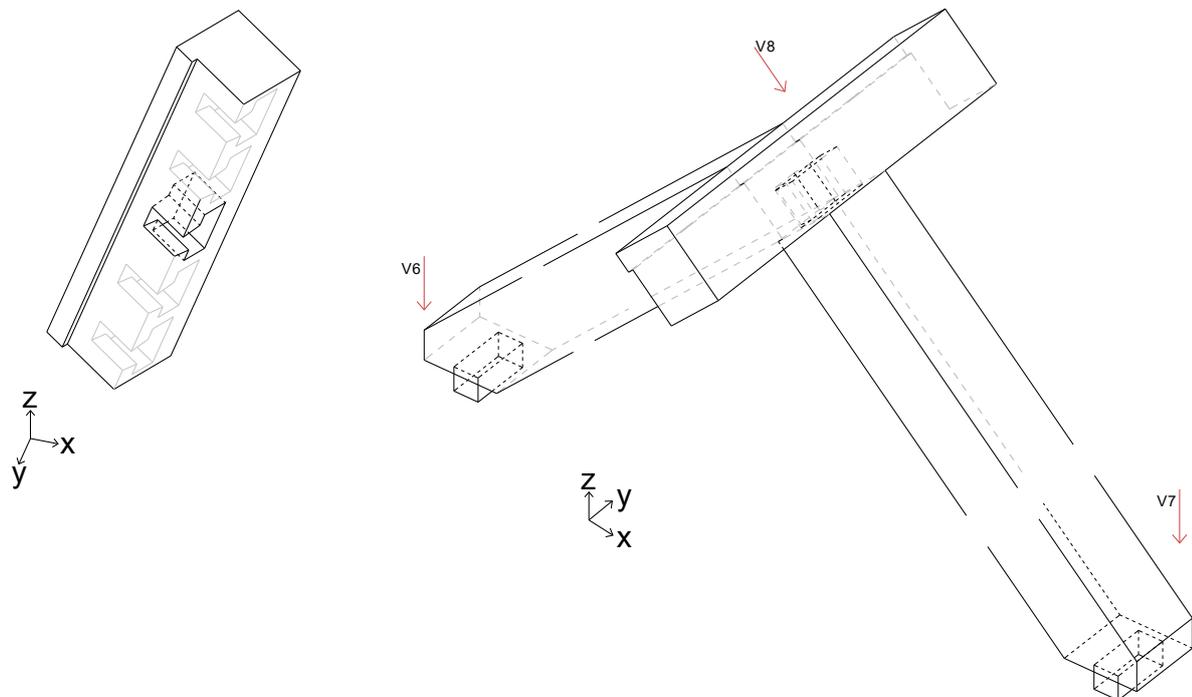


Figure 51 Les chevrons et la panne sablière

Les éléments de la façade, tels que les portes et les fenêtres, peuvent être aménagés dans les montants de la paroi. Afin d'éviter des entailles dans les montants les extrémités de la fenêtre ou de la porte doivent correspondre au multiple de l'épaisseur des poteaux. Dans ce cas proposé la largeur de la fenêtre ou de la porte sera un multiple de 12. Une traverse est aménagée à l'endroit où les montants sont interrompus par l'élément. Des tenon-mortaises suffisent pour stabiliser les montants en dessous ou en dessus de l'élément, les montants latéraux adjacents empêchant les mouvements latéraux.

Les montants qui forment le pignon sous les chevrons sont coupés selon la ligne qui forme le toit et reçoivent des tenons coupés selon la pente de la toiture à l'endroit du montant. De cette façon les mortaises aménagées dans les chevrons restent parallèles à l'orientation du chevron.

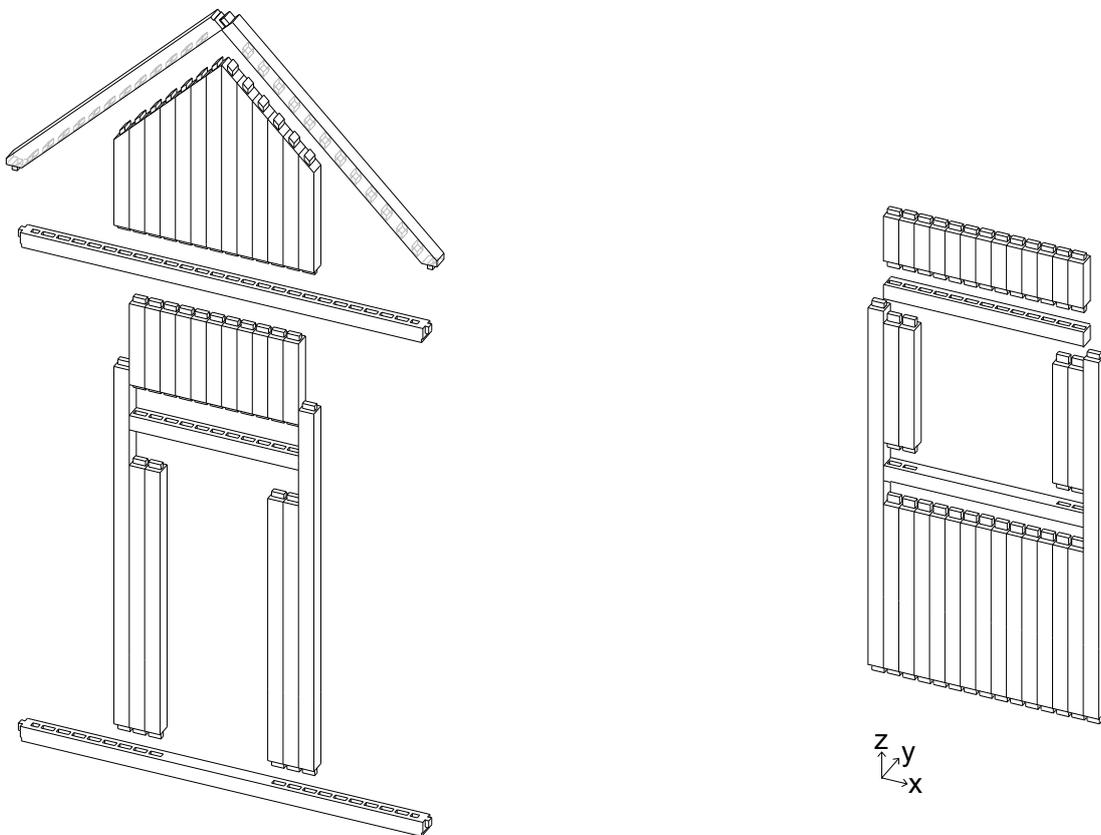


Figure 52: A gauche : séquence de montage des éléments au tour de la porte et sur le pignon sous les chevrons ; à droite : séquence de montage autour d'une fenêtre.

4.2 Structure à ossature bois avec des panneaux de contreventement

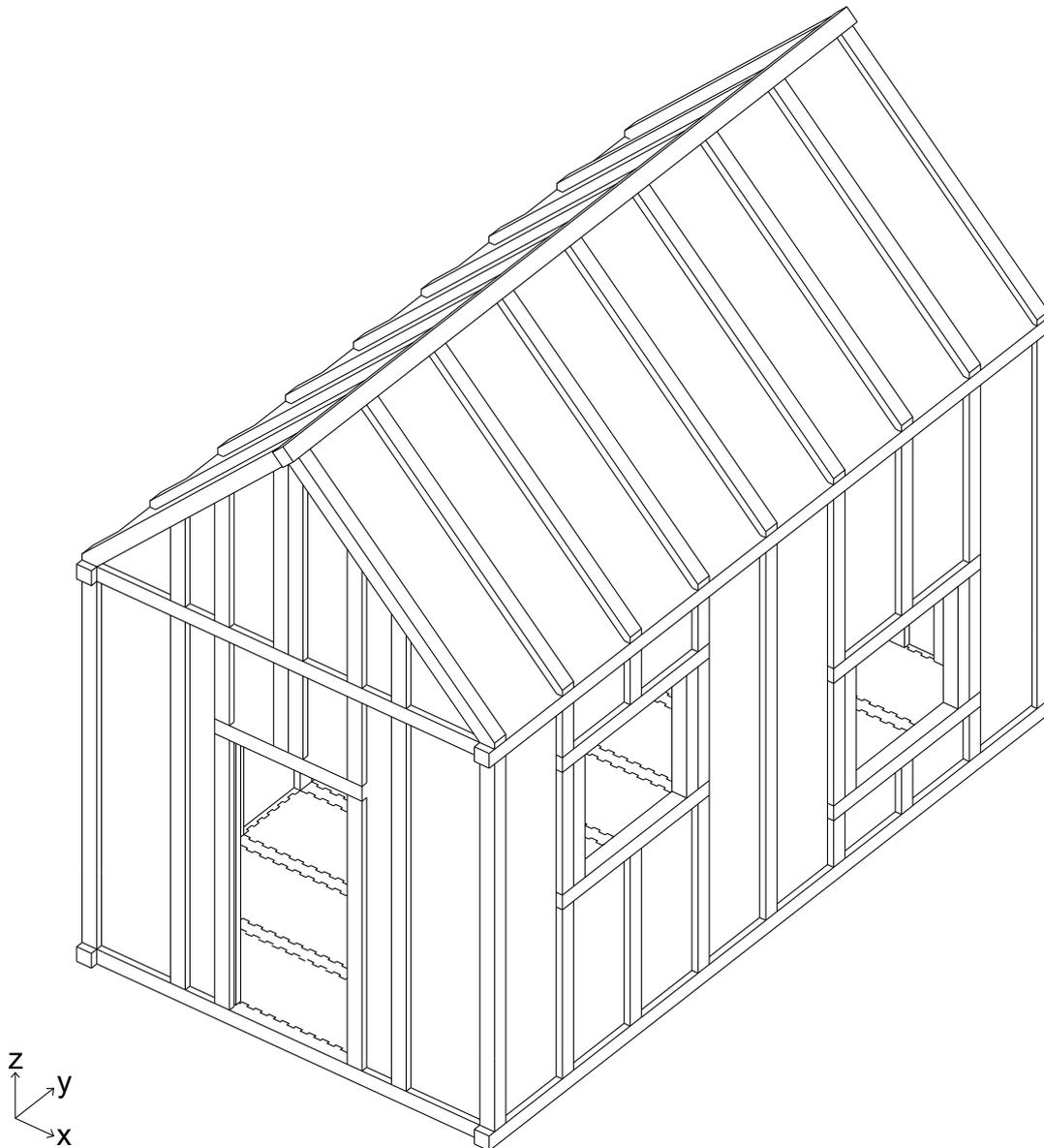


Figure 53 Axonométrie version avec panneaux

Les structures en ossature bois impliquant des panneaux rigides de contreventement sont très populaires et présentent de multiples avantages, tel que la préfabrication, le faible coût et la rapidité du montage. Ce type de construction peut être considéré comme un système hybride composé de cadres structurels massifs et de panneaux légers. Il est intéressant de voir comment le joint Ari-kake influence les systèmes hybrides.

Un nouveau démonstrateur avec la même affectation et les mêmes dimensions que la précédente est proposée, mais cette fois conçue comme une structure en ossature bois contreventée par des panneaux.

L'intérêt de cette technique réside dans les coûts financiers des matériaux et dans la possibilité d'intégrer l'isolation thermique dans la structure. Mais cette version présente des difficultés supplémentaires en comparaison avec la version en bois massif. Les panneaux fonctionnent différemment des poutres et la connexion entre les deux systèmes ne peut pas se faire à l'aide de l'assemblage Ari-kake. Par contre les panneaux peuvent être intégrés dans la structure par différents moyens. S'il n'est pas possible de se limiter

à l'assemblage Ari-kake pour construire la maison, la construction doit tout de même rester aussi simple que possible.

4.2.1 La composition de la structure

Il existe des différentes techniques pour intégrer des panneaux à une ossature. Certaines fonctionnent grâce aux clous ou aux vises et d'autres fonctionnent avec des connections bois à bois. Ce sont celles qui seront retenues pour cette démonstration. Voici les méthodes de fixation des panneaux :

- a. Les panneaux sont fixés par-dessus la structure à l'aide des clous/vises. C'est la technique la plus simple mais elle nécessite beaucoup de temps sur le chantier et elle contient un nombre considérable des pièces métalliques.
- b. Insertion du panneau entre deux poutres grâce aux rainures. Cette technique nécessite de préparer les rainures dans l'atelier mais elle simplifie et accélère le montage sur le chantier. Les rainures aménagées dans le cadre maintiennent le panneau en place qui empêche le cadre de se déformer.
- c. Le panneau et le cadre sont alignés d'un côté du cadre et fixés ensemble grâce aux multiples joints tenon-mortaise ou queue d'aronde. La répétition de l'assemblage sur tout le pourtour du panneau augmente la surface de contact avec les poutres du cadre. Pour une plus grande stabilité la connexion peut être renforcée avec des clous si cela est nécessaire.

La technique la mieux adaptée pour ce démonstrateur consiste en rainures aménagées dans la structure primaire. Elle simplifie le montage et le démontage, elle préserve la majeure partie de la résistance dans la poutre de bois et elle lie au mieux la structure et les panneaux sans moyens de fixation additionnels. En revanche pour bloquer le panneau dans tous les sens les rainures doivent être écartées du bord tranchant du cadre vers le milieu de son épaisseur. Au moins 1 cm doit être laissé entrer le tranchant de la poutre et le panneau. Ceci implique que l'axe d'insertion du panneau correspond à l'axe d'insertion de la poutre (Figure 56). Par ailleurs l'assemblage Ari-kake prévoit que tous les éléments s'insèrent verticalement. Cette contrainte complique l'utilisation des rainures dans les poutres horizontales des planchers. Bien qu'il soit possible de préassembler les poutres du plancher avec les panneaux et ensuite insérer le tout dans les traverses, ceci peut devenir compliqué pour des grandes surfaces de sol. Il est alors préférable d'opter pour l'assemblage aux joints multiples tenon-mortaise pour les panneaux horizontaux. Ainsi les poutres sont connectées à la traverse une après l'autre et les panneaux se mettent en place également un après l'autre.

Le cadre structurel de cette version est identique à celui de la version avec du bois massif. En comparaison avec la version précédente 5 cadres sont enlevés et remplacés par un panneau. Le cadre est donc répété tous les 72cm, laissant des travées de 60cm entre deux comblées par des panneaux fins. La section des poutres est la même que dans la version précédente et les nœuds sont également identiques.

Dans la version avec du bois massif la traverse est affaiblie par l'ajout des mortaises et contre-queues tous les 12 cm, en revanche les poutres de plancher, les montants et les chevrons sont intacts sur leur longueur. Dans la version avec des panneaux, les traverses sont plus résistantes, les entailles étant placées tous les 72cm. En revanche l'ajout des panneaux augmente le nombre des entailles dans les poutres du plancher et la traverse. L'épaisseur des panneaux doit être choisie en fonction de l'épaisseur des poutres pour garantir un impact minimal à leur résistance.

Cette variante est donc constituée de 3 systèmes constructifs : l'ossature assemblée avec Ari-kake (Figure 21), les panneaux verticaux insérés dans les rainures des montants et des chevrons, les panneaux horizontaux assemblés avec les poutres des planchers (Figure 55).

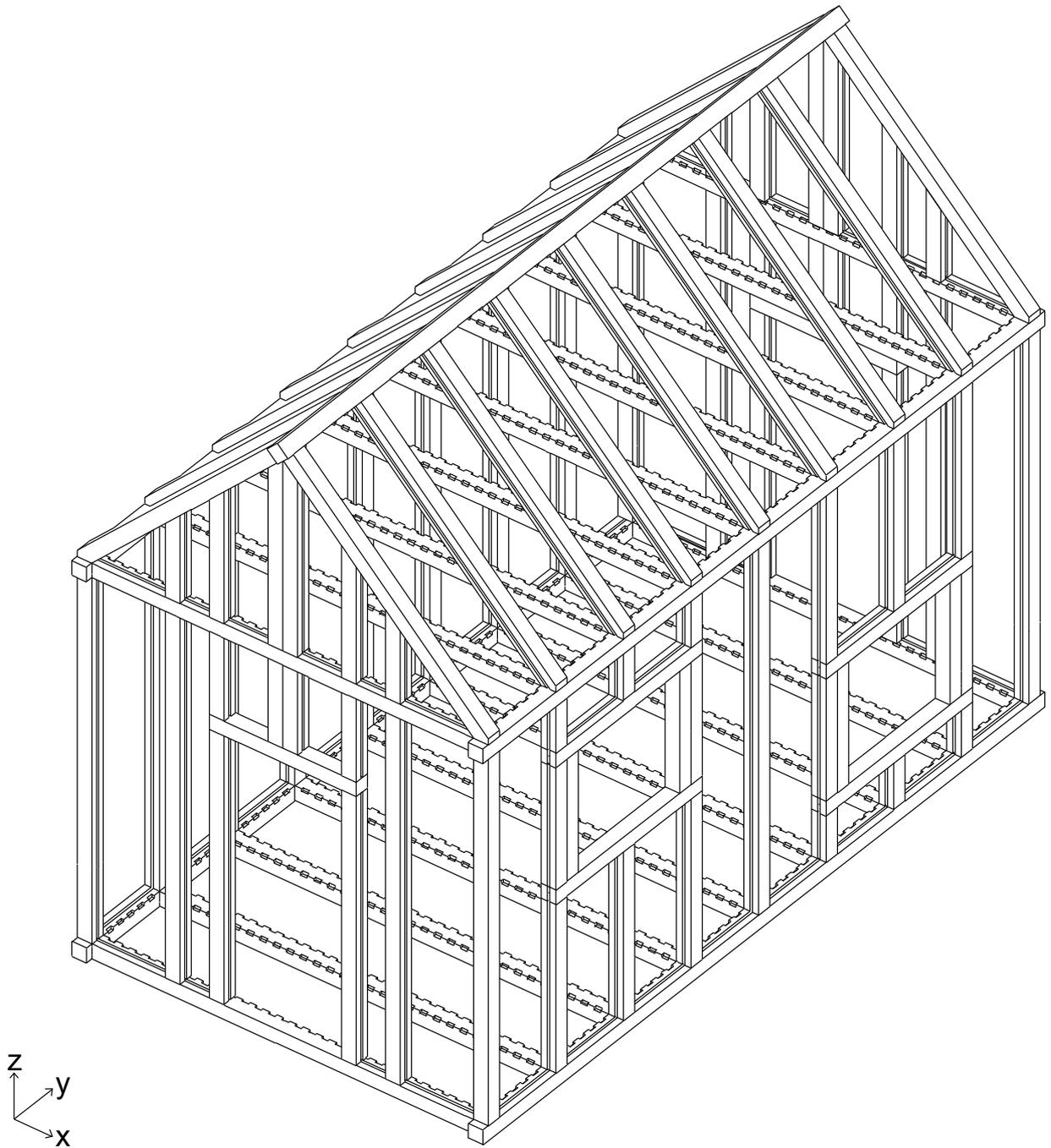


Figure 54 Illustration de la structure primaire

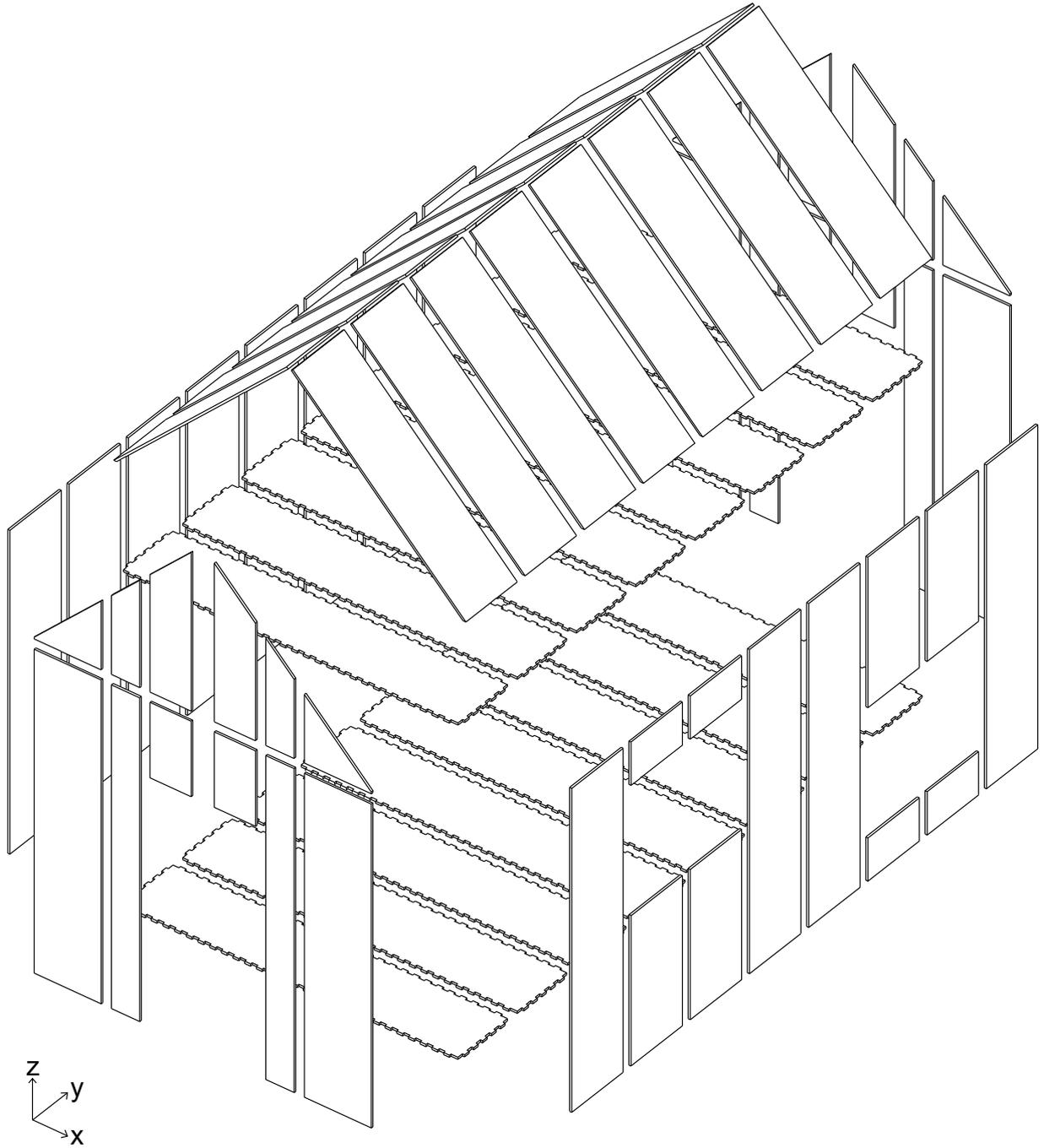


Figure 55 Illustration des panneaux

4.2.2 Séquence de montage

La Figure 56 illustre la séquence de montage de la maison avec des panneaux. Dans le but de simplifier la compréhension du dessin, chaque travée ne contient qu'un panneau et l'isolation est exclue du dessin. Dans le cas des rainures, le principe et l'ordre de montage sont les mêmes que ce soit un panneau unique ou deux panneaux avec de l'isolant au milieu (Figure 57).

La première étape du montage consiste à insérer toutes les poutres qui forment l'ossature du sol dans la traverse par l'intermédiaire des arondes (V1). Une fois que les poutres sont en place, les panneaux du sol sont assemblés aux poutres et à la traverse (V2). Les montants des parois sont ensuite fixés aux traverses inférieures par les tenon-mortaises, bloquant ainsi les poutres du plancher (V3). Avant de mettre les traverses supérieures les panneaux verticaux sont glissés dans les rainures des montants (V4). Les traverses sont également pourvues de rainures, ce qui empêche les panneaux de gauchir au fil du temps. Les traverses supérieures sont ensuite posées sur les montants des parois par l'intermédiaire des mortaises (V5). Les poutres qui forment le plancher des combles sont insérés dans les traverses supérieures (V6). Les pignons triangulaires doivent être installés avant de positionner les chevrons. Une fois que les poutres sont en place, les panneaux du sol des combles sont mis de la même manière que pour le sol inférieur (V7). La mise en place des chevrons se fait simultanément avec les panneaux. Dès que 2 chevrons sont fixés à la traverse on les appuie sur une cale et on les consolide avec le panneau (V8 et V9). Une fois que tous les chevrons du pan sont consolidés nous procédons de la même manière avec le pan opposé (V10 et V11). Finalement la panne faitière est insérée dans les chevrons avec un vecteur d'insertion à 45° par rapport à la verticale (V12).

En fonction de l'importance de l'isolation thermique, l'épaisseur de l'isolant peut être l'élément déterminant pour l'épaisseur des montants. Le système des montants contreventés par deux panneaux l'isolant est mis entre les panneaux. Son épaisseur est contrainte par le décalage des rainures vers le milieu du montant et l'épaisseur des panneaux. Pour augmenter la résistance de la rainure il faut l'éloigner autant qu'on peut de l'arrête de la pièce de bois. Ce système nécessite donc un compromis entre l'efficacité de l'isolant thermique et la stabilité structurelle de la façade.

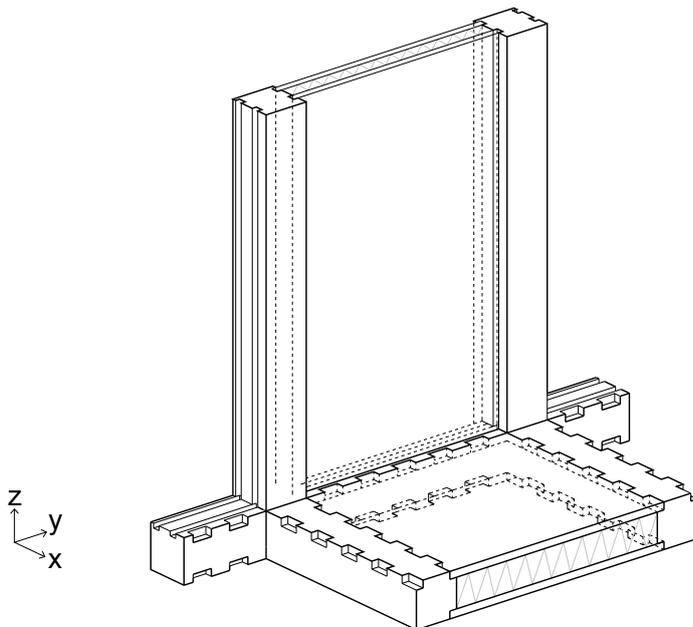


Figure 56 Détail avec isolation

Structure à ossature bois avec des panneaux de contreventement

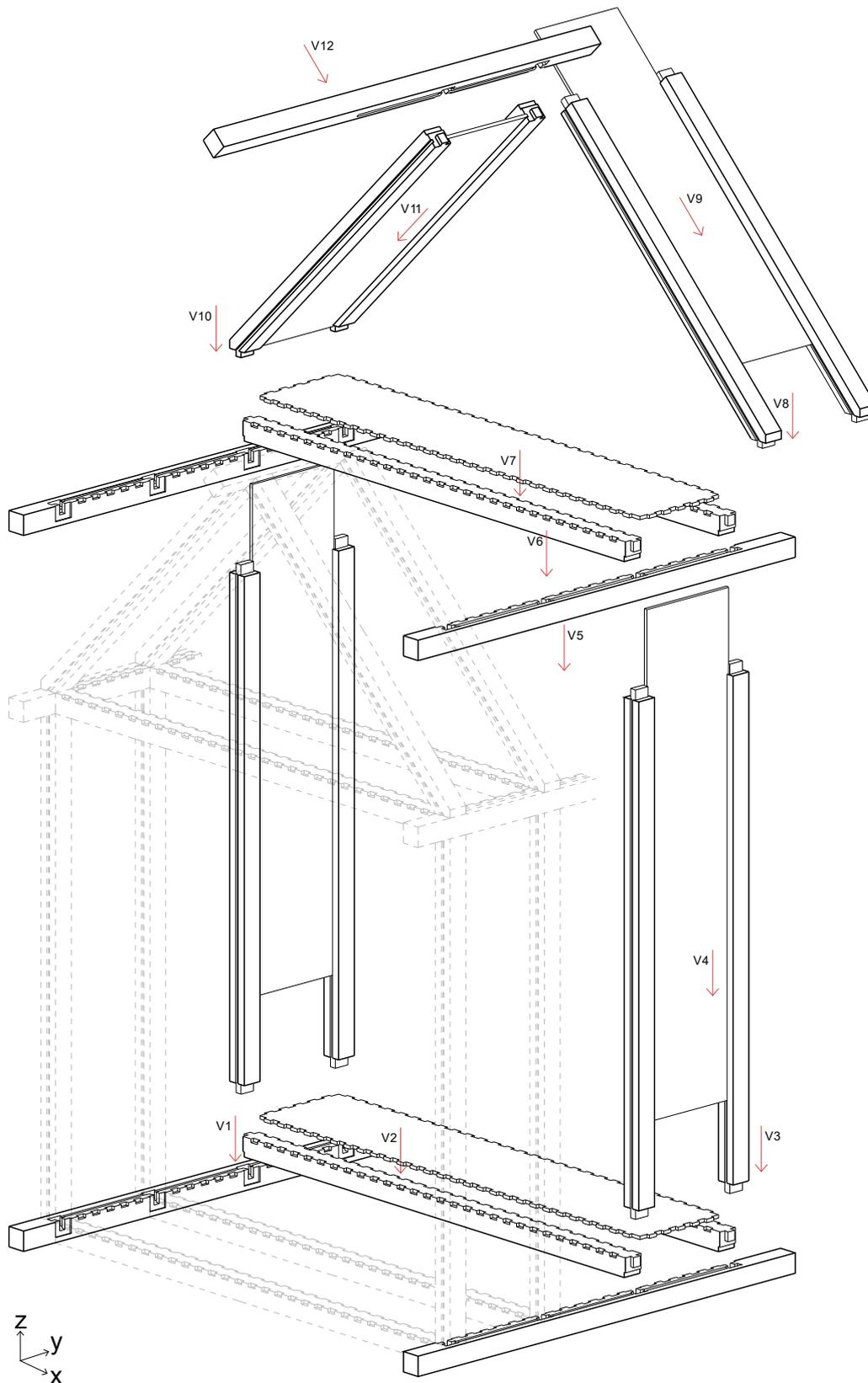


Figure 57 Module décomposé

4.3 Structure avec du bois rond

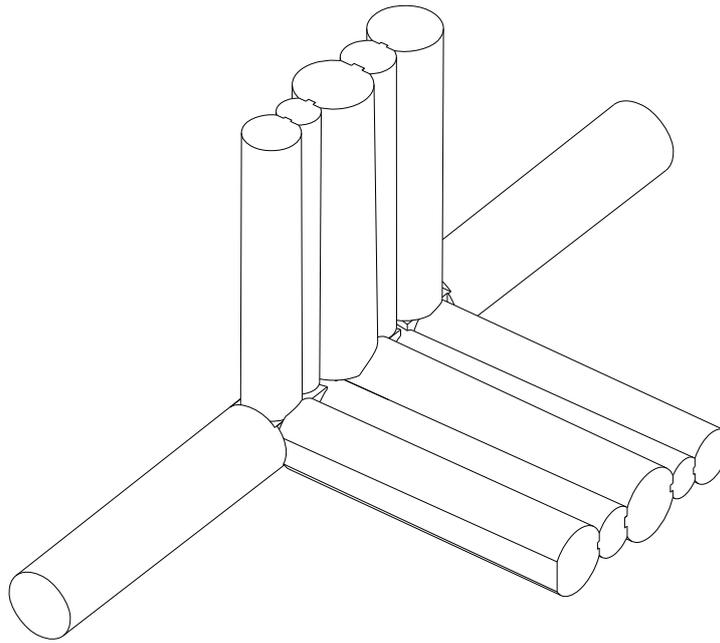


Figure 58: Noeud d'une structure en rondins de bois assemblé à l'aide de Ari-kake

Le bois rond s'utilise depuis des siècles pour la construction, notamment dans les structures en empilement de rondins de bois ou en construction en palissade.

Traditionnellement les rondins sont partiellement équarris et empilés à l'aide des rainures et languettes.

Cette technique est une des plus efficaces en termes de matière première et de production de déchets. Lorsque l'on utilise des troncs pour la construction très peu de matière est enlevé, seulement pour former 2 surfaces de contact pour l'empilement. Ceci permet de préserver une large partie de l'épaisseur du tronc de l'arbre, et donc mieux conserver les qualités structurelles de l'arbre, que lors de l'équarrissage des poutres de bois. Cette technique permet d'utiliser des arbres fins pour la construction où l'équivalent en bois équarri nécessiterait un arbre plus large. C'est également la technique qui nécessite peu de main-d'œuvre pour la transformation et donc engendre des coûts bas¹⁹.

En ce moment il y a des recherches sur la fabrication numérique de structures avec du bois rond, comme celle du projet Wood Chip Barn réalisé par des étudiants de AA à Hooke Park. Une des particularités de cette technique résulte dans la variation constante du diamètre du tronc. Les troncs des arbres sont coniques avec une section plus fine au sommet de l'arbre qu'à sa base. Cette particularité rend impossible la standardisation d'un élément constructif en bois rond. En revanche il est possible d'utiliser au mieux la qualité de chaque tronc en prenant en compte sa géométrie unique dans le design numérique du projet. Ceci est rendu possible grâce au développement de la technologie de scanner tridimensionnel. En scannant les troncs d'arbres on peut obtenir leurs géométries et en extraire les qualités structurelles, dans le but de les intégrer dans le design en fonction des informations obtenues.

¹⁹ BUKAUSKAS Aurimas, BREGULLA Julie, MAYENCOURT Paul, MUELLER Caitlin, SHAVNA Bharna, SHEPERT Paul, WALKER Pete. Whole timber construction: A state of the art review. MIT, Boston 2018.

Certaines méthodes de construction en bois rond sont développées actuellement au laboratoire Ibois à l'EPFL dans le cadre des recherches menées par Petras Vestartas. C'est intéressant de se poser la question du fonctionnement de l'assemblage Ari-kake dans un système développé en bois rond. Ce chapitre analyse le fonctionnement de l'assemblage face à la variation des troncs qui constituent la structure et aux rencontres des sections rondes dans le nœud angulaire.



Figure 59: Projet Wood Chip Barn, réalisé par les étudiants de AA à Hooke Park. Ce projet est un treillis spatial grâce à la géométrie des 25 fourches d'arbres scannées et implantées selon leurs valeurs géométriques et structurelles.



Figure 60: Projet de recherche mené par Petras Vestartas à l'Ibois, EPFL. Ce prototype fait partie de l'étude de cas End-Side Joints, qui combine un maillage de rondins de bois avec des panneaux de contreventement.

Les recherches sur le bois rond méritent une investigation approfondie, qui pourrait être sujet d'un autre travail de recherche. Le cas de figure étudié dans cette thèse est l'adaptation du modèle de structure en bois massif où les madriers équarris sont remplacés par des rondins de diamètre variable. Les questions de la géométrie globale du plancher ou de la paroi ne sont pas traitées ici. Les rondins possèdent 2 faces planes et sont joints entre eux à l'aide de rainures et languettes. Les troncs sont de forme conique et de diamètre variable. Ils sont alignés à leurs milieux respectifs.

Les rondins horizontaux et verticaux sont dotés de rainures pour améliorer le contact entre les rondins et améliorer la stabilité de l'ensemble. Les éléments constituant les planchers et les parois sont assemblés entre eux avant d'être posés sur le rondin de support (Figure 61). En deuxième lieu les rondins verticaux sont insérés dans le rondin de support, bloquant ainsi les rondins horizontaux (Figure 62). La séquence de montage est ralentie et compliquée par la nécessité de préassembler le plancher avant de le poser sur le support.

Lors de la planification du nœud Ari-kake avec une palissade de rondins il faut faire un compromis entre 2 volontés, à savoir la transformation minimale des arbres et la simplicité du montage.

Dans le cas de bois massif équarri l'assemblage Ari-kake fonctionne en tant que connexion dans un cadre, qui est réitéré le long des traverses. Les sections carrées étant identiques, chaque montant se trouve exactement en dessus de la poutre respective. Les axes centraux de la poutre et du montant se croisent dans le nœud.

Dans le cas du bois rond l'assemblage Ari-kake est désaxé. Les diamètres des rondins horizontaux ne correspondent pas aux diamètres des rondins verticaux. Il n'y a pas de système de cadres, car l'axe central du montant ne croise pas celui de la poutre respective. Si un montant est de diamètre large et le suivant est de diamètre significativement réduit, certains montants risquent de ne pas recouvrir la queue d'aronde du rondin horizontal ou du moins pas entièrement. Il est donc impératif de procéder au placement de chaque géométrie 3d à sa place dans le design numérique.

Structure avec du bois rond

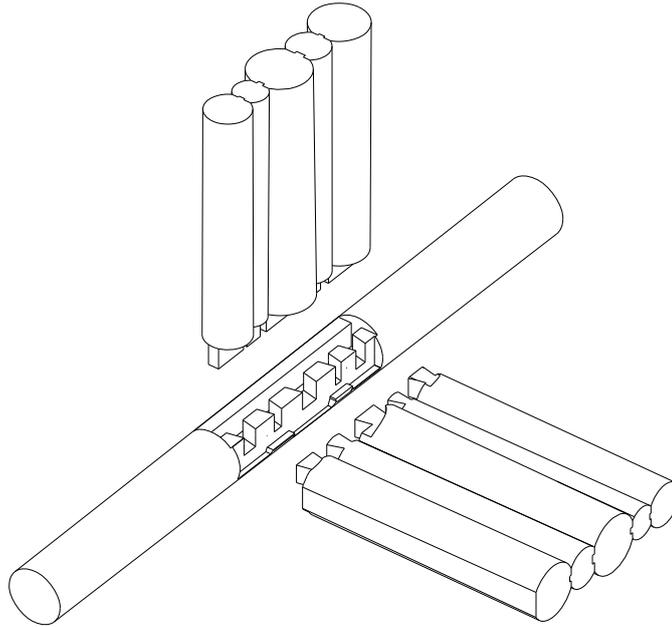


Figure 61: Les rondins horizontaux sont assemblés ensemble et insérés dans les contres-queues du rondin de support

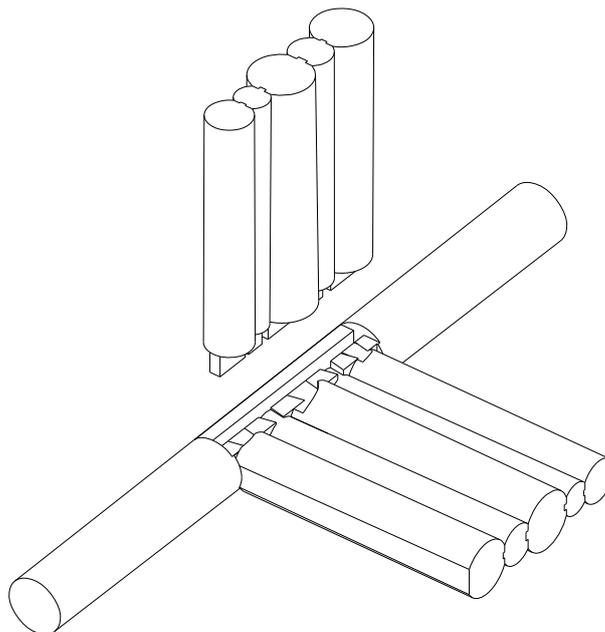


Figure 62: Les rondins verticaux s'insèrent dans une rainure continue dans le but de la simplification du montage.

A l'échelle de l'assemblage la variabilité des diamètres des troncs se traduit par un décalage entre les tenon-mortaises et les queues d'aronde respectives. Si l'on privilégie la transformation minimale du rondin de support les mortaises seraient fraisées une par une, pour correspondre aux tenons respectifs. Mais la géométrie déjà complexe d'une paroi en rondins est difficile à insérer dans des mortaises multiples et nécessite une précision de manutention extrême. Il serait donc recommandable de fraiser une rainure traversante d'un bout à l'autre du tronc de support pour simplifier la pose de la paroi, ce qui laisserait du vide indésirable entre les tenons.

Également dans le but de simplification du montage le rondin de support est scié pour former une surface horizontale plate qui accueillera les rondins verticaux. Si un rondin vertical possède un diamètre supérieur à celui du rondin de support, le négatif de son diamètre devra être fraisé dans le rondin du plancher (Figure 63). Si le diamètre du tronc vertical est inférieur au 2/3 du diamètre du rondin de support, il ne couvrira pas la queue d'aronde. Il est donc nécessaire de trier le stock des arbres à disposition pour en choisir les mieux adaptés à l'assemblage où ils se rencontrent. L'assemblage conditionne le choix des troncs et par conséquent la géométrie de la construction.

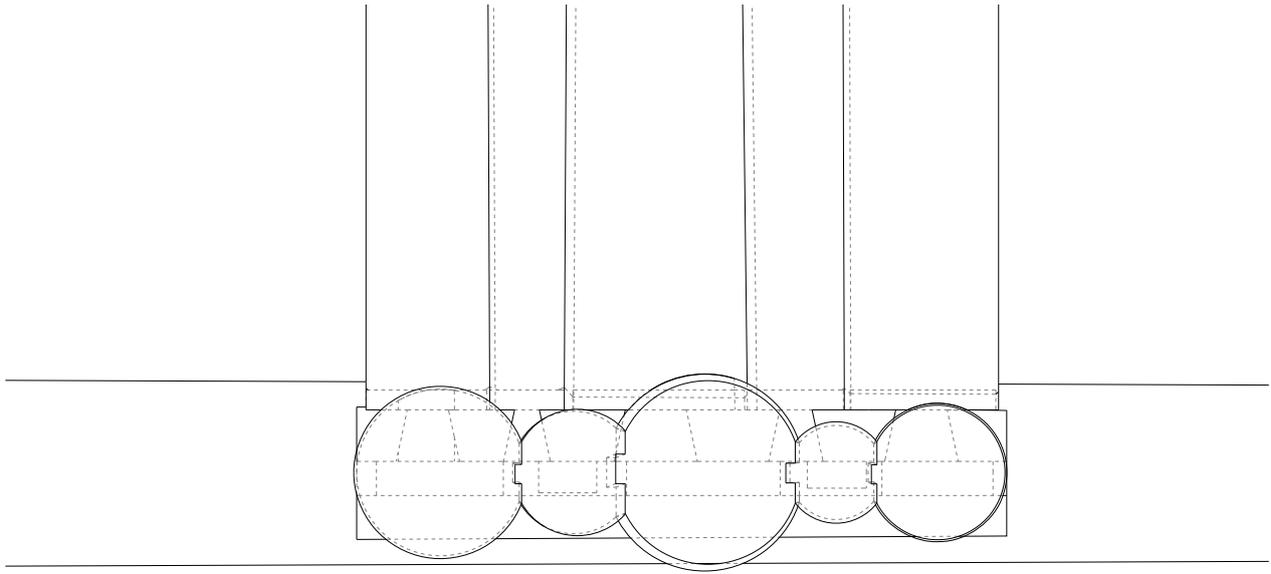


Figure 63 : Les troncs verticaux ne sont pas forcément alignés avec les troncs horizontaux.

Une variante avec des parois et planchers massifs en bois rond n'est pas la variante la plus appropriée pour l'assemblage Ari-kake. Malgré le potentiel des technologies telles que le traitement de la géométrie scannée, les algorithmes de placement, la fabrication robotique, la réalisation de cette méthode est beaucoup plus compliquée qu'une structure composite rondins/panneaux de contreventement, assemblée à l'aide du joint Ari-kake. La répétition des rondins engendre plus de difficultés que la répétition des éléments standardisés, tels que des montants équarris. En fonction de leur diamètre les rondins verticaux peuvent se chevaucher avec les rondins horizontaux, nécessitant un contrôle approfondi de la jonction entre l'élément de la paroi et celui du plancher. Ces chevauchements sont plus faciles à contrôler dans une structure composite rondins/panneaux, car elles seraient ponctuelles. Le système à coque, comme celui développé par Petras Vestartas dans son prototype End-Side Joints (Figure 60), pourrait être imaginé avec l'assemblage Ari-kake.

L'analyse de la méthode par répétition de bois rond démontre certains comportements propres au bois rond, qui diffèrent de l'assemblage des planchers et murs massifs en bois équarri. Elle montre également les limites de l'assemblage Ari-kake et la nécessité de le transformer dans certaines techniques de construction.

4.4 Structure avec du bois massif et des poutres de support courbés en bois lamellé-collé

Certaines volontés architecturales impliquent des espaces de forme organique, des éléments structuraux non-linéaires, des parois et des planchers qui ne sont pas dans des plans verticaux et horizontaux. Ces idées étaient difficiles à concevoir au dernier siècle mais avec deviennent plus fréquentes en architecture contemporaine grâce aux logiciels paramétriques.

Ce modèle analyse le comportement de l'assemblage Ari-kake dans un cas où il est réitéré le long d'une poutre courbe. Le plancher est composé de poutres en bois massif équarri, disposées parallèlement. Les poutres de plancher pénètrent donc toutes parallèlement dans la poutre de support, en revanche l'angle avec lequel elles croisent la poutre courbée n'est pas le même. Les montants sont orientés selon les poutres du plancher. De plus les montants sont orientés selon un angle vertical variable.

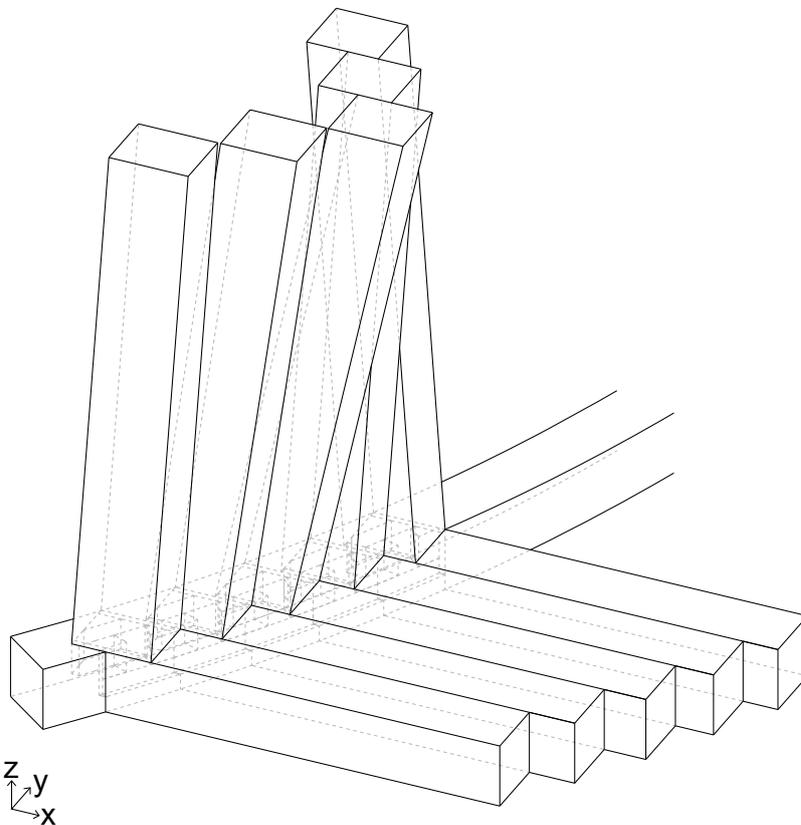


Figure 64 : Modèle de plancher en bois équarri et une poutre arrondie

L'arête de la poutre du plancher s'oriente selon le vecteur normal à la courbure de la poutre de support à l'endroit de rencontre avec la poutre du plancher.

Le montant est orienté selon l'axe des poutres de plancher, il ne suit donc pas le plan tangent de la courbure de la poutre de support. La surface d'appui du montant ne couvre que partiellement la poutre de support. En revanche le montant doit préserver son appui sur la poutre de plancher, car l'arête peut se déporter de la contre-queue au fil des années. Le tenon par contre suit la courbure de la poutre de support.

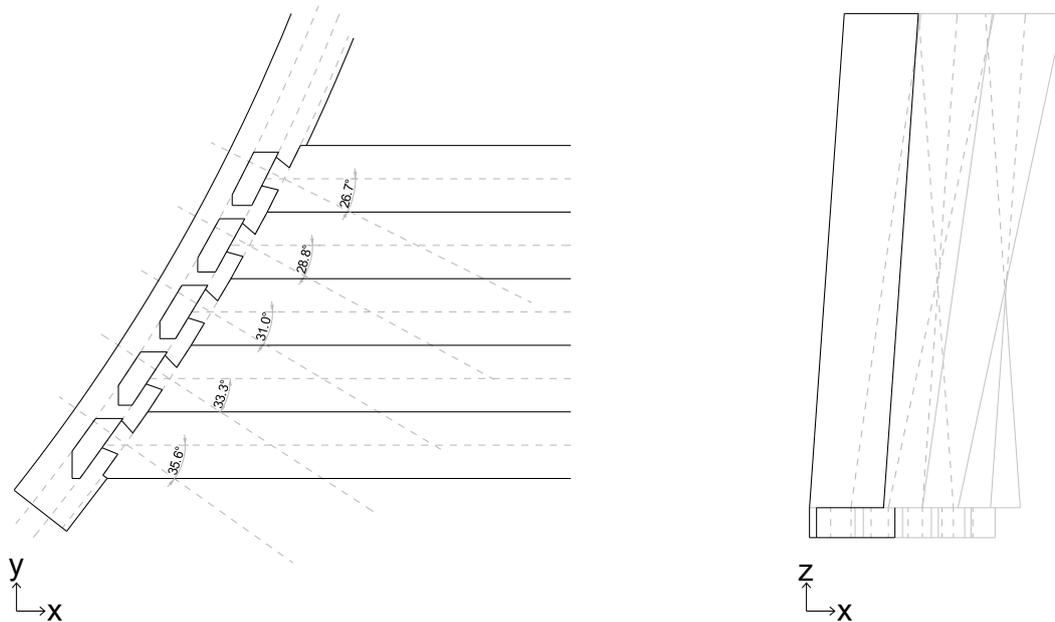


Figure 65 : A gauche : Plan de la rencontre entre les poutres de plancher et la poutre de support, avec les axes centraux des poutres et ceux des arondes ; A droite : la variation de l'inclinaison du montant

La section des montants dépend de leurs positions sur la poutre de support. Pour ce modèle le choix s'est porté sur l'orientation des montants identique à l'orientation des poutres de plancher. La largeur du montant est toujours égale à la largeur de la poutre de plancher. La longueur de la base peut être régie par 2 critères. Soit un coin de la base rectangulaire dépasse la poutre de support, soit le coin opposé ne touche pas l'arrête courbe du support. Dans un troisième cas le montant pourrait avoir une base trapézoïdale, un cas non-désirable, car chaque montant devrait être coupé selon des angles différents.

Dans une situation où le montant est orienté parallèlement aux poutres de plancher et le tenon-mortaise suit la courbure de la poutre de support, le tenon et la mortaise sont taillées de forme trapézoïdale (Figure 65). Par ailleurs le trapèze est déporté du centre de la base rectangulaire vers l'extrémité extérieure de la base. Les proportions de 1/3-2/3 sont valables pour la mortaise mais ne le sont pas pour le tenon.

L'assemblage Ari-kake permet d'incliner les montants de la paroi. L'inclinaison permise peut varier entre 45° et 135°. Malgré l'orientation non-verticale du montant, le tenon s'insère verticalement dans la mortaise. Lors de l'usinage le montant doit être scié selon l'angle de l'inclinaison du montant, car ce dernier sera usiné dans la position horizontale.

Lorsque les formes et les orientations spatiales des poutres varient, la géométrie de l'assemblage s'adapte. Malgré une géométrie et des proportions qui diffèrent des originales, le fonctionnement de l'assemblage reste identique au joint Ari-kake traditionnel. Des formes architecturales « organiques » profitent des qualités que cet assemblage offre, tout autant que des formes « simples ».

Conclusion

Les investigations de cette thèse ont démontré qu'il est possible de concevoir une structure avec un type d'assemblage unique sans recourir aux connecteurs métalliques ni aux colles. Bien qu'il soit imaginable de construire une telle structure avec des poutres préfabriquées par des artisans expérimentés, il est plus réaliste de nos jours de s'appuyer sur l'aide des machines et de la CAO pour la réalisation d'une telle tâche.

Les prototypes réalisés au cours de cette recherche démontrent l'efficacité des systèmes simples à base de poutres de section identique et de connexion unique. L'investissement dans d'une infrastructure numérique devient intéressant quand il y a un grand nombre d'éléments identiques à usiner.

Les différents démonstrateurs montrent que la complexité d'une construction dépend de la diversité des techniques utilisées. Dans le cas d'une construction en palissade de bois massif ou en rondins il est possible d'imaginer toutes les connexions avec l'assemblage Ari-kake. En revanche il est impossible de restreindre les assemblages à un seul type dans une construction qui est conçue de plusieurs techniques constructives, telles que des cadres en bois avec des panneaux de bois.

La géométrie de l'assemblage étant conditionnée par les relations proportionnelles aux poutres en question, l'assemblage peut s'adapter aux sections de bois variables, y compris des sections rondes. La composition traditionnelle de l'assemblage Ari-kake pourrait être complétée par des montants ou des poutres supplémentaires, réduisant ainsi l'épaisseur intacte de la poutre de support. Dans cette circonstance les proportions définies dans le chapitre 2.3 peuvent évoluer pour limiter la part de l'épaisseur découpée de la poutre tout en modifiant la résistance de la connexion.

Le fonctionnement de l'assemblage Ari-kake permet de concevoir des structures orthogonales mais également des structures organiques, triangulées et non-linéaires. Malgré des variations de la géométrie au sein du joint, ses qualités, à savoir, la séquence de montage hiérarchisée, le démontage simple ainsi que la pureté esthétique, sont bénéfiques à la structure indépendamment de la volonté architecturale.

Des travaux futurs doivent être conduits pour analyser les forces qui agissent dans un nœud Ari-kake, ainsi que l'impact de la variation des proportions sur la résistance de l'assemblage. Le modèle utilisé dans cette thèse est un espace simple et de dimensions arbitraires. Il est intéressant de voir comment les techniques étudiées vont s'adapter aux programmes spécifiques et comment l'assemblage Ari-kake va conditionner les espaces pour répondre aux besoins de ces programmes.

Bibliographie

- ADEL A., THOMA A., HELMREICH M., GERMAZIO F., KOHLER M.. Design of Robotically Fabricated Timber Frame Structures. ETH, Zürich 2017.
- ALHASHIM Ibraheem, OLSON Matt, TAGLIASACCHI Andrea, ZHANG Hao. Mean Curvature Skeletons. GrUVi Lab, School of Computing Science, Simon Fraser University, Canada 2012.
- ALLAIS Maxime, KUPFERLE Frank, ROSSI Frédéric. Dimensionnement à froid des assemblages traditionnels bois, Conformement aux eurocodes. C4CI : Consultants Construction Innovation, Mundolsheim 2015.
- BERNASCONI Andrea. Assemblages, liaisons, ancrages. HES-SO, Yverdons-les-bains, 2011.
- BOCQUET Jean François, GAMERRO Julien, WEINAND Yves. A Calculation Method for Interconnected Timber Elements Using Wood-Wood Connections. EPFL, Lausanne 2020.
- BRANDAO Filipo, PAIO Alexandra, ANTUNES Nuno. Towards a Digitally Fabricated Disassemble-able Building System: A CNC fabricated T-Slot Joint.
- BUKAUSKAS Aurimas. New Structural Systems in Small-Diameter Round Timber. MIT, Boston 2015.
- BUKAUSKAS Aurimas, BREGULLA Julie, MAYENCOURT Paul, MUELLER Caitlin, SHAVNA Bharna, SHEPERT Paul, WALKER Pete. Whole timber construction: A state of the art review. MIT, Boston 2018.
- BULLAR John. Assemblages en bois: Toutes les techniques pas à pas. Dunod, Paris 2015.
- BURTON Richard, DICKSON Michael, HARRIS Richard. The use of roundwood thinnings in buildings – a case study. Routledge: Taylor & Francis Group, London 1998.
- CASEROTTO J. «Assemblages à tenons et mortaises.» Menuiserie-caserotto. 2010. Consultation: Octobre 2020.
- DE CEUKELAIRE Edwin. Manuel Modulaire Bois : Les assemblages bois. Centre de Formation Bois, Bruxelles 2013.
- DE FURSTENBERG Tassilo, MANDERLIER Charline. Etude de faisabilité de structures en bois drone-compatible. EPL, Louvain 2017.
- FRIDHOLM Mathias. «The age of wooden high-rises.» Swedish Wood. 2009. Consultation: Octobre 2020.
- GANDOLPHE Thomas. Tectonics of Discrete Structures- Morphological studies of Non Sequential Joints. École des Ponts ParisTech, Navier laboratory, Grenoble.
- GODTHELP Tom. Timber Reciprocal Frame Structures. Eindhoven University of Technology, Eindhoven 2018.
- GRAUBNER Wolfram. Assemblages en bois: L'Europe et le Japon face à face. Editions H. Vial, Dourdan 2002.
- GREZEL J. Les assemblages, manuel de la charpente en bois n°9. Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, Paris 1950.
- IGARASHI Takeo, LARSSON Maria, YOSSHIDA Hironori. Human-in-the-loop Fabrication of 3D Surfaces with Natural Tree Branches. University of Tokyo, Tokyo 2019.

- LOPEZ Alejandro Guil, GUERRERO VALADEZ Isabel María. Design of a set of stool and table with a sustainable approach by using DFA AND DFE principles. University of Skoevde, Skoevde 2007.
- MANKOUCHE Steven, TORGHABEHI Omid Olyian, VLIET Kasey, VON BEULOW Peter. Combining parametric form generation and design exploration to produce a wooden reticulated shell using natural tree crotches. MIT, Boston 2018.
- MISCHLER Adrian. Techniques d'assemblage permettant de placer les sciages feuillus sur le marché de la construction. ETH, Zürich.
- NEUMANN Oliver SCHMIDT Daniel. Innovative CNC Timber Framing - Technology and Cultural Expression. Escuela de Arquitectura, The University of British Columbia, Temuco et Vancouver.
- NOLL Terrie. Assemblages en bois. Eyrolles, Paris 2016.
- ROBELLER Christopher. Integral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures. EPFL, Lausanne 2015.
- ROBELLER C., HAHN B., MAYENCOURT P., WEINAND Y. CNC-gefräste Schwalbenschwanzzinken für die Verbindung von vorgefertigten Bauteilen aus Brettsperrholz. EPFL, IBOIS, Lausanne 2014.
- SCHICKHOFER Gerhard. Starrer und nachgiebiger Verbund bei geschichteten, flächenhaften Holzstrukturen. TU, Graz 1994.
- SEBERA V., ŠIMEK M. Finite Element Analysis Of Dovetail Joint Made With The Use Of CNC Technology. Acta universitatis agriculturae et silviculturae, Mendelianae 2010.
- TAMKE Martin, RAMSGAARD THOMSEN Mette. Digital wood craft. Dans: CAAD Futures 09 Publication. CITA, Royal Academy of Fine Arts, Copenhagen 2009
- VESTARTAS Petras. Wood-wood connections for Whole Timber. EPFL, IBOIS, Lausanne, en cours.
- VIOLLET-LE-DUC M. Dictionnaire raisonné de l'architecture française : du XIe au XVIe siècle. Imprimerie de M. Martinet, A. Morel, Paris 1875.
- N.N. Charpente Bois massif. Corabois-Charpente. Consultation: Novembre 2020.
- N.N. Connexions pour assemblage des charpentes industrialisées. Simpson: Strong-Tie. Consultation: Novembre 2020.
- N. N. Liste de prix : Bois Massiv. Getaz-miauton. Consultation: Novembre 2020.
- N.N. Using WikiHouse: A introductory guide for your project. Open Systems Lab, UK 2018.

