

Etude de faisabilité de structures en bois drone-compatible

Mémoire présenté par
Tassilo DE FURSTENBERG et Charline MANDERLIER

en vue de l'obtention du grade de master en
Ingénieur civil des constructions

Promoteur
Pierre LATTEUR

Lecteurs
Cathérine DONEUX, Sébastien GOESSENS

Année académique 2016 -2017

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le Professeur Pierre Latteur¹, notre promoteur de mémoire, pour avoir supervisé et encadré notre recherche. Nous voudrions aussi lui témoigner notre gratitude pour l'opportunité qu'il nous a offerte de séjourner au Massachusetts Institute of Technology (MIT) afin d'y approfondir notre mémoire. Un tout grand merci également à Monsieur Sébastien Goessens¹, assistant à l'UCL, pour le temps précieux qu'il nous a consacré tout au long de ce travail et pour les réponses apportées à nos différentes questions.

Nos remerciements s'adressent également à l'équipe de techniciens du laboratoire LEMSC et, en particulier, à Monsieur Guillaume Gomez, pour leur disponibilité tout au long de l'année et leur soutien technique sans lequel nous n'aurions pu réaliser les prototypes d'assemblage.

Nous adressons ensuite nos plus vifs remerciements à Madame Aurélie Deschuyteneer² et Monsieur Jean-François Rondeaux², tous deux assistants à l'UCL, pour leur soutien, leurs remarques pertinentes et surtout la précieuse relecture de certaines parties de ce travail.

Enfin, nous aimerions remercier Professor Caitlin Mueller³ du Massachusetts Institute of Technology pour l'accueil au sein de son département d'architecture et ses conseils très enrichissants. Concernant cette semaine passée au MIT, nous voudrions également remercier Monsieur Paul Mayencourt pour l'encadrement de notre séjour, sa grande disponibilité et les échanges très constructifs dans l'avancement de notre travail.

¹ Université Catholique de Louvain, Ecole Polytechnique de Louvain (EPL)

² Université Catholique de Louvain, Faculté d'architecture et d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)

³ Massachusetts Institute of Technology (MIT), Building Technology Program, Department of Architecture

Table des matières

Remerciements.....	i
Introduction	1
Chapitre I : Etat de l’art.....	4
I.1. Le drone et la construction : un duo prometteur.....	5
I.1.1. Les drones.....	5
I.2. La construction par drone est en vol !	8
I.2.1. Recherches hors Université catholique de Louvain	8
I.2.2. Recherches à l’Université catholique de Louvain	10
I.3. Le bois et le drone : un couple parfait ?	12
I.3.1. Le bois, un matériau d’avenir.....	12
I.3.2. La drone-compatibilité du bois.....	12
I.3.3. Les assemblages bois.....	13
I.3.4. Les systèmes constructifs	24
Chapitre II : Propriétés du bois	31
II.1. Etude du frottement du bois	32
II.1.1. Valeurs théoriques	32
II.1.2. Valeurs expérimentales	33
II.2. Propriétés hygroscopiques du bois	35
Chapitre III : Assemblages drone-compatibles	37
III.1. Assemblages à mi-bois.....	38
III.1.1. Assemblage à mi-bois pour l’empilement	39
III.1.2. Assemblage à mi-bois pour la jonction de deux poutres	42
III.1.3. Validation du fonctionnement	43
III.1.4. Résistance	50
III.1.5. Application à une structure simple	54
III.2. Queue d’aronde pour bois empilé.....	59
III.2.1. Caractéristiques et fonctionnement	59
III.2.2. Validation du fonctionnement	61
III.2.3. Résistance	62
III.2.4. Application à une structure simple	64
III.3. Assemblages colonne - colonne	66
III.3.1. Considérations préliminaires et objectifs	66
III.3.2. Deux assemblages colonne - colonne.....	69

III.3.3.	Application à une structure simple	80
III.4.	Queue d'aronde pour jonction de poutres.....	83
III.4.1.	Caractéristiques et fonctionnement	83
III.4.2.	Résistance	87
III.4.3.	Application à une structure simple	93
III.5.	Kawai tsugite	100
III.5.1.	Considérations préliminaires et fonctionnement	100
III.5.2.	Dimensions	104
III.5.3.	Validation du fonctionnement	106
III.6.	Récapitulatif et comparaison des assemblages	107
Chapitre IV :	Structures artistiques	109
IV.1.	Développements artistiques de la construction par drones.....	110
Chapitre V :	Quelques pistes de développement futur	114
V.1.	Approfondissement de l'étude des assemblages	115
V.2.	La notion de vecteurs d'assemblage.....	116
V.3.	L'optimisation de la matière.....	116
Conclusion.....		118
Bibliographie.....		123
Annexes		125
Annexe 1 :	Etude du frottement du bois	126
Annexe 2 :	Etude du gonflement du bois	134

Introduction

Le mot « drone » désigne un appareil volant inhabité et piloté à distance. Ces petits hélicoptères sont apparus à la fin de la Première Guerre Mondiale. Initialement perçus par le public comme des énigmatiques engins de guerre télécommandés, les drones se sont rapidement fait connaître comme ces engins dotés d'une caméra vidéo se répandant de plus en plus dans le ciel. Aujourd'hui, les drones civils réalisent quotidiennement des tâches telles que la livraison de colis (première livraison par drone en 2016 par Amazon Prime Air) ou la cartographie de territoires (précision de l'ordre de 600 fois celle d'un satellite urbain classique). Tandis que la première génération de drones nécessitait un pilotage actif, la nouvelle génération comporte une navigation automatique. En intégrant un GPS/Glonass et des capteurs infrarouges, les drones peuvent suivre une route prédéfinie et éviter des obstacles.

Ces dernières années, de nombreux projets ont été lancés afin de mettre des drones au service de la construction. En effet, le monde de la construction est à l'heure actuelle le secteur d'activité avec le plus d'accidents, ce qui signifie une perte de 200 000 jours de travail chaque année en Belgique. En outre, les erreurs humaines et les retards représentent des coûts importants pour les entreprises. Les drones apparaissent donc de plus en plus comme une solution idéale pour pallier ces problèmes, car ils sont fiables, précis, et ne mettent pas la vie humaine en danger.

La densification des zones habitées comme réponse à l'expansion démographique prévoit d'ici 2060 un accroissement de la population d'environ 2 millions de personnes en Belgique. Ceci impose de trouver de nouvelles manières de transporter les éléments de construction. En effet, les engins de chantier classiques ont une emprise au sol importante. La livraison d'éléments de construction en milieu urbain constitue donc un réel défi de logistique, pour ne pas que les travaux d'une certaine ampleur congestionnent les villes. Dans ce contexte, les drones apparaissent comme la solution idéale, car ils sont rapides (ils se déplacent en ligne droite) et n'ont pas d'emprise au sol.

L'ensemble de ces enjeux laisse entrevoir un fort potentiel de développement des drones dans la construction. Plusieurs travaux de recherches en cours actuellement ont d'ores et déjà mené à des résultats très prometteurs. A l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (ETHZ), une équipe de chercheurs est parvenue à assembler à l'aide de quadricoptères (drones à quatre hélices) une tour de 6 mètres de haut composé de 1500 briques en polystyrène empilées. Une précision d'assemblage de l'ordre de 2 cm a pu être atteinte. Chez nous, à l'Université catholique de Louvain (UCL), des ingénieurs sont parvenus à construire un portique par empilement d'éléments en béton de 15-20 kg chacun. La précision atteinte, de 5 cm, reste impressionnante étant donné le poids des éléments. La construction par drone est donc en marche...ou plutôt en vol !

Néanmoins, le développement des drones et des systèmes permettant leur positionnement doit également s'accompagner de nouvelles manières de construire y afférentes, qu'on nommera « drone-compatibles ». En ce qui concerne l'adaptation aux structures en béton, des travaux sont actuellement menés à l'UCL, et ont fait l'objet de travaux de fin d'études en 2015-2016 et 2016-2017. Par contre, pour l'adaptation des techniques de construction à l'acier et au bois, la question reste encore ouverte aujourd'hui. Ce travail a donc pour but de se focaliser plus particulièrement sur le matériau bois, et d'en étudier les adaptations à la construction par drone.

Le bois présente le grand avantage de posséder un excellent rapport résistance/poids, atout essentiel par rapport à l'acier et au béton. Ce rapport est en effet deux fois supérieur à celui de l'acier S235, et

cinq fois supérieur à celui du béton C30/37. Cet avantage est assez séduisant, sachant que les drones ont une capacité de levage limitée (de l'ordre de 80-100 kg). Le bois est également peu énergivore à la production (30kW/m), ce qui est 20 fois moins que l'acier et 6 fois moins que le béton. Il a également un écobilan positif, car il stocke plus de CO₂ sous forme solide qu'il n'en produit lors de sa transformation. De plus, à épaisseur égale, le bois isole thermiquement 450 fois plus que l'acier, 12 fois plus que le béton et 6 fois plus que la brique. Ces deux derniers aspects contribuent donc - directement par le stockage de CO₂, et indirectement par la diminution des besoins de chauffage - à la réduction des gaz à effet de serre. Enfin, le bois se recycle de manière simple et peu coûteuse.

Par contre, le bois est un matériau naturel, ce qui amène tout de même certaines difficultés par rapport aux autres matériaux de construction. Il est, en effet, nécessaire de maîtriser parfaitement ses propriétés mécaniques et physiques, et de bien connaître les manières de construire et de réaliser des assemblages en bois.

Aujourd'hui, les évolutions réglementaires sur les exigences énergétiques des habitations ainsi que les réflexions sur les changements climatiques encouragent de plus en plus à utiliser le bois comme matériau de construction. En région Bruxelloise, depuis le 1er janvier 2015, une loi impose la construction de bâtiments passifs pour toute nouvelle construction à usage d'habitation. Ce n'est donc pas étonnant que la popularité du bois ne cesse de croître. Une enquête sur « L'état de la construction bois en Belgique »⁴ révèle en effet que plus de 9% des constructions neuves en Belgique sont en bois, ce qui est presque le double d'il y a 5 ans. Le bois apparaît donc comme un matériau d'avenir qui, par son excellent rapport résistance/poids, le destine particulièrement à former avec le drone un couple parfait.

L'objectif de ce travail se dessine donc tout simplement : réaliser une étude de faisabilité des structures en bois drone-compatibles. Dans l'immédiat, il s'agit d'ouvrir des pistes de développement d'assemblages en bois drones-compatibles, constituant ainsi une nouvelle voie dans la construction assistée par drones. À plus long terme, ce travail permettra également d'être le dernier maillon de la chaîne d'automatisation de la construction en bois, du dessin assisté (Computer Aided Design : CAD), en passant par l'usinage robotisé (Computer Numerical Control : CNC), jusqu'à la construction automatisée.

Le premier chapitre de ce mémoire propose un état de l'art de la problématique. Il visera tout d'abord à approfondir les raisons pour lesquelles le bois forme un couple parfait avec le drone. Ensuite il y sera question des recherches en cours en ce qui concerne la construction par drones, que ce soit à l'UCL ou dans d'autres universités. Enfin, les types de construction et les différents assemblages en bois seront présentés.

Le second chapitre s'intéresse à deux propriétés particulières du bois qui ont un impact important pour une mise en œuvre par drones : sa rugosité et ses propriétés hygrométriques. En ce qui concerne la rugosité, elle va conditionner le frottement entre les éléments et donc la manière dont ils vont se mettre en place. Pour étudier ce paramètre, une étude de frottement entre pièces de bois a été réalisée, pour différentes essences communément utilisées en Belgique. Les propriétés hygrométriques vont, quant à elles, influencer le gonflement des éléments en bois et a fortiori leur volume, ce qui va conditionner fortement la rigidité des assemblages.

⁴ Etude bisannuelle menée par HoutInfoBois pour « dresser les tendances et les évolutions du secteur de la construction bois en Belgique ». L'étude en question a été réalisée pour les années 2015-2016. (Etude récupéré sur le site <http://www.houtinfobois.be>)

Le troisième chapitre porte sur le développement d'assemblages en bois drone-compatibles. Les six premières parties qui composent ce chapitre présenteront les sept assemblages développés dans le cadre de ce travail de fin d'études. Celles-ci détailleront pour chaque cas les caractéristiques et le fonctionnement de l'assemblage, la validation expérimentale de ce mode de fonctionnement (par maquette ou par test en grandeur réelle), les propriétés mécaniques de l'assemblage, ainsi que le potentiel pratique d'application en construction qui sera illustré à l'aide d'un exemple simple. La septième partie de ce chapitre servira enfin de récapitulatif. Elle comparera de plus les six différents types d'assemblages entre eux, en ce qui concerne par exemple leur facilité de fabrication ou de mise en place.

Le quatrième chapitre développe quelques exemples de structures drone-compatibles composées d'éléments en bois. Ceci met en évidence la vocation à la fois fonctionnelle mais aussi récréative et artistique de ce type de structures.

Enfin, le dernier chapitre de ce travail ouvre des pistes pour le développement futur de la construction par drone de structures en bois.

Chapitre I : Etat de l'art

Le premier chapitre propose un état de l'art de la problématique. Il est divisé en trois parties.

La première partie vise tout d'abord à approfondir les raisons pour lesquelles le drone et la construction forment un duo prometteur. Elle compare ensuite le potentiel de robots roulants et de robots volants dans la construction du futur. La deuxième partie présente, de manière non exhaustive, les recherches en cours dans la construction par drone, respectivement à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, à l'University of Pennsylvania et à l'Université catholique de Louvain. La troisième partie concerne les assemblages en bois et les systèmes constructifs, qui par leur forme et leur originalité, ont stimulé notre créativité dans la recherche de joints drone-compatibles.

I.1. LE DRONE ET LA CONSTRUCTION : UN DUO PROMETTEUR

I.1.1. Les drones

I.1.1.1. L'évolution des drones

Le mot « drone » désigne un appareil volant inhabité et piloté à distance (=UAV : Unmanned Aerial Vehicle). Les premières ébauches de drones sont apparues à la fin de la première guerre mondiale. Cet engin a ensuite évolué et les premiers drones à usage non-militaire sont apparus dans les années 2000. Les domaines d'application étaient, dans un premier temps, limités à des usages civils (incendies, sécurité...). Ensuite, au fil des années, les applications sont devenues également privées et se sont diversifiées.

On retrouve aujourd'hui, entre autres, les applications suivantes :

- Sécurité :
 - Surveillance d'infrastructures, d'entrepôts, de bâtiments, etc.
 - Inspection d'ouvrages ou d'installations peu accessibles afin de répertorier les défauts et les entretiens éventuels
 - Observation des dégâts lors d'intempéries ou lors d'une catastrophe naturelle
 - Suivi de manifestations
 - Surveillance des feux de forêt
- Agriculture :
 - Dosage de l'engrais en fonction des besoins
 - Estimation du rendement
 - Détection des anomalies (maladies, plants manquants...)
- Média (vidéos et photos) : événements, cinéma, télévision, etc.
- Transport
 - Transport de médicaments
 - Livraison de colis (Amazon a livré sa première livraison par drone en décembre 2016)
 - Transport de personnes : le « drone-taxi » devrait apparaître, à Dubaï, en juillet 2017

Les drones ont donc des utilisations très variées et vont encore fortement évoluer dans les années à venir. Il existe aujourd'hui des drones de toute taille, pouvant porter des charges de plus en plus importantes. En outre, des systèmes tels que *LPS*⁵ (Local Positionning System) permettent aux drones d'atteindre une précision de positionnement centimétrique.

⁵ Technologie de positionnement de drones à l'aide de balises développée par la société française Novadem et présentée au Consumer Electronics Show en 2016

I.1.1.2. Le drone pour la construction

Etant donné l'évolution de la technologie du drone, il est intéressant de se demander l'apport que celui-ci peut avoir dans le monde de la construction. Et s'il contribuait de manière active à la construction de structures diverses ? Et si, à lui seul, il pouvait assembler les éléments entre eux ?

I.1.1.2.1. La construction aujourd'hui

Les modes de constructions actuels présentent plusieurs inconvénients :

- Le monde de la construction est le domaine présentant le plus grand taux d'accidents (grave ou non).
- Les erreurs humaines sur chantiers sont fréquentes et entraînent, entre autres, du gaspillage de matériau et donc un surcoût.
- Les retards sur le planning sont monnaies courantes sur un chantier.
- Un projet de construction implique beaucoup d'intervenants différents.
- La logistique est complexe.

La construction, et plus précisément la phase de chantier, est un des rares domaines d'ingénierie qui a très peu évolué près d'un demi-siècle. Alors que les programmes informatiques se développent sans cesse et que les techniques de production industrielle sont de plus en plus innovantes, il y a très clairement quelque chose à améliorer dans la construction.

I.1.1.2.2. L'automatisation

L'utilisation de robots en vue d'une automatisation complète offrirait pour la construction, plus de rapidité, plus de sécurité et également moins d'erreur.

Pourquoi une automatisation avec des robots volant et pas des robots roulant ?

Tableau 1 : comparaison des inconvénients et avantages de la construction par robot roulant ou robot volan (drones)

ROBOT ROULANT		ROBOT VOLANT
Avantages (en plus de ceux liés à l'automatisation)	• Peu de limites en hauteur	• Pas impacté par les contraintes du terrain, peu de problème d'accessibilité • Rapidité (déplacements directs) • Possibilité de stocker les matériaux à l'extérieur de la zone de chantier • Pas de limites de hauteur
Inconvénients	• Configuration du sol variable, tous les endroits du chantier ne sont pas accessibles • Imprécisions • Limité en hauteur • Nécessite de repenser notre manière de construire	• Capacité de levage limitée (100kg) • Imprécisions de positionnement (5 cm) • Sensibilité au vent • Nécessite de repenser la manière de construire

Nous pensons donc que, tant qu'à concevoir de nouveaux éléments constructifs, l'utilisation de robots volants présente plus d'intérêts et offre des possibilités de construction plus diverses.

Une combinaison de plusieurs types de robots est envisageable. Toutefois, nous n'aborderons que l'utilisation de drones dans ce rapport.

I.1.1.2.3. Les drones-bâtisseurs

Ces drones-bâtisseurs auront donc un rôle actif : aller chercher chaque élément constructif dans la zone de stockage et les assembler au fur et à mesure sur le chantier. Ils seront les acteurs principaux sur le chantier ! L'objectif est d'avoir un drone ou plusieurs drones qui fonctionnent de manière automatique. Ainsi, les ouvrages seront construits de manière rapide et efficace tel l'oiseau qui fait son nid.

Les trois contraintes principales à prendre en compte dans le développement d'éléments assemblables par drone sont les suivantes :

- Le poids : les éléments doivent avoir un poids maximal de 100 kg.
- L'imprécision : les éléments doivent tolérer une imprécision sur la position du drone estimée à un rayon de 5 cm autour du point théorique.
- Les éléments doivent être mis en place par un emboîtement vertical (le drone n'a pas suffisamment de force pour assembler les éléments horizontalement, il a juste le pouvoir de descendre un élément qui, par son poids, va prendre sa position finale).

Des essais ont été effectués à l'aide d'un drone construit spécialement pour ce projet de recherche. C'est à partir d'essais réalisés avec ce drone que le rayon d'imprécision a été fixé à 5cm.

I.2. LA CONSTRUCTION PAR DRONE EST EN VOL !

I.2.1. Recherches hors Université catholique de Louvain

Des universités s'intéressent à la construction par drone, sujet de recherche innovant en pleine évolution. Voici quelques travaux intéressants repris de manière non exhaustive.

I.2.1.1. Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (ETHZ)

I.2.1.1.1. Construction par quadricoptère d'une structure en module de polystyrène

ARC (Aerial Robotic Construction) est un sujet de recherche récent à l'université de Zurich. Ce projet est rempli de défis théoriques et techniques. La première expérience effectuée dans le cadre de cette recherche est un prototype appelé « Flight Assembled Architecture ». Il s'agit d'une tour de 6m de haut composée de 1500 modules en polystyrène et assemblée par une série de quadricoptères autonomes.



Figure 1 : pose d'un module par un quadricoptère autonome



Figure 2 : tour de 6m de haut construite à l'aide de quadricoptères autonomes

I.2.1.1.2. Construction de structures tendues par robots volants

L'université de Zurich travaille également sur le développement de méthodes de construction pour créer des structures tendues avec des robots volants. L'objectif de cette recherche est de démontrer qu'un robot volant peut, en construisant une structure, voler d'un point à un autre en contournant les objets existants.

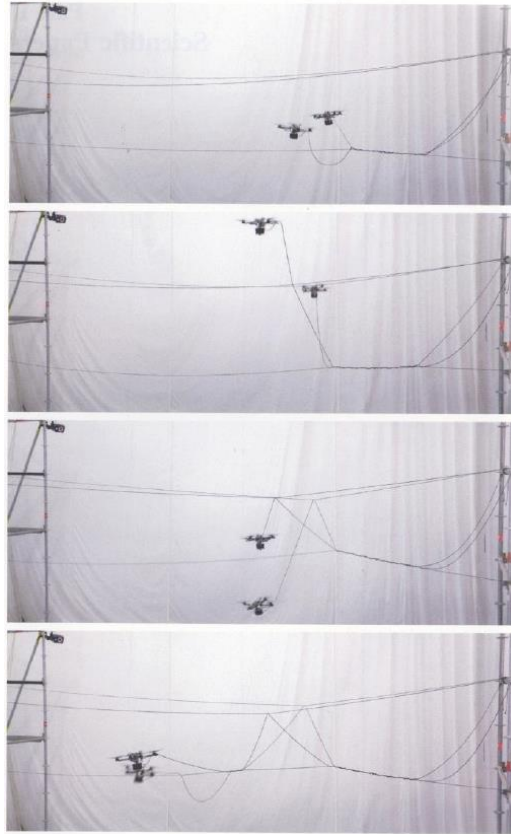


Figure 3 : construction d'une structure tendue à l'aide de drones

I.2.1.2. University of Pennsylvania

L'université de Pennsylvanie travaille sur la construction de structures cubiques avec une série de quadricoptères. Les chercheurs ont montré qu'une équipe de robots aériens est capable de construire une structure de manière automatique à partir d'éléments simples composés de barres et de nœuds aimantés. Ceux-ci peuvent s'assembler de différentes manières comme illustré à la Figure 4.

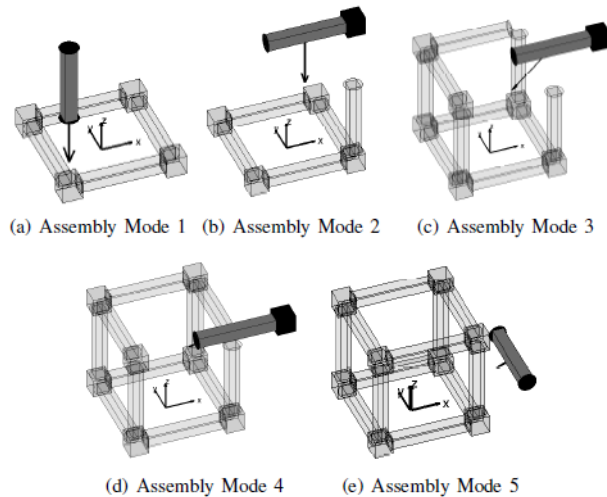


Figure 4 : différents modes d'assemblage des éléments

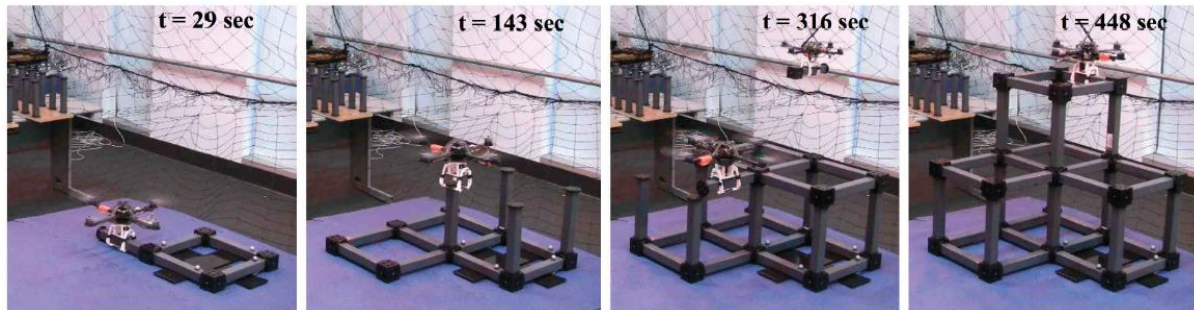


Figure 5 : assemblage d'éléments aimantés par quadricoptères autonomes

I.2.2. Recherches à l'Université catholique de Louvain

Le projet de recherche sur la construction par drone a commencé il y a quelques années à l'UCL et fait l'objet d'une collaboration avec le Massachusetts Institute of Technology (MIT). Trois travaux de fin d'étude ont déjà été consacrés à ce projet et réunissent doctorants, étudiants et chercheurs :

- Feasibility study for drone-based manufacturing of architectural structures (2014-2015)
- Development of a "drone-compatible" masonry construction system (2015-2016)
- Development of elementary 3D drawing tools for "drone-compatible" construction systems (2015-2016)

Cette année (2016-2017), trois sujets de mémoire s'intéressent à la construction par drone, l'un porte sur le développement d'éléments en maçonnerie, l'autre sur l'intégration de la construction par drone dans un modèle BIM et enfin le nôtre sur les structures en bois.

La faisabilité de la construction par drone a pu être démontrée par des essais réalisés à la drone-zone de l'UCL. Un drone a été spécialement construit afin de répondre aux critères de cette recherche. Des blocs de béton cylindriques de 15 à 20 kg ont été empilés de manière à former une colonne. Ces blocs (figure X) permettent une imprécision de mise en place de 6,5 cm autour de l'axe de symétrie vertical du bloc. Les essais ont été effectués avec un pilote qui dirigeait le drone. Pour un système de guidage automatique, nous pouvons nous attendre à une imprécision de 5 cm, sous vent modéré.

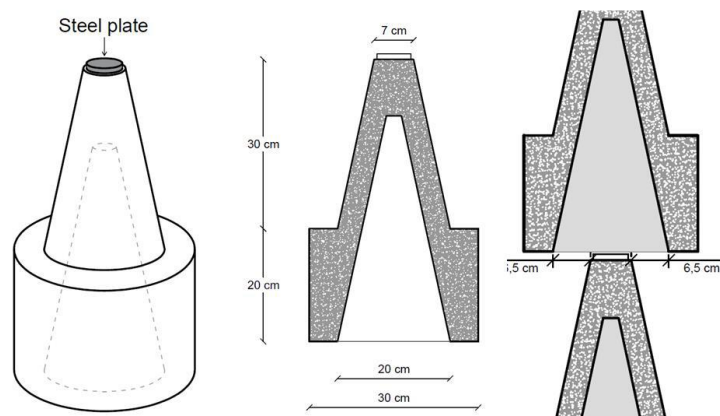


Figure 6 : dimensions des blocs coniques utilisés lors des essais

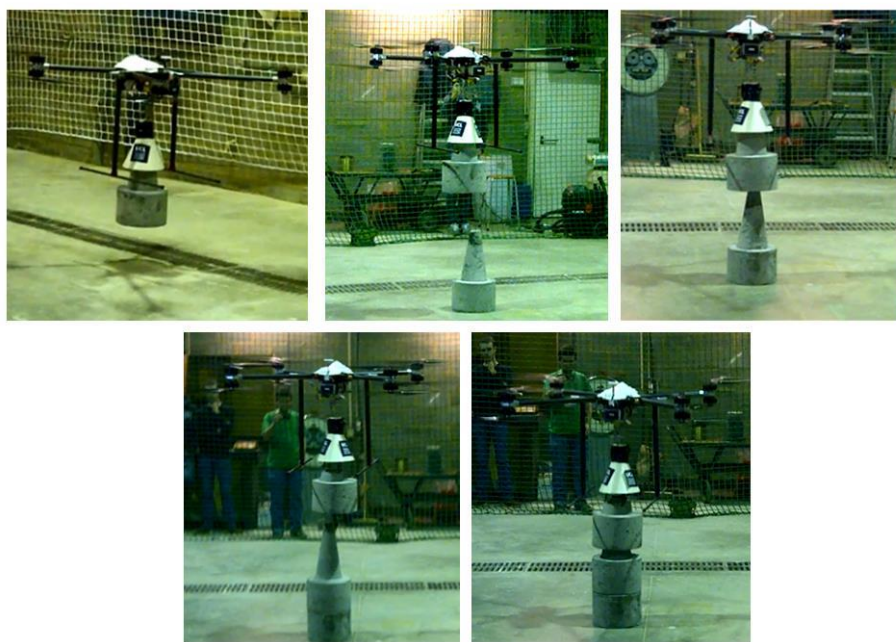


Figure 7 : construction d'une colonne par drone piloté

La faisabilité ayant été démontrée à partir d'assemblages d'éléments simples, le travail consiste maintenant à développer des éléments permettant de créer des structures plus complexes. Ce travail est effectué en parallèle sur le béton et sur le bois. En plus du design d'éléments constructifs, une équipe se penche sur les instructions à donner au drone sur base d'un modèle 3D. Dès l'année académique prochaine, des étudiants en informatique seront chargés de développer un système de guidage automatique pour le drone. Ce projet de recherche prend de plus en plus d'ampleur, et les résultats sont prometteurs.

I.3. LE BOIS ET LE DRONE : UN COUPLE PARFAIT ?

I.3.1. Le bois, un matériau d'avenir.

Le matériau bois possède de nombreux avantages notamment face aux préoccupations environnementales actuelles. Le procédé de fabrication des éléments en bois est peu énergivore et peu polluant (30kW/m), ce qui est 20 fois moins que l'acier et 6 fois moins que le béton. Il a également un écobilan positif, car il séquestre plus de CO₂ lors de sa croissance, qu'il n'en produit lors de sa transformation. De plus, à épaisseur égale, le bois isole thermiquement 450 fois plus que l'acier, 12 fois plus que le béton et 6 fois plus que la brique. Ces deux derniers aspects contribuent donc - directement par le stockage de CO₂, et indirectement par la diminution des besoins de chauffage - à la réduction des gaz à effet de serre. Enfin, le bois se recycle de manière simple et peu coûteuse.

Le bois apparaît comme un matériau d'avenir, qui doit être valorisé au maximum. Ce n'est donc pas un hasard si des pays tels que la Suisse, l'Allemagne et les pays Scandinaves, très soucieux d'utiliser des ressources non polluantes et renouvelables, sont à la pointe en ce qui concerne les nouvelles méthodes de construction en bois.

Tableau 2 : volume de bois nécessaire pour la réalisation d'une maison unifamiliale en fonction du type de construction choisie.

Type de construction	Consommation de bois
Consutrction en colombage	env. 15 - 20 m ³
Construction en Ossature bois	env. 20 - 40 m ³
Construction par madriers empilés	env. 50 - 80 m ³
Construction en bois massif	env. 150 - 200 m ³

Une forêt vieillissante ne remplit plus son rôle de poumon. Consommer du bois permet donc d'assurer leur renouvellement, stockant ainsi plus de CO₂ sous forme solide. Les forêts européennes sont à mêmes de répondre à des grandes demandes en bois. Par exemple en Suisse, toutes les deux minutes, les forêts produisent 40m³ de bois, suffisamment pour réaliser une maison unifamiliale en ossature bois.

I.3.2. La drone-compatibilité du bois

Aux nombreuses qualités précitées s'ajoutent deux avantages majeurs qui rendent le bois particulièrement séduisant pour la réalisation de structures par drone : son excellent rapport résistance/poids propre et sa maniabilité.

La première contrainte de la construction par drone concerne le poids des éléments. Les drones ont une capacité de levage limitée à 100 kg. A ce sujet, le bois a une longueur d'avance sur l'acier et le béton, car il possède un excellent rapport résistance/poids propre lui permettant de franchir des portées importantes avec des éléments légers. Le Tableau 3 compare le rapport résistance / poids propre de

différents matériaux. Le rapport résistance/poids-propre du bois est deux fois supérieur à celui de l'acier S235 et cinq fois supérieur à celui du béton C30/37.

Tableau 3 : comparaison du rapport résistance / poids propre pour différents matériaux de construction

Matériau	Classe	Poids volumique moyen P (kN/m ³)	Résistance caractéristique moyenne R (MPa)	Rapport R/P (*10 ⁶ [mm])
Bois (f _{m,k})	GL 28h	4,5	28	6,22
	C24	4,2	24	5,71
	D30	6,4	30	4,69
Acier S355	S355	78	355	4,55
Acier S235	S235	78	235	3,01
Béton C30/37	C30/37	25	30	1,2

La deuxième contrainte concerne l'imprécision de positionnement du drone (5 cm). Cette imprécision implique le développement d'assemblages spécifiques qui par leur forme corrigent l'imprécision du drone et permettent aux éléments de s'emboîter et de se verrouiller automatiquement. La maniabilité du bois facilite la réalisation de ces assemblages. Il existe actuellement une multitude d'assemblages bois-bois démontrant les diverses possibilités de travail du bois.

I.3.3. Les assemblages bois⁶

Les assemblages sont des éléments essentiels de la construction en bois. En effet, ils conditionnent non seulement la résistance de la structure, en assurant la transmission des efforts, mais également la durabilité de la structure, car ce sont des points faibles. Le concepteur, lors du choix des assemblages, aura en général pour objectif de trouver un compromis entre résistance et durabilité d'une part, mais également le prix et le temps de construction d'autre part. Cependant, le nombre quasi illimité d'assemblages semble lui rendre le choix impossible. Il suffit de feuilleter des livres sur les assemblages traditionnels pour s'en rendre compte. En réalité, peu d'assemblages présentent simultanément des intérêts de durabilité, de résistance, de coût et d'intégration architecturale.

L'objectif étant de développer des assemblages en bois drone-compatibles, il nous semble indispensable de faire un rapide état de l'art des assemblages utilisés dans la construction en bois. La présente section qui traite donc des assemblages bois, n'a pas pour ambition d'être un manuel pour charpentier, mais plutôt un recueil d'assemblages qui, par leur forme et leur originalité, ont permis de stimuler notre créativité dans la recherche de joints drone-compatibles.

Pour ce faire, la section est divisée en deux parties : la première sous-section consiste en un bref historique des assemblages bois, la seconde s'intéresse aux assemblages les plus employés dans la construction en bois ainsi qu'à quelques assemblages traditionnels remarquables d'ingéniosité.

⁶ Les images de ce chapitre sont issues majoritairement du très bon ouvrage : "Encyclopedia of Wood Joints", W. Graubner, The Taunon Press, 1992

I.3.3.1. Quelques jalons historiques sur les assemblages bois

Le développement des assemblages en bois en Europe est marqué par trois étapes cruciales : la sédentarisation de l'homme, le développement de la « ferme » romaine et la production en grande série des clous.

Le premier jalon a lieu vers 9000 av. J-C, lorsque l'homme devient sédentaire. La nécessité de créer une habitation permanente et solide, va permettre la naissance des assemblages en bois. En effet, l'homme abandonne les lianes et les cordes, qui permettaient de lier ensemble deux éléments en bois, et développe, pour sa maison, des assemblages bois-bois « résistants ».

La deuxième étape importante a lieu durant l'antiquité : la « ferme » Romaine gagne toute l'Europe. La charpente à « entrain », qu'on appelle aujourd'hui « ferme », est une invention grecque, mais qui sera perfectionnée par les Romains. La « ferme » tire parti de la bonne résistance en traction et en flexion du bois. Les Romains réalisent leurs charpentes principalement en chêne. Différents assemblages, tels que l'embranchement et l'assemblage par enture ainsi que les assemblages tenons mortaises, (bloqué par des chevilles) se développent grâce à la « ferme » Romaine.

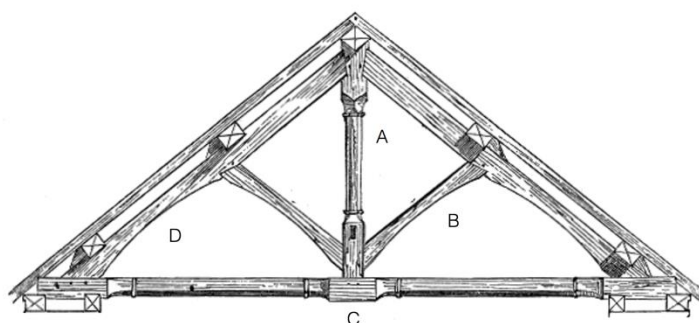


Figure 8 : schéma d'une charpente traditionnelle [A] poinçon ; [B] contre-fiche ; [C] entrain ; [D] arbalétrier

La plupart des connexions que nous connaissons aujourd'hui se sont développées à partir de ces assemblages de base. Au fil du temps, la recherche de solutions à des exigences spécifiques ont mené au développement de nouveaux assemblages. Ces exigences pouvaient parfois être propres à une seule situation comme l'illustre l'assemblage représenté à la

Figure 9. Cet assemblage est appelé « Joint du pilier de la porte d'Otemon » car il n'a été utilisé qu'une seule fois, pour réaliser les colonnes de la porte d'Otemon qui mène au château d'Osaka (construit vers 1628). La forme en triangle de l'assemblage rappelle les montagnes qui entourent la ville d'Osaka.

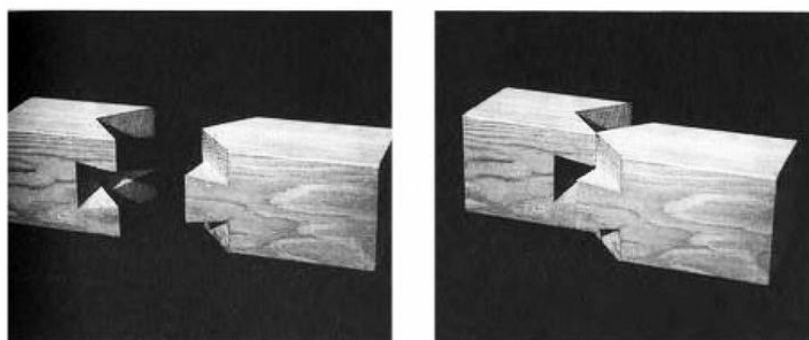


Figure 9 : Otemon Gates Pillar : joint complexe constitué d'une queue d'aronde qui s'assemble diagonalement.

La troisième étape cruciale dans le développement des assemblages bois a lieu avec la révolution industrielle : la production en grande série des clous étirés. Cette évolution a révolutionné le monde de la construction, permettant d'assembler des éléments rapidement et de manière résistante. Depuis, en Europe, beaucoup d'assemblages traditionnels bois-bois ont été remplacés par des assemblages à connecteurs métalliques. Au Japon et plus précisément dans l'architecture religieuse, les assemblages traditionnels bois-bois persistent cependant encore et toujours.

Au Japon, la culture de l'assemblage en bois, profondément enracinée, est le fruit de plus de 1500 ans d'expérience accumulée. Dans l'architecture, un élément en bois sert non seulement d'élément de structure, mais également d'élément de finition. Comme élément de structure, il doit être durable, comme élément de finition, il doit être plaisant esthétiquement. Pour les Européens, les assemblages japonais donnent souvent l'impression d'avoir été réalisés essentiellement pour des raisons esthétiques (ce qui est parfois vrai). En réalité, ils ont été imaginés de manière à transmettre des forces dans une ou plusieurs directions particulières.

Les assemblages développés au Japon ont une grande ductilité ce qui leur confère la capacité d'absorber de l'énergie. On raconte qu'après un tremblement de terre, les charpentiers japonais frappaient à l'aide de petites masses sur chaque assemblage afin de les remettre en place. Le comportement semi-rigide, élasto-plastique des assemblages bois est un grand avantage dans le cas de sollicitations dynamiques.

Afin de clôturer cette introduction sur les assemblages en bois, nous aimerions expliquer 4 termes importants du jargon des charpentiers japonais :

Tsugite – Shikuchi - Hikari Kata - Juki Gumi

Tsugite et *Shikuchi* sont les noms donnés par les maîtres charpentiers respectivement aux joints de bout et aux joints d'angle. Les joints sont ainsi divisés en deux grandes familles. Nous avons divisé les assemblages présentés à la section suivante selon le même principe.

Hikari Kata signifie « reproduction ». Il s'agit de l'art de copier parfaitement la forme d'une pièce en bois sur une autre. Pour que les joints s'emboîtent bien, sans jeu ou contraintes parasites, il est essentiel de maîtriser une série de méthodes (*hikari*) et d'outils de traçage des formes.

Enfin, *Juki Gumi* est l'art de l'élaboration des charpentes. Il s'agit d'apprendre à définir les joints qui sont les plus faciles à construire tout en retirant le moins possible de matière afin à préserver au maximum la rigidité de base de la pièce en bois.

I.3.3.2. Quelques assemblages bois

Avant tout, il est utile d'introduire brièvement la notion de mi-bois, qui sera utilisée à plusieurs reprises ci-après.

L'assemblage à mi-bois, comme son nom l'indique, consiste à retirer la moitié de l'épaisseur des éléments à assembler. Les plus vieilles constructions en bois, faites de rondins empilés, utilisaient déjà l'assemblage à mi-bois afin de rendre rigide la connexion entre deux éléments perpendiculaires.

Cette méthode d'assemblage permet de bloquer les deux translations dans le plan horizontal. Le blocage de la translation verticale est assuré soit par le poids de l'élément soit par empilement d'élément soit par clouage.

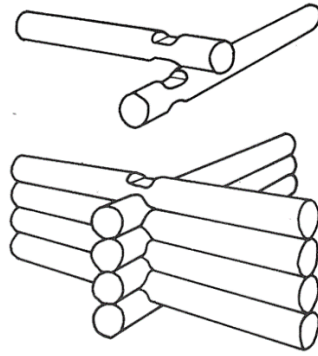


Figure 10 : structure réalisée en rondins empilés à l'aide d'entailles à mi-bois

I.3.3.2.1. Tsugite – Assemblages de bout

1. L'enture

Les assemblages par enture ne sont pas solides en soi, c'est pourquoi ils sont souvent chevillés ou boulonnés. L'enture est un assemblage à mi-bois qui est utilisé, par exemple, pour des poutres cantilevers.

- L'enture de continuité

L'enture de continuité peut reprendre un effort de cisaillement vertical et lorsqu'elle est chevillée ou boulonnée, (Figure 11), elle peut reprendre également un effort de cisaillement transversal. Elle ne peut pas reprendre de moment, c'est pourquoi elle est utilisée à des endroits de moment nul.

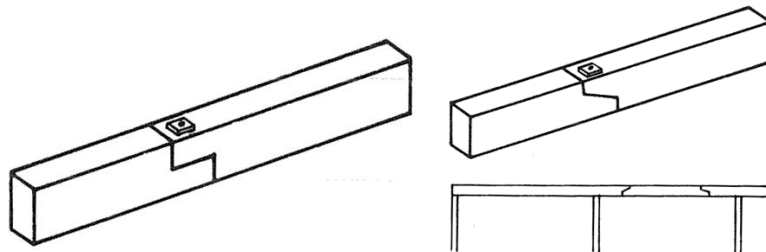


Figure 11 : l'enture de continuité

- L'enture en sifflet

L'enture en sifflet peut reprendre des efforts similaires à l'enture de continuité. La forme en sifflet permet la transmission d'efforts non seulement par butée, mais également par frottement. La hauteur de l'épaule fait en général $1/6$ de la largeur de l'élément.

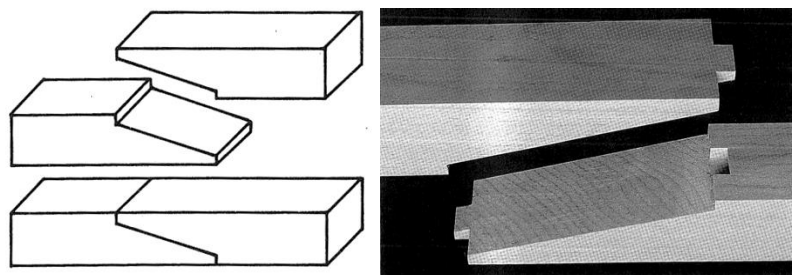


Figure 12 : l'enture en sifflet

- Le trait de Jupiter – Isuka Tsugi

Le trait de Jupiter permet d'abouter deux éléments de manière très résistante. Les deux parties du joint sont identiques, ce qui le rend assez facile à réaliser. Il existe plusieurs variantes de cet assemblage, qui permettent de reprendre différents efforts.

- Le trait de Jupiter simple permet de reprendre de la compression et de l'effort tranchant.
- Le trait de Jupiter des charpentiers permet de reprendre en plus des efforts précités, un effort de traction.
- Le trait de Jupiter amélioré permet de reprendre en plus de la compression et de l'effort tranchant, un effort tranchant transversal.

La hauteur de l'épaule fait en général 1/6 de la largeur de l'élément et la longueur de l'entaille de 1 à 2 fois la largeur de l'élément.

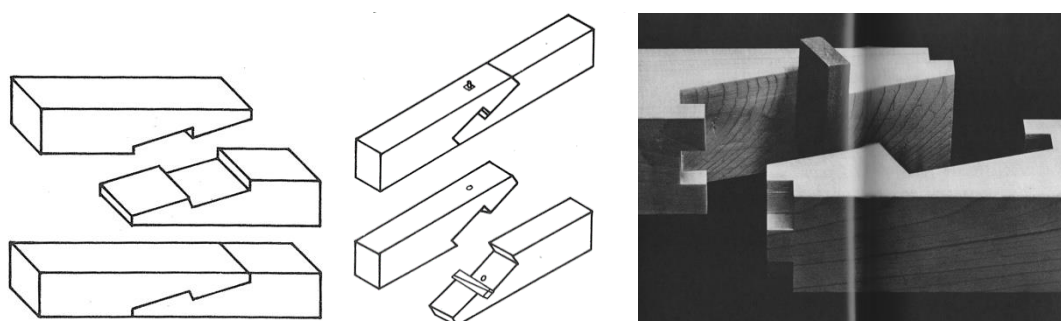


Figure 13 : [gauche] le trait de Jupiter simple ; [centre] le trait de Jupiter des charpentiers ; [droite] le trait de Jupiter des charpentiers amélioré

2. La queue d'aronde - Ari Tsugi

La queue d'aronde empêche le tenon de sortir de la mortaise. Cet assemblage résiste à la traction selon son axe longitudinal. Lorsque la queue d'aronde est à mi-bois (Figure 14), elle peut reprendre un effort de cisaillement. Cet assemblage permet d'abouter des éléments appuyés de manière continue, ne subissant pas d'efforts de cisaillement, comme les pannes de toitures.

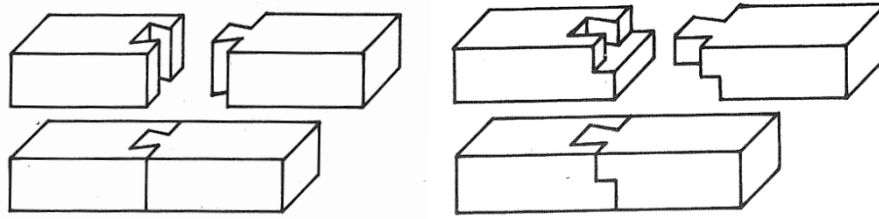


Figure 14 : [gauche] la queue d'aronde traversante [droite] la queue d'aronde à mi-bois

3. Le cou d'oie - Kama Tsugi

L'assemblage en cou d'oie suit un principe similaire à la queue d'aronde. Cet assemblage est utilisé au Japon depuis plus d'un millénaire. Il fonctionne bien en traction et en cisaillement. La longueur du tenon fait en général le double de la largeur de l'élément.

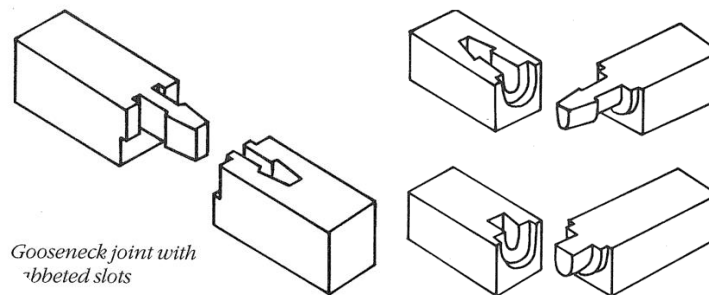


Figure 15 : le cou d'oie traditionnel [gauche] le cou d'oie usiné industriellement [droite]

4. Le tenon-mortaise simple et le tenon-mortaise en croix - Jyuji Mechigai Tsugi

L'assemblage tenon-mortaise en croix est utilisé pour joindre deux poteaux ou montants. Il a une bonne résistance en rotation et une bonne résistance en cisaillement. La résistance en flexion est cependant plus faible. La mortaise est la partie femelle dans laquelle est enfoncé le tenon.

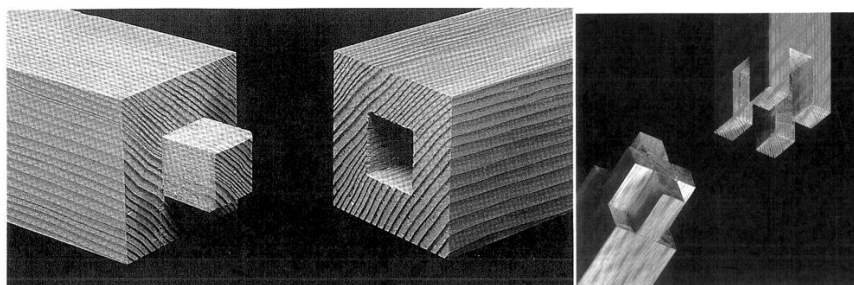


Figure 16 : le tenon-mortaise simple [gauche] ; le tenon-mortaise en croix [droite]

I.3.3.2.2. Shiguchi – Assemblage d'angle

1. La queue d'aronde – Ari Kake

Les assemblages par queue d'aronde d'angle sont encore très utilisés dans la construction bois « industrielle », par exemple sous la forme de sabots. Lorsque la queue d'aronde doit reprendre un effort de traction important, sa longueur fera, en général, toute la largeur de l'élément.

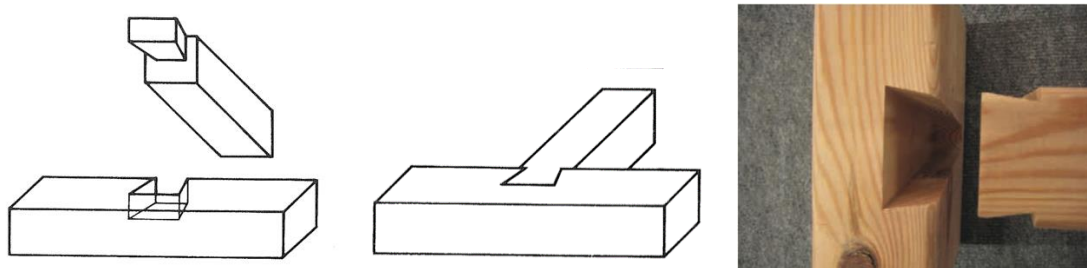


Figure 17 : la queue d'aronde pour la jonction en T d'élément

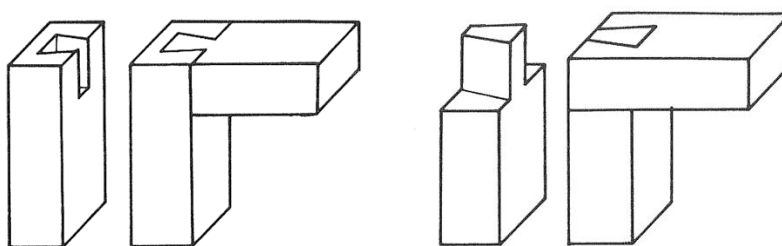


Figure 18 : la queue d'aronde pour la jonction en L d'éléments ; non-traversante [gauche] ; traversante [droite]

2. L'assemblage d'angle par tenon-mortaise

Le joint d'angle est de loin le plus utilisé. Il est facile à réaliser et a beaucoup d'applications. Sa capacité à résister à des efforts venant de différentes directions le rend particulièrement adapté pour lier ensemble des colonnes, des poutres, des panneaux, des pannes et d'autres éléments. Dans la construction moderne, le tenon (partie mâle) non chevillé fait en général entre 4 et 5 cm de longueur. La mortaise (partie femelle) est de l'ordre de 0,5 cm plus profonde. Cela permet d'éviter que le tenon ne bute contre le fond de la mortaise (et ne sorte) quand le bois sèche. L'effort de compression simple est donc transféré par l'épaulement du tenon et non la tête du tenon. Lorsque l'assemblage est chevillé, il peut également reprendre un effort de traction.

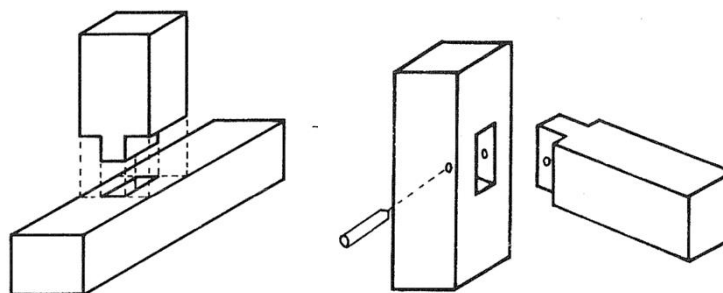


Figure 19 : exemple d'un assemblage tenon-mortaise non chevillé [gauche] et chevillé [droite]

Il existe une variante du tenon-mortaise appelée Jigoku hozo. Dans cet assemblage, le tenon prend la forme d'une queue d'aronde lorsqu'il est battu dans la mortaise. Cette dernière, quant à elle, a la forme d'une queue d'aronde. Il s'agit d'une sorte de queue d'aronde aveugle (dans le sens où on ne la voit pas de l'extérieur)

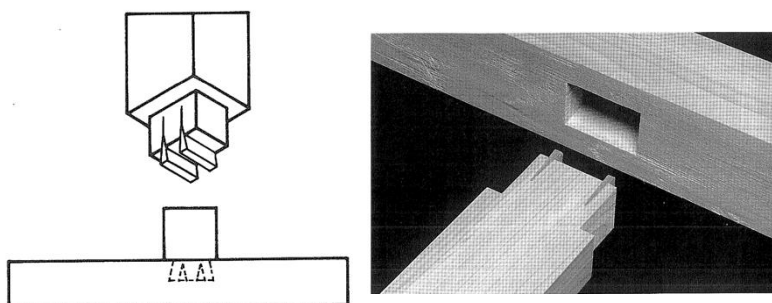


Figure 20 : Jigoku Hozo

3. Le joint à recouvrement (l'entablure croisée) - Ai Kaki –

Le joint à recouvrement, qui est un joint par entailles à mi-bois, possède, tout comme le tenon-mortaise, de nombreuses variantes qui dérivent de la forme simple représentée Figure 21. L'entablure est utilisée dans des joints d'angle en croix ou des joints en T, par exemple pour des charpentes.

L'entablure à mi-bois permet également de réaliser des assemblages par moisement (Figure 22). Notons que l'angle entre les éléments peut être différent de 90 degrés.

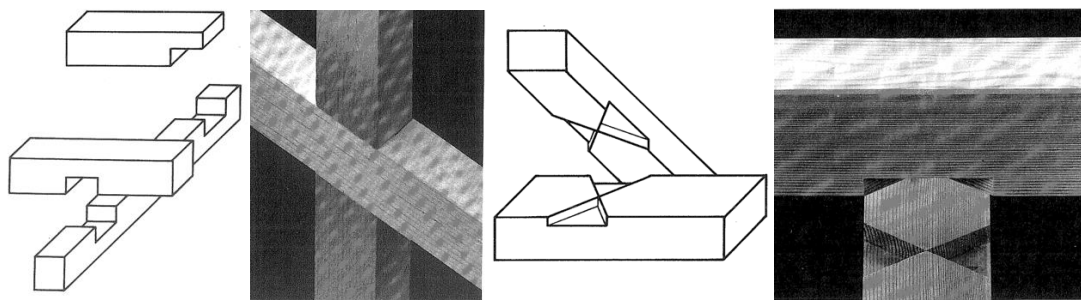


Figure 21 : l'entablure croisée en entaille rectangulaire [gauche] ou triangulaire [droite]

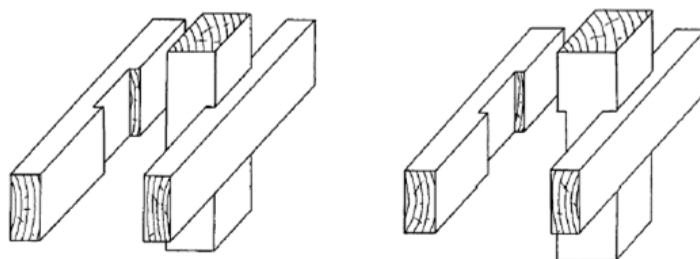


Figure 22 : [gauche] le moisement à une entaille ; [droite] le moisement à deux entailles

4. Le *nuki*

Le *nuki* permet de joindre une colonne et une poutre. Il s'agit du joint de base de la construction japonaise, très employé dans les temples traditionnels ainsi que dans l'architecture domestique au Japon.

Ce joint (dont la forme la plus pure est représentée à la Figure 23 à droite) est composé de deux éléments : une poutre étroite appelée « *Nuki* » et une colonne dans laquelle est pratiquée une entaille rectangulaire. La taille de l'entaille est plus haute que la poutre de sorte que le *nuki* entre facilement. Ensuite, des cales en bois sont insérées et battues jusqu'à être suffisamment serrées entre la poutre et la colonne. Cet assemblage, très simple, donne un résultat très rigide car il combine encastrement et frottement du bois.

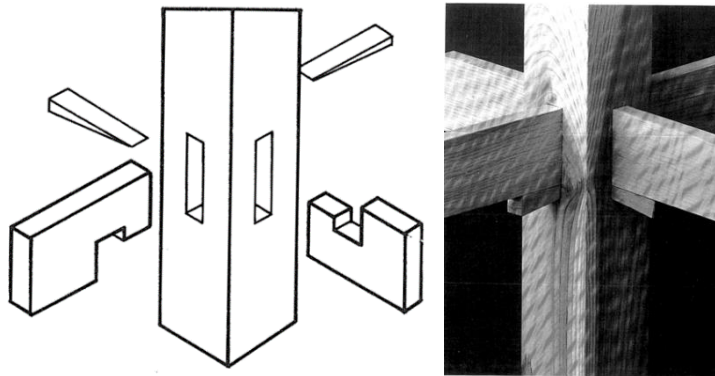


Figure 23 : le *nuki*

5. L'embrèvement

L'assemblage par embrèvement est utilisé pour créer un assemblage, résistant en compression, entre deux éléments qui se joignent en oblique. L'épaulement reprend la plus grande partie de l'effort. Vu que le bois est très résistant dans le sens des fibres, ce joint peut résister à des charges assez importantes. Il faut toutefois faire attention à avoir une surface de contact la plus parfaite possible. Ce joint est un des seuls à être encore régulièrement utilisé dans la construction moderne en bois.

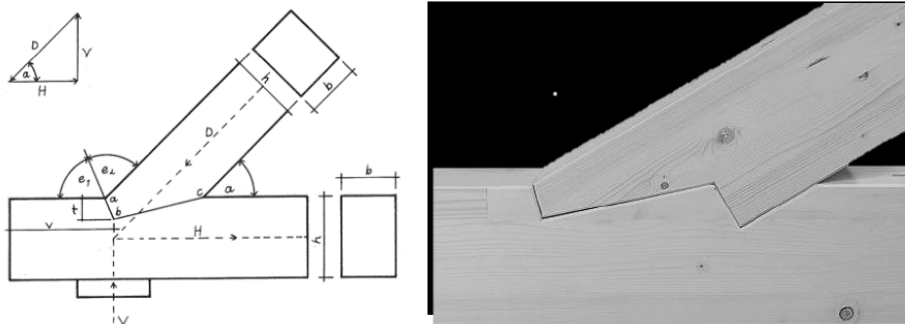


Figure 24 : l'embrèvement (simple à gauche et double à droite)

6. L'enfourchement

Le joint par enfourchement consiste en une poutre horizontale reposant dans une fourche coupée au bout d'un support vertical. Le joint peut éventuellement être fixé à l'aide de chevilles ou de vis. L'enfourchement peut être simple, double ou croisé, tel que représenté à la

Figure 26.

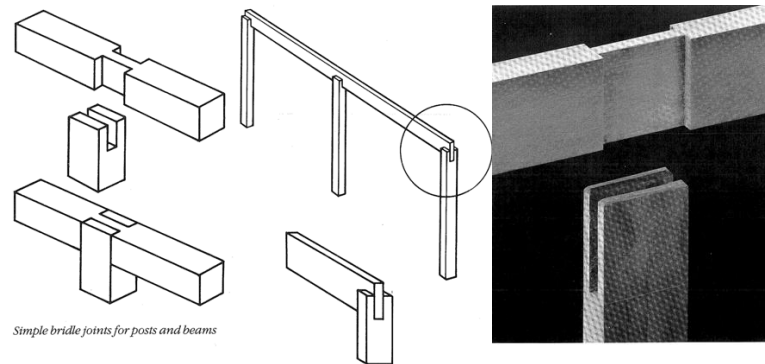


Figure 25 : l'assemblage par enfourchement.

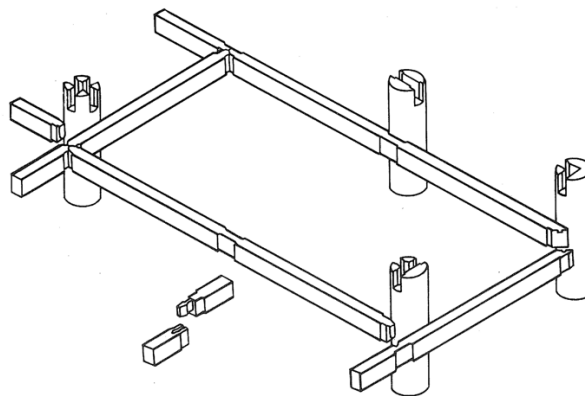


Figure 26 : exemple d'une structure poteaux-poutres réalisée à l'aide d'assemblages par enfourchement.

7. L'empilement

Les assemblages précités sont principalement utilisés pour faire des structures poteaux-poutres, c'est-à-dire un « squelette » en bois. Cependant, le bois est également utilisé pour des constructions par empilement.

Un assemblage par empilement nous a particulièrement séduits, il s'agit de l'assemblage type « queue d'aronde » illustré à la Figure 27. Une fois les madriers mis en place, l'assemblage est bloqué par le propre poids des éléments.

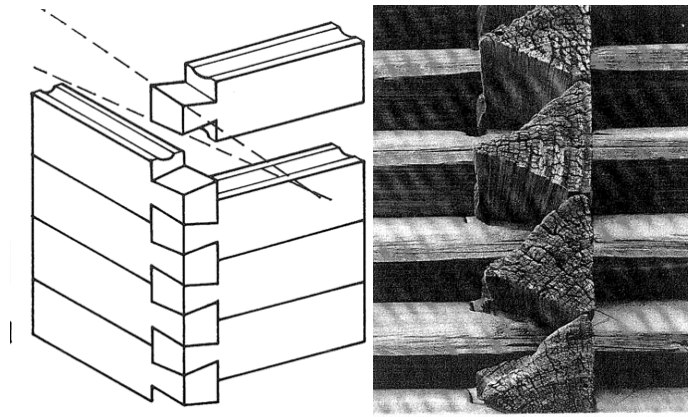


Figure 27 : exemple de structure réalisée par empilement de madriers [gauche] Photo d'une structure réalisée en bois empilé, Japon, 8^e siècle [droite]

8. Le *kawai tsugite*

Le *kawai tsugite* est un assemblage japonais, très particulier, qui permet d'assembler des éléments identiques de manière axiale ou perpendiculaire. On peut assembler deux colonnes ou une poutre et une colonne à l'aide du même joint.

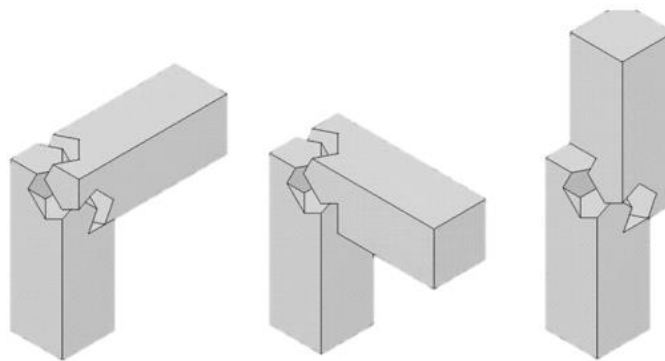


Figure 28 : le *kawai tsugite*

I.3.4. Les systèmes constructifs

La construction en bois est constituée d'une longue chaîne de traditions qui a permis le développement de structures à partir d'éléments linéaires. Ces éléments permettent de former des structures en deux dimensions telles que des cadres mais également en trois dimensions pour créer des treillis. En plus de ces structures de type « squelette », des constructions massives peuvent être créées par empilement d'éléments longs. Le bois est particulier car tous les éléments structuraux sont créés sur base d'éléments linéaires, alors que le béton et l'acier peuvent être coulés, fondus, moulés directement sous différentes formes.

L'évolution du travail du bois a joué un rôle dans le développement des constructions, et a servi de base pour l'utilisation d'autres matériaux. Les temples grecs, par exemples, étaient initialement réalisés en bois. Cependant, le bois pourrissait et il a donc été remplacé par la pierre. Les tailleurs de pierres grecs ont taillé les blocs de manière à reprendre les formes qui étaient caractéristiques de la construction en bois. Plus récemment, les structures poteaux-poutres en bois sont à l'origine de la construction de type squelette qui fut reprise au 18^e siècle pour les constructions en acier.

Quatre systèmes constructifs sont principalement utilisés en construction bois aujourd'hui : le bois empilé, l'ossature bois, le système de panneaux en bois massif et le système poteaux-poutres.



Figure 29 : Quatre systèmes constructifs en bois : bois empilé, ossature bois, système de panneaux en bois massif et système poteaux-poutres [de gauche à droite]

Dans le cadre de notre travail, nous allons nous concentrer sur les structures poteaux-poutres et sur le bois empilé car ces systèmes permettent d'assembler des éléments d'un volume et d'un poids plus raisonnable eu égard à la construction par drone.

Chaque système constructif possède ses propres caractéristiques et présente des avantages qui conviennent à différentes situations.

I.3.4.1. Le poteaux-poutres

I.3.4.1.1. Historique

Le poteaux-poutres est un des plus vieux systèmes constructifs. En effet, l'homme a très vite enfoncé dans le sol des bois ronds pour former les murs de sa cabane. Il se servait des fourches formées par les branches pour poser la toiture.

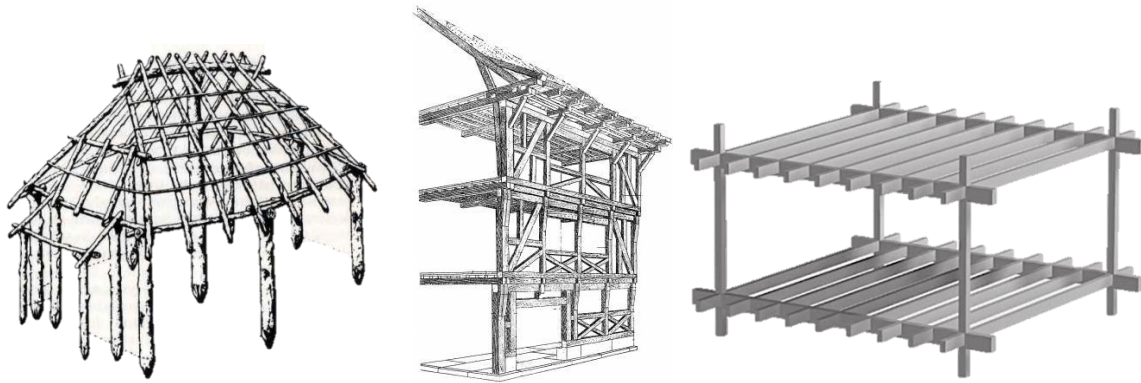


Figure 30: dessin d'une cabane primitive reconstituée d'après des restes archéologiques trouvés sur la colline du Palatin Rome, VII siècle a. Chr. [gauche] ; ossature type colombage [centre] ; ossature type poteaux-poutres [droite]

C'est à partir de ce mode primitif de construction que s'est développé le colombage qui s'est ensuite répandu dans les régions européennes durant plusieurs siècles. Dans le système en colombage, les ouvertures laissées entre les éléments de bois sont remplies par des branches tressées et du torchis. Les exigences actuelles en termes de dimensions des ouvertures, techniquement irréalisables à l'époque, ont mené au développement des systèmes poteaux-poutres que nous connaissons. La « cabane » primitive est donc le précurseur du système poteaux-poutres, système à structure linéaire. Dans ce type de construction, la structure primaire, constituée de poteaux, de poutres et d'éléments de contreventement disposés selon une trame régulière, accueille la structure secondaire formée par les planchers. Ces planchers (panneaux massifs ou solivage) transmettent les charges vers les éléments poutres. Contrairement aux structures massives, dans les structures poteaux-poutres, les murs ne remplissent pas de fonction porteuse, mais uniquement une fonction séparatrice. Les cloisons intérieures et l'enveloppe extérieure sont indépendantes de la structure portante ; ce qui permet une grande liberté de l'aménagement intérieur ainsi que de façade par de grandes baies vitrées. (Figure 31, prise lors du chantier)



Figure 31 : collège de Mirecourt, Architecture Studio, France⁷

La structure portante laissée apparente du côté intérieur garantit la continuité de l'enveloppe extérieure et rythme ainsi l'espace au profit de l'expression architecturale. Les poteaux et les poutres sont assemblés de manière à former une maille rectangulaire.

⁷ Source de l'image : <http://laugeletrenouard.fr/college-dolmaire-mirecourt/>

Contrairement à une structure en béton dans laquelle les dalles pleines contreventent la structure horizontalement, le système poteaux-poutres exige un contreventement de la structure portante à la fois horizontalement et verticalement. Pour les planchers, il est intéressant d'utiliser des panneaux de type CLT⁸ car ceux-ci servent non seulement de contreventements (effet diaphragme), mais également de structure secondaire. Verticalement, le contreventement se fait en général par des croix de Saint-André, diagonales en bois massif ou éléments panneaux (OSB⁹).

Le développement de nombreux assemblages métalliques¹⁰ tels que des clous, des broches ou des connecteurs à plaques permet de réaliser n'importe quel type d'assemblage. Certains assemblages peuvent ainsi devenir fastidieux à calculer tant le nombre de vérifications à effectuer sont élevées.

Enfin, en ce qui concerne l'isolation extérieure et l'étanchéité à l'air, elle se fait essentiellement dans l'habillage du bâtiment. Il est essentiel de ne pas faire passer la structure à travers l'enveloppe pour éviter des ponts thermiques.

Le système poteaux-poutres a plusieurs avantages et inconvénients. Ceux-ci sont repris ci-dessous :

Avantages :

- Grande liberté architecturale, un plan flexible ;
- Possibilité de construire sur plusieurs étages ;
- Possibilité d'avoir de grandes ouvertures ;
- Possibilité de préfabrication des murs, des planchers et des éléments de toiture.

Inconvénients :

- Une mise en œuvre moins rapide que d'autres systèmes constructifs en bois ;
- La nécessité d'une étude de stabilité plus importante ;
- Des assemblages métalliques souvent complexes et sensibles au feu ;
- Un coût plus élevé de construction ;
- L'économie d'échelle¹¹ rend le système peu intéressant pour des petits projets.

Le nombre de constructions en poteaux-poutres réalisées en Belgique augmente depuis quelques années. Même s'il représente encore une infime partie des constructions en bois réalisées en Belgique (moins de 8% des structures neuves en bois), ce système séduit particulièrement pour les constructions de grande dimension. En outre, l'utilisation du Bois Lamellé Collé (BLC) pour les poutres permet de réaliser des éléments sans défauts et aux dimensions voulues. Ainsi le poteaux-poutres en bois rivalise avec des systèmes tels que l'ossature métallique ou le poteaux-poutres béton.

⁸ Cross Laminated Timber.

⁹ Oriented Strand Board

¹⁰ Ce développement a entraîné l'abandon des assemblages traditionnels. Ces assemblages étaient moins rentables car ils nécessitent un vrai savoir-faire. De moins en moins de charpentiers maîtrisent encore l'art de la charpenterie en Europe. L'importance de la tradition dans la construction bois a été conservée dans la charpenterie Japonaise, dont certains assemblages sont remarquables.

¹¹ Le coût de construction d'un projet en poteau-poutre est principalement lié au nombre d'assemblages. Pour un petit projet le nombre de nœuds sera élevé par rapport à la superficie couverte.

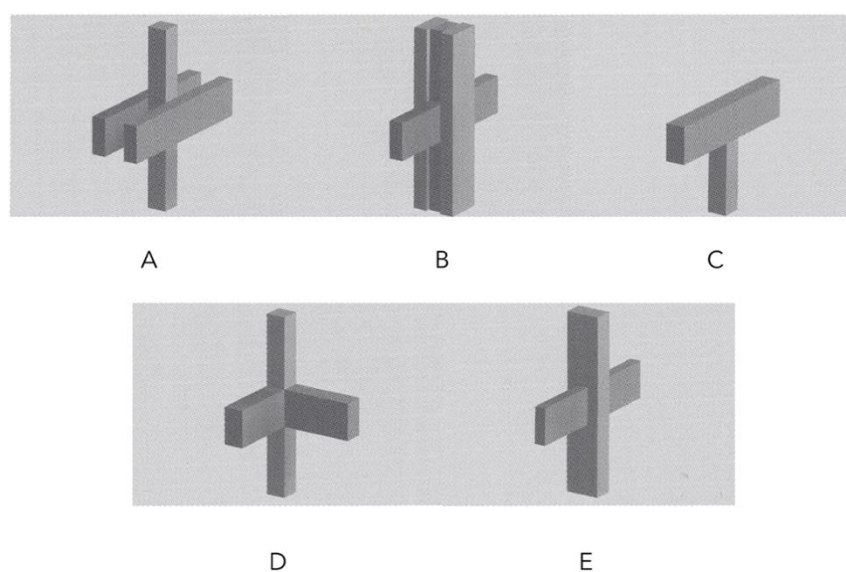
I.3.4.1.2. En pratique

Dans la construction poteaux-poutres, la structure primaire reprend les charges de la structure secondaire et les transfère aux fondations. La structure primaire est souvent réalisée en lamellé-collé tandis que la structure secondaire est réalisée en bois massif ou avec des éléments préfabriqués (par exemple des panneaux). Les types de bois les plus couramment utilisés sont donc le lamellé collé, classe de résistance GL24h et le bois massif ou le bois massif reconstitués en classe de résistance C24.

La structure des bâtiments en poteaux-poutres suit une trame horizontale régulière. Le choix de la trame dépend souvent de contraintes architecturales. Les dimensions de la trame sont en général un multiple de 625 mm (dimensions commerciales courantes des panneaux) : 1250/1250 mm, 2500/2500 mm, ..., 7500/7500 mm.

En théorie, plus la trame est grande, plus la consommation en bois sera grande. Cependant, le coût de construction d'une trame de grande dimension est proportionnellement plus faible. En effet, le coût étant principalement lié au nombre de nœuds, plus la trame est grande, plus le nombre d'assemblages sera petit par rapport à la superficie.

Lorsque la trame est déterminée, il faut choisir le type d'ossature en fonction des charges. Enfin, les nœuds et les éléments porteurs doivent être dimensionnés. Les différents types d'ossatures de la construction contemporaine sont représentés à la Figure 32.



Types d'ossatures	
A	Poteau simple et poutres moisées
B	Poteaux moisés et poutre simple
C	Poutre en appui sur le poteau
D	Poutre en appui contre le poteau
E	Poutre continue et poteau entaillé

Figure 32 : types d'ossatures les plus courants¹²

¹² Source de l'image : J. KOLB, *Bois, systèmes constructifs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2006

I.3.4.2. Le bois empilé

Initialement l'homme utilisait le bois de manière assez primitive sous forme de rondins empilés. Aujourd'hui, nous construisons toujours à l'aide de madriers empilés parce qu'ils répondent aux normes énergétiques les plus exigeantes. Grâce à des méthodes de fabrication plus précises, l'aspect visuel et énergétique est remarquable.

La construction ancestrale, par empilement de rondins de bois, était particulièrement populaire dans l'architecture du logement des pays du Nord de l'Europe où les ressources en bois étaient très fournies (3000 millions de m³ de bois en Suède). Ce système constructif était apprécié pour les avantages suivants :

- très bonne inertie et isolation thermique étant donné la grande quantité de bois mise en œuvre (propriété non négligeable dans les climats froids) ;
- facilité de montage ;
- rapidité de construction ;
- aspect chaleureux ;
- régulation hygrométrique.

La construction moderne en madriers réunit l'expérience des générations passées et les nombreuses recherches qui ont eu lieu sur le matériau bois et de la physique du bâtiment. Le savoir-faire ancestral s'adapte aux nouvelles exigences de l'habitat. De cette manière, on préserve une manière de construire unique et très fortement enracinée dans certaines régions du monde. Certains points faibles de ce type de construction tels que les importants tassements ou encore la nécessité de protéger les coins sont maintenant mieux connus et par conséquent mieux maîtrisés.

Parmi les améliorations importantes, on retrouve :

- l'utilisation de madriers profilés de manière à garantir une bonne étanchéité (Figure 33 C) ;
- l'intégration des techniques directement dans les madriers ;
- l'utilisation de tourillons métalliques qui solidarisent l'ensemble.

La construction par empilement de madriers a donc beaucoup évolué. La Figure 33 illustre l'évolution de ce système de construction. Les madriers ont généralement une épaisseur variant de 5,5 à 20 cm.

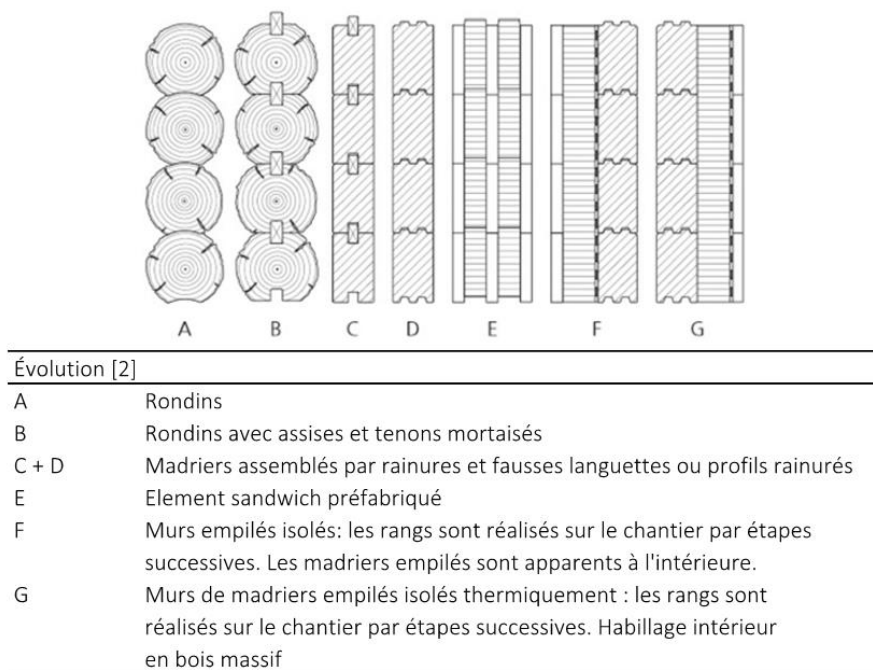


Figure 33 : évolution de la construction par empilement¹³

Aujourd'hui, grâce à certains architectes locaux, la construction en bois empilé se renouvelle. Les nouvelles techniques permettent d'obtenir un beau rendu très chaleureux et de construire de grandes baies vitrées. Il existe également des éléments préfabriqués qui intègrent le bardage, la couche d'étanchéité et l'isolation, mais ces techniques modernes restent aujourd'hui encore très locales et ne se diffusent pas.

Le bâtiment en bois empilé de la Figure 34¹⁴ montre l'intérêt subsistant aujourd'hui pour des structures en bois empilé qui, avec du savoir-faire, permettent de construire sur plusieurs étages.



Figure 34 : bâtiment multiétage en bois empilé (Suisse)

¹³ Source du tableau : J. KOLB, *Bois, systèmes constructifs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2006

¹⁴ Source de l'image : www.google.com/maps

Ce système constructif par empilement présente trois inconvénients majeurs :

- Tassement important des murs porteurs bois durant les premières années qui peut atteindre jusqu'à 25 mm par étage. Les causes de ce tassement sont diverses :
 - Contraintes élevées perpendiculairement aux fibres, or le bois se déforme fortement dans ce sens ;
 - Séchage du bois ;
 - Variations dimensionnelles du bois entre les saisons ;
- sensibilité du bois aux attaques de champignons nécessitant une attention particulière à la protection des extrémités des madriers au niveau des croisements ;
- détails d'isolation délicats au niveau des angles extérieurs.

Chapitre II : Propriétés du bois

Dans le cadre de ce deuxième chapitre, deux propriétés du bois sont étudiées plus particulièrement : le coefficient de frottement ainsi que les propriétés hygroscopiques.

L'étude du frottement du bois est indispensable pour s'assurer que les éléments vont pouvoir glisser les uns sur les autres lorsque le drone déposera l'élément supérieur sur celui déjà en place.

Quant aux propriétés hygroscopiques, elles serviront à éviter que des problèmes de gonflement du bois empêchent l'emboîtement des deux éléments de l'assemblage.

II.1. ETUDE DU FROTTEMENT DU BOIS

La construction par drone implique le développement d'assemblages qui, par leur forme, corrigent l'imprécision du drone et permettent aux éléments de s'emboîter et de se verrouiller automatiquement. En effet, étant donné cette imprécision, l'assemblage doit être composé de pentes afin de guider l'élément supérieur dans sa mise en place sur l'élément inférieur. La Figure 35 illustre le glissement qui s'effectue entre les éléments.

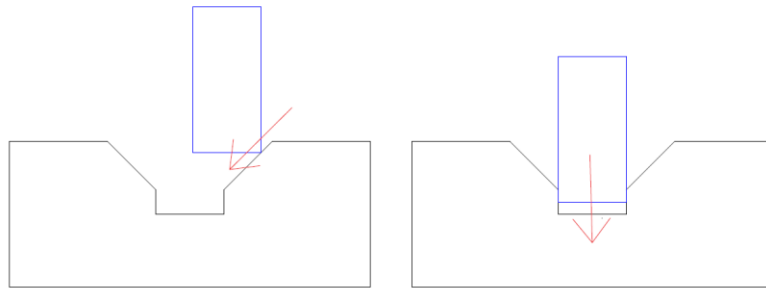


Figure 35 : l'élément supérieur glisse sur la poutre inférieure et se met en place

Dès lors, il est indispensable d'évaluer le coefficient de frottement du bois afin de concevoir des pentes suffisamment grandes pour permettre le glissement.

II.1.1. Valeurs théoriques

Nous nous intéressons au coefficient de frottement statique puisque celui-ci sera le plus critique pour fixer la pente minimale de l'assemblage. D'après nos recherches dans la littérature, le coefficient de frottement bois-bois vaut :

$$\mu_s = 0,4 \text{ à } 0,6$$

A partir de ce coefficient, nous pouvons calculer la pente minimale pour que l'objet se mette en mouvement (voir Figure 36). La condition pour la mise en mouvement de l'objet est :

$$P \sin(\alpha) > P \cos(\alpha) \mu_s$$

Et donc :

$$\tan(\alpha) > \mu_s$$

En prenant la valeur maximale du coefficient ($\mu_s = 0,6$), nous obtenons un angle minimal de : 31° .

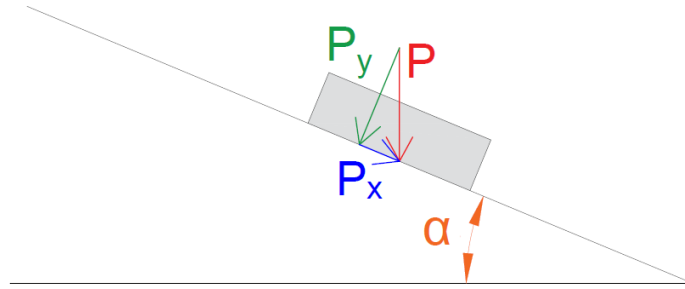


Figure 36 : calcul de l'angle minimum à partir du coefficient de frottement

Remarque : on constate bien que l'angle limite pour assurer le glissement d'un objet est indépendant de son poids.

II.1.2. Valeurs expérimentales

Afin de confirmer la pente minimale obtenue de manière théorique, nous avons déterminé cet angle limite de manière expérimentale. Le dispositif expérimental (Figure 37) consistait simplement à poser deux échantillons de bois l'un sur l'autre sur une planche. Ensuite, nous levions progressivement la planche jusqu'à glissement de l'élément supérieur sur son support (élément inférieur). Nous mesurons alors l'angle d'inclinaison correspondant à cette mise en mouvement.

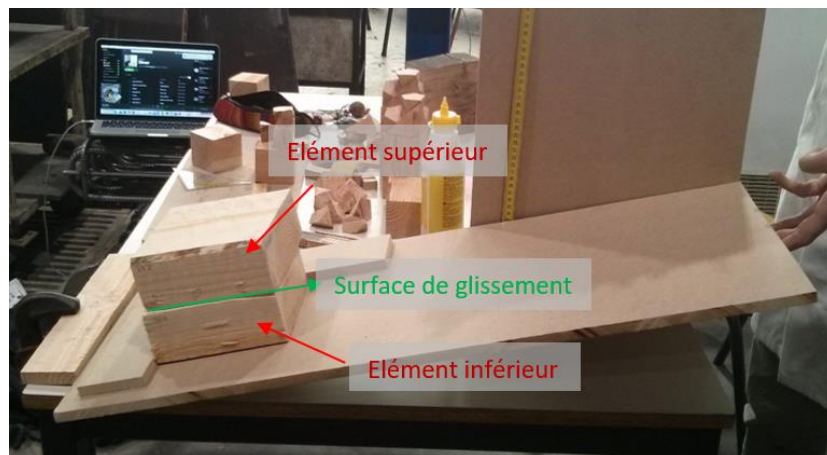


Figure 37 : détermination expérimentale du coefficient de frottement

Afin d'effectuer ces essais, nous avons préparé quatre échantillons de douglas (D1 à D4) et deux échantillons de chêne (C1 et C2). D1, D2, C1 et C2 sont des carrés coupés perpendiculairement aux fibres alors que D3 et D4 ont été coupés à 45° par rapport au sens des fibres.

Nous avons effectué une série de combinaisons¹⁵ à partir des différentes faces des échantillons en orientant les fibres dans différentes directions. Pour chaque combinaison, nous avons effectué 5 fois l'essai. Une fois suffisamment d'essais effectués, nous avons poncé les faces des échantillons D1 et D2 afin de comparer le glissement d'une surface brute et d'une surface poncée. Le Tableau 4 présente la moyenne et la valeur maximale des angles limites pour assurer le glissement bois contre bois.

¹⁵ En annexe 1 se trouvent les photos de toutes les faces testées ainsi que l'ensemble des angles mesurés.

Tableau 4 : angles minimaux assurant le glissement des éléments

	Douglas brut	Douglas poncé	Chêne brut
Valeur maximale	33,3°	19,3°	30,8°
Valeur moyenne	26,8°	18,4°	24,6°

L'angle critique que nous allons considérer dans le design de nos assemblages est donc de 33,3°. Evidemment, au plus l'angle sera grand, au mieux l'élément glissera. En fonction des possibilités, nous allons essayer d'augmenter la pente jusqu'à 45° voire plus pour certains assemblages.

Nous remarquons également que le coefficient de frottement du bois poncé est nettement meilleur. Lors de la fabrication, poncer les assemblages assurerait un meilleur glissement entre éléments.

II.2. PROPRIETES HYGROSCOPIQUES DU BOIS

Le bois est constitué en majorité de trois types d'eaux : l'eau libre (dans les pores), l'eau liée (les molécules d'eau se lient à la lignine, l'hémicellulose et la cellulose) et l'eau de constitution (appartenant à la matière organique elle-même). L'eau libre et l'eau liée peuvent être évacuées du bois par séchage. La perte de l'eau libre n'a pratiquement pas d'impact sur les propriétés mécaniques ou le volume. Les variations de l'eau liée, par contre, provoquent de grandes variations de volume (retrait ou gonflement).

L'eau liée varie en fonction de l'environnement dans lequel est placé le bois. Le taux d'hygroscopie évolue jusqu'à être en équilibre avec le milieu ambiant. Cet équilibre dépend principalement de l'humidité de l'air et de la température. Le Tableau 5 reprend le taux d'hygroscopie d'équilibre du bois en fonction de la saison.

Tableau 5 : taux d'hygroscopie d'équilibre du bois

	Extérieur	Intérieur
Eté	w = 13 %	w = 13 %
Hiver	w = 19 %	w = 7 %

Ce phénomène de gonflement peut être problématique sur chantier s'il n'est pas pris en compte dans la logistique. En effet, du bois stocké sur chantier sans être protégé va gonfler. Ensuite, lors de la mise en place, les éléments seront difficilement emboîtables à cause de leurs variations dimensionnelles.

Dans le cas de la construction par drone, les éléments doivent s'assembler seuls, sous leur propre poids et donc l'assemblage ne peut en aucun cas avoir gonflé car la mise en place ne serait plus possible. Nous devons donc absolument prendre ce phénomène en compte dans notre réflexion.

Nous avons décidé de nous servir de ce phénomène de retrait / gonflement à notre avantage. Le principe est de sécher le bois sous le niveau hygroscopique final (correspondant au milieu dans lequel il sera mis en place). Ensuite, une fois le bois suffisamment séché, les assemblages sont découpés. Les éléments doivent alors être protégés jusqu'à leur mise en place. A cet effet, le bois ne sera pas entreposé sur chantier mais arrivera sur camion bâché directement le jour de la mise en place¹⁶. Une fois les éléments assemblés sur site, ceux-ci vont gonfler afin d'atteindre un équilibre hygroscopique correspondant au milieu ambiant. Ce gonflement va permettre de rigidifier l'assemblage.

Nous pouvons calculer le gonflement théorique des éléments à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta L = \frac{\beta}{100} * \Delta w * L$$

Avec :

- β le coefficient de retrait ou gonflement moyen [%/%]
- Δw la variation du taux d'hygroscopie du bois [%]
- L la longueur de l'élément dans la direction considérée [mm]
- ΔL la variation dimensionnelle dans la direction considérée [mm]

¹⁶ Ce principe peut paraître contraignant mais c'est pourtant tout à fait faisable. Les constructions en béton fonctionnent de cette manière puisque celui-ci doit être mis en place dans un certain laps de temps après sa fabrication.

Le gonflement ou le retrait longitudinal (dans le sens des fibres) est toujours négligeable. En effet, comme l'illustre le Tableau 6 le coefficient β est très faible longitudinalement.

Tableau 6 : coefficients de retrait et de gonflement de différentes essences de bois

	β tangentiel	β radial	β longitudinal
Epicéa	0,37	0,19	0,01
Douglas	0,27	0,17	0,01
Chêne	0,32	0,19	0,01
Hêtre	0,38	0,22	0,01

Comme exemple, nous pouvons calculer le gonflement d'un madrier de Douglas de de type 7 x15 pour un taux d'humidité initial de 5%. Nous déterminons le gonflement dans la largeur de 63mm.

Tableau 7 : gonflement en mm d'un élément de dimension initiale = 63 mm

	Extérieur & été	Extérieur & hiver	Intérieur & été	Intérieur & hiver
Tangentiel	1,36 mm	2,38 mm	1,36 mm	0,34 mm
Radial	0,86 mm	1,50 mm	0,86 mm	0,21 mm

En annexe 2, se trouvent les tableaux de calculs pour le Douglas, l'Epicéa et le Chêne.

Chapitre III : Assemblages drone-compatibles

Ce chapitre constitue la partie principale de notre travail : le développement de sept assemblages drone-compatibles.

Quatre contraintes encadrent le développement de nos assemblages : la capacité de levage du drone limitée à 100 kg, les imprécisions de positionnement du drone (5 cm), la nécessité d'un emboîtement vertical et la volonté d'un assemblage bois-bois.

Le principal défi est de développer des assemblages qui, par leur forme, corrigent l'imprécision du drone et permettent aux éléments de s'emboîter et de se verrouiller automatiquement. En effet, les assemblages traditionnels en bois requièrent une précision de mise en place que le drone n'atteint pas.

L'adaptation à la construction par drone consiste donc à trouver des alternatives aux assemblages traditionnels nécessitant moins de précision lors du placement.

Nous avons développé des assemblages de différents types afin de pouvoir, en les combinant, créer diverses structures. Nous nous sommes toutefois limités à deux types de construction : les structures par empilement et les structures poteaux-poutres. Les assemblages présentés dans ce chapitre ont été étudiés de manière complète : détermination de la géométrie et des dimensions de la version adaptée, validation du fonctionnement de l'assemblage, calcul de résistance, étude d'exemples de structures composées d'éléments drone-compatibles.

III.1. ASSEMBLAGES A MI-BOIS

L'objectif de cette section est la présentation d'un assemblage à mi-bois drone-compatible. La section est décomposée en cinq parties.

L'assemblage à mi-bois traditionnel étant employé pour empiler des madriers ou pour joindre deux poutres, nous avons développé deux variantes : l'une pour l'empilement d'éléments et l'autre pour la jonction de poutres. La première et la deuxième partie présentent le fonctionnement de l'assemblage et les dimensions caractéristiques de ces deux variantes. La troisième partie porte sur la validation expérimentale du fonctionnement à l'aide de modèles réduits en bois et d'un essai à échelle réelle avec un drone. La quatrième partie concerne la résistance mécanique de l'assemblage et présente une synthèse des calculs effectués. Un tableau synthétise, pour différentes sections de poutre, la capacité portante de l'assemblage. La cinquième partie illustre le potentiel de l'assemblage à mi-bois à l'aide d'une structure de *carport* réalisée entièrement avec des éléments à mi-bois drone-compatibles.

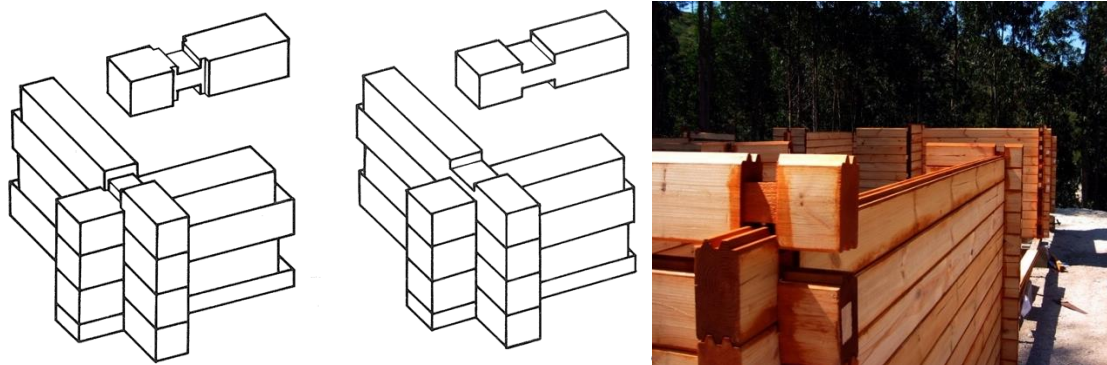


Figure 38 : assemblage à mi-bois traditionnel pour l'empilement de madriers¹⁷

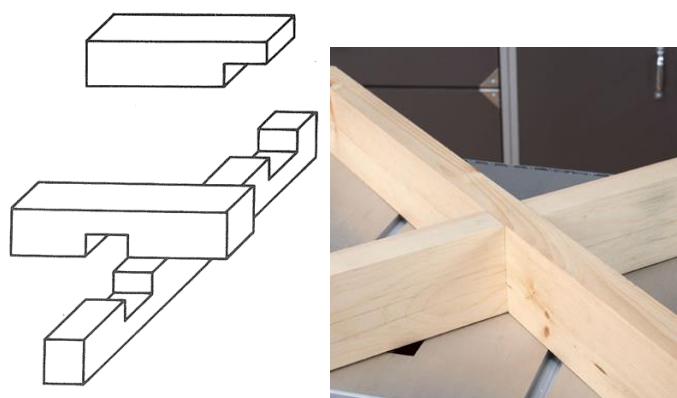


Figure 39 : assemblage à mi-bois traditionnel pour la jonction de deux poutres

¹⁷ Source de l'image : <http://www.woneninhout.nl/hout-stapelbouw-methode/>
Source des schémas : "Encyclopedia of Wood Joints", **W. Graubner**, The Taunon Press, 1992

III.1.1. Assemblage à mi-bois pour l'empilement

Avant de fixer les dimensions et les caractéristiques de la version drone-compatible de l'assemblage, nous nous sommes penchés sur le fonctionnement du système constructif par empilement.

III.1.1.1. Etude du système constructif par empilement

Afin de nous familiariser avec le bois empilé, nous avons réalisé une série de modèles réduits, à l'aide de lattes en bois. Nous avons découpé une encoche à mi-bois classique dans les éléments afin de pouvoir les assembler. La profondeur de l'encoche correspond à un quart de la hauteur de l'élément, permettant ainsi aux éléments de se chevaucher sur une mi-hauteur. Ce décalage d'une mi-hauteur entre les éléments est nécessaire afin de créer l'empilement. L'objectif de cette démarche est d'identifier les différents types de pièces nécessaires à la création de structures diverses. La Figure 40 illustre un exemple de construction empilée.

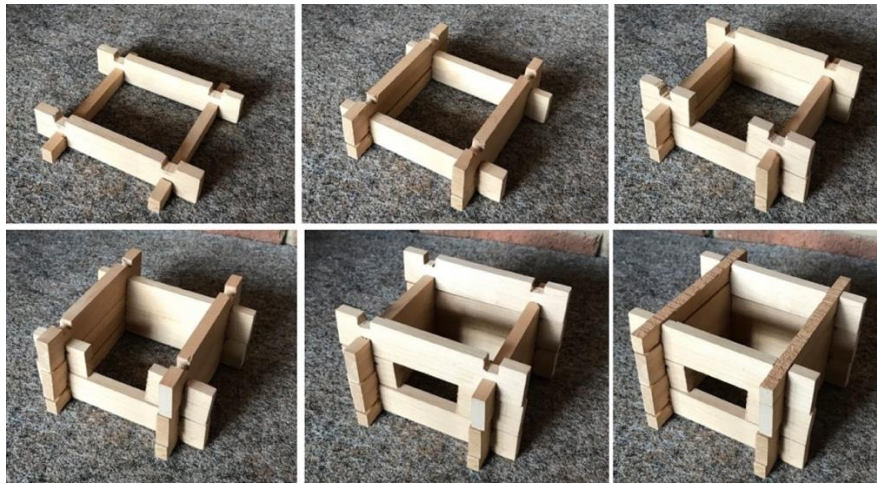


Figure 40 : principe d'assemblage d'une structure en bois empilé

Sur base de ces essais, les deux pièces principales du système d'empilement ont pu être identifiées :

- 1) Une pièce de hauteur h munie de deux encoches, de part et d'autre de l'élément, qui font chacune le quart de la hauteur (Figure 41 à gauche)
- 2) Une pièce de hauteur $h/2$ avec une seule encoche sur la moitié de sa hauteur, c'est-à-dire de profondeur $h/4$ (Figure 41 à droite). Ces pièces servent de première ou de dernière pièce de l'empilement.

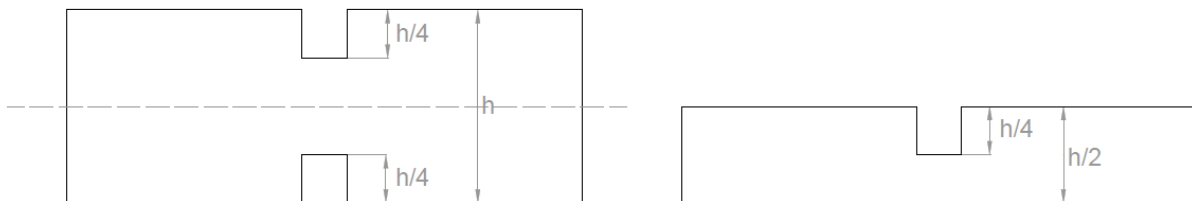


Figure 41 : pièces entaillées sur le quart de la hauteur servant pour l'empilement de madriers

III.1.1.2. Caractéristiques et fonctionnement

Deux contraintes importantes nous ont guidés lors de l'adaptation de l'assemblage à mi-bois traditionnel. D'une part, la forme des éléments doit pouvoir reprendre l'imprécision de 5 cm inhérente au positionnement du drone. D'autre part, l'assemblage doit être fixe et rigide, c'est-à-dire que le déplacement relatif d'un élément de l'assemblage par rapport à l'autre élément ne peut pas être supérieur au déplacement qui serait observé dans le cas d'assemblages classiques.

La forme des pièces que nous avons développées est simple (Figure 42). L'encoche à mi-bois est chanfreinée de chaque côté sur une longueur de 5 cm. Les pentes ainsi créées sont nécessaires pour reprendre les 5 cm d'imprécision. L'angle minimal de chaque pente doit être de 33° (voir Chapitre 2). Nous avons fixé cet angle à 45° afin d'assurer un meilleur glissement des éléments. Enfin, l'encoche à mi-bois n'est pas chanfreinée sur tout sa hauteur. Une partie rectangulaire est conservée sur une hauteur h_{en} afin d'assurer le blocage des pièces mises en place. La hauteur de la partie encastrée est telle que la hauteur totale de l'encoche vaut un quart de la hauteur de la section.

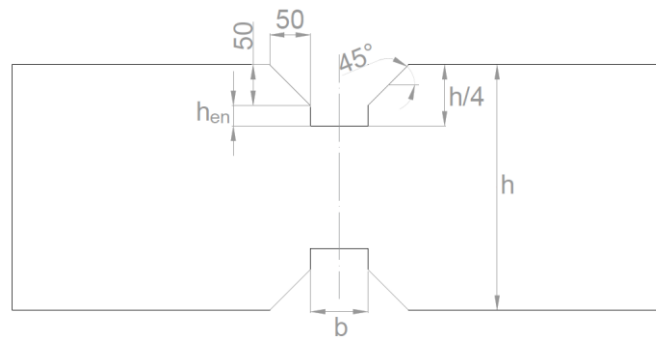


Figure 42 : dimensions de l'assemblage à mi-bois pour empilement (en mm)

Cet assemblage nécessite une hauteur minimale de : $h_{min} = (50 + h_{en}) * 4 > 200 \text{ mm}$ (Figure 42). Dès lors, en considérant la plus petite section commerciale en bois acceptable, c'est-à-dire les types 4 x 23 et 8 x 23, la hauteur d'encastrement, h_{en} , sera de 7,5 mm. Cette hauteur d'encastrement est faible mais suffisante pour garantir la stabilité de la structure dans son état final. C'est-à-dire lorsque les éléments s'appuient les uns sur les autres, assurant ainsi la rigidité de l'assemblage. Toutefois, lors de la mise en place, cette faible hauteur d'encastrement pourrait permettre le basculement de l'élément dû au vent provoqué par la proximité du drone.

Dans le cas de cet assemblage, l'instruction donnée au drone correspond à la position finale des madriers. Autrement dit, l'ordre donné est de positionner le centre de l'assemblage supérieur sur le centre de l'encoche inférieure. Chaque élément peut reprendre 5 cm selon son axe longitudinal. Les éléments se croisant perpendiculairement, les 5 cm d'imprécision peuvent ainsi être repris dans toutes les directions.

III.1.1.3. Dimensions de l'assemblage pour des sections types

Comme précisé ci-dessus, la hauteur de la plus petite section en bois massif acceptable pour cet assemblage est de 230 mm. Le Tableau 8 présente les dimensions de l'assemblage pour trois sections commerciales courantes en bois massif et pour deux angles de la pente de l'encoche. La longueur

maximale ($L_{\max}$) de chaque élément, afin de ne pas dépasser la limite de 100 kg imposée par le drone, est indiquée dans la dernière colonne.

Tableau 8 : dimensions de l'assemblage à mi-bois pour trois sections commerciales types

Type de poutres	α [degrés]	h [mm]	b [mm]	h_{en} [mm]	$L_{\max}$ [m]
4x23	45	225	38	6,25	> 15
	33	225	38	23,8	> 15
8x23	45	225	75	6,25	> 10
	33	225	75	23,8	> 10
10x30	45	300	100	25	7,41
	33	300	100	42,5	7,41

III.1.2. Assemblage à mi-bois pour la jonction de deux poutres

L'assemblage à mi-bois pour la jonction de deux poutres suit les mêmes principes que la version pour empilement. Nous avons donc chanfreiné l'assemblage à mi-bois classique, ajoutant des pentes à 45° sur une longueur de 5 cm de chaque côté de l'encoche. Nous veillons également à avoir une partie de l'encoche qui reste rectangulaire (sur une hauteur h_{en}) afin d'assurer le blocage des éléments mis en place. La différence avec l'assemblage pour empilement présenté ci-avant est que la hauteur de l'encoche vaut la moitié de la hauteur de la poutre (Figure 43). Ainsi, les faces supérieures des deux poutres se situent dans un même plan horizontal une fois assemblées.

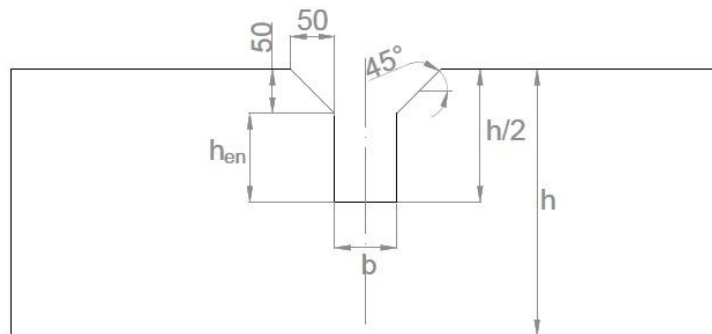


Figure 43 : dimensions de l'assemblage à mi-bois pour la jonction de poutres [mm]

La hauteur minimale est moins restrictive. En effet, en considérant par exemple une hauteur d'encastrement h_{en} de 25 mm¹⁸, la hauteur minimale de la poutre est de 150 mm. Le Tableau 9 présente, à l'instar du Tableau 8, les dimensions des éléments.

Tableau 9 : dimensions de l'assemblage à mi-bois pour six sections commerciales type

Type de poutres	α [degrés]	h [mm]	b [mm]	h_{en} [mm]	L_{max} [m]
4x15	45	150	38	25	> 15
	33	150	38	42,5	> 15
7x15	45	150	63	25	> 15
	33	150	63	42,5	> 15
7x18	45	175	63	37,5	> 15
	33	175	63	55,0	> 15
4x23	45	225	38	62,5	> 15
	33	225	38	80,0	> 15
8x23	45	225	75	62,5	> 10
	33	225	75	80,0	> 10
10x30	45	300	100	100	7,41
	33	300	100	117,5	7,41

¹⁸ Nous verrons dans la section III.1.3.2 que cette hauteur correspond à la hauteur minimale en pratique pour garantir la stabilité latérale de l'élément lors de sa mise en place.

III.1.3. Validation du fonctionnement

La validation du fonctionnement de l'assemblage est identique pour les deux assemblages présentés ci-avant. En effet, le principe de mise en place est le même pour l'assemblage servant à empiler des éléments ou à joindre deux poutres.

III.1.3.1. Essais à la main

Le fonctionnement de cet assemblage a dans un premier temps été validé à l'aide d'essais à la main. Pour ce faire, des maquettes en bois ont été réalisées. Nous avons travaillé avec des sections de type 7 x 15 dans lesquelles nous avons pratiqué une encoche d'une profondeur $h/2$ comme illustré à la Figure 44. L'objectif des essais est de valider le principe d'assemblage et de confirmer que la pente de 45° assure un bon glissement.



Figure 44 : photo d'un modèle réduit réalisé pour des essais de mise en place à la main, [mm]

La Figure 45 illustre les essais de mise en place qui ont été réalisés, l'élément supérieur étant positionné différemment à chaque essai.



Figure 45 : séquence d'assemblage des éléments à la main

Lors de ces essais, nous avons constaté que l'élément supérieur se coince parfois en oblique sur l'élément inférieur (Figure 46). Dans ce cas, nous remontons légèrement l'élément pour ensuite laisser le laisser redescendre. Ce mouvement permet systématiquement d'assurer une bonne mise en place de l'élément supérieur.

Dans le cas de la mise en place par drone, il faudrait donc donner l'instruction au drone de toujours remonter de quelques centimètres pour ensuite redescendre à la position finale. Ainsi, si l'élément est coincé, il sera débloqué. Ce principe est illustré à la Figure 46.

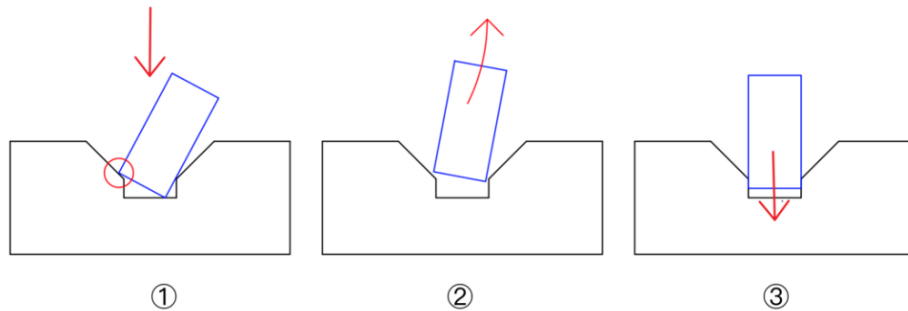


Figure 46 : lorsque l'élément supérieur se bloque de travers (1), le drone remonte (2), la mise en place se fait alors correctement (3)

Grâce à l'application de cette procédure, l'assemblage fonctionne comme prévu. La pente de 45° garantit également un bon glissement des éléments.

III.1.3.2. Essai avec drone

Le fonctionnement de l'assemblage a également pu être validé par un essai avec drone. Le drone développé par l'UCL spécialement pour la recherche sur les éléments drone-compatibles, a une capacité de levage de 30 kg. Toutefois, dans le cadre de ces premiers tests, nous nous sommes fixés un poids maximal de dix kilogrammes par élément. L'objectif de l'essai était également d'évaluer l'influence de l'inertie d'éléments longs sur la maniabilité du drone. Pour ces raisons, nous avons travaillé avec des poutres de 2,5 m de long et de section 4 x 23 cm. Ces éléments font exactement dix kilogrammes.

Le drone n'est pas encore équipé pour voler de manière automatique, cet essai a donc été effectué par un pilote.

III.1.3.2.1. Disposition et dimensions des éléments testés avec le drone

- La Figure 47 illustre le dispositif d'éléments que nous avons mis en place pour l'essai. Les poutres n°1 et n°2 sont fixées au sol tandis que les poutres n°3 et n°4 seront mises en place par le drone. Des encoches d'une hauteur correspondant à la moitié ($h/2$) et au quart ($h/4$) de la hauteur de la poutre ont été taillées respectivement sur les poutres n°3 et n°4.

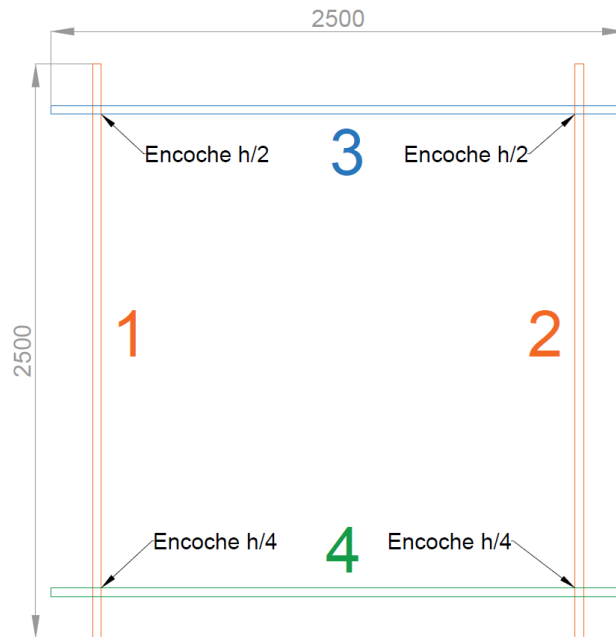


Figure 47 : plan de la disposition des éléments lors de l'essai avec le drone [mm]

- Les dimensions de la poutre n°3 (encoches de mi-hauteur) sont représentées à la Figure 48. La largeur de la partie inclinée de l'encoche fait 8 cm au lieu des 5 cm considérés dans le reste de ce travail. Ainsi, l'imprécision de positionnement du drone qui peut être reprise est égale à 8cm. Cela a pour objectif de pallier le fait que le pilote humain est moins précis que le pilotage automatique.
- Les dimensions de la poutre n°4 sont représentées à la Figure 49. Les encoches sur un quart de hauteur sont plus contraignantes. En effet, en conservant l'angle de 45°, contrairement à la poutre n°3, nous ne pouvons pas augmenter l'imprécision au-delà de 5cm car la hauteur de la poutre n'est pas suffisante.
- Le système de levage qui a été attaché au drone est représenté Figure 50 . Ce système consiste en un système d'électro-aimants fixé au drone par l'intermédiaire de deux tiges filetées. Les plats métalliques sur lesquelles viendront se fixer ces électro-aimants, sont des carrés en acier de 150 x 150 mm et d'épaisseur 5 mm (ceux-ci sont représentés en bleu Figure 48). L'épaisseur des plats doit être telle qu'elle permet la formation d'un champ magnétique suffisamment puissant. L'espace de 60 cm entre les électro-aimants garantit la rigidité en rotation du système « drone + poutre » sans trop encombrer le drone.

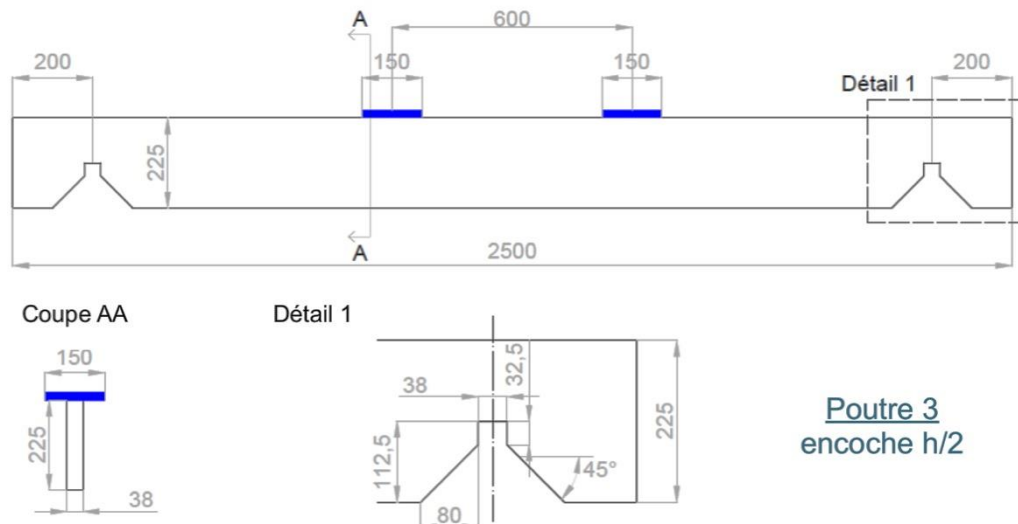


Figure 48 : dimensions de la poutre n°3 et position des plats métalliques (en bleu) [mm]

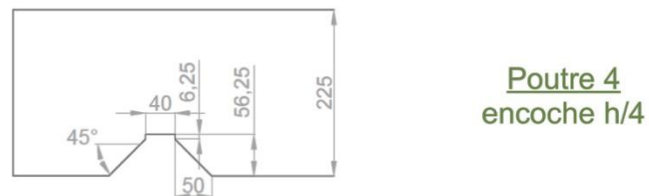


Figure 49 : dimensions de l'encoche à mi-bois réalisée sur la poutre n° 4



Figure 50 : système de levage fixé au drone

III.1.3.2.2. Essai de mise en place par le drone (poutre n°3)

Lors de cet essai, le drone prend les poutres n°3 et n°4 et les assemble à leur position finale (Figure 47).

ETAPE 1 : Prise de l'élément

La première étape consiste à aller chercher l'élément avec le drone. Celui-ci doit descendre sur l'élément de manière à connecter les électro-aimants aux deux plaques métalliques (Figure 51). Cette étape a été franchie quelques fois, plus ou moins rapidement, par le pilote.



Figure 51 : prise de l'élément par le drone

ETAPE 2 : Mise en place de l'élément sur les deux poutres supports

Une fois l'élément porté par le drone, celui-ci doit aller le déposer sur les deux poutres supports. Rappelons que dans le cas de la poutre n°3, l'imprécision de positionnement tolérée est de 8 cm. La Figure 52 illustre quelques étapes de cet essai. Comme le montrent les photos, l'essai a été concluant puisque la poutre a été bien mise en place. Ce premier test d'assemblage d'élément en bois par drone est donc encourageant.

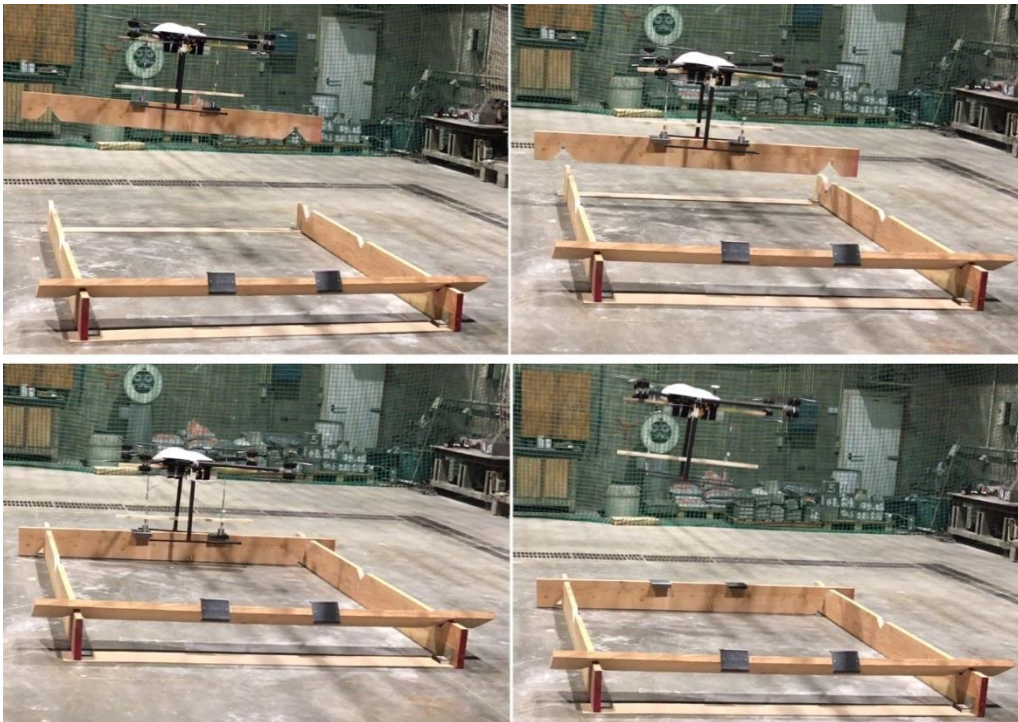


Figure 52 : mise en place de la poutre n°3 par le drone

III.1.3.2.3. Constatations et pistes d'amélioration

Suite à ce premier essai d'assemblage de poutres, nous avons quatre constatations :

- 1) Les éléments testés sont trop fins (4 cm). Ils basculent lorsque le drone, en s'approchant de la poutre pour la soulever, crée des turbulences. Durant les essais, il a donc été nécessaire de coincer la poutre entre deux éléments de bois afin de la stabiliser. A l'avenir, il faudra soit utiliser des éléments moins élancés, soit prévoir un système de maintien latéral.



Figure 53 : système de maintien latéral de la poutre ayant été mis en place

- 2) La profondeur d'encoche verticale des poutres n°4 ($h_{en} = 6,25$ mm) n'est pas suffisante pour assurer la stabilité de l'élément lorsqu'il est en place. En effet, lors de l'essai de la poutre n°3, la poutre n°4 a basculé avec le vent créé par le drone qui vole dans la drone-zone. La poutre n°3 n'a donc finalement pas été testée car le risque de basculement lors de la pose implique un risque de casse pour le drone.

La conclusion est que pour empiler des éléments à l'aide de drones, une section 4 x 23 cm, et donc une hauteur d'encastrement de 6,25 mm, ne fonctionne pas. Une hauteur d'encastrement de 2,5 cm, ce qui correspond à des poutres de type 10 x 30 cm nous semble plus réaliste. Il est toutefois nécessaire d'effectuer des tests afin de valider cette hypothèse.



Figure 54 : basculement de la poutre n°4 (encoche sur un quart de la hauteur) dû au vent créé par le drone

L'essai de mise en place de la poutre n°4 n'a donc pas été réalisé.

- 3) Le système de levage doit être amélioré dans le cas des essais avec pilote et dans l'optique d'une construction par drone automatique :
 - a. Essais avec pilote : Lors de l'essai, le pilote a éprouvé des difficultés à aligner parfaitement les électro-aimants avec l'axe de la poutre. Le problème est dû aux plaques métalliques qui sont plus larges que la poutre (plaque de 150 x 150 mm pour une poutre de 40 mm de large). Ces plaques devaient être suffisamment grandes pour permettre aux électro-aimants de s'y attacher facilement malgré l'imprécision de positionnement du drone. Deux problèmes principaux ont été rencontrés lorsque le drone s'approchait de la poutre pour la saisir :

- Les pieds du drone ou les électro-aimants cognent latéralement les plaques (qui sont encombrantes) entraînant le basculement de la poutre.
- Lorsque les électro-aimants ne sont pas bien centrés sur la poutre, la force de levage n'est pas dans l'axe de la poutre et les électro-aimants se détachent facilement des plaques métalliques.

Il est donc nécessaire de concevoir un nouveau système de levage qui permette de simplifier la tâche du pilote lors de la prise de l'élément.

- Pilotage automatique : Il est indispensable de prévoir un système de levage qui permette de positionner les électro-aimants exactement à l'endroit souhaité. En effet, si l'électro-aimant n'est pas parfaitement positionné, nous ajoutons à l'imprécision inhérente au drone une imprécision due au décalage de l'électro-aimant par rapport à la position théorique.
- 4) Afin d'éviter tout blocage lors de la mise en place, nous pourrions ajouter des pentes dans la largeur de l'assemblage comme illustré à la Figure 55 :

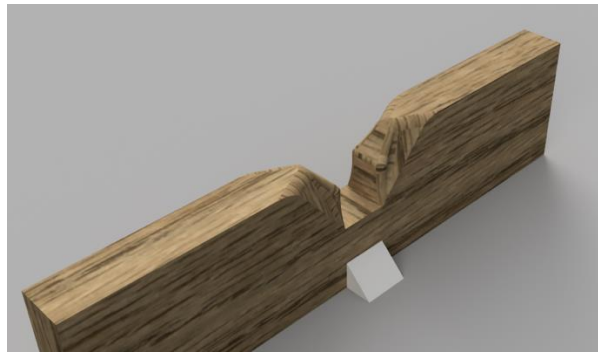


Figure 55 : proposition d'affinement local de la section de la poutre

L'assemblage a tout de même fonctionné sans ces pentes additionnelles mais il serait intéressant d'effectuer des tests comparatifs entre les deux options.

III.1.4. Résistance

Cette section est consacrée à l'estimation de la capacité portante de l'assemblage à mi-bois drone-compatible. Ces vérifications ont été faites pour des éléments de différentes dimensions. Les résultats sont résumés dans le Tableau 10 qui se trouve à la page 54, en fin de section. Les formules utilisées sont celles prescrites par l'Eurocode 5.

Hypothèses de calcul :

- Epicéa (C24)
- Classe de service 3
- Les différentes sections étudiées sont les plus courantes : 4 x 23 cm, 8 x 23 cm et 10 x 30 cm

La Figure 56 illustre les assemblages étudiés dans le cas d'une poutre en bois de type 10 x 30 cm (pente de 33° et 45°).

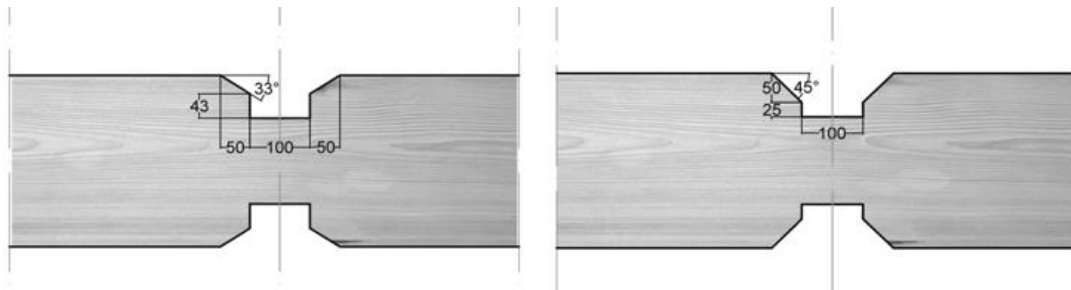


Figure 56 : dimensions des deux types d'assemblages, pente de 33° et 45° respectivement, ici pour une poutre 10x30 cm

Les vérifications effectuées sont :

- Dans la section (Figure 57 à droite)
 - Cisaillement en section réduite (2)
 - Flexion en section réduite (2)
 - Flexion en section pleine (1)
- Dans l'assemblage (Figure 57 à gauche) :
 - La compression perpendiculairement aux fibres (appui d'une poutre sur l'autre)
 - Reprise d'un effort de flexion



Figure 57 : schéma des vérifications effectuées : capacité portante de chaque élément [gauche] et de l'assemblage [droite]

En réalité, il est peu probable que l'assemblage ait la rigidité nécessaire pour reprendre des efforts de flexion. En effet, dans le cas de la flexion, l'assemblage est comprimé perpendiculairement aux fibres. Or, dans cette direction, le bois se déforme dix fois plus que dans le sens des fibres.

III.1.4.1. Cisaillement en section réduite

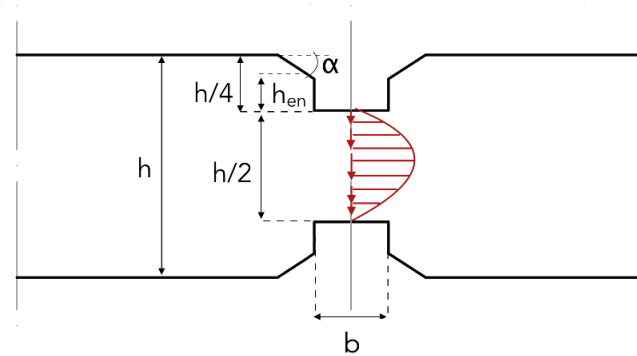


Figure 58 : contraintes de cisaillement dans la section réduite

Le critère de vérification au cisaillement s'écrit :

$$\tau_{Ed,max} = \frac{3 * V_{Ed}}{2 * k_{cr} * A} \leq f_{v,d} = \frac{f_{v,k} * k_{mod}}{\gamma_m}$$

Avec :

- V_{Ed} l'effort de cisaillement sollicitant
- k_{cr} le coefficient réducteur tenant compte de la présence de fissures dans le bois qui diminuent la résistance en cisaillement de l'élément
- A l'aire de la section cisailée
- $f_{v,k}$ la résistance caractéristique en cisaillement
- k_{mod} le coefficient qui tient compte de la durée d'application des charges et de la classe de service du bois
- γ_m coefficient partiel de sécurité sur le matériau bois

Nous avons effectué la vérification du critère de cisaillement au droit de la section réduite car il s'agit du point critique. Pour le bois massif, la résistance en cisaillement est fixée par l'eurocode à 4 MPa. Pour les bois lamellés collés, la valeur est fixée à 3,5 MPa.

III.1.4.2. Flexion en section pleine et en section réduite

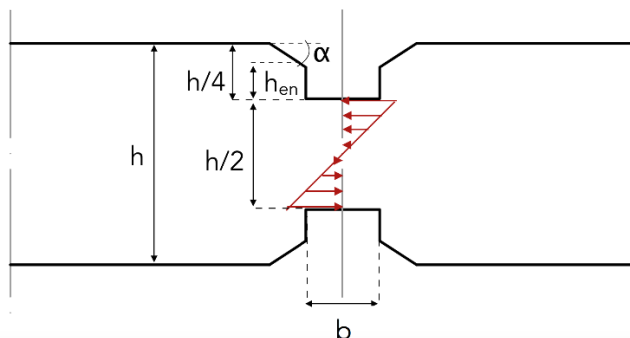


Figure 59 : contrainte de flexion en section réduite

Pour la vérification de résistance en flexion, le critère de vérification s'écrit

$$\sigma_{m,Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{él}} \leq f_{m,d} = \frac{f_{m,k} * k_{mod}}{\gamma_m}$$

Avec :

- M_{Ed} le moment sollicitant
- $W_{él}$ le module de flexion élastique qui vaut $\frac{b*h^2}{6} (mm^3)$ pour une section rectangulaire.
- $f_{m,k}$ la résistance caractéristique en flexion
- k_{mod} le coefficient qui tient compte de la durée d'application des charges et de la classe de service du bois
- γ_M coefficient partiel de sécurité sur le matériau bois

La vérification en section pleine et en section réduite se fait identiquement, seul le module de flexion $W_{él}$ change d'un cas à l'autre.

III.1.4.3. Compression au sein de l'assemblage

La poutre portée transfère les efforts à la poutre porteuse en comprimant le bois perpendiculairement aux fibres. La compression perpendiculairement aux fibres étant un élément critique du bois, nous allons nous y attarder brièvement.

A l'échelle macroscopique, trois modes de rupture du bois sollicité perpendiculairement aux fibres ont été identifiés. Premièrement, le décollement des fibres : ce mode de rupture s'observe principalement sur les lamelles de faux quartier. Deuxièmement, pour des lamelles débitées sur quartier, il peut y avoir une rupture par flambement des cernes du bois. Enfin, pour des lamelles sur dosse, il peut y avoir une rupture par écrasement du bois de printemps. Ces modes de rupture sont illustrés à la Figure 60.

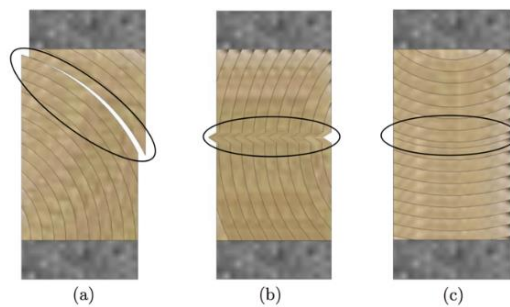


Figure 60 : modes de rupture du bois sollicité perpendiculairement aux fibres : (a) décollement des fibres (b) flambement des fibres (c) écrasement du bois de printemps¹⁹

¹⁹ Source de l'image : D. LATHUILLIERE, *Thèse de doctorat, Etude du comportement et du renforcement d'appuis sollicités en compression selon un angle donné du bois lamellé-collé*, Université de Lorraine, France, 2015.

Dans le sens perpendiculaire aux fibres, le bois a donc un comportement différent s'il est sollicité radialement ou tangentiellement. Cependant, dans le monde industriel, le type de débit étant inconnu à l'avance, c'est une valeur moyenne qui est retenue. Sur base de nombreux essais, l'eurocode 5 fixe la résistance du bois dans le sens perpendiculaire aux fibres $f_{c,90,k}$ à une valeur qui est de l'ordre du 2,5 MPa pour les résineux et les bois lamellés collés et de 8 MPa pour les feuillus. Les feuillus ont globalement une meilleure résistance perpendiculairement aux fibres que les résineux parce qu'ils possèdent plus de rayons ligneux. Dans le cadre des calculs, nous avons considéré uniquement des résineux qui sont les plus employés en structure.

Le module d'élasticité perpendiculairement aux fibres $E_{90,moyen}$ est également beaucoup plus faible avec une valeur qui est en moyenne 30 fois plus petite que le module de Young dans le sens des fibres. Perpendiculairement aux fibres, le bois a un comportement élasto-plastique avec une rupture qui survient rapidement.

Le critère de vérification du bois comprimé perpendiculairement aux fibres s'écrit :

$$\sigma_{c,90,Ed} = \frac{N_{c,90,Ed}}{A} \leq f_{c,90,d} = \frac{f_{c,90,k} * k_{c,90} * k_{mod}}{\gamma_m}$$

Avec :

- $N_{c,90,Ed}$ l'effort de compression sollicitant
- A la surface comprimée
- $f_{c,90,k}$ la résistance caractéristique perpendiculaire aux fibres
- k_{mod} le coefficient qui tient compte de la durée d'application des charges et de la classe de service du bois
- γ_M coefficient partiel de sécurité sur le matériau bois
- $k_{c,90}$ coefficient empirique qui tient compte de la diffusion de l'effort. Il dépend, entres autres, de la configuration de chargement et de la hauteur de la section.

III.1.4.4. Flexion au sein de l'assemblage

Nous considérons une reprise de moment théorique de l'assemblage à mi-bois. En effet, comme expliqué en début de section, l'assemblage n'est pas assez rigide pour transmettre réellement un moment. Comme illustré à la Figure 61, lorsqu'un moment est appliqué dans l'assemblage, des contraintes de compression naissent, de part et d'autre, de l'assemblage, aux niveaux des surfaces de contact entre les éléments.

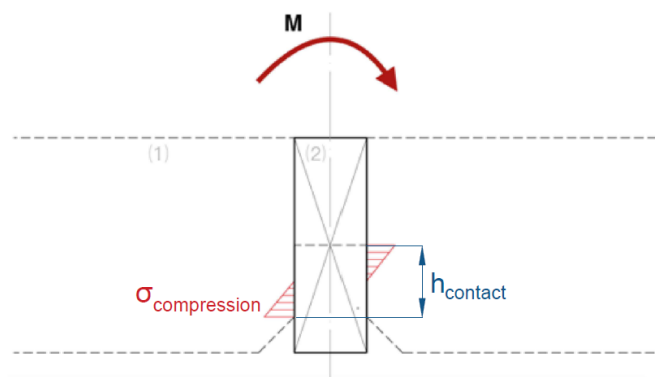


Figure 61 : contraintes de flexion au sein de l'assemblage

Nous utilisons le critère de vérification en flexion classique mais en remplaçant $f_{m,k}$ par $f_{c,90,k}$. Concernant le module de flexion W_{el} , nous considérons comme section la zone de contact entre les deux poutres. Nous obtenons donc $\frac{b \cdot h_{contact}^2}{6}$ (mm³) (Figure 61).

III.1.4.5. Résistance de l'assemblage

Suite aux critères de vérification énoncés précédemment dans cette section, le Tableau 10 présente les résistances maximales selon ces différents cas.

Tableau 10 : résistance de l'assemblage et de la section

Type de poutres	α [degrés]	h [mm]	b [mm]	h_{en} [mm]	$N_{Rd, \perp}$ aux fibres [kN]	V_{Rd} [kN]	M_{Rd} [kN.m]	$M_{Rd, section réduite}$ [kN.m]	$M_{Rd, \perp}$ aux fibres [kN.m]
4x23	45	225	38	6,25	2,50	4,63	5,33	1,33	4,28E-04
	33	225	38	23,8	2,50	4,63	5,33	1,33	6,20E-03
8x23	45	225	75	6,25	9,74	9,13	10,51	2,63	8,45E-04
	33	225	75	23,8	9,74	9,13	10,51	2,63	1,22E-02
10x30	45	300	100	25	17,31	16,23	24,92	6,23	1,80E-02
	33	300	100	42,5	17,31	16,23	24,92	6,23	5,22E-02

Les notations utilisées dans ce tableau sont les suivantes :

- α est l'angle des pentes de l'assemblage
- h et b sont les dimensions de la poutre
- h_{en} correspond à la partie rectangulaire de l'encoche (contribuant à l'encastrement des éléments l'un dans l'autre)
- $N_{Rd, perpendiculairement aux fibres}$ correspond à la résistance en compression perpendiculaire aux fibres dans l'assemblage (appui d'une poutre sur l'autre)
- V_{Rd} correspond à la résistance au cisaillement en section réduite
- M_{Rd} correspond à la résistance à la flexion en section pleine
- $M_{Rd, section réduite}$ correspond à la résistance à la flexion en section réduite
- $M_{Rd, perpendiculairement aux fibres}$ correspond à la résistance à la flexion de l'assemblage

III.1.5. Application à une structure simple

Cette section a pour objectif d'illustrer, à travers un exemple de structure simple, le potentiel de l'assemblage à mi-bois que nous proposons. Les résultats des essais à échelle réelle avec le drone étant positifs, nous pourrions imaginer construire « demain » une structure telle que celle que nous proposons.

III.1.5.1. Présentation de la structure

Afin de ne pas être bloqués par des considérations de type étanchéité, passage des techniques ou isolation, nous avons choisi une structure ouverte qui n'est pas destinée à l'habitation.

Nous avons imaginé une structure composée de deux murs massifs en madriers empilés. Ces murs soutiennent deux poutres primaires qui soutiennent, à leur tour, cinq poutres secondaires (Figure 62). Ce type de structure assez rudimentaire, est très régulièrement utilisé pour réaliser des *carports*, des pergolas ou des auvents. C'est pour sa simplicité et ses nombreuses applications que nous l'avons choisie.

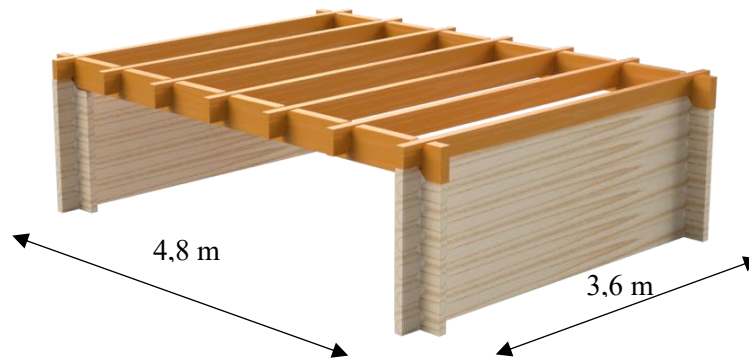


Figure 62 : structure composée d'éléments drone-compatibles

Les deux poutres principales ont une portée de 4,8 m, tandis que les poutres secondaires ont une longueur de 3,6 m. Ceci correspond aux dimensions d'un *carport* pour une voiture et une moto. Ces dimensions permettent également de respecter la limite de poids de 100 kg par élément imposée par le drone. Chaque élément peut donc être transporté par un seul drone.²⁰

²⁰ Pour des raisons d'inertie de la poutre, nous pourrions imaginer que les longs éléments soient portés par deux drones. Chaque drone porte une extrémité de l'élément. Ainsi, la poutre ne peut pas entraîner les drones en tournant.

III.1.5.2. Principe de montage

La séquence de montage de la structure par des drones est représentée à la Figure 63.



Figure 63 : séquence de montage par drone

Tout d'abord, les drones construisent les deux murs porteurs par empilement de madriers (Figure 65, poutres de type 3 et 3.1). Les madriers ont une longueur de 3,6 mètres d'encoche à encoche. Des éléments de plus petite taille (Figure 65, poutres de type 1 et 1.2) sont déposés par alternance et forment par empilement des croix à chaque extrémité des madriers. Ces croix permettent d'éviter que les longs éléments ne basculent latéralement.



Figure 64 : les éléments de type 1 et 1.2 stabilisent latéralement les longues poutres.

Ensuite, les drones déposent deux longues poutres qui s'appuient aux extrémités des murs (Figure 65, poutre de type 2). Ces éléments ne s'appuient qu'à leurs extrémités. Ils fonctionnent donc comme des poutres isostatiques.

Enfin, sept poutres secondaires, espacées de 80 cm, sont déposées sur les poutres primaires. Ces sept poutres serviront de support à la toiture. Cinq des sept poutres sont isostatiques, tandis que les deux poutres d'extrémités sont empilées et servent de tête de mur. Pour que les poutres primaires soient à fleur des poutres secondaires, la hauteur de l'encoche des poutres (Figure 65 : poutre de type 2 et de type 4) fait la moitié de la hauteur de l'élément et non pas le quart.

Le code couleur de la Figure 65 permet d'identifier la position de chaque type d'élément.

III.1.5.3. Eléments constitutifs de la structure

Les éléments ont été dimensionnés selon l'eurocode 5. Les hypothèses de dimensionnement sont les suivantes :

- Classe de service 3 : $k_{mod} = 0,7$
- Classe de bois C24 : $f_{m,k} = 24\text{Mpa}$; $f_{c,90,k} = 2,5\text{ Mpa}$; $E_{moyen} = 11\text{ Gpa}$
- Charges :
 - Neige : $0,5\text{ kN/m}^2$
 - Vente : 1 kN/m^2
 - Charges exploitation (entretien toiture) : $0,5\text{ kN/m}^2$

Les six types d'éléments différents nécessaires pour la réalisation de la structure sont repris de manière synthétique dans le Tableau 11.

Tableau 11 : caractéristiques des différents éléments utilisés pour la réalisation de la structure

	Type de section	Longueur [m]	Poids [kg]
Type 1	8 x 23	0,5	3,8
Type 1.2	8 x 23	0,5	3,8
Type 2	8 x 23	4,1	31,1
Type 3	8 x 23	4,1	31,1
Type 3.2	8 x 23	5,3	40,3
Type 4	10 x 30	5,3	71,6

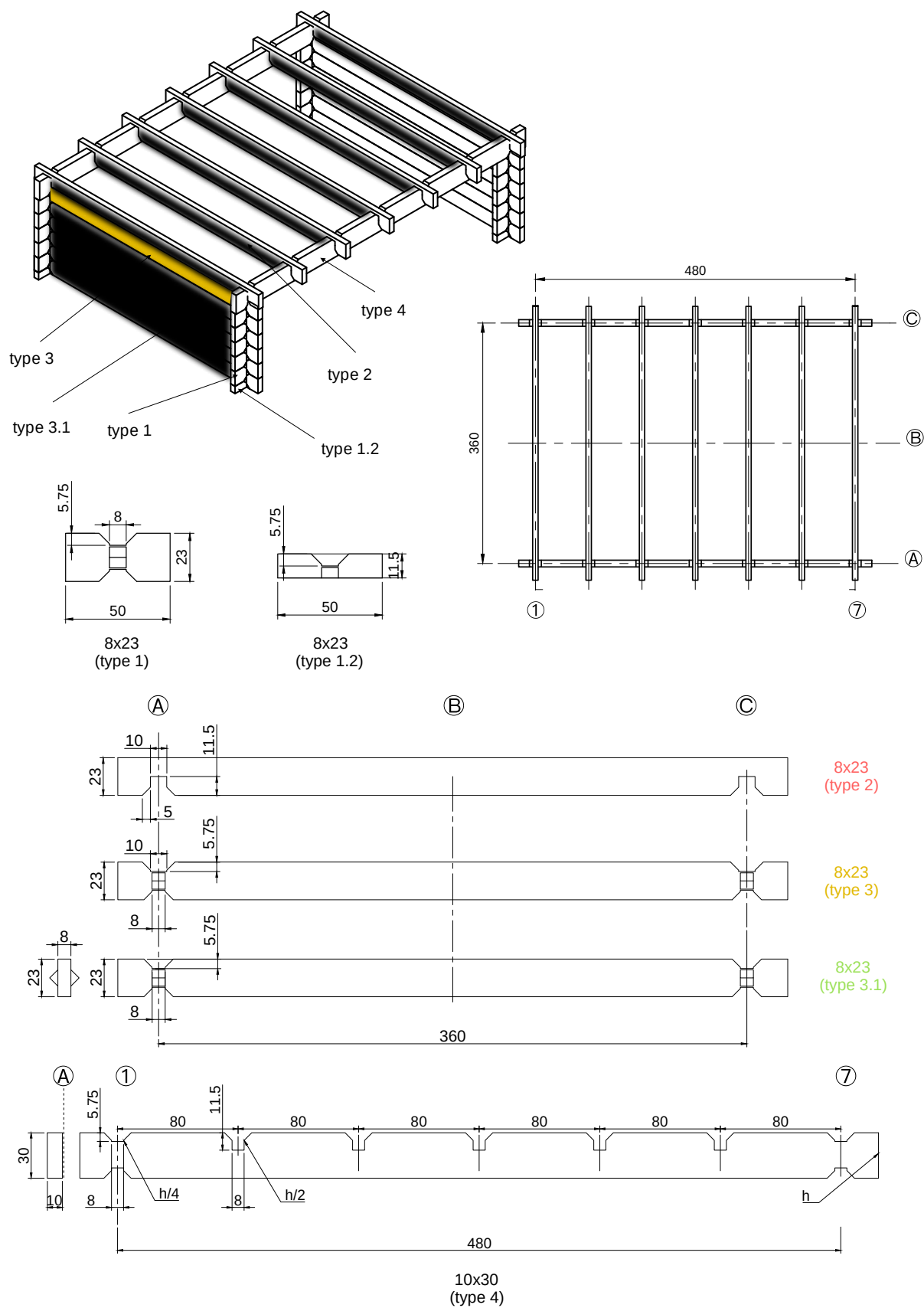


Figure 65 : plans de la structure et des différents éléments constitutifs [cm]

III.2. QUEUE D'ARONDE POUR BOIS EMPILE

L'objet de cette section est la présentation d'un assemblage en queue d'aronde, drone-compatible, pour l'empilement de madriers. La section est composée de quatre parties.

La première partie caractérise l'assemblage et son fonctionnement. La deuxième partie permet de valider le fonctionnement de l'assemblage à l'aide de modèles réduits. La troisième partie concerne la résistance mécanique de l'assemblage en compression. Et enfin, la quatrième partie illustre le potentiel de cet assemblage à l'aide d'une structure empilée simple réalisée uniquement avec des éléments drone-compatibles.



Figure 66 : structure réalisée à l'aide de madriers empilés (dimensions en cm). Le bout des madriers est pourvu de queues d'aronde qui assurant la stabilité de l'empilement. ²¹

III.2.1. Caractéristiques et fonctionnement

L'assemblage en queue d'aronde illustré Figure 66, nous a grandement inspiré. Cet assemblage est facilement adaptable à la construction par drone car il comporte déjà des pentes. En effet, les surfaces de contact entre les queues d'aronde sont doublement inclinées. L'angle de la pente doit être le même dans les deux directions pour que les éléments puissent s'emboîter. Les dimensions (largeur, hauteur, pentes) de la queue d'aronde doivent cependant être adaptées de sorte que l'assemblage reprenne l'imprécision de positionnement du drone de 5 cm.

Les dimensions de l'assemblage drone-compatible sont présentées Figure 67. La section de poutre minimale est de 10 x 30 cm. La largeur minimale, 10 cm, est due au fait qu'il faut pouvoir reprendre 5 cm d'imprécision dans toutes les directions. Quant à la hauteur de 30 cm, elle est fixée de manière à ce que les pentes de la queue d'aronde soient supérieures à l'angle limite de $33,3^{\circ 22}$. Pour une hauteur de 30 cm, l'angle vaut 35° . Le rapport hauteur / largeur de la poutre doit être supérieur à $\frac{30}{10} = 3$ afin de garantir cet angle minimum.

²¹ Source de l'image : <http://www.copaindescopeaux.fr>

²² cf. Chapitre 2, pente minimale pour que les éléments en bois glissent correctement

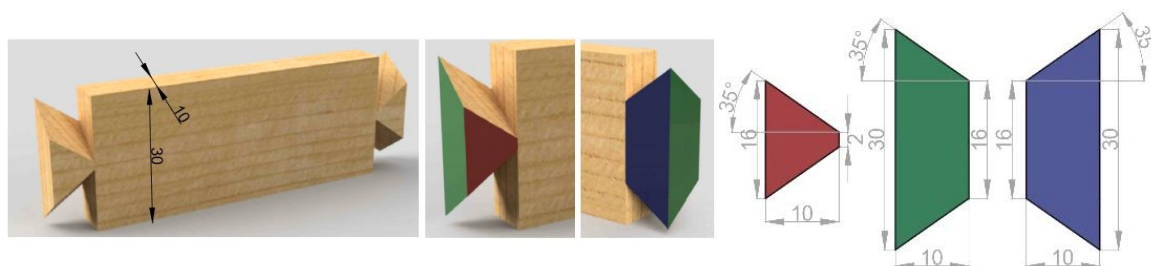


Figure 67 : dimensions de l'assemblage drone-compatible [cm]

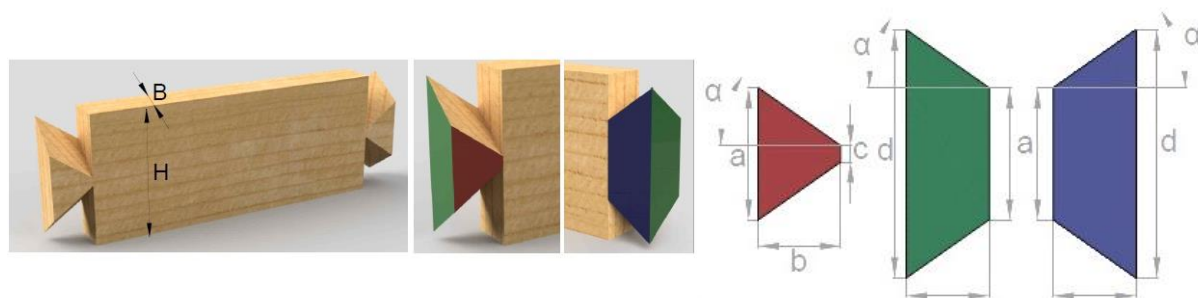
L'imprécision tolérée par l'assemblage dépend des dimensions de la poutre. Comme précisé précédemment, la plus petite section commerciale en bois qui fonctionne est 10x30cm. Les dimensions courantes pour la construction par empilement de madriers sont aujourd'hui de : 6 à 20 cm de largeur et 10 à 40 cm de hauteur. Le Tableau 12 résume, pour trois sections courantes, les dimensions de l'assemblage ainsi que l'imprécision tolérée.

En plus de la contrainte d'imprécision, les éléments sont également contraints par la capacité de levage du drone qui est de l'ordre de 100 kg. Le Tableau 12 tient également compte de cette contrainte de poids. La dernière colonne du tableau présente la longueur maximale de chaque élément pour limiter le poids à 100kg.

Remarques :

- Dans tous les cas la dimension de C est égale à 2 cm ;
- La masse volumique moyenne considérée est de 450 kg/m³.
- La colonne « Imp » donne l'imprécision de positionnement que peut reprendre l'assemblage dans toutes les directions.

Tableau 12 : dimensions types



B (cm)	H (cm)	a (cm)	b (cm)	c (cm)	d (cm)	α (°)	Imp (cm)	Lmax (m)
10	30	16	10	2	30	35,0	5	7,41
10	40	21	10	2	40	43,5	5	5,56
15	45	23,5	15	2	45	35,6	7,5	3,29

Le schéma de fonctionnement de l'assemblage est illustré Figure 68. Afin de garantir la reprise de l'imprécision, l'instruction donnée au drone est de déposer le point B de l'élément supérieur sur le point A de l'élément inférieur. Cette instruction ne concerne qu'une extrémité de la poutre. La seule contrainte de positionnement de l'autre extrémité est qu'elle soit dans l'axe de la position finale.

La Figure 68 illustre également la raison pour laquelle les pentes de l'élément sont limitées à 35° pour une poutre de 30 cm de hauteur. En effet, la hauteur de la partie C (sur l'image de droite) diminue pour

un angle de pente qui augmente. Dans le cas d'un angle de 35° , cette hauteur vaut 2 cm. Dans les assemblages traditionnels, les plus petites dimensions d'assemblage (entres autres pour les tenons) sont de l'ordre de 2 cm. Il est donc préférable de ne pas diminuer cette épaisseur.

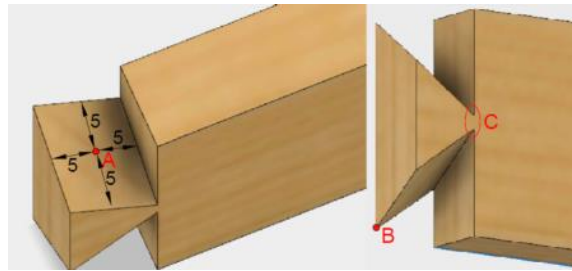


Figure 68 : schéma de fonctionnement de l'assemblage, à gauche l'élément porteur, à droite l'élément porté

Enfin, comme pour toute structure par empilement, il faut prévoir des éléments de demi hauteur afin de commencer ou terminer l'empilement. Pour mémoire, cela est lié au décalage d'une demi hauteur entre deux éléments empilés perpendiculairement. Ces éléments (Figure 69) sont obtenus, simplement, en coupant en deux dans la hauteur les éléments.

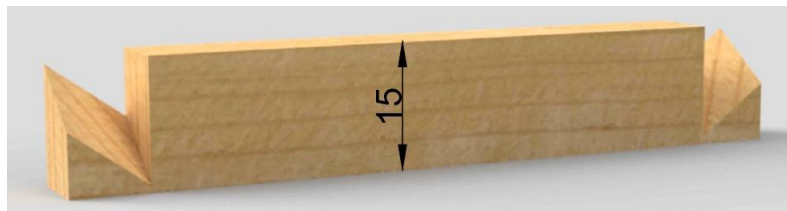


Figure 69 : élément nécessaire pour commencer ou terminer l'empilement. Cet élément est obtenu en coupant en deux, dans le sens de la longueur, les éléments.

III.2.2. Validation du fonctionnement

Le fonctionnement de l'assemblage a été validé à l'aide de modèles réduits imprimés en 3D et ensuite avec des éléments réalisés à échelle réelle en bois.

Tout d'abord, nous avons imprimé en 3D l'assemblage à l'échelle 1/10. Les dimensions de l'assemblage sont celles d'une poutre 10x30 cm. Comme l'illustre la Figure 70, les essais sont concluants. Le glissement des éléments se fait très bien. Peu importe la position initiale de l'élément supérieur (tant qu'on reste dans la tolérance des 5 cm d'imprécision dans toutes les directions), l'assemblage permet à l'élément de glisser afin de prendre la bonne position finale.

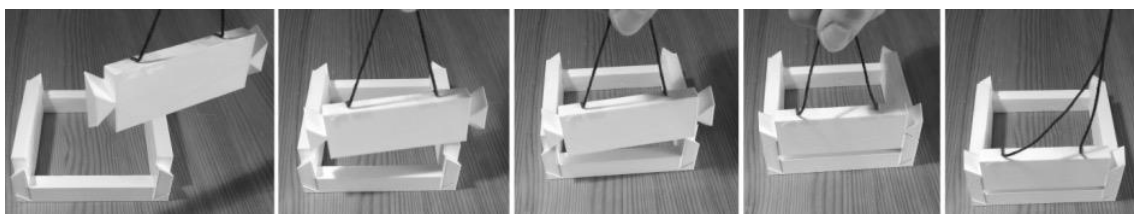


Figure 70 : assemblage d'éléments imprimés en 3D



Figure 71 : assemblage d'éléments en bois

Nous avons ensuite vérifié que le glissement s'effectue aussi bien avec des éléments en bois. En effet, le coefficient de frottement du bois est très différent de celui du plastique des éléments imprimés. Dans un premier temps, nous n'avons pas poncé l'assemblage, nous avons laissé les surfaces brutes. Dans ce cas, les essais n'étaient pas toujours concluants, la poutre supérieure restait parfois coincée et ne descendait pas correctement dans sa position finale. Nous avons alors poncé les surfaces de glissement afin de réduire leur rugosité. La différence lors de la mise en place était non négligeable. L'élément supérieur se mettait alors correctement en place comme illustré à la Figure 71.

III.2.3. Résistance

Dans le cas d'une structure empilée les charges se transmettent par compression perpendiculaire aux fibres d'un élément à l'autre. Il est donc assez facile d'estimer la capacité portante des éléments car il suffit de vérifier la résistance en compression perpendiculairement aux fibres des madriers.

Afin d'estimer la faisabilité de la réalisation des structures par empilement avec cet assemblage, nous avons considéré une habitation rectangulaire de 10 x 14 m comme illustrée à la Figure 72. Les poutres de plancher portent dans la longueur et s'appuient sur les murs de 10m. La hauteur entre étage est fixée à 3,5 m. Nous vérifions la résistance du madrier inférieur d'un mur porteur qui est le plus chargé. Le Tableau 13 résume pour les 10 x 30 cm, 10 x 40 cm et 15 x 45 cm le nombre d'étages réalisable.

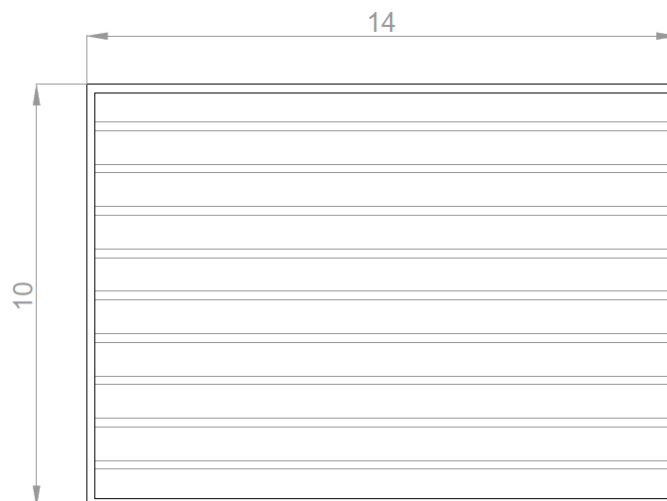


Figure 72 : structure étudiée

Données de calcul

- Classe de service 3 : $k_{\text{mod}} = 0,65$
- Classe de bois C24 : $f_{c,90,k} = 2,5 \text{ MPa}$

Charges :

- Variables :
 - Vent : 1 kN/m^2
 - Neige : $0,5 \text{ kN/m}^2$
 - Exploitation :
 - Toiture : $0,5 \text{ kN/m}^2$
 - Plancher : $2,5 \text{ kN/m}^2$
- Permanentes
 - Poids propre toiture : $1,5 \text{ kN/m}^2$
 - Poids propre plancher (10 cm de chape en béton) : $2,5 \text{ kN/m}^2$
 - Poids propre madriers : $420 \text{ kg/m}^3 = 4,12 \text{ kN/m}^3$

Tableau 13 : résistance des madriers en compression perpendiculairement aux fibres et nombre d'étages acceptable.

B [cm]	H [cm]	L [m]	N_{Rd} [kN]	$N_{Ed, R}$ [kN]	$N_{Ed, R+1}$ [kN]	$N_{Ed, R+2}$ [kN]	$N_{Ed, R+3}$ [kN]
10	30	10	1300	395,8	887,8	1379,7	1871,7
10	40	10	1300	395,2	887,2	1379,2	1871,1
15	45	10	1950	403,4	905,1	1406,9	1908,6

Le Tableau 13 montre que pour des madriers de 10 x 30 cm et 10 x 40 cm la structure est limitée à du R+1, soit 2 étages. Pour des éléments de 15 x 40 cm, 4 étages sont supportés (R+3).

III.2.4. Application à une structure simple

III.2.4.1. Présentation de la structure

Cet assemblage en queue d'aronde à double pente permet donc de créer des structures par empilement. Ce type de structure est communément utilisé pour des habitations. Nous avons imaginé une structure plus simple. Cette construction, illustrée à la Figure 73, pourrait servir de pare-vent dans un parc ou avoir comme unique objectif de cadrer une vue du paysage.

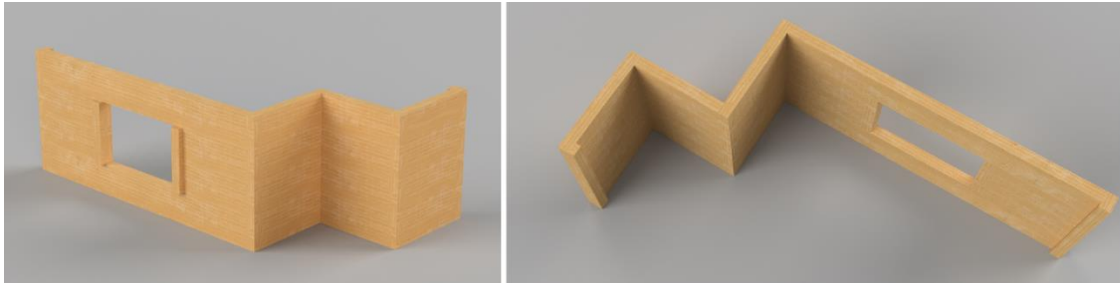


Figure 73 : : structure composée d'éléments drone-compatibles

Les dimensions de cette structure ainsi que les types d'éléments utilisés sont présentés à la Figure 75.

Moyennant quelques adaptations des éléments, les possibilités géométriques sont nombreuses. Par exemple, les éléments B1 et B2 (en vert et en jaune Figure 74) sont antisymétriques et permettent de réaliser une structure en escalier. Il est également possible de créer des ouvertures. Pour créer cette structure 6 types différents d'éléments ont été nécessaires.

Notons enfin qu'il est nécessaire de placer des cales (C1 et C2, en blanc et rouge) à toutes les extrémités de mur.

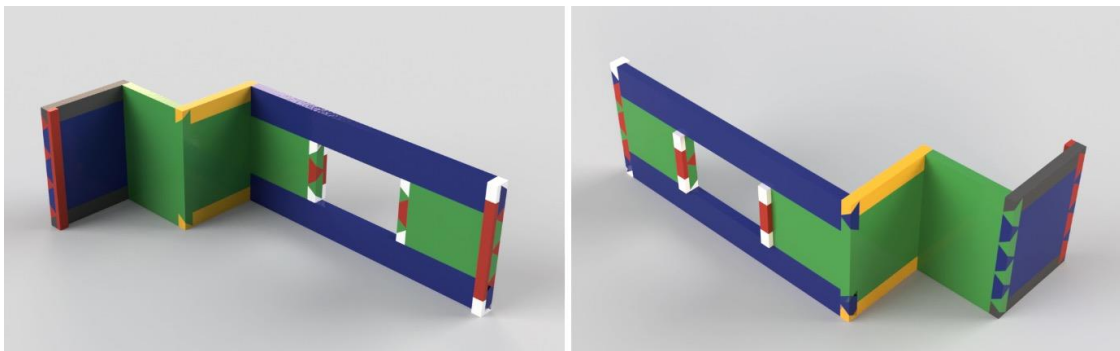


Figure 74 : illustration par couleur des différents types d'éléments

III.2.4.2. Eléments constitutifs de la structure

Tous les éléments sont des poutres de 10 x 30 cm. On répertorie les éléments suivants :

- Type A1 (bleu) : madrier symétrique
- Type A2 (gris) : madrier symétrique de demi hauteur
- Type B1 (vert) : madrier antisymétrique

- Type B2 (jaune) : madrier antisymétrique de demi hauteur
- Type C1 (rouge) : cale pour extrémité
- Type C2 (blanc) : cale de demi hauteur pour extrémité

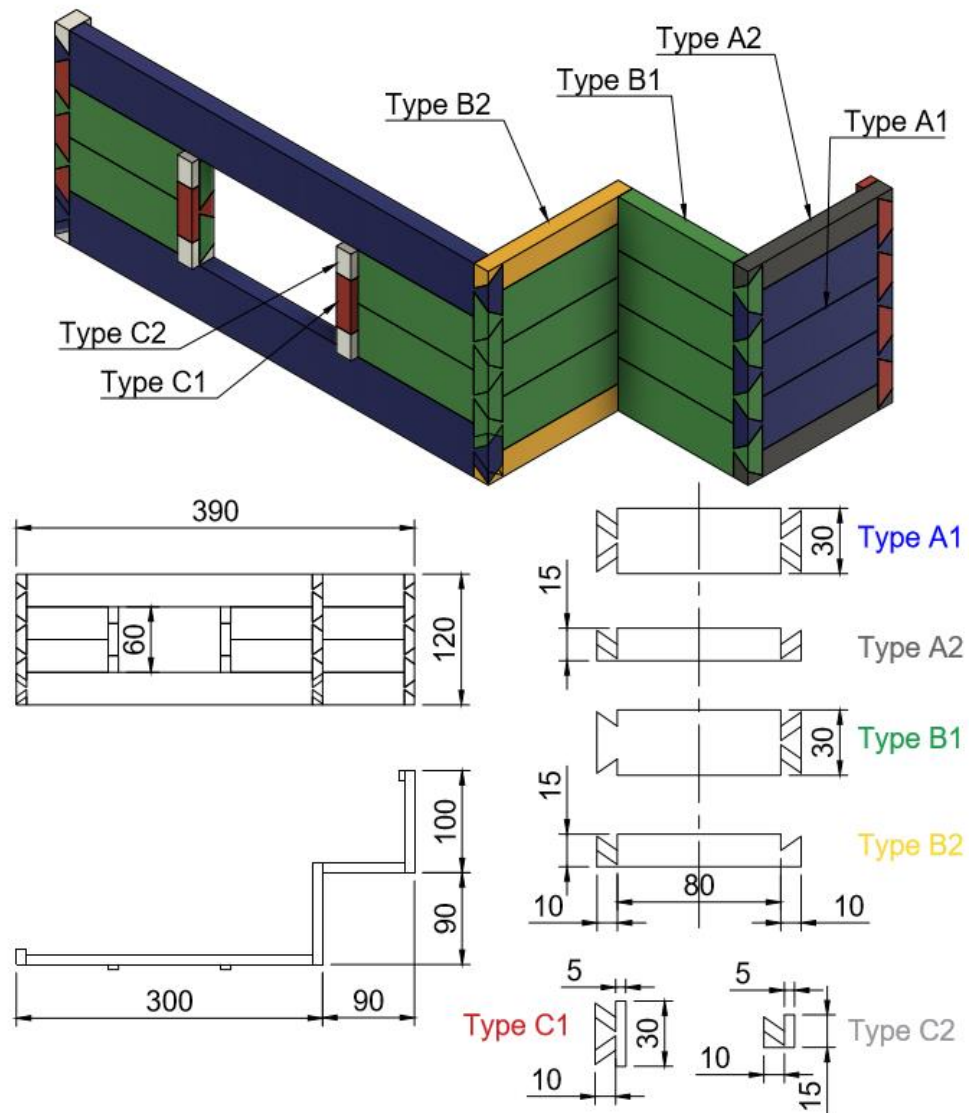


Figure 75 : plans de la structure et des différents éléments constitutifs [cm]

III.3. ASSEMBLAGES COLONNE - COLONNE

L'objectif de cette section est la présentation de deux assemblages de colonnes drone-compatibles permettant de réaliser des structures poteaux-poutres. La section comporte trois parties. La première partie fixe le cadre et les objectifs qui ont guidé le développement de ces deux assemblages. Nous y évoquons aussi deux autres assemblages qui nous ont inspirés, le *nuki* et le tenon-mortaise en croix. De plus, nous y rappelons succinctement l'assemblage à mi-bois drone-compatible auquel nous faisons souvent référence dans le reste de la section. La deuxième partie présente les caractéristiques, le fonctionnement, la méthode de validation et la résistance mécanique des deux assemblages colonnes, qu'on nommera type 1 et type 2. Pour chacun des deux types, un tableau synthétise les dimensions maximales, c'est-à-dire la taille de la trame et le nombre d'étages, de la structure poteaux-poutres réalisable à l'aide de ces éléments. La troisième partie illustre le potentiel de ces assemblages par la construction d'une petite habitation en poteaux-poutres réalisée entièrement à l'aide d'éléments drone-compatibles.

III.3.1. Considérations préliminaires et objectifs

Le *nuki* et le tenon-mortaise en croix nous ont servi de source d'inspiration pour développer les deux assemblages colonne-colonne. (Figure 77)

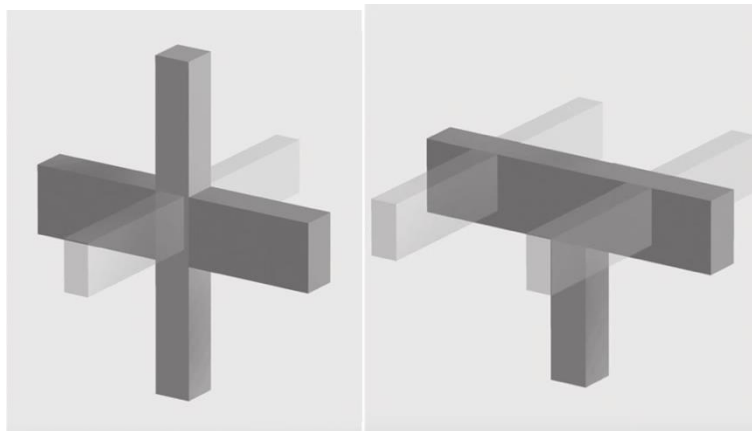


Figure 76 : ossature avec poteau continu [gauche] ; Ossature avec poutre en appui sur le poteau [droite]²³

Le *nuki* qui permet de joindre une colonne et une poutre, a été décrit en détail dans le premier chapitre.

²³ Source image : J. KOLB, *Bois, systèmes constructifs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2006.

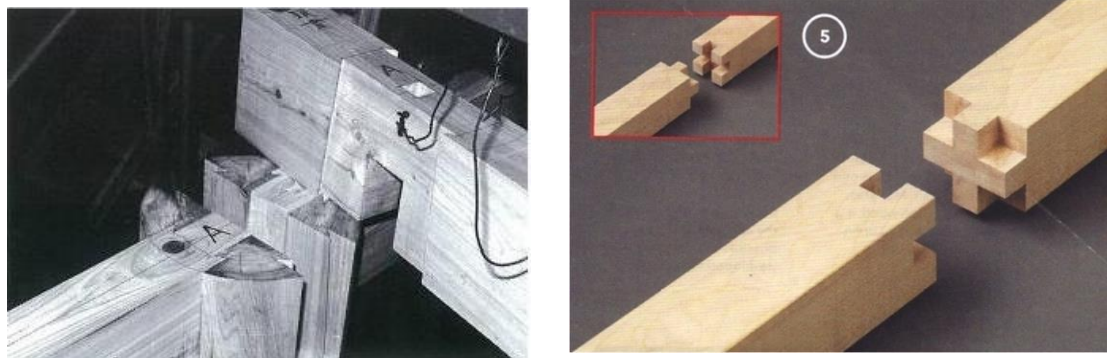


Figure 77 : joint *nuki* [gauche] Assemblage tenon-mortaise cruciforme [droite]²⁴

Rappelons seulement que le joint *nuki* est composé de deux éléments : une poutre étroite appelée *nuki* et une colonne dans laquelle est pratiquée une entaille rectangulaire. Le *nuki* est mis en place dans l'entaille avant d'être fixé à l'aide de cales en bois battues. L'assemblage de la Figure 77, à gauche, est une autre version du joint *nuki*. L'emboîtement se fait verticalement et non pas horizontalement. Sur cette image, le *nuki* est en outre combiné à un assemblage à mi-bois (*watari-ago*) qui permet de croiser deux poutres au sommet d'un poteau.

Le tenon-mortaise en croix (Figure 77, à droite), également décrit dans le premier chapitre est utilisé pour joindre deux poteaux ou montants. Il a une bonne résistance en rotation et une bonne résistance au cisaillement. La résistance à la flexion est cependant plus faible.

Enfin, rappelons brièvement l'assemblage à mi-bois pour la jonction de poutres présenté ci-avant, car nous y faisons souvent référence dans le reste de cette section. Cet assemblage est représenté à la Figure 78. La profondeur de l'encoche réalisée est égale à la demi hauteur de l'élément de sorte que les faces supérieures des deux poutres se situent dans un même plan horizontal, une fois assemblées.

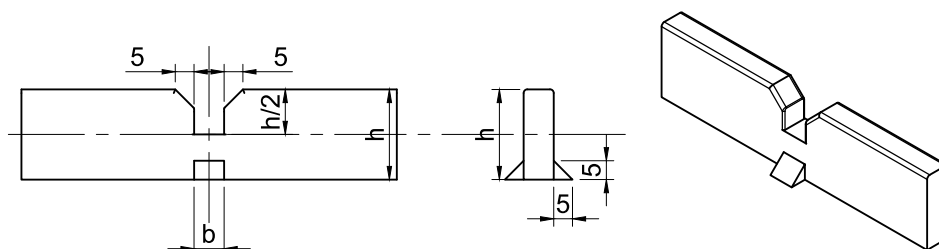


Figure 78 : dimensions de l'assemblage à mi-bois pour la jonction de poutres [cm]

La largeur de chaque partie inclinée (45°) doit être au moins de 5 cm, comme illustré à la Figure 3, ceci afin de respecter les 5 cm d'imprécision dans toutes les directions, inhérents au positionnement du drone.

²⁴ Source de l'image : <http://drh.edm.bosai.go.jp>

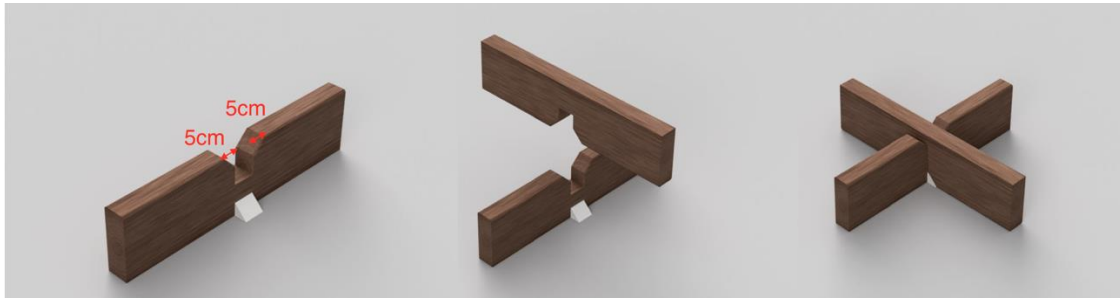


Figure 79 : séquence de montage des assemblages à mi-bois pour la jonction de poutres

Les petites excroissances latérales sur les éléments en blanc (Figure 79) sont des guides qui permettent à l'assemblage de se centrer sur la colonne.

III.3.2. Deux assemblages colonne - colonne

Nous avons développé deux types d'assemblages de colonnes. Tous deux sont cruciformes, les poutres se croisant en leur centre. Dans le type 1, les colonnes s'assemblent grâce aux poutres qui se croisent tandis que dans le type 2, deux éléments colonnes peuvent être joint indépendamment des poutres, il y a une extrémité mâle et une extrémité femelle. Chaque assemblage est décrit en détail ci-dessous.

Le principe de la mise en place de la poutre dans les joints colonnes, que nous proposons, est illustré Figure 80. Dans de nombreux assemblages japonais, comme le *nuki* par exemple, l'assemblage se fait en deux étapes. Après la mise en place, la deuxième étape consiste à fixer le joint à l'aide de cales en bois insérées puis battues. Pour nos assemblages, nous nous sommes imposés comme contrainte que la géométrie de l'assemblage permette un assemblage en une étape. Nous avons chanfreiné les extrémités de la colonne. Les pentes ainsi créés garantissent que la poutre glisse et se mette au bon endroit. La largeur des pentes de 5 cm permet de reprendre l'imprécision de positionnement du drone.

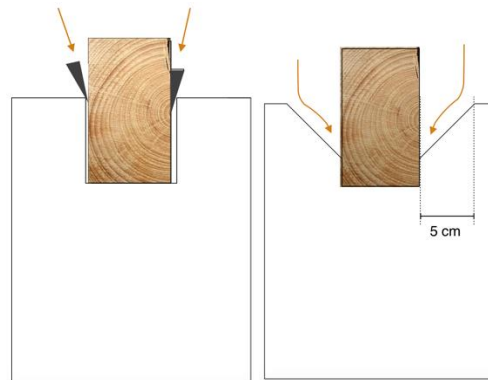


Figure 80 : assemblage traditionnel en deux étapes [gauche] notre proposition permettant un assemblage en une étape [droite]

III.3.2.1. Assemblage de colonnes de type 1

III.3.2.1.1. Caractéristiques et fonctionnement



Figure 81 : séquence de montage ; joint de type 1

Dans l'assemblage de type 1, les deux extrémités de la colonne sont identiques. La jonction se fait par le biais des poutres qui se croisent au centre de la colonne. La séquence de montage est la suivante : la partie inférieure de la colonne saisit la poutre jusqu'à la moitié, tandis que la partie supérieure de la

colonne s'encastre sur l'autre moitié de la poutre. (Figure 81). L'entaille réalisée dans la colonne fait la moitié de la hauteur de la poutre. Cet assemblage présente plusieurs avantages et inconvénients, listés ci-dessous :

Avantages :

- Les deux extrémités de la colonne sont identiques, ce qui est intéressant sur le plan de la fabrication et de la logistique ;
- Les quatre têtes de colonne sont trapues et par conséquent solides ;
- La géométrie simple de l'assemblage garantit un usinage facile et rapide ;

Inconvénients :

- Il est irréaliste de penser que le joint puisse reprendre un moment. En effet, la rigidité en rotation de l'assemblage est due à la compression perpendiculairement aux fibres du bois au sein de l'assemblage poutre-poutre (comme expliqué dans la section sur les assemblages à mi-bois) et au contact colonne-poutre, or le bois est très peu rigide perpendiculairement à ses fibres ;
- La connexion des parties de colonne est assurée par la poutre. Il n'est pas possible d'abouter deux colonnes de manière indépendante.

L'assemblage type 1 est destiné particulièrement à un usage dans des petites structures. Par conséquent nous l'avons optimisé pour cet usage : les quatre têtes de la colonne font chacune 2 x 2 cm. Nous verrons plus loin que, pour ces dimensions, l'effort transmis d'une colonne à une autre permet effectivement la réalisation de structures à un, voire deux étages. Les quatre têtes de la colonne sont chanfreinées à 45° sur une largeur de 5 cm. La largeur minimale de chaque colonne est égale à la largeur de la poutre à laquelle on ajoute la largeur des pentes (2 x 5 cm) plus la largeur des têtes de colonne (2 x 2 cm).

Enfin, lors de l'assemblage des éléments, les excroissances latérales de la poutre garantissent que l'encoche soit bien au centre de la colonne. La Figure 83 illustre comment les excroissances glissent sur les têtes de colonne et permettent de bien centrer l'encoche sur la poutre.

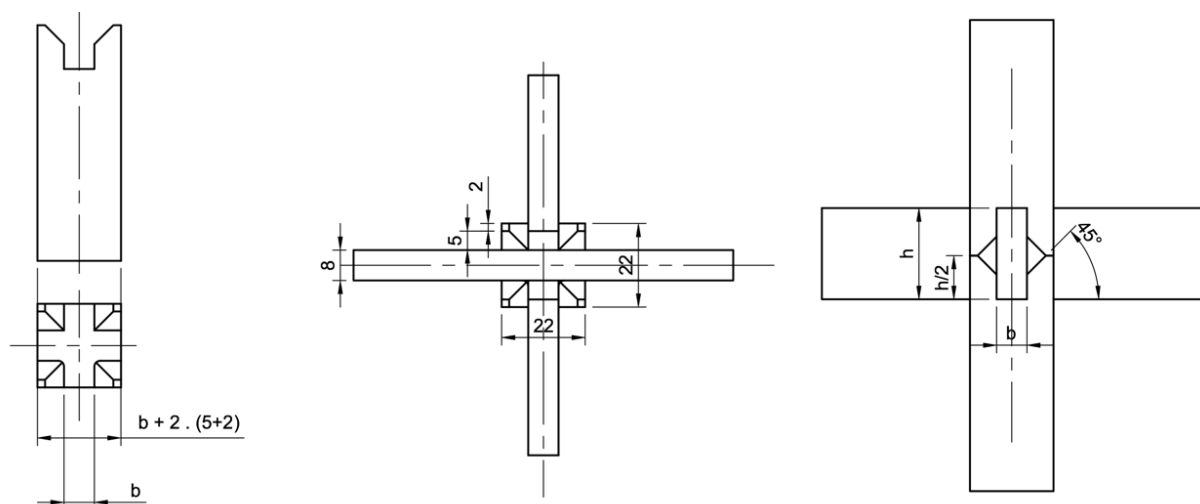


Figure 82 : dimensions des éléments pour un joint de type 1 [cm]

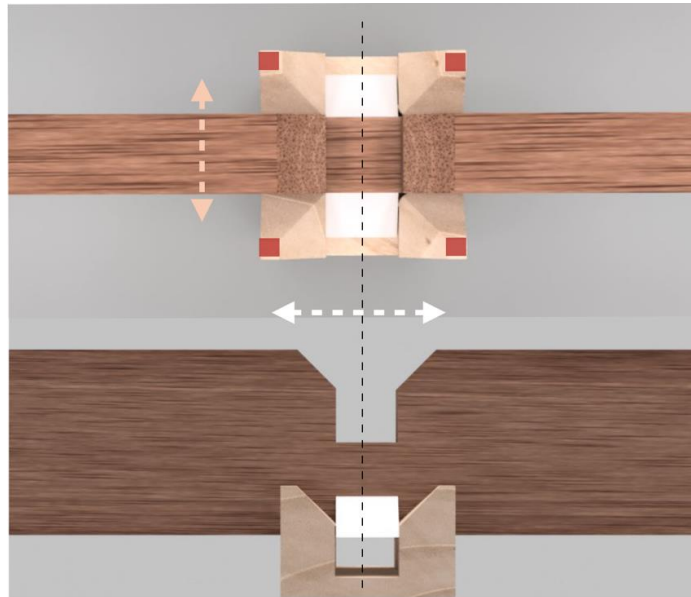


Figure 83 : vue en plan de l'assemblage type 1 lors de la mise en place d'une poutre. Les excroissances (en blanc) assurent que l'encoche soit bien centrée.

III.3.2.1.2. Validation du fonctionnement



Figure 84 : maquette en bois réalisée pour valider le fonctionnement de l'assemblage de colonnes de type 1

Nous avons réalisé des maquettes en bois à échelle réduite. Ces maquettes nous ont permis de valider le fonctionnement de l'assemblage.

III.3.2.1.3. Résistance

Les calculs ont été réalisés sur base des normes prescrites par l'eurocode 5.

Le principe d'assemblage de ce joint est tel que la jonction entre les colonnes ne peut se faire qu'à la hauteur des planchers. En supposant une hauteur de 3,5 m de plancher à plancher, les dimensions maximales admissibles de la colonne sont 25 x 25 cm. En effet, au-delà de ces dimensions, la limite de poids de 100 kg imposée par le drone est dépassée. En pratique, cette limite impose donc d'utiliser des poutres de maximum 10 cm de largeur. Cette dimension correspond à la largeur maximale des poutres

en bois massif, voilà pourquoi nous n'utiliserons pas de poutres en bois lamellé-collé avec cet assemblage.

Par ailleurs, en supposant que ce sont essentiellement les quatre têtes de colonne qui transmettent les efforts verticaux de compression d'une colonne à une autre, et en considérant que les colonnes sont en bois lamellé-collé de classe GL32h, l'assemblage est capable de reprendre 33kN en tête²⁵ (Figure 85).

$$F_{Rd} = 4 * A_{têtes\ de\ colonne} * f_{c,0,d} = 33\ kN$$

$$\text{avec } A_{têtes\ de\ colonnes} = 20 * 20\ mm^2$$

$$\text{et avec } f_{c,0,d} = \frac{0,9 * f_{c,0,k}}{1,25} = 23\ MPa$$

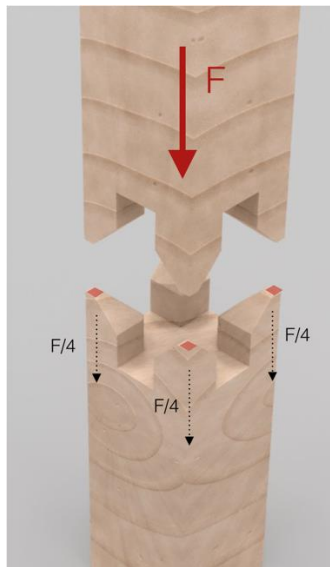


Figure 85 : schéma des surfaces de contact considérées pour la transmission d'un effort normal

²⁵ Nous négligeons la transmission d'efforts entre les colonnes par le biais des poutres. (classe de Service 1) (sécuritaire)

III.3.2.2. Assemblage de colonnes de type 2

III.3.2.2.1. Caractéristiques et fonctionnement de l'assemblage

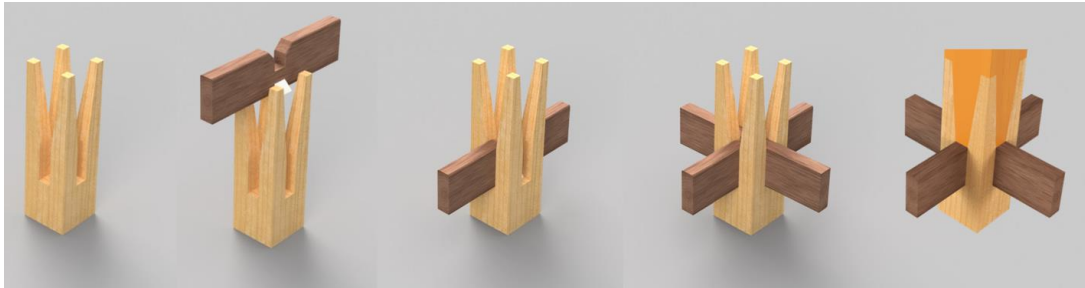


Figure 86 : séquence de montage pour un joint de type 2

L'assemblage de type 2 s'inspire du tenon-mortaise en croix : il possède une partie mâle en croix, le tenon, et une partie femelle, la mortaise. La jonction des colonnes se fait indépendamment des poutres suivant la séquence de montage illustré à la Figure 86. Cet assemblage présente plusieurs avantages et inconvénients repris ci-dessous :

Avantages :

- Il permet l'aboutement de deux colonnes sans avoir besoin de croiser des poutres dans l'assemblage. Dans les structures poteaux-poutres, les charges verticales qui s'appliquent sur la colonne peuvent être importantes. Par conséquent, les colonnes ont potentiellement des sections importantes²⁶ et une masse par mètre élevée. L'utilité de pouvoir abouter deux colonnes se justifie par le fait qu'un drone peut porter 100 kg maximum ;
- L'aplomb est garanti tant par des surfaces horizontales que par des surfaces verticales. Le type 2 est par conséquent plus précis que le type 1 ;
- L'emboîtement entre la partie mâle et la partie femelle de la colonne, à condition qu'il soit suffisamment long, permet de reprendre un moment parasite. Nous avons ainsi potentiellement une marge de sécurité supplémentaire par rapport à l'assemblage de type 1²⁷.

Inconvénients :

- Les têtes de la mortaise sont longues et par conséquent fragiles. Il faudra en tenir compte durant le stockage des éléments ;
- La longueur de l'assemblage entraîne des pertes importantes de bois à l'usinage.

L'assemblage de type 2 est destiné à un usage dans des structures à plusieurs étages. Par conséquent, nous l'avons optimisé pour cet usage : les quatre têtes de la colonne font chacune 5 x 5 cm – contre 2

²⁶ Le bois a un faible module d'élasticité (comparé aux matériaux de construction). Il sera par conséquence souvent dimensionné au flambement ce qui aura tendance à augmenter la section. Cela peut être limitant pour l'assemblage par drone. Par exemple, pour une section de colonne de 30x30, la longueur maximale théorique transportable par un drone est de l'ordre de 2,5m (pour des résineux)

²⁷ Plusieurs recherches ont été faites afin d'estimer la capacité d'un tenon mortaise à reprendre un couple. Des essais ont été menés sur des tenon collés dans la mortaise et indiquent une résistance de l'ordre de 2-3 kN.m

x 2 cm pour le type 1. Ces dimensions ont été choisies de manière à augmenter l'effort transmis d'une colonne à une autre et à donner aux têtes de la mortaise une certaine robustesse. Nous verrons plus loin que ces dimensions permettent de réaliser une habitation ayant jusqu'à trois étages.

Les dimensions de l'assemblage sont représentées Figure 87. Afin de rendre le tenon-mortaise drone-compatible, nous avons fait deux adaptations. D'une part, nous avons chanfreiné les quatre têtes de la mortaise de manière à reprendre les 5 cm d'imprécision dans toutes les directions. D'autre part, nous avons allongé les quatre têtes de la mortaise de manière à garantir une continuité entre les colonnes. Leur hauteur est indiquée par $(a + h)$ sur la Figure 87. La valeur de « a » (50 cm) permet d'avoir une marge de sécurité dans le cas d'un moment de force parasite. Le calcul de cette valeur est détaillé plus loin.

Enfin la largeur minimale de la colonne est égale à la largeur de la poutre « b » à laquelle on ajoute la largeur des pentes (2×5 cm) plus la largeur des têtes de colonne (2×5 cm). Notre choix des dimensions des têtes de la mortaise implique donc que les colonnes de type 2 ont des dimensions minimales supérieures aux colonnes de type 1.

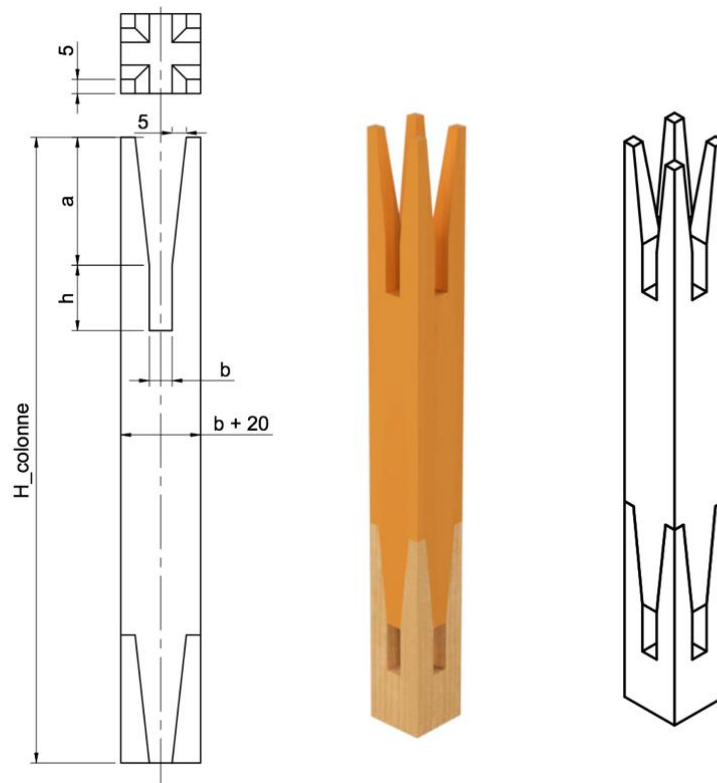


Figure 87 : dimensions des éléments [cm] pour un joint de type 2

III.3.2.2.2. Validation du fonctionnement de l'assemblage

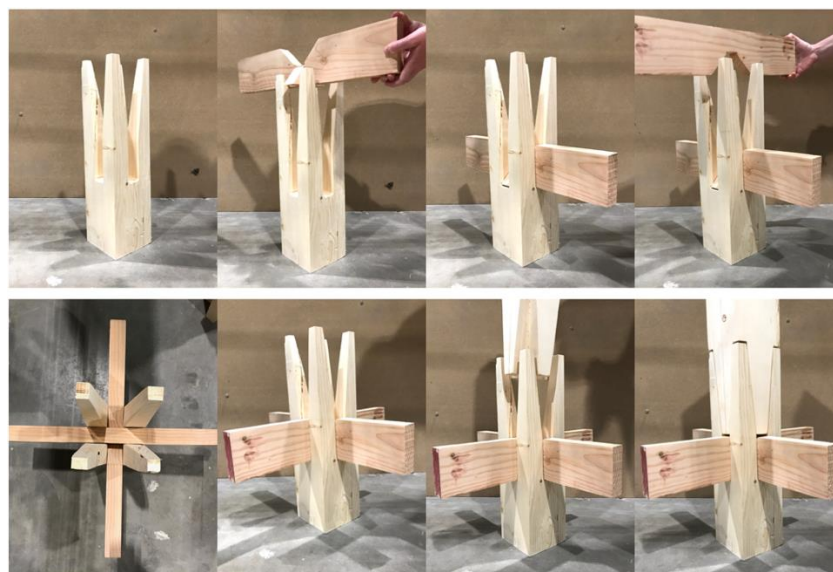


Figure 88 : modèle en bois réalisé pour valider le fonctionnement présumé de l'assemblage.

Nous avons réalisé des maquettes en bois à échelle réduite de la colonne et des poutres afin de valider la séquence de montage. La colonne a été usinée à l'aide d'une fraiseuse numérique dans les laboratoires du *Massachusetts Institute of Technology*. La réalisation du fichier de découpe pour la fraiseuse, qui a pris trois jours, requière une excellente connaissance du travail du bois. Le fonctionnement présumé de l'assemblage a pu être validé comme illustré à la Figure 88.

III.3.2.2.3. Résistance de l'assemblage

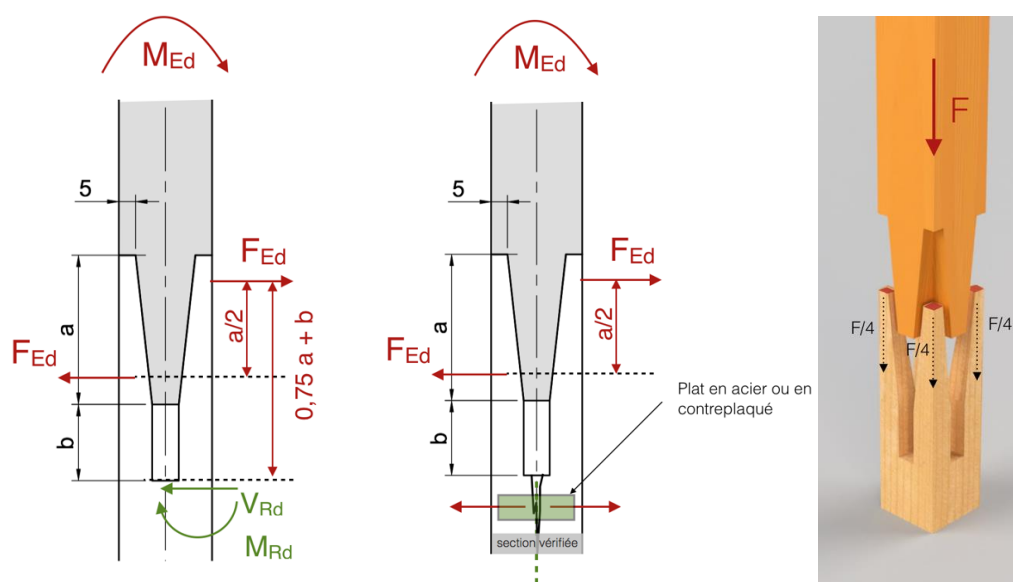


Figure 89 : schéma de calcul de la résistance de l'assemblage en flexion [gauche] ; Plaque en acier ou en contreplaqué permet d'éviter le « fendage » de la colonne [centre] ; schéma des surfaces de contact considérées pour la transmission d'un effort normal [droite]

Les calculs ont été réalisés sur base des normes prescrites par l'eurocode 5. La valeur de « b » (Figure 89) a été considérée comme étant égale à 30 cm.

Résistance en flexion

Il existe une relation quasi-linéaire entre la longueur du tenon et la résistance en flexion de l'assemblage [6].

Nous voulons estimer le moment de force sollicitant ($M_{Ed,max}$) que l'assemblage est capable de reprendre. Pour cela, nous décomposons M_{Ed} en deux forces parallèles (F_{Ed}), de sens opposé, espacées d'un bras de levier $a/2$. (Figure 89 à gauche).

La force F_{Ed} doit respecter les deux critères suivants :

$$V_{Rd} \geq F_{Ed} [kN] \quad (1)$$

$$M_{Rd} \geq F_{Ed} * (0,75a + b)[kN.m] = M_{Ed} \quad (2)$$

avec M_{Rd} et V_{Rd} respectivement, la résistance en cisaillement et en flexion en base des têtes.

Chacune des quatre têtes de la mortaise a une section de 10 x 10 cm à sa base. Si nous considérons une colonne en bois lamellé-collé GL32h, nous obtenons pour M_{Rd} et V_{Rd} :

$$M_{Rd} = W_{ef} * f_{m,d} = 3,8 kN.m < M_{Ed,base des têtes}$$

$$V_{Rd} = \frac{2}{3} * f_{v,d} * A_{ef} = 8,04 kN < F_{Ed}$$

Nous pouvons ainsi trouver F_{Ed} et donc $M_{Ed,max}$.

Pour une hauteur a de 30, 40 ou 50 cm, F_{Ed} vaut respectivement 7, 6 et 5,5 kN.

Il existe une contrainte de traction perpendiculaire aux fibres en base des têtes qui permet d'équilibrer l'effort F_{Ed} . Afin d'éviter une fissure de fendage, nous proposons de fixer des plats en acier ou en contreplaqué cloué (schéma de centre Figure 89).²⁸

Pour « a » qui vaut 50 cm, le M_{Ed} maximal que peut reprendre l'assemblage vaut 2,8kN.m. Au-delà de 50 cm, les têtes de la mortaise risquent d'être trop fragiles.

Résistance en compression

²⁸ Ces plats métalliques seront très utiles en pratique. En raison de défauts de fabrication, le contact entre les têtes de la mortaise et l'épaulement du tenon ne peut être parfait. Le contact se fera après écartement des têtes (comme une hache fend une bûche en bois) ce qui aurait tendance à fendre la colonne s'il n'y avait pas de plat de renforcement.

Dans un cas idéal, on peut supposer que l'effort normal F sera transmis entièrement par compression, via les quatre têtes de la mortaise (Figure 14 à droite). Dans ce cas, et en considérant que les colonnes sont en bois lamellé-collé de classe GL32h, l'assemblage est capable de reprendre :

$$F_{assemblage} = 4 * A_{tête} * f_{c,0,d} = 205kN$$

$$\text{avec } A_{tête} = 50mm * 50mm$$

L'assemblage de type 2 permet d'abouter deux colonnes indépendamment des poutres. Contrairement au type 1, il n'est pas nécessaire de limiter le poids d'une colonne de type 2 à 100 kg. En effet, on peut la diviser en plusieurs éléments transportables qui seront ensuite aboutés. Comme il n'y a pas de limite de poids, les dimensions de la colonne, et par conséquent la largeur des poutres, ne sont plus limitées.

En pratique, dans le cas d'un assemblage de type 2, le plus optimal est donc de combiner cet assemblage à des poutres en bois lamellé-collé.

III.3.2.3. Etude de faisabilité.

Afin d'évaluer la faisabilité de construire des structures réelles avec des colonnes de type 1 et de type 2, nous avons imaginé une habitation en poteaux-poutres. Nous avons donné aux dimensions de la trame de la structure, les paramètres « a » et « b », respectivement la longueur de la portée principale et secondaire (Figure 90).

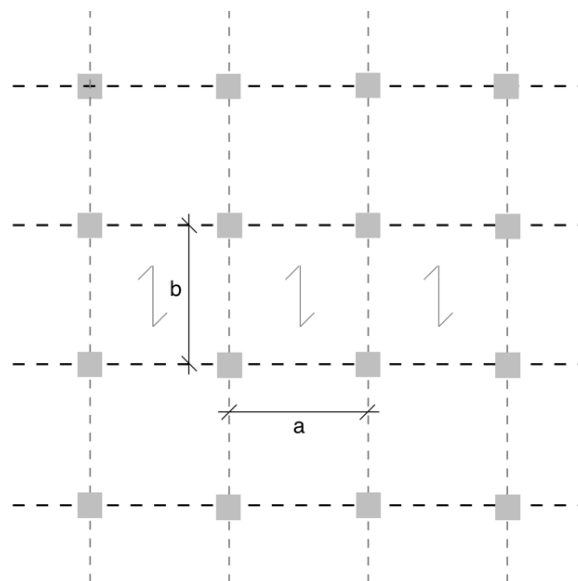


Figure 90 : schéma de la trame ; Sens de portée secondaire (b) et primaire (a)

Nous avons calculé les dimensions maximales - les valeurs de « a » et « b » et le nombre d'étages - de la structure poteaux-poutres réalisable à l'aide de ces deux types de colonnes. Le Tableau 14 résume les résultats obtenus pour des poutres de différentes sections. Il peut être utilisé par les concepteurs comme un petit catalogue de prédimensionnement.

Les calculs ont été effectués pour six sections de poutre différentes, trois par type d'assemblage. Pour le :

- Type 1 des sections en bois massif de 7 x 15 cm, 8 x 23 cm et 10 x 30 cm ;
- Type 2 des sections en bois lamellé-collé de 10 x 32 cm, 14 x 36 cm et 18 x 40 cm.

Hypothèses de calculs :

La structure considérée est une structure en poteaux-poutres de type habitation : charges réparties de 2kN/m^2 .

La hauteur maximale des colonnes, h_{max} , donnée dans le Tableau 14 est fixée de manière à limiter le poids des éléments à 100 kg maximum.

Pour les calculs de charge critique de flambement, F_{crit} , les colonnes ont été considérées comme doublement rotulées.

Les valeurs de charges maximales acceptables sur la poutre à l'état limite ultime et à l'état limite de service sont basées sur les hypothèses suivantes :

- q_{ELU}
 - Charges réparties sur tout le long de la poutre, pas de charge ponctuelle
 - Travées symétriques
 - Poutre protégée des intempéries et déversement empêché
- q_{ELS}
 - Travées symétriques
 - Poutre protégée des intempéries et déversement empêché
 - $E_{\text{moyen}} = 11\,000\text{MPa}$
 - Limite de la flèche à $L/350$,
 - Coefficient de fluage : 1,4
 - Charges réparties sur tout le long de la poutre, pas de charge ponctuelle
 -

Conclusion

- 1) L'assemblage de type 1, destiné à des petites structures, permet de réaliser une trame de 3 x 3 m ou 3 x 5 m et un nombre d'étage limité à R+2 ou R+1.
- 2) L'assemblage de type 2, destiné à des grandes structures, permet de réaliser une trame de 5 x 5 m et un nombre d'étage limité à R+3
- 3) Nous constatons que le flambement ne sera jamais critique parce que la forme de l'assemblage entraîne un surdimensionnement des colonnes.

Tableau 14 : dimensions des colonnes en fonction de la largeur des poutres ; [au-dessus] dimensions maximales de la trame et nombre maximal d'étages réalisables en fonction du type de joint et de la section de poutre choisis

	Largeur poutre [cm]	Largeur colonne	Section colonne [cm]	h_{max} [m]	h_{choisi} [m]	F_{crit} [kN]	$F_{max_colonne}$ (a) [kN]
Type 1	7	si 2 sens de portée:	21 x 21	3,5	3,5	450	33
		si 1 seul sens de portée:	21 x 19	5,6	3,5	400	
	8	"	22 x 22	3,5	3,5	520	
		"	22 x 19	5,3	3,5	400	
	10	"	24 x 24	3,9	3,5	500	
Type 2		"	24 x 19	4,8	3,5	500	205
	10	"	30 x 30	2,5	2,5	900	
		"	30 x 25	3	3	>1000	
	14	"	34 x 34	2	2	>1000	
		"	34 x 25	2,6	2,6	>1000	
	18	"	38 x 38	1,9	1,9	>1000	
		"	38 x 25	2,3	2,3	>1000	

	$F_{max_colonne}$ (a) [kN]	Section poutre [cm]	Classe	a [m] (b)	$q_{max,ELU}$ [kN/m] (c)	$q_{max,ELS}$ [kN/m] (c*)	b [m] (d)	F_{appui} [kN] (e)	#étages (f)
Type 1	33	7 x 15	C 24	3	3,25	1,12	0,6	1,7	9,8
		8 x 23		3	8,03	5,18	2,6	7,8	2,1
		10 X 30		3	16,3	9,87	4,9	14,8	1,1
Type 2	205	10 x 32	GL24h	4	14,5	6,48	3,2	13,0	7,9
		14 x 36*		5	16,3	6,77	3,4	16,9	6,1
		18 x 40*		5	25,6	11,7	5	29,3	3,5

a) Charge maximale que l'assemblage peut reprendre par compression des 4 têtes de

b) Portée de la poutre (cfr. Figure) choisie de manière à avoir une trame $\pm$ carrée.

c) et c*) Indique respectivement la charge répartie maximale acceptable sur la poutre à l'ELU et en service.

d) Largeur minimale de la travée de manière à ne pas dépasser les valeurs données en (c) dans le cas d'une charge de type "habitation" (2kN/m^2).

e) Charge maximale appliquée par une poutre sur la colonne dans le cas des dimensions fixées par (b) et (c).

f) Nombre d'étages qui peuvent être construits de manière à respecter la charge donnée en (a). La valeur indique le nombre d'étages hors rez-de-chaussée.

* Section dont le poids dépasse les 100kg et qui doit donc être portée par deux drones.

III.3.3. Application à une structure simple

Cette section a pour objectif d'illustrer, à travers un exemple de structure simple, le potentiel de l'assemblage colonne (type 2) que nous proposons.

Pour cette section, nous avons imaginé une structure poteaux-poutres, de deux étages, composée d'une seule travée. Chaque étage est soutenu par quatre colonnes. Les colonnes servent d'appui à deux poutres primaires qui soutiennent sept poutres secondaires. Cette structure assez rudimentaire (Figure 62) pourrait être utilisée pour réaliser de petites habitations.

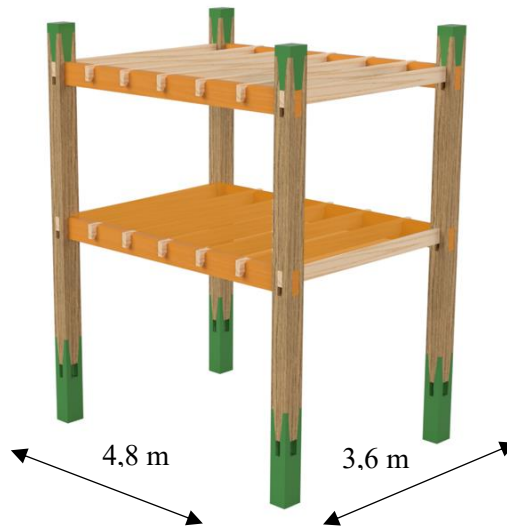


Figure 91 : structure composée d'éléments drone-compatibles

Les deux poutres principales ont une portée de 4,8 m, tandis que les poutres secondaires ont une longueur de 3,6 m. Le Tableau 15 résume les caractéristiques de chaque type d'élément.

Les deux poutres primaires pèsent plus de 100 kg. Elles devront donc être portées par deux drones. De plus, il est fort probable que la précision du drone dépende du poids qu'il transporte. En utilisant deux drones nous augmentons ainsi la précision.

Tableau 15 : caractéristiques des différents types d'élément.

	Type de section	Longueur [m]	Poids [kg]
Type 1	28 x 34	2,5	96
Type 1.2	28 x 34	1,0	38
Type 2	14 x 36	4,8	109*
Type 3	8 x 23	3,6	30

* Nécessite un transport par deux drones

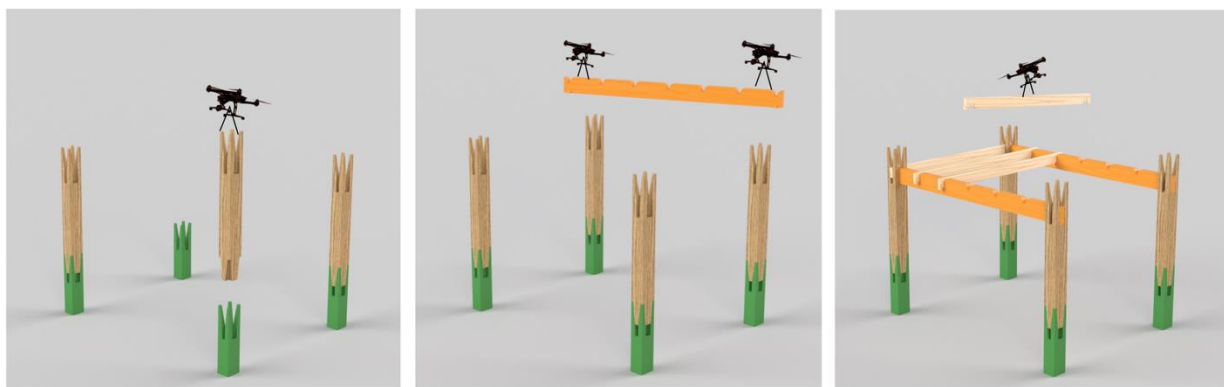


Figure 92 : séquence de montage de la structure par drone

La séquence de montage de la structure par des drones est représentée à la

Figure 92. Cette séquence est la même pour chaque étage.

Tout d'abord, les drones construisent les quatre colonnes. Pour le premier étage, les colonnes sont constituées de deux éléments aboutés déposés successivement.

Ensuite, les drones déposent deux longues poutres dont les encoches viennent se centrer sur les colonnes (Figure 18, éléments de type 2). Rappelons que ce sont les petites excroissances ajoutées latéralement sur la poutre qui permettent aux encoches de bien se centrer.

Enfin, sept poutres secondaires, espacées de 80 cm, sont déposées sur les poutres primaires. Ces sept poutres serviront de support au plancher (Figure 93, poutre de type 3). Pour que les poutres primaires soient à fleur des poutres secondaires, la hauteur de l'encoche des poutres fait la moitié de la hauteur de l'élément.

Le code couleur de la Figure 93 permet d'identifier la position de chaque type d'élément. Les différents éléments ont été dimensionnés à l'aide du Tableau 14.

III.4. QUEUE D'ARONDE POUR JONCTION DE POUTRES

L'objet de cette section est la présentation d'un assemblage en queue d'aronde, drone-compatible, pour l'aboutement ou la jonction de deux poutres. La section comporte trois parties.

La première partie présente les caractéristiques et le fonctionnement de l'assemblage drone-compatible. En particulier, il est question des contraintes géométriques de l'assemblage. La deuxième partie est consacrée aux calculs de résistance de l'assemblage selon différents critères. Sur ce point, en fin de cette section, un tableau synthétise la capacité portante de l'assemblage. La troisième et dernière partie illustre le potentiel de l'assemblage à l'aide de deux structures simples réalisées entièrement à l'aide d'éléments drone-compatibles. Nous verrons, par exemple, que l'assemblage a un réel potentiel pour l'aboutement des éléments d'une structure hyperstatique.

III.4.1. Caractéristiques et fonctionnement

L'assemblage en queue d'aronde traditionnel, utilisé pour l'aboutement ou la jonction de deux poutres, nous a fortement inspiré. Celui-ci est composé d'un tenon en forme de trapèze qui vient s'insérer dans une partie femelle de même forme.

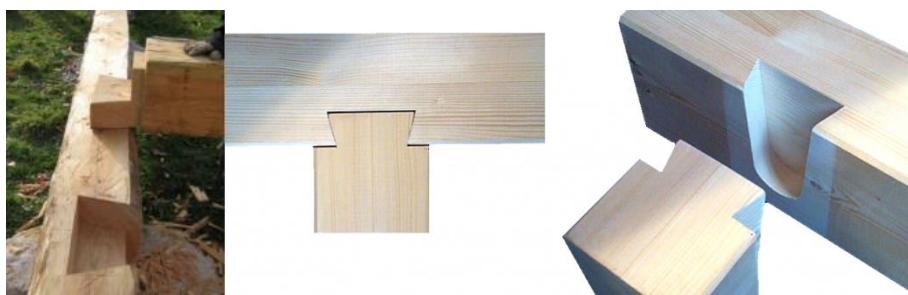


Figure 94 : photos de poutres assemblées à l'aide d'une queue d'aronde

Afin de rendre cet assemblage compatible à la construction par drones nous avons rendu la queue d'aronde (partie mâle et femelle) progressive (Figure 95). En effet, l'utilisation de formes coniques est un moyen simple pour reprendre une imprécision de mise en place.

Comme illustré Figure 95 à droite, afin de reprendre les 5 cm d'imprécision de positionnement du drone, il faut avoir 5 cm de marge dans toutes les directions entre la partie inférieure (en orange) et la partie supérieure de la queue d'aronde (en bleu). Le principe de positionnement des éléments lors de la mise en place est de centrer la partie inférieure de la queue d'aronde mâle sur la partie supérieure de la queue d'aronde femelle. Cette disposition correspond à l'instruction à donner au drone.

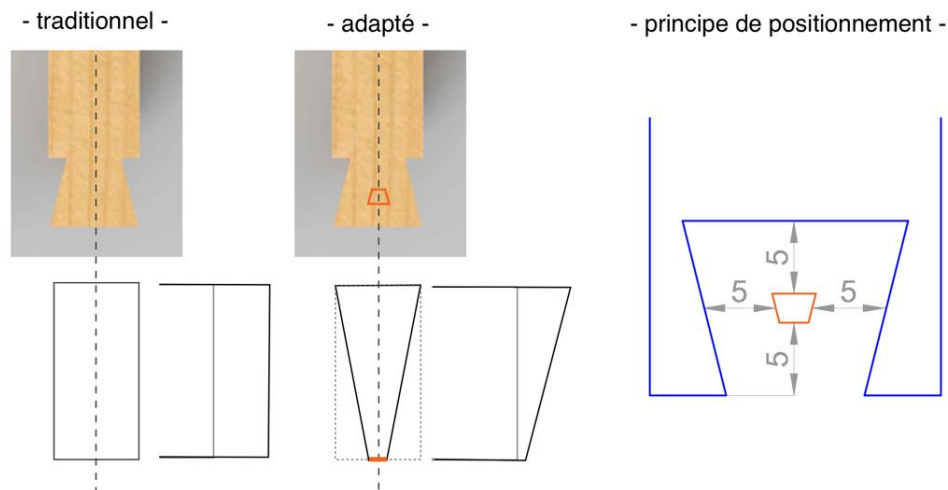


Figure 95 : assemblage en queue d'aronde traditionnel et adapté [gauche] ; principe de positionnement de la partie mâle sur la partie femelle (dimensions en cm) [droite]

En plan, nous avons fixé les dimensions de la partie inférieure de la queue d'aronde telles qu'elles soient les plus petites possibles sans être fragiles. La fragilité est difficile à évaluer, c'est pourquoi nous nous sommes basés sur les assemblages traditionnels : l'épaisseur des pièces en bois est rarement inférieure à 2 cm.

Les dimensions de la partie supérieure de la queue d'aronde sont obtenues géométriquement à partir de la partie inférieure, en tenant compte des contraintes de positionnement du drone et en prenant un rapport de 5/3 entre la grande et la petite base du trapèze. Ce rapport est celui qu'on retrouve généralement dans ce type d'assemblage. La Figure 96 (gauche) présente les dimensions (en plan) de l'assemblage. Il y a peu de contraintes sur la hauteur de l'assemblage. Il suffit que la pente de la queue d'aronde soit supérieure à 45°. C'est à dire que la hauteur de la poutre soit supérieure à 10cm, ce qui sera, à priori toujours le cas.

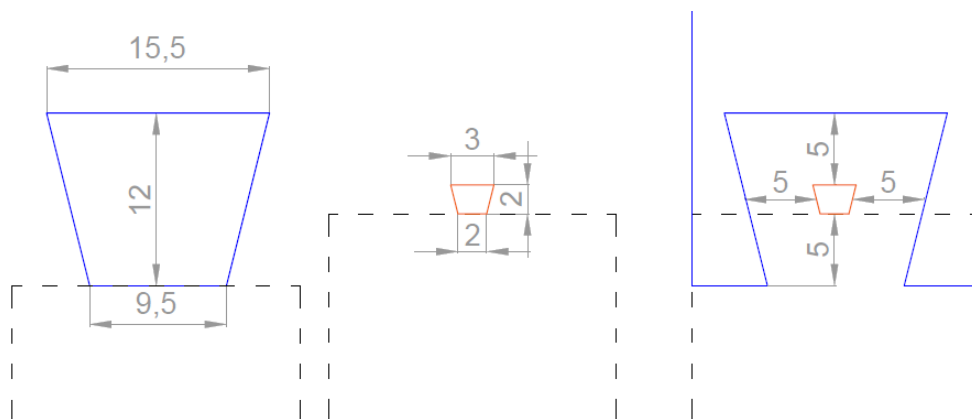


Figure 96 : dimensions (en cm) de la queue d'aronde drone-compatible [gauche] – problème d'emboîtement [droite]

A partir des dimensions et du schéma de positionnement présentés à la Figure 96, nous remarquons deux choses :

- 1) La largeur minimale de la queue d'aronde est de 15,5 cm. Pour l'aboutement de deux poutres, la largeur minimale de chaque élément sera de 19,5 cm afin de garantir un « enrobage » de 2 cm de part et d'autre de l'assemblage. Pour la jonction en « T » de deux poutres, la largeur minimale est égale à la largeur de la queue d'aronde, soit 15,5cm. Dans les deux cas les

poutres seront en BLC car ces dimensions sont trop grandes pour être en bois massif. (Figure 97)

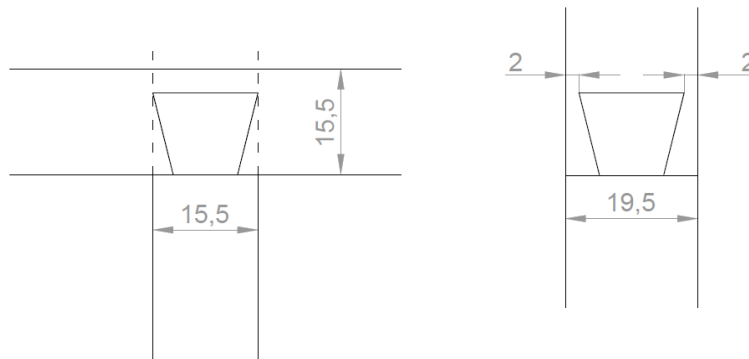


Figure 97 : dimensions minimales des poutres (à gauche : jonction en « T » ; à droite : aboutement)

- 2) Sur la Figure 96 à droite, on observe que l'extrémité de la poutre mâle (en pointillé) va empêcher la mise en place de l'élément. Nous proposons de créer des entailles afin de permettre à la queue d'aronde supérieure de descendre dans la partie femelle suivant le principe de positionnement prévu. Deux solutions sont envisageables :

- a. Entailler la poutre de la partie femelle

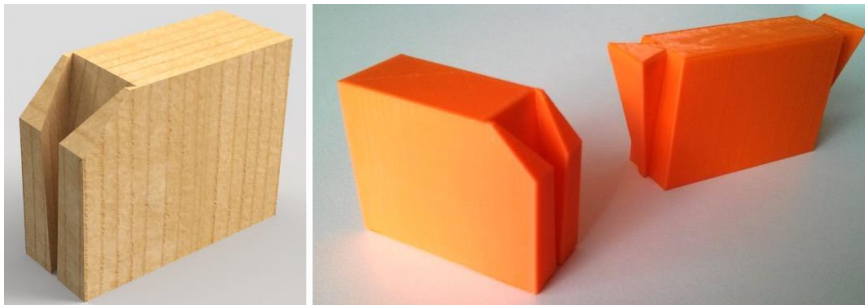


Figure 98 : entaille dans la partie femelle

- b. Entailler la poutre de la partie mâle

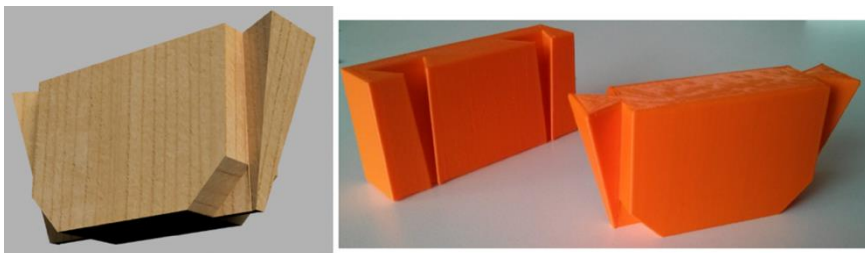


Figure 99 : entaille dans la partie mâle

Les deux solutions ont été imprimées afin de tester leur fonctionnement et de déterminer la solution optimale. La seconde solution fonctionne parfaitement bien. Par contre, la première solution ne fonctionne pas si l'élément supérieur arrive légèrement incliné. Ceci est illustré à la Figure 100.

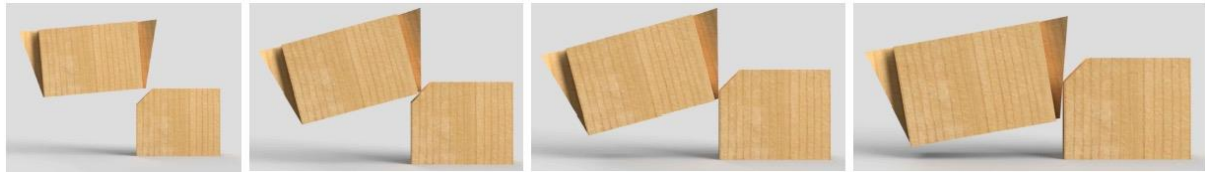


Figure 100 : échec de l'emboîtement

Nous retenons donc la seconde solution qui consiste à entailler en biais les coins de la partie mâle.

La Figure 101 est un modèle 3D de l'assemblage pour une poutre de 16 x 30 cm. La Figure 102 en présente les dimensions.

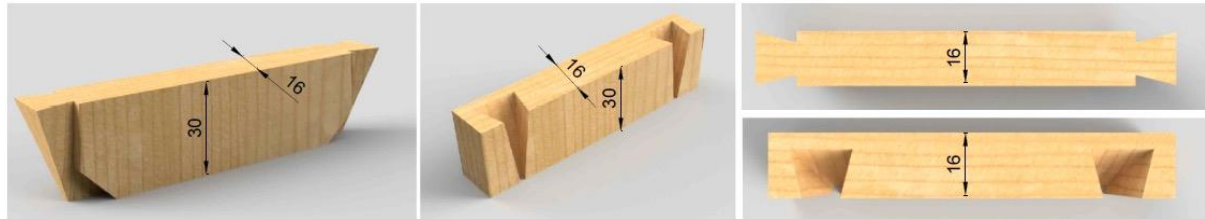


Figure 101 : version finale de l'assemblage

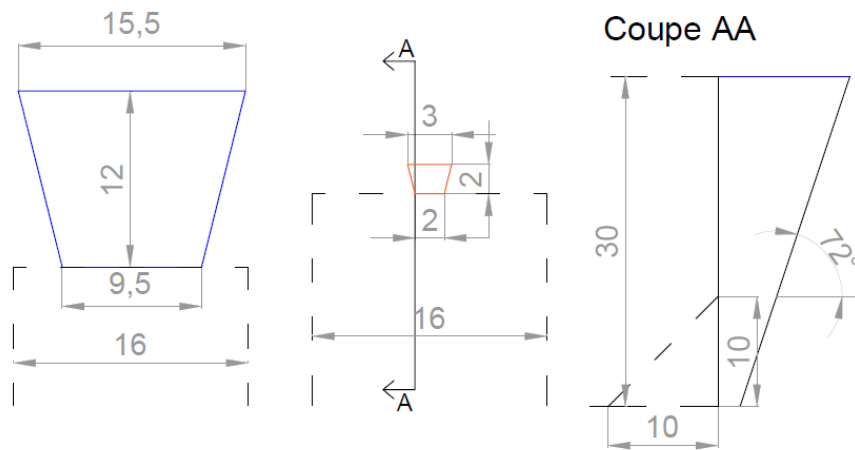


Figure 102 : dimensions (en cm) de l'assemblage sur une poutre 16x30 cm

III.4.2. Résistance

Etant donné les applications structurales²⁹ de cet assemblage il est surtout nécessaire de faire les deux vérifications suivantes :

- La compression au niveau de l'appui d'une poutre sur une autre dans l'assemblage ;
- L'effort tranchant à la jonction assemblage / poutre.

En outre nous avons fait les vérifications suivantes afin de caractériser de manière complète la résistance de l'assemblage :

- La résistance en traction dans l'axe de l'assemblage ;
- La résistance en compression dans l'axe de l'assemblage ;
- La résistance en flexion.

Nous allons déterminer pour ces 5 critères, les efforts résistants que l'assemblage peut supporter. Un récapitulatif de la résistance de l'assemblage est présenté à la fin de cette section (Tableau 17 p.94).

Hypothèses de calculs :

- Bois lamellé-collé de classe GL24h ;
- Classe de service 2 : $k_{mod} = 0,8$;
- Coefficient partiel de sécurité $\gamma_M = 1,25$ (BLC)

III.4.2.1. Compression aux appuis

La première résistance à calculer est la résistance à la compression perpendiculaire aux fibres au niveau des appuis. La Figure 103 à gauche, illustre comment la réaction d'appui va se répartir le long de la surface de contact. Afin d'être du côté de la sécurité, nous considérons comme seule surface de contact la surface illustrée en bleu sur la Figure 103 à droite. En effet, en cas d'imperfection de fabrication, il est possible que le contact ne s'effectue pas de manière parfaite sur toutes les faces de l'assemblage.

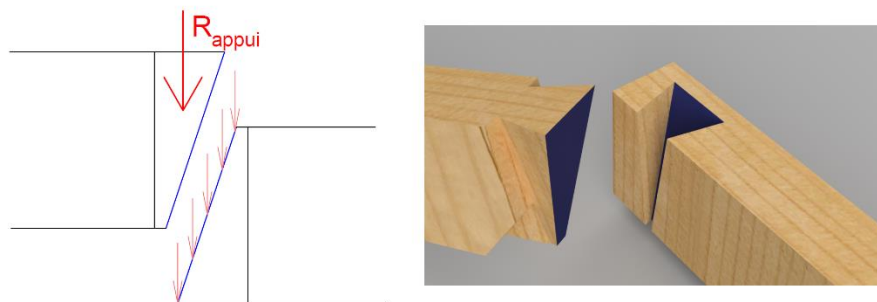


Figure 103 : vérification de la compression aux appuis

²⁹ Dans la section suivante, deux structures illustreront les deux types d'utilisation principale de cet assemblage.

L'effort maximal de compression admissible, c'est-à-dire la réaction d'appui maximale supportée, se calcule avec la formule suivante :

$$N_{Rd,comp\ appui} = f_{c,90,d} * A$$

Avec :

- $f_{c,90,d}$ la résistance du bois C24 en compression perpendiculaire aux fibres
- A la projection horizontale de la surface d'appui

III.4.2.2. Effort tranchant

La section critique du point de vue de l'effort tranchant sera à la jonction entre la poutre et la queue d'aronde comme illustré à la Figure 104.

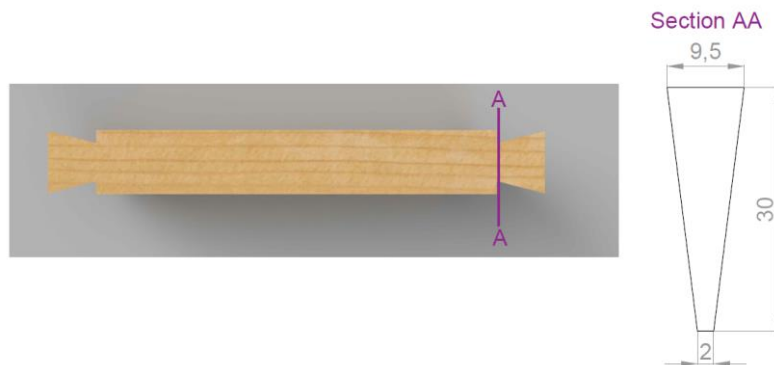


Figure 104 : effort tranchant résistant (dimensions en cm)

L'effort tranchant résistant se calcule avec la formule suivante :

$$V_{Rd} = \frac{f_{v,d} * 2 * A * k_{cr}}{3}$$

Avec :

- $f_{v,d}$ la résistance à l'effort tranchant du bois C24
- A la section critique pour l'effort tranchant (comme illustré à la Figure 104)
- k_{cr} un coefficient tenant compte de l'existence d'éventuelles fissures aux appuis

III.4.2.3. Traction dans l'axe de l'assemblage

La forme de l'assemblage en queue d'aronde permet de reprendre une traction dans l'axe de l'assemblage comme illustré à la Figure 105. Dans le cas d'une telle sollicitation, il faut vérifier la traction dans le sens des fibres dans la section AA (voir Figure 105) et la compression parallèle aux fibres sur les surfaces de contact de l'assemblage (en vert sur la Figure 105).

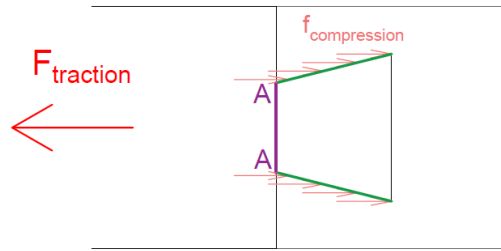


Figure 105 : effort de traction résistant (vue du haut de l'assemblage)

Traction dans la section AA

L'effort de traction résistant se calcule de la manière suivante :

$$N_{Rd,section\ tendue} = f_{t,0,d} * A$$

Avec :

- $f_{t,0,d}$ la résistance en traction parallèle aux fibres
- A la surface de la section critique

Compression sur les surfaces de contact

L'effort de compression résistant se calcule avec la formule suivante :

$$N_{Rd,section\ comprimée} = f_{c,0,d} * A$$

Avec :

- $f_{c,0,d}$ la résistance en compression parallèle aux fibres
- A la projection (perpendiculaire à la force) des surfaces comprimées

A partir de ces deux critères, nous pouvons déterminer la force de traction maximale applicable sur l'assemblage :

$$N_{RD,traction} = \text{Minimum} (N_{Rd,section\ tendue} ; N_{Rd,section\ comprimée})$$

III.4.2.4. Compression dans l'axe de l'assemblage

L'assemblage peut également résister à une compression dans l'axe de l'assemblage comme illustré à la Figure 106. Dans ce cas, nous considérons que seule la surface de l'extrémité de la queue d'aronde reprend la compression (voir Figure 106). Nous ne prenons donc pas en compte la surface de contact entre les poutres pour être du côté de la sécurité.

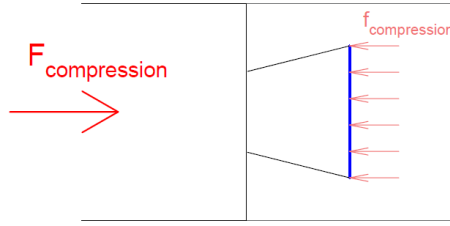


Figure 106 : effort de compression résistant (vue du haut de l'assemblage)

L'effort de compression résistant est déterminé par :

$$N_{Rd,compression} = f_{c,0,d} * A$$

Avec :

- $f_{c,0,d}$ la résistance en compression parallèle aux fibres
- A la projection perpendiculairement à la force de la surface comprimée

III.4.2.5. Résistance en flexion

La géométrie de l'assemblage permet d'envisager théoriquement une résistance en flexion. Cette résistance est théorique car en pratique il y aura d'abord un mouvement relatif entre les deux poutres car le contact entre les surfaces de l'assemblage ne sera jamais parfait. Ce mouvement impliquerait une déformation (flèche) indésirable. Il est toutefois intéressant de déterminer la réserve de moment que possèdent les éléments en cas d'apparition d'un moment parasite ou pour l'étape de mise en place.

L'analyse de la résistance en flexion de cet assemblage consiste à étudier la compression sur la partie supérieure et la traction sur la partie inférieure pour un moment positif et inversement pour un moment négatif. Etant donné que l'assemblage n'est pas identique sur toute la hauteur, mais possède des dimensions progressives, nous devons calculer de manière distincte le moment résistant positif et le moment résistant négatif.

Moment positif

Un moment positif implique une compression en partie supérieure de la poutre et une traction en partie inférieure comme illustré à la Figure 107.

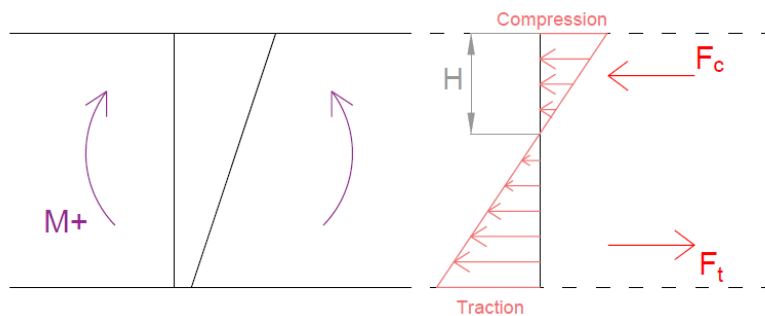


Figure 107 : moment positif résistant

Il faut déterminer la hauteur de l'axe neutre (H) de manière à vérifier l'égalité entre la force de traction et celle de compression. Au sein de l'assemblage, les surfaces à considérer comme étant comprimées et tendues suivent les mêmes critères que pour le calcul de l'effort résistant de traction et de compression.

La force de compression maximale admissible vaut :

$$F_c = f_{c,0,d} * A_{comprimée\ 1}$$

La force de traction maximale admissible vaut (pour rappel la traction dans l'assemblage induit également un effort de compression sur les côtés de la queue d'aronde comme illustré à la Figure 105) :

$$F_t = \text{minimum} (f_{t,0,d} * A_{tendue} ; f_{c,0,d} * A_{comprimée\ 2})$$

Il suffit alors d'itérer sur la hauteur de l'axe neutre et donc sur les surfaces comprimées et tendues jusqu'à vérifier l'égalité $F_t = F_c$.

Dès lors, le moment de flexion positif maximale admissible vaut :

$$M_{Rd}^+ = F * z$$

Avec :

- $F = F_t = F_c$
- z le bras de levier entre les forces

Moment négatif

Le principe de calcul et les formules utilisées sont les mêmes que pour le moment positif, seules les surfaces comprimées et tendues changent. Dans le cas du moment négatif, la partie supérieure de la poutre est tendue et la partie inférieure est comprimée.

III.4.2.6. Récapitulatif des efforts résistants de l'assemblage

Le Tableau 16 récapitule les efforts résistants de l'assemblage pour les dimensions de base de la queue d'aronde et pour une hauteur de poutre de 30 cm. Pour rappel, ces dimensions sont présentées à la Figure 108.

Tableau 16 : efforts résistants de l'assemblage en queue d'aronde

Compression aux appuis	Effort tranchant	Traction	Compression	Moment positif	Moment négatif
$N_{Rd,comp\ appui}$ [kN]	V_{Rd} [kN]	$N_{Rd,traction}$ [kN]	$N_{Rd,compression}$ [kN]	M_{Rd}^+ [kNm]	M_{Rd}^- [kNm]
13,91	16,60	156,25	410,87	14,42	14,66

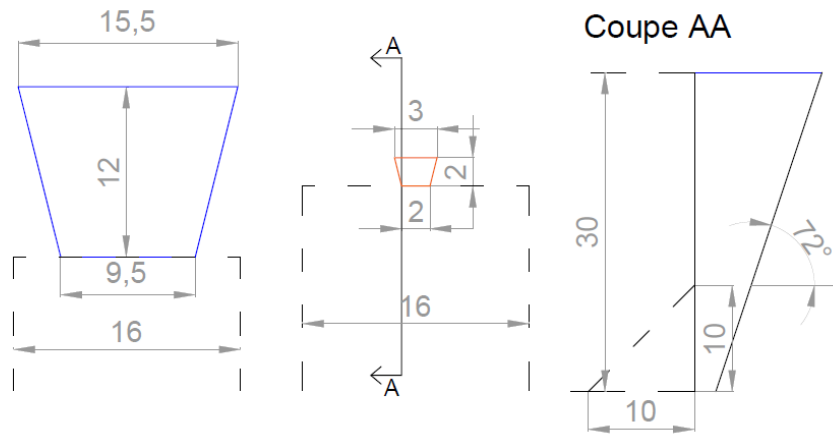


Figure 108 : rappel des dimensions de la queue d'aronde

III.4.3. Application à une structure simple

Nous allons présenter deux types de structure pour lesquelles l'assemblage est intéressant. La première structure illustre la jonction de deux poutres de manière perpendiculaire. La deuxième structure présente l'aboutage de deux éléments.

III.4.3.1. Structure 1

Présentation de la structure

Nous avons choisi d'utiliser le même type de structure simple que celle présentée pour l'assemblage mi-bois, c'est-à-dire une structure poteaux-poutres d'un étage composée d'une seule travée. Comme illustré à la Figure 109, cette structure est composée de 4 colonnes. Les colonnes servent d'appui à deux poutres primaires qui supportent 7 poutres secondaires espacées de 80 cm. Cette structure pourrait servir pour la réalisation d'un *carport*, d'un auvent ou même d'une petite habitation de plain-pied.

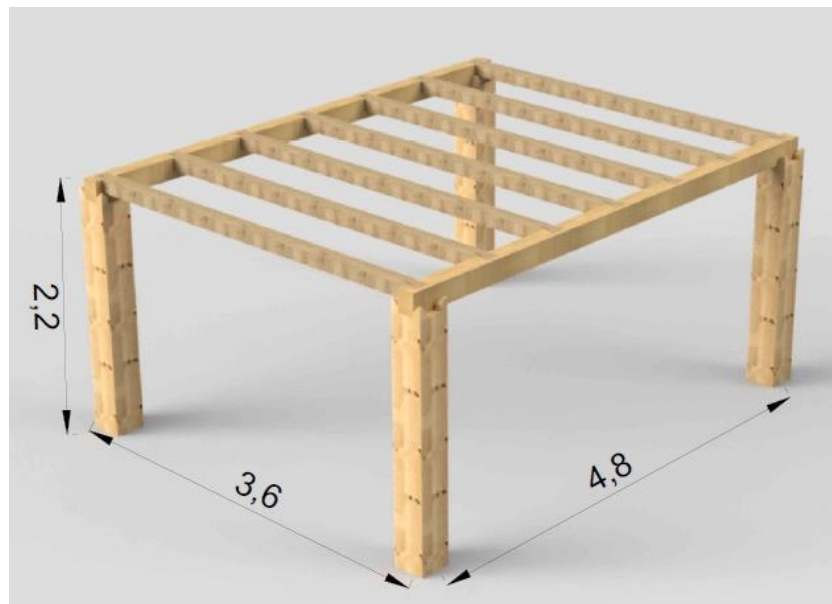


Figure 109 : dimensions générales de la structure (en m)

Les poutres primaires ont une portée de 4,8 m et les poutres secondaires ont une portée de 3,6m. Dû aux dimensions de l'assemblage en queue d'aronde, la largeur minimale des poutres est de 15,5 cm. Les colonnes utilisées sont de type 1 et ont donc comme dimension minimale $[b + 2 * (5 + 2)]$ cm soit 29,5 cm.

Dimensionnement de la structure

Les éléments ont été dimensionnés selon les normes prescrites par l'eurocode EC5. Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- Classe de service 3: $k_{mod} = 0,7$
- Bois lamellé collé :
 - o Poutre primaire : GL28h

- Poutre secondaire : GL24h
- Colonne : GL24h
- Charges
 - Neige : $0,5 \text{ kN/m}^2$
 - Vente : 1 kN/m^2
 - Charges exploitation (toiture) : $0,5 \text{ kN/m}^2$

Les poutres sont dimensionnées en respectant les critères suivants :

- Compression aux appuis (comme calculé dans la section précédente sur la résistance de l'assemblage)
- Effort tranchant (au niveau de la section critique à la jonction avec l'assemblage)
- Flexion
- Flèche à court terme ($< L/400$)
- Flèche à long terme ($< L/250$)

Les colonnes sont dimensionnées en compression en prenant en compte le critère de flambement.

Le Tableau 17 reprend les dimensions obtenues pour les éléments ainsi que le poids de ceux-ci.

Tableau 17 : dimensions des éléments constitutifs

	b [cm]	h [cm]	L [m]	Poids [kg]
Poutre primaire	16	20	4,8	64,5
Poutre secondaire	15,5	12	3,6	28,1
Colonne	30	30	2,2	83,2

La Figure 110 présente les plans détaillés de la structure et des éléments constitutifs.

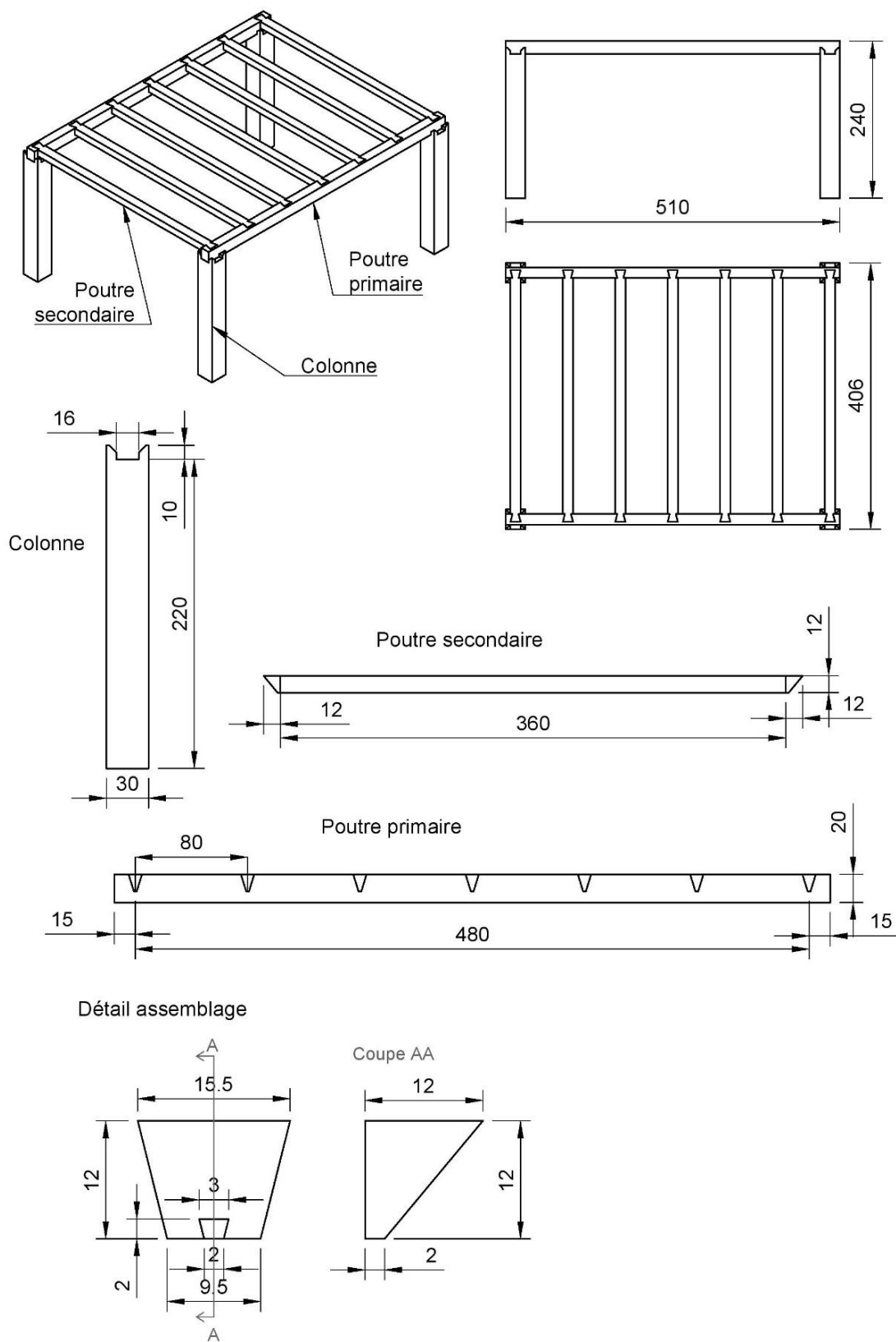


Figure 110 : dimensions de la structure et des éléments constitutifs [cm]

III.4.3.2. Structure 2

Présentation de la structure

L'assemblage en queue d'aronde permet également d'aboutir deux poutres. Cette propriété est intéressante car la capacité de levage du drone est limitée à 100kg. L'assemblage permet de diviser une poutre trop lourde en plusieurs éléments plus légers. Notre assemblage ne peut pas reprendre de moment de flexion, c'est pourquoi l'aboutement entre deux éléments doit se faire au droit des moments de force nuls. Nous appliquons le principe des poutres cantilevers qui consiste à placer une « rotule fictive » où le moment s'annule. Ceci permet de conserver les avantages des structures hyperstatiques sans devoir concevoir des assemblages capables de reprendre un moment de force.

Nous reprenons la structure simple étudiée précédemment mais nous la prolongeons afin de créer 3 travées comme illustré à la Figure 111. Les colonnes utilisées sont également de type 1 et ont donc comme dimension minimale $[b + 2 * (5 + 2)]$ cm (b = largeur de la poutre)

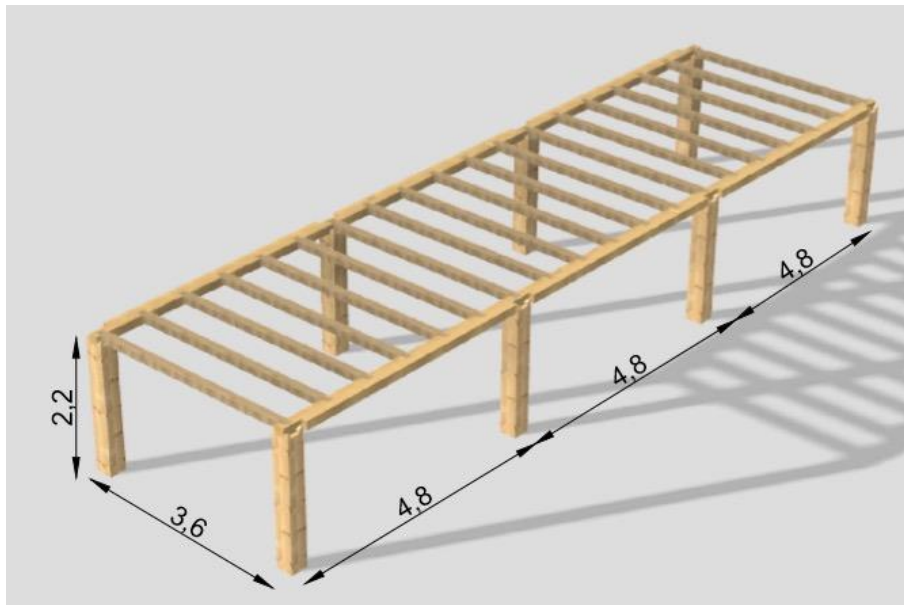


Figure 111 : dimensions générales de la structure hyperstatique (en m)

La position des rotules, les réactions d'appuis et les moments de flexion ont été déterminés à l'aide d'une table de dimensionnement disponible dans le « Traité de Génie Civil, Volume 13 » édité par les « Presses polytechniques et universitaires romande ». Le schéma statique de la structure est illustré Figure 112.

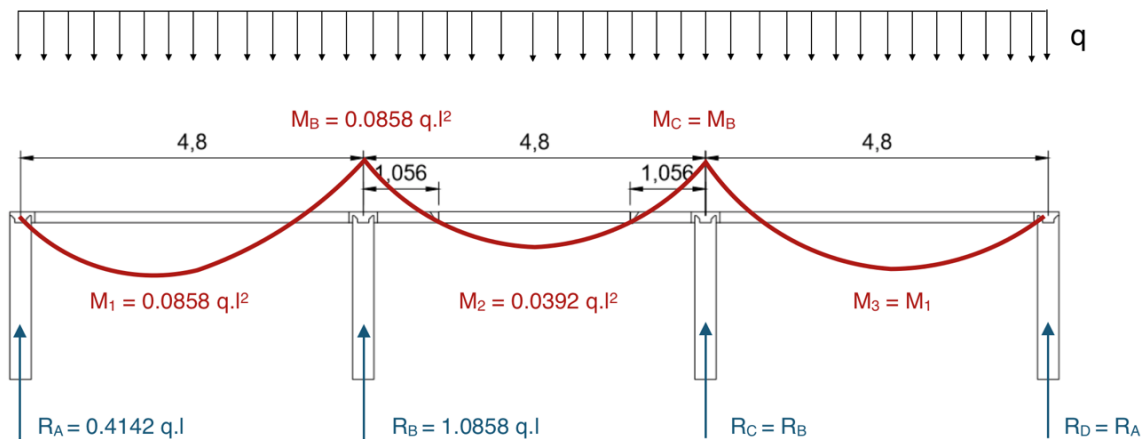


Figure 112 : schéma statique de la structure

Les rotules fictives sont placées à 1,056 m des appuis intermédiaires, à l'endroit où le moment s'annule. (Figure 113).

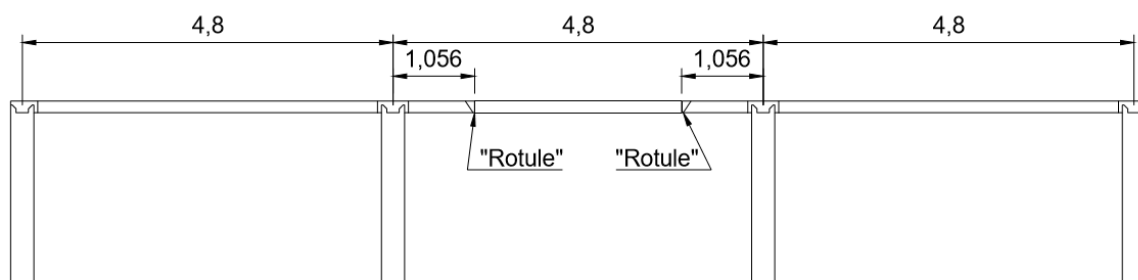


Figure 113 : schéma illustrant la position des rotules (en m)

Dimensionnement de la structure

Les hypothèses de dimensionnement sont identiques :

- Classe de service 3: $k_{mod} = 0,7$
- Bois lamellé collé :
 - Poutre primaire : GL28h
 - Poutre secondaire : GL24h
 - Colonne : GL24h
- Charges
 - Neige : $0,5 \text{ kN/m}^2$
 - Vent : 1 kN/m^2
 - Charges exploitation (toiture) : $0,5 \text{ kN/m}^2$

Le Tableau 18 reprend les dimensions obtenues pour les quatre types d'éléments ainsi que le poids de ceux-ci.

Tableau 18 : dimensions des éléments constitutifs

	b [cm]	h [cm]	L [m]	Poids [kg]
Poutre primaire 1	25,5	15	5,856	94,1
Poutre primaire 2	25,5	15	2,688	43,2
Poutre secondaire	15,5	12	3,6	28,1
Colonne	30	30	2,2	83,2

Les contraintes géométriques de l'assemblage en queue d'aronde pour l'aboutement d'éléments imposent que la largeur minimale des poutres primaires soit de 25,5 cm. Cette largeur a un impact non négligeable sur les colonnes dont les dimensions minimales seraient de $b + 2 \cdot (5+2)$ soit 39,5 cm (b = largeur de poutre). Les colonnes seraient alors largement surdimensionnées ce qui n'est pas économique. Afin de solutionner ce problème, nous avons réduit la largeur des poutres primaires au niveau de la jonction avec les colonnes tout en veillant à ce que la résistance à l'effort tranchant et à la compression sur appui reste suffisante. Dès lors, au niveau des colonnes, nous avons réduit la largeur des poutres primaires à 16 cm au lieu des 25,5.

La Figure 114 présente les plans détaillés de la structure. Les dimensions de l'assemblage en queue d'aronde sont toujours les mêmes.

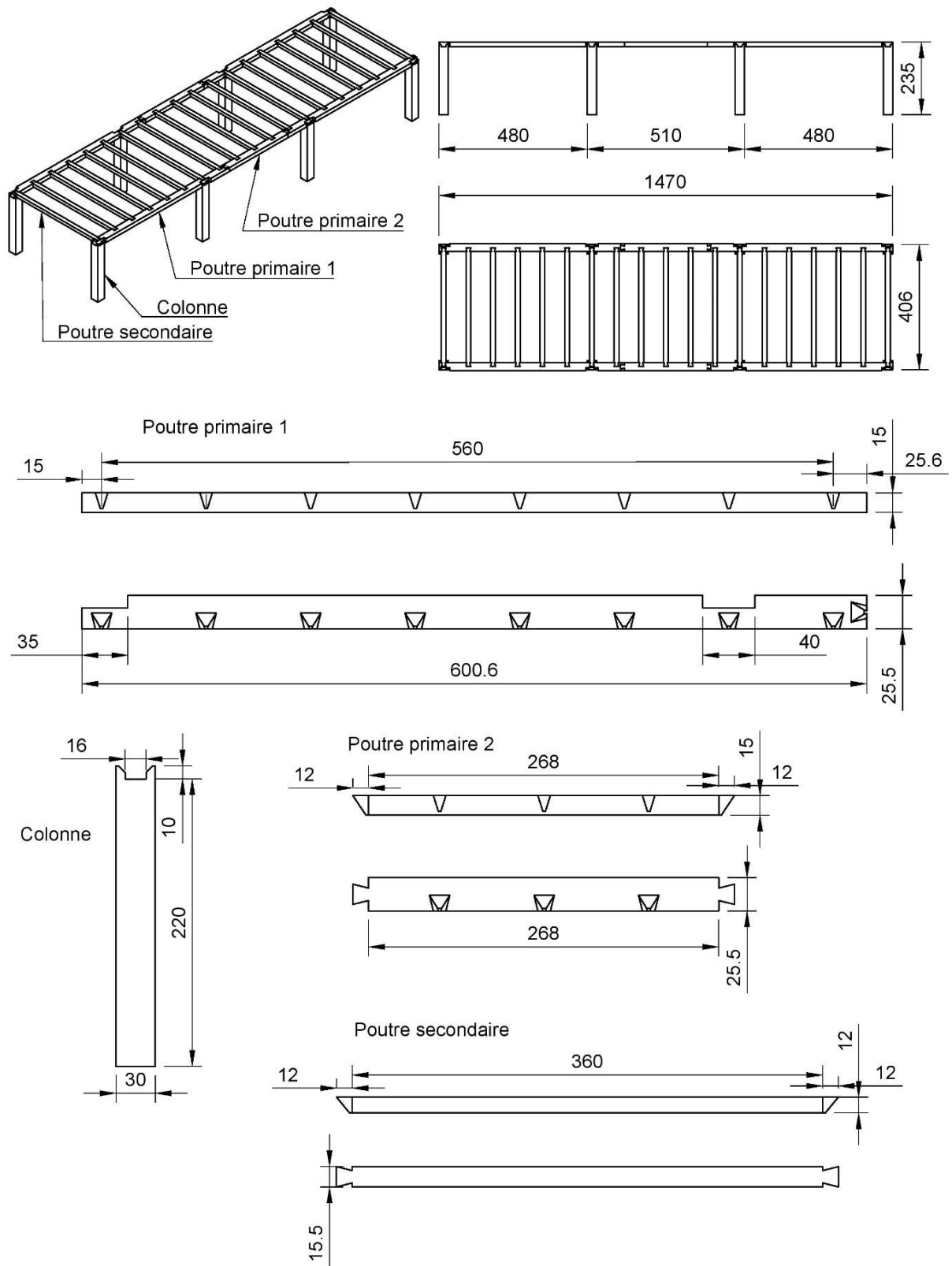


Figure 114 : dimensions de la structure hyperstatique et des éléments constitutifs (en cm)

III.5. KAWAI TSUGITE

L'objet de cette section est l'adaptation d'un assemblage traditionnel japonais à la construction par drone. La section comporte trois parties.

La première partie concerne le fonctionnement de l'assemblage et les adaptations qui ont été effectuées afin de le rendre drone-compatible. Ces adaptations ont pour objectif principal de permettre un assemblage par déplacement vertical. Deux versions de l'assemblage ont été développées, qu'on nommera type 1 et type 2. La deuxième partie présente les dimensions de l'assemblage ainsi que l'imprécision de positionnement du drone tolérée. La troisième partie décrit brièvement comment le fonctionnement de l'assemblage a été validé à l'aide de modèles réduits. Nous y décrivons également les étapes de fabrication des maquettes en bois que nous avons réalisées.

III.5.1. Considérations préliminaires et fonctionnement

Au Japon, il y a une longue tradition dans l'art de travailler le bois. Les charpentiers ont développé de multiples assemblages remarquables. Parmi eux, le *kawai tsugite* nous a inspiré dans le cadre de cette recherche.

La *kawai tsugite* est particulier comparé aux autres assemblages présentés dans ce travail. En effet, pour tous les assemblages présentés jusqu'à présent, ce n'est pas la recherche de la « forme en soi », qui a guidé le développement mais les contraintes inhérentes à la construction en bois et aux drones.

Pour le *kawai tsugite*, par contre, c'est la forme qui a constitué le point de départ du développement. A partir de la forme traditionnelle, nous avons cherché à trouver par essai-erreur et déduction logique une forme drone-compatible de l'assemblage.



Figure 115: la forme traditionnelle du *kawai tsugite* permet d'assembler deux éléments identiques axialement ou perpendiculairement.

Le *kawai tsugite* permet de connecter deux éléments identiques axialement ou perpendiculairement comme illustré à la Figure 115 : neuf configurations différentes sont possibles. Pour cette raison, l'assemblage est qualifié de « tri-directionnel ». Les éléments sont assemblés uniquement par un déplacement oblique à 45° (Figure 116). Si la partie supérieure est déposée verticalement sur celle du bas, elle glisse diagonalement et ne s'assemble pas. Ce mouvement est présenté à la Figure 117. Cependant, le drone permet uniquement d'emboîter les éléments par un déplacement vertical. Afin de permettre ce type de mise en place, la forme de l'assemblage doit être adaptée.

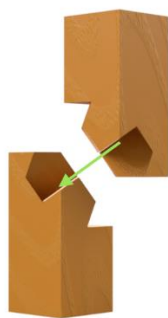


Figure 116 : vecteur d'assemblage du kawai tsugite traditionnel

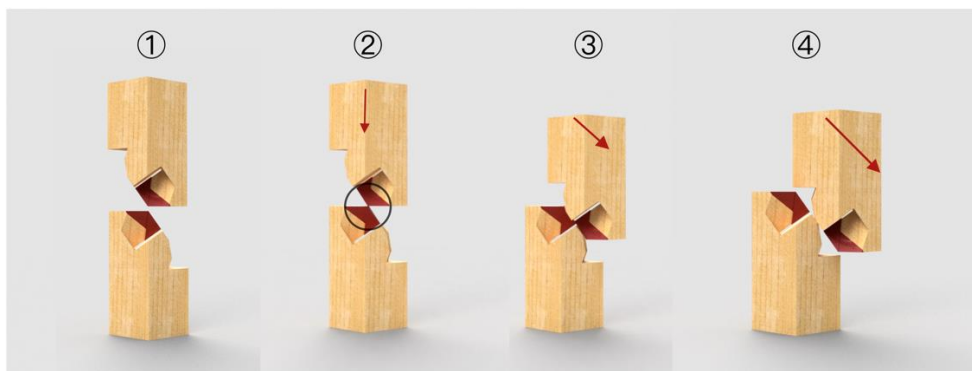


Figure 117 : assemblage traditionnel : les parties en rouge empêchent les éléments de s'assembler lorsqu'il est déposé verticalement (1) L'élément supérieur est déposé par le drone (2) Contact entre les éléments (3) et (4) La pièce supérieure glisse mais ne s'assemble pas

L'adaptation de la forme de l'assemblage à la construction par drone consiste à enlever ou modifier certaines parties des extrémités qu'on nommera « dents » (Figure 118) et qui sont colorées en rouge sur la Figure 117. Il s'agit des parties de l'élément qui lors d'un assemblage vertical se touchent en premier. Lorsque nous retirons ces parties, la mise en place peut se faire par une pose verticale et l'emboîtement se fait alors en suivant un mouvement de zigzag comme illustré à la Figure 119. Les éléments, après avoir glissés, entrent en contact et finalement se joignent.

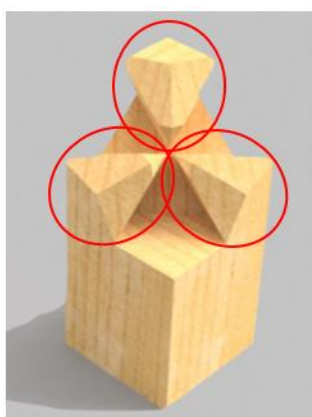


Figure 118 : extrémités de l'assemblage appelées « dents »

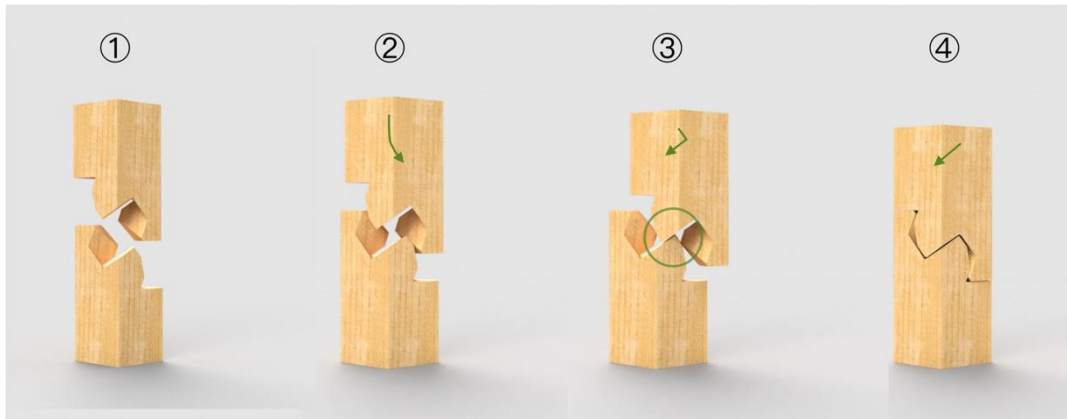


Figure 119 : principe d'assemblage du kawai tsugite adapté (les parties en rouges ont été retirées) (1) L'élément supérieur est déposé par le drone (2) Le contact entre les éléments à lieu plus bas, (3) Le contact (cercle vert) induit un glissement dans la direction opposée (4) assemblage complet

L'enjeu de cette adaptation est de trouver un compromis entre la facilité et la stabilité de l'assemblage. Plus les dents sont entaillées, plus les éléments s'emboîteront facilement, mais plus les surfaces de contact entre les deux éléments seront réduites. Nous proposons donc deux types différents de *kawai tsugite* adapté. Le type 1 offre une mise en place plus contrainte mais une bonne stabilité. Le type 2 offre plus de flexibilité pour la connexion des éléments mais une stabilité réduite.

III.5.1.1. *Kawai tsugite* adapté de type 1

Moins les dents sont entaillées, plus les surfaces de contact sont importantes et donc plus la stabilité de l'assemblage est élevée. C'est pourquoi, seulement une des trois dents a été entaillée pour le type 1. Cette version ne peut être assemblée que dans une seule direction prédéfinie et perd donc la notion d'assemblage tri-directionnel. Cela mène à trois types d'éléments différents en fonction de quelle dent est entaillée. Il y a ainsi neuf combinaisons d'éléments possibles, chaque combinaison permettant une unique configuration. La Figure 120 en montre trois, mais d'autres possibilités existent, comme par exemple une connexion poutre-poutre perpendiculaire. Si le type 1 a l'avantage de conserver de grandes surfaces de contact, il requiert cependant une définition à l'avance de la configuration d'assemblage souhaitée.

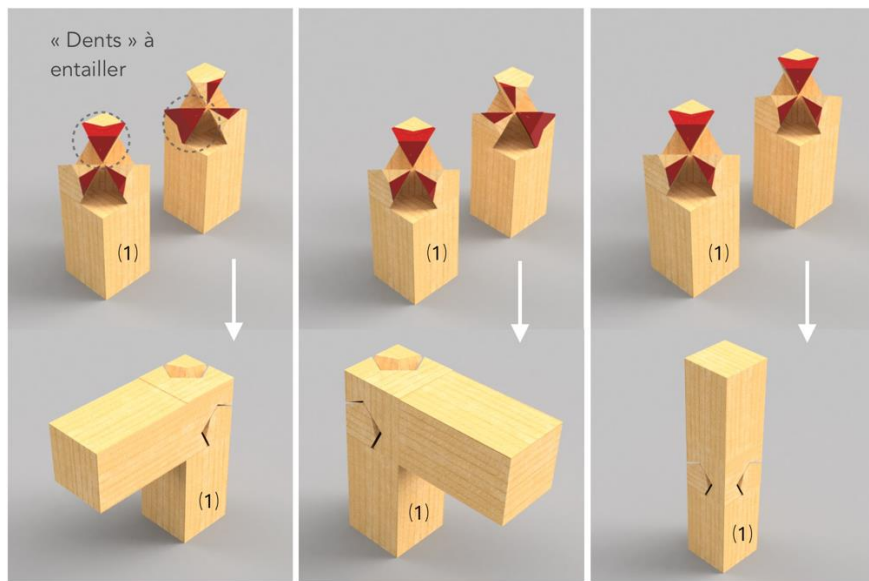


Figure 120 : 3 des 9 possibilités de configuration du kawai tsugite de type 1

III.5.1.2. *Kawai tsugite* adapté de type 2

L'objectif de cette seconde version est de conserver la propriété tri-directionnelle de l'assemblage traditionnel, c'est-à-dire de garder la possibilité d'utiliser le même assemblage pour les neuf configurations différentes (poutre-poutre, colonne-colonne, etc.). Pour cela, les trois dents des deux éléments qui se connectent doivent être entaillées. La Figure 121 illustre trois configurations différentes, toutes les trois réalisées avec les deux mêmes éléments. L'inconvénient de cette version du *kawai tsugite* est que les surfaces de contact sont réduites. Par conséquent, la stabilité de l'assemblage est plus faible.

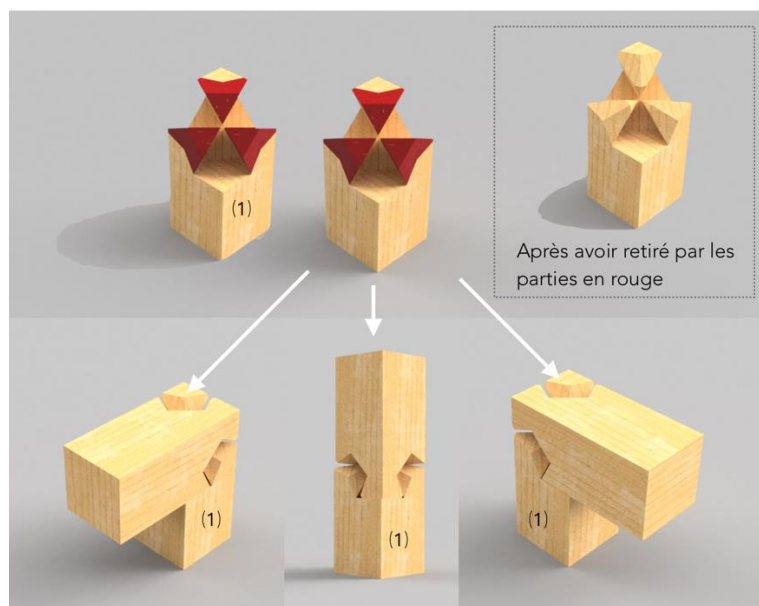


Figure 121 : trois configurations réalisées à l'aide des deux mêmes éléments.

III.5.2. Dimensions

Les dimensions de départ de l'assemblage sont celles du *kawai tsugite* traditionnel. Ensuite, la géométrie drone-compatible a été établie de manière progressive et itérative en fabriquant des modèles en bois ou en imprimant des éléments en 3D.

Il est intéressant de décrire la méthode de fabrication en bois de l'assemblage traditionnel jusqu'à l'obtention de la version drone-compatible. Cela permet de mieux visualiser la géométrie de l'élément. Les différentes étapes sont représentées à la Figure 122.

Le point de départ est un cube de côté b . La première étape consiste à couper un tétraèdre dans le cube (1). Le sommet du tétraèdre doit coïncider avec un des sommets du cube et les côtés de la base du tétraèdre sont les diagonales des faces du cube. Ensuite, on trace (2), sur la face triangulaire A du cube tronqué, trois droites passant par le centre de gravité A et parallèles à chacun des côtés de A. Les trois parties orange ainsi délimitées sont maintenues, tandis que les autres parties sont retirées (3) et (4). Nous obtenons ainsi la tête du *kawai tsugite* avec ses trois « dents » (5).

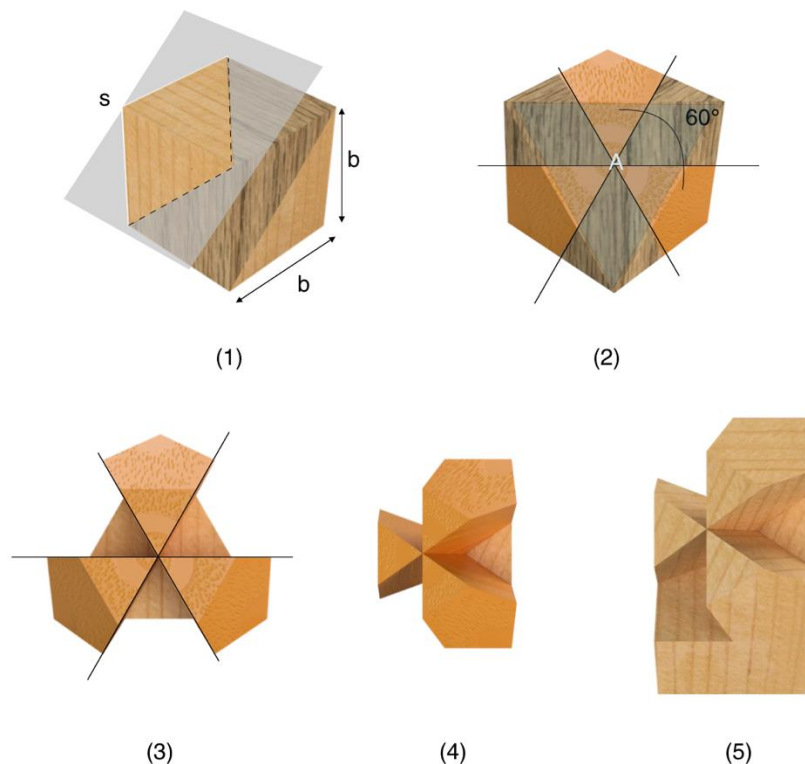


Figure 122 : étape de fabrication du *kawai tsugite*

L'élément obtenu est le *kawai tsugite* traditionnel. Afin de le rendre drone-compatible, les dents doivent être entaillées. Ces découpes peuvent être effectuées à l'aide d'une scie à main ou d'une scie sauteuse.

La Figure 123 illustre comment obtenir en plusieurs étapes, par découpe successive des dents, chacun des types d'assemblage. Pour le type 1, il faut suivre les étapes 1, 2 et 3. Pour le type 2, il faut répéter les étapes 1 et 2 sur les trois dents de l'assemblage. Les dimensions des découpes sont données sur la Figure 123 en fonction de la largeur b de l'élément.

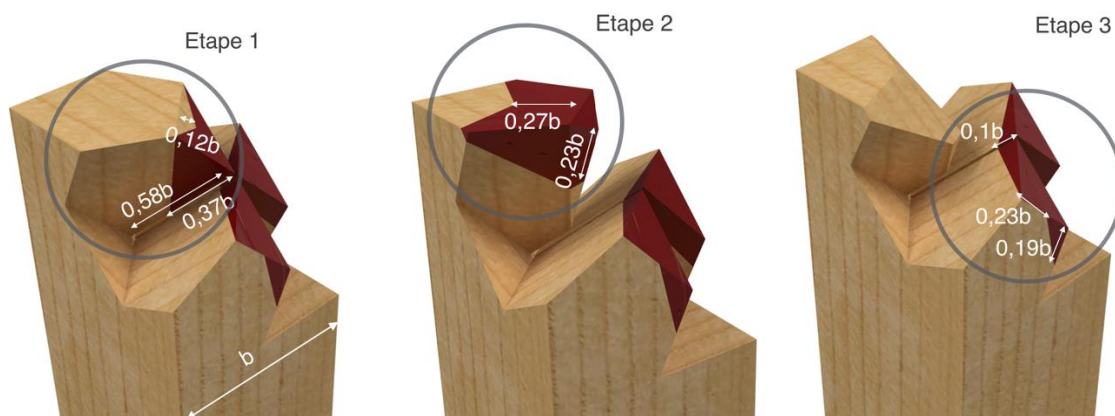
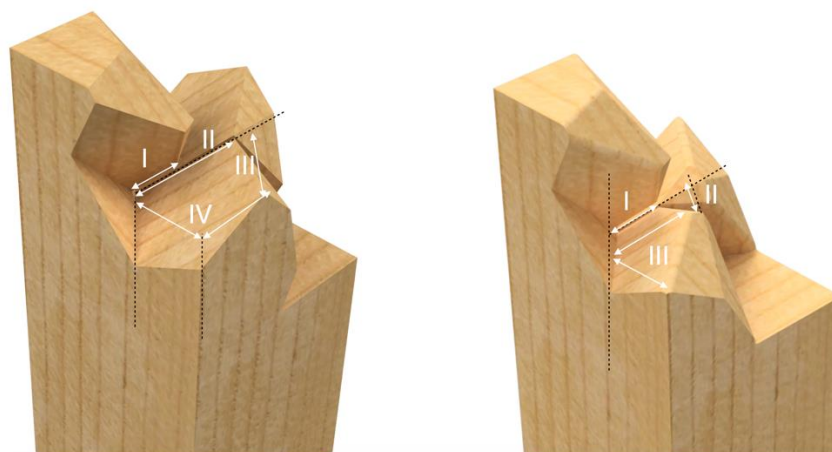


Figure 123 : étapes de découpe pour obtenir l'assemblage de Type1 / Type 2

L'assemblage fonctionne pour des sections carrées de dimensions variables. Les dimensions minimales de chaque élément, afin de garantir la tolérance de 5 cm dans toutes les directions, sont de 15 x 15 cm pour la version de type 1. Pour le type 2, ces dimensions sont légèrement supérieures.



	I	II	III	IV
Type 1	0,21 b	0,48 b	0,456 b	0,33 b
Type 2	0,21 b	0,22 b	0,27 b	0,27 b

Figure 124 : dimensions des éléments type 1 [gauche] et type 2 [droite]

Le but principal de l'adaptation du *kawai tsugite* est de pouvoir reprendre une imprécision de mise en place due au drone. Le Tableau 19 permet de quantifier cette imprécision, qui est identique dans toutes les directions, pour trois dimensions de base différentes.

Remarque : la géométrie de l'assemblage étant relativement complexe, ces valeurs peuvent légèrement varier en réalité.

Tableau 19 : quantification de l'imprécision tolérée par l'assemblage (en cm)

	15x15 [cm]	20x20 [cm]	30x30 [cm]
Type 1	5	6,7	10
Type 2	4	5,3	8

III.5.3. Validation du fonctionnement

Tout au long du développement, nous avons réalisé plusieurs impressions 3D et modèles réduits en bois de l'assemblage. En effet, le processus de conception de la version drone-compatible du *kawai tsugite* est expérimental. A chaque itération, nous avons effectué plusieurs adaptations afin d'obtenir la géométrie actuelle qui est satisfaisante.

La Figure 125 et la Figure 126 illustrent les derniers modèles réduits qui ont permis de valider les dimensions finales de l'assemblage.

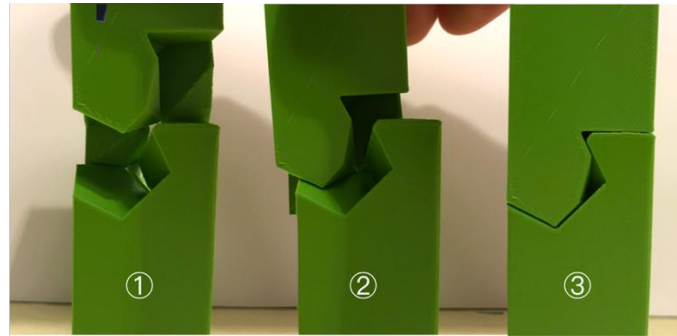


Figure 125 : modèles réduits réalisés pour valider le fonctionnement de l'assemblage de type 2



Figure 126 : modèles réduits en bois réalisés pour valider le fonctionnement de l'assemblage de type 2

III.6. RECAPITULATIF ET COMPARAISON DES ASSEMBLAGES

Cette section a pour but de résumer et comparer les caractéristiques des différents assemblages qui ont été développés. Au total, sept assemblages ont été conçus. Deux d'entre eux sont dédiés à la construction de structures par empilement, deux autres assemblages permettent de lier deux poutres, et les trois derniers sont consacrés à la jonction de colonnes.

Le Tableau 20 reprend ces sept assemblages et les compare selon différents critères.

Tableau 20 : récapitulatif et comparaison des assemblages développés

	1.1 Mi-bois pour empilement	1.2 Mi-bois pour jonction de poutres	2. Queue d'aronde pour empilement	3.1 Assemblage de colonnes de type 1	3.1 Assemblage de colonnes de type 2	4 Queue d'aronde pour jonction de poutres	5.Kawai Tsugite
Applications	Structure empilée	Jonction de poutres	Structure empilée	Jonction de 2 colonnes avec 2 poutres	Jonction de 2 colonnes avec ou sans 2 poutres	Jonction de poutres (croisement ou aboutage)	Jonction de 2 colonnes, 2 poutres ou une poutre et une colonne
Dimensions minimales	Hauteur : 30 cm	Hauteur : 15 cm	10x30 cm	Largeur de la poutre + 2 * [5+2] cm	Largeur de la poutre + 2 * [5+5] cm	Largeur : 15,5 cm (croisement de poutre) ou 19,5 cm (aboutage)	15x15 cm
Imprécision tolérée	5 cm ou plus en augmentant la hauteur de la poutre	5 cm ou plus en augmentant la hauteur de la poutre	5 cm ou plus en augmentant la section de la poutre	5 cm ou plus en augmentant les dimensions de la colonne	5 cm ou plus en augmentant les dimensions de la colonne	5 cm ou plus en augmentant la largeur de la poutre	5 cm ou plus en augmentant les dimensions
Potentiel structural	+	++	-	+	+	++	--
Facilité de fabrication	++	++	+	+	-	-	--
Perte de matière à la fabrication (+ = peu de perte)	++	++	-	-	-	-	+
Commentaire spécifique	Essai avec drone concluant pour un assemblage de type mi-bois drone compatible	Contrainte uniquement sur la hauteur des poutres donc grande inertie possible	Possibilité de construire des habitations de 2 à 4 étages pour des madriers de 10x30 cm à 15x45 cm	Possibilité de construire des habitations de 2 étages maximum	Possibilité de construire des habitations possédant jusqu'à 7 étages	Possibilité de créer des structures de type cantilever, intéressant pour : garder les avantages d'une structure hyperstatique & séparer des éléments longs et lourds en plusieurs parties	Géométrie intéressante

Suite à l'étude de ces assemblages et à la création de plusieurs structures les combinant, nous avons observé :

- De manière générale, l'imprécision sur la position du drone implique des dimensions minimales contraignantes. Il n'est actuellement pas possible d'assembler de petits ou de fins éléments avec ce mode de construction.
- Les deux types d'assemblage de colonnes sont surtout compatibles avec l'assemblage de poutres à mi-bois. Celui-ci n'a pas de contrainte sur sa largeur mais uniquement sur sa hauteur et permet donc d'utiliser des poutres à grande inertie pour une faible largeur. En effet, les dimensions des assemblages de colonnes sont directement liées à la largeur des poutres qui se

croisent en leur centre. Dès lors, si les poutres utilisées sont peu élancées et ont donc une largeur importante, les colonnes seront de grandes dimensions et seront largement surdimensionnées.

Chapitre IV : Structures artistiques

Ce chapitre développe trois exemples de structures drone-compatibles composées d'éléments en bois afin de mettre en évidence la vocation à la fois fonctionnelle mais aussi récréative et artistique de ce type de structures.

IV.1. DEVELOPPEMENTS ARTISTIQUES DE LA CONSTRUCTION PAR DRONES

Nous avons imaginé trois structures réalisées à l'aide d'assemblages drone-compatibles.

Les deux premières structures s'inspirent de la structure « Woods of Net » réalisée au Japon par l'artiste japonais Toshiko Horiuchi et Tezuka Architects. Cette œuvre d'art est composée de 589 éléments en bois empilés de manière à former un igloo. Les éléments sont assemblés, sans aucune connexion métallique, uniquement par une combinaison de tenon-mortaises et d'assemblage à mi-bois.

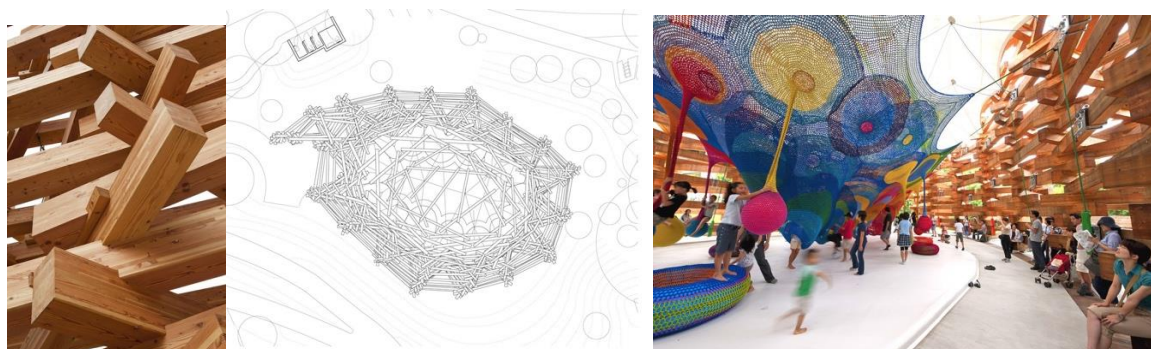


Figure 127 : « Woods of Net » par Tezuka Architects et le bureau d'étude TIS & PARTNERS³⁰

La première structure est illustrée à la Figure 128. Elle est destinée à créer des lieux de jeu, de repos et de méditation dans les espaces publics. Cette structure, dont chacun des plis délimite un espace, est constituée d'éléments empilés se croisant avec un angle de $157,5^\circ$. Cet angle, angle de l'hexadécagone (polygone à 16 côtés) régulier, a été choisi de manière à réaliser des structures quasi circulaires, mais d'autres angles fonctionneraient également. Deux types d'éléments ont été développés, un permettant de réaliser des courbes, et l'autre des contre-courbes. Les dimensions des deux éléments sont représentées à la Figure 129. Etant donné que les éléments ne se croisent pas perpendiculairement, mais de biais ($157,5^\circ$) la largeur des entailles est plus importante (52 cm contre 20 cm pour les éléments perpendiculaires). Cette largeur implique que les éléments aient une longueur minimale de plus d'un mètre.

Cette structure, n'est pas la seule structure réalisable. Nous avons également imaginé un petit abri qui pourrait être utilisé comme arrêt de bus (Figure 130). Cette petite structure combine les éléments utilisés précédemment (type 1 et type 2) ainsi qu'un type supplémentaire (type 3) permettant de croiser des éléments à 45° .

³⁰ Source des images : <http://www.archdaily.com/39223/woods-of-net-tezuka-architects>



Figure 128 : structure ondulée réalisée à l'aide d'éléments drone-compatibles

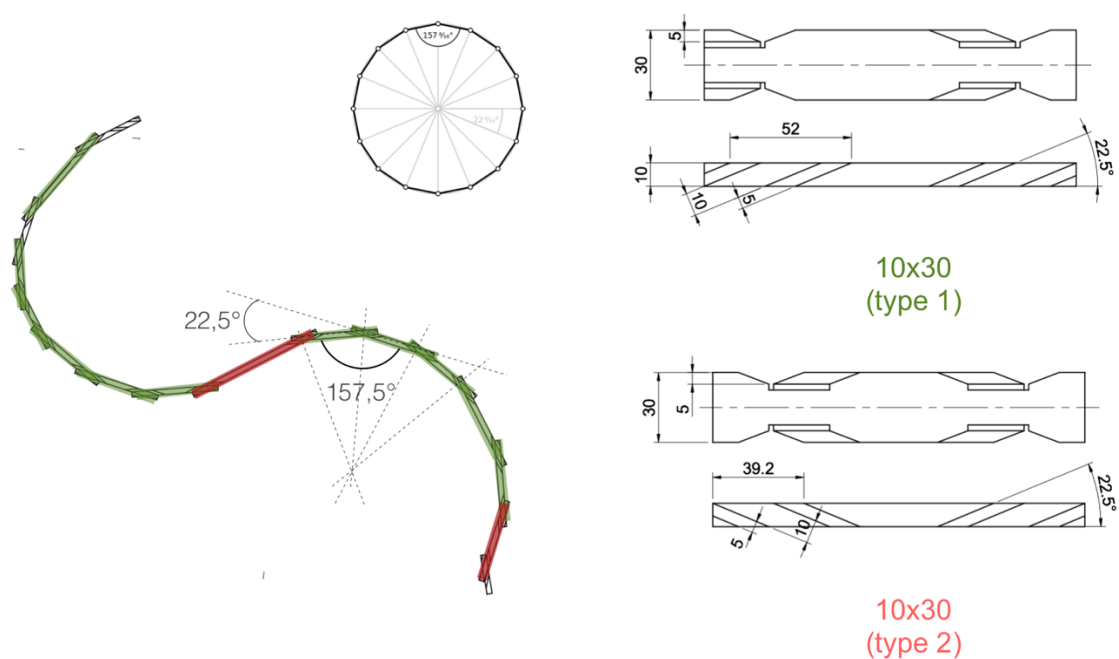


Figure 129 : dimensions des éléments constitutifs de la structure [cm]

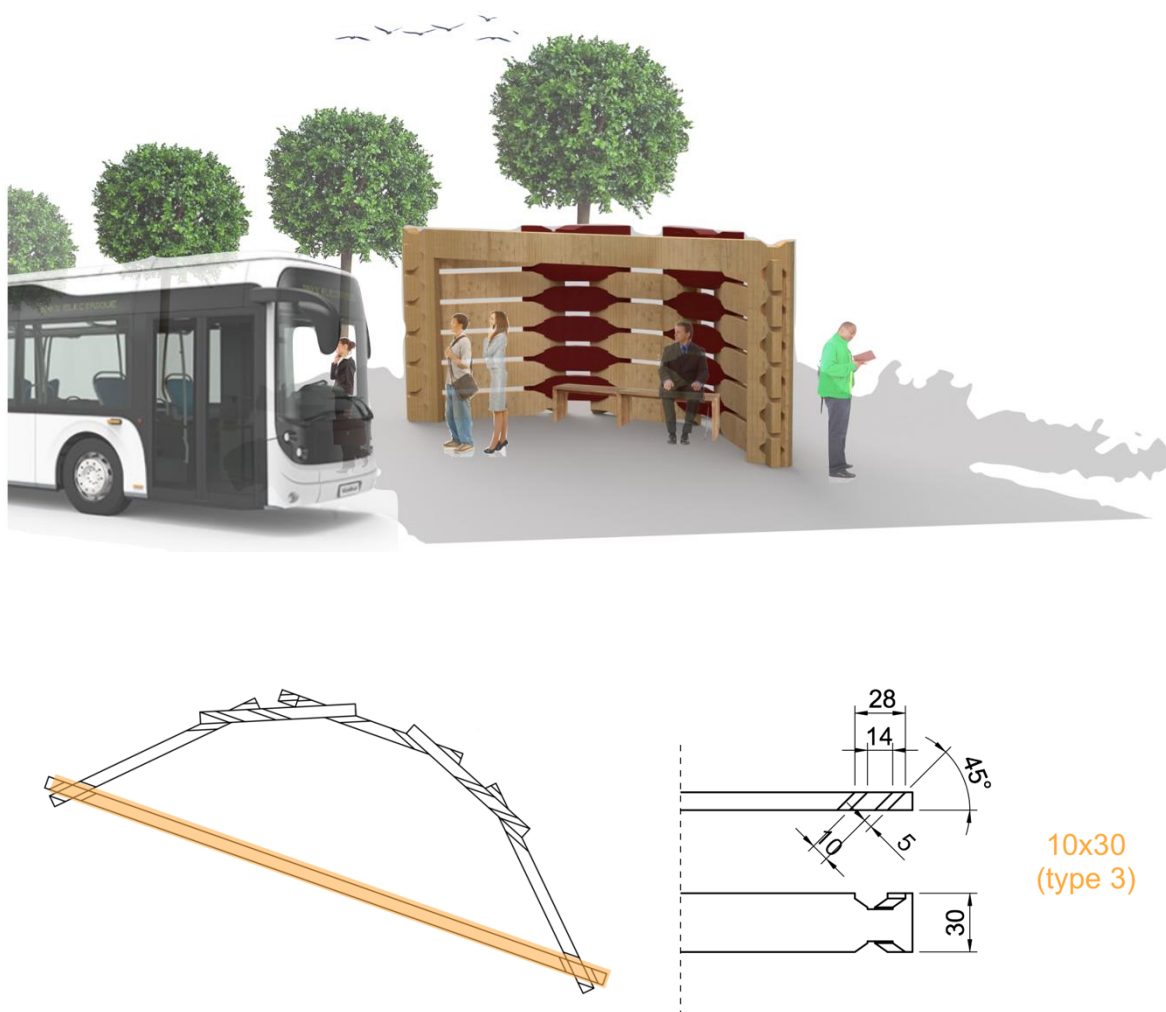


Figure 130: abri réalisé à l'aide d'éléments drone-compatibles de type 1, de type 2 et de type 3 [dimensions en cm] (présenté ci-dessus).

Moyennant le développement de plusieurs assemblages supplémentaires, une structure telle que celle imaginée par Tezuka Architects pourrait être réalisée à l'aide de drones. Nous pourrions imaginer que le drone scannerait sur chaque élément un QR³¹ code contenant la position finale exacte de l'élément. Le gain de temps serait considérable.

La troisième structure (Figure 131) a été réalisée à l'aide de l'assemblage colonne-colonne de type 1 présenté au Chapitre 3. L'assemblage a été adapté : la colonne est circulaire et l'axe selon lequel se croisent les poutres varie.

Cette petite structure est destinée à servir comme banc, comme table d'apéritif ou encore comme escalier. Elle pourrait être utilisée pour une installation temporaire, un événement qui nécessiterait l'installation de dizaines de ces structures. Même si la structure est petite et les éléments légers, le temps économisé dans le cas d'un montage et démontage par drones serait considérable.

³¹ En anglais *quick response*

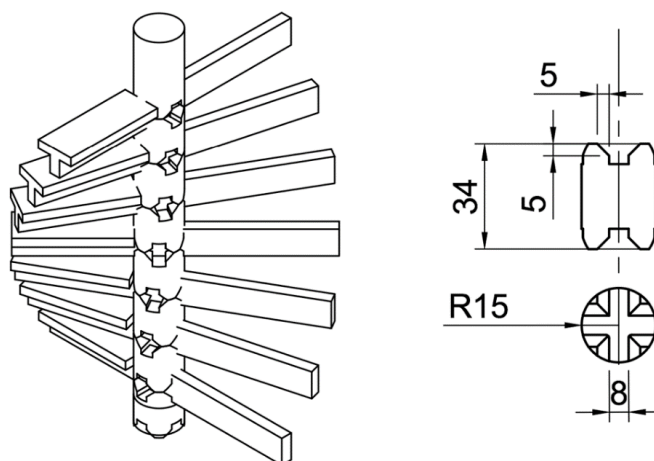


Figure 131 : structure temporaire réalisée à l'aide d'assemblages colonne-colonne drone-compatibles, les dimensions des éléments sont données ci-dessus [cm]

Chapitre V : Quelques pistes de développement futur

Le chapitre cinq présente des recommandations pour la suite de ce travail. Quelques pistes pour le développement futur des assemblages sont proposées : l'utilisation de fraiseuses numériques, les notions de vecteur d'assemblage et d'optimisation de matière devraient notamment être développées par ceux qui reprendront le flambeau.

V.1. APPROFONDISSEMENT DE L'ETUDE DES ASSEMBLAGES

Sept assemblages ont été étudiés de manière à valider leur principe de fonctionnement et à explorer leur potentiel structural. Toutefois, certains assemblages nécessitent d'être approfondis parce qu'ils n'ont pas pu être réalisés à échelle réelle en bois.

Pour la suite de la recherche, l'utilisation d'une fraiseuse numérique est indispensable. Cet outil faciliterait la fabrication de modèles à échelle réelle. Le résultat obtenu illustrerait le vrai rendu du bois et la vraie imprécision de l'assemblage.

De plus, au MIT, nous avons pris conscience de l'influence de l'usinage robotisé sur la conception des assemblages. L'utilisation d'une fraiseuse numérique permettrait donc d'intégrer ses contraintes et ses exigences au processus de conception. Les trois maillons de l'automatisation seraient alors maîtrisés : dessin assisté, fabrication robotisée et construction automatisée.

Une fois les éléments fabriqués en bois à échelle réelle, il conviendrait de tester leur mise en place à l'aide du drone.

Ensuite, des structures simples pourraient être réalisées à l'aide d'éléments drones-compatibles. Par exemple, la structure empilée de type *carport*, présentée au chapitre 3, pourrait faire l'objet d'un essai avec drone dans un futur proche. En effet, cette structure (Figure 132) est constituée d'assemblage à mi-bois dont le fonctionnement a déjà été validé par un essai avec drone.

En parallèle, il est nécessaire de tester dans la réalité le principe de conception spécifique décrit au Chapitre 2. Pour rappel, l'idée de ce principe est de sécher le bois sous son taux d'humidité d'utilisation avant d'effectuer les découpes. Ce faible taux d'humidité est maintenu jusqu'à la mise en place de l'élément. Ensuite, le bois va s'adapter aux conditions ambiantes et va donc gonfler. Ces essais viseront donc à évaluer dans quelle mesure le gonflement du bois peut contribuer à rigidifier l'assemblage et à en augmenter la résistance.

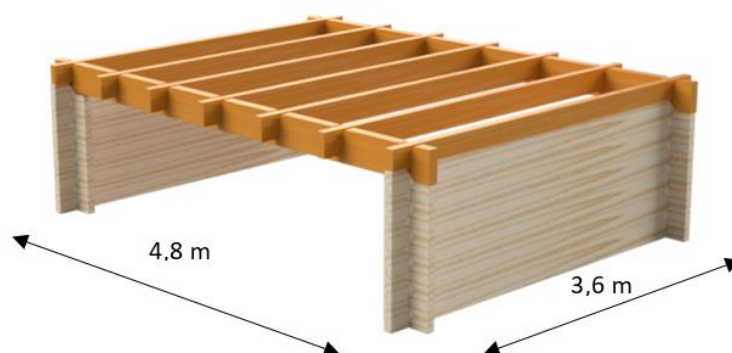


Figure 132 : exemple de structure pouvant faire l'objet d'un essai avec drone

V.2. LA NOTION DE VECTEURS D'ASSEMBLAGE

Lors de notre visite au MIT, nous avons eu l'occasion de discuter avec une chercheuse qui travaille sur le développement de méthodes numériques pour la fabrication et l'assemblage de détails constructifs. Elle nous a initié aux notions de « vecteurs d'assemblage » et « liberté locale de translation (=LTF : local transitional freedom) ». Il s'agit de principes permettant de quantifier le nombre de mouvements possibles pour assembler deux éléments.

La Figure 133 illustre ces notions avec deux exemples d'assemblage. A gauche, se trouve l'assemblage colonne de type 1, la poutre est mise en place sur la colonne selon un grand nombre de directions différentes. A droite, est présenté le *kawai tsugite*, la connexion de la deuxième partie de l'élément ne peut se faire que par un nombre plus restreint de directions.

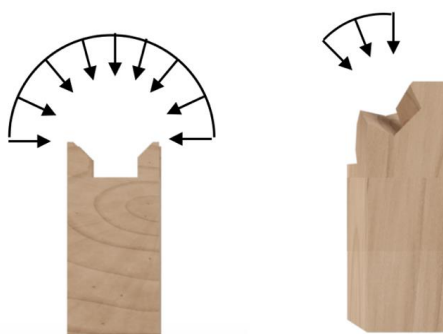


Figure 133 : vecteurs d'assemblage pour deux exemples d'assemblages

Les vecteurs d'assemblage permettent de quantifier la liberté de mise en place que présente chaque assemblage, permettant ainsi de comparer de manière objective et chiffrée les assemblages entre eux.

Il existe des algorithmes qui permettent de calculer automatiquement le champ de vecteurs d'assemblage d'un élément. Ces algorithmes permettent de quantifier l'impact d'un paramètre géométrique de l'assemblage sur la liberté locale de translation de celui-ci. Il est donc possible de déterminer la géométrie optimale de la pièce afin de garantir un champ de vecteurs adéquat.

V.3. L'OPTIMISATION DE LA MATIERE

Lors de notre séjour au MIT, nous avons eu l'occasion de travailler avec Paul Mayencourt, chercheur dans le domaine du bois. Il travaille sur l'optimisation et la fabrication digitale de structure en bois. Il développe de nouvelles formes d'éléments qui sont optimisées en fonction du cas de charge et donc des efforts internes. Ce principe permet de réduire le volume et donc le poids des éléments. Les fraiseuses numériques permettent d'obtenir facilement une série d'éléments optimisés.

Cette optimisation de la matière est particulièrement intéressante pour la construction par drone qui impose une limite sur le poids des éléments. De plus, l'utilisation de drone tend vers une automatisation complète de la construction et donc y intégrer ce processus ne posera pas de problème. Ajoutons également que la plupart des assemblages drone-compatibles doivent être fabriqués par fraisage. Dès lors, enlever une partie de la poutre afin de l'optimiser se combinera aux autres tâches de la fraiseuse.

Conclusion

L'objectif de ce travail est l'étude de faisabilité de la construction par drone de structures en bois, matériau pour lequel le potentiel d'adaptabilité à ce nouveau mode de construction n'avait pas encore été étudié. En effet, les recherches effectuées jusqu'à présent au sujet de la conception d'éléments drone-compatibles se limitaient à la maçonnerie, permettant de valider le principe de construction par drone. La présente recherche vise donc à caractériser le matériau bois, de manière à mettre en avant les propriétés intéressantes pour un tel principe de construction, et à concevoir quelques éléments en bois drone-compatibles en vue de la construction de structures simples.

Le bois est un matériau de plus en plus utilisé car il présente de nombreux avantages, notamment face aux préoccupations environnementales actuelles. Deux caractéristiques de ce matériau sont particulièrement intéressantes pour la construction par drone : son très bon rapport résistance / poids propre, et les nombreuses possibilités de son travail.

Dans le cadre de cette recherche, deux propriétés physiques du bois ont été étudiées plus en détail : son coefficient de frottement et ses propriétés hygroscopiques. Le coefficient de frottement permet de faire glisser deux éléments l'un sur l'autre pour une pente supérieure à 33°. Cette donnée fixe l'angle minimum à utiliser dans les assemblages. Les propriétés hygroscopiques du bois, quant à elles, vont favoriser la rigidité des assemblages. Le principe est de sécher le bois sous son niveau d'utilisation avant d'effectuer les découpes. Ensuite, ce faible taux d'humidité doit être maintenu jusqu'à la mise en place des éléments. Une fois ceux-ci placés sur site, le bois va s'adapter au milieu ambiant et gonfler, rendant les assemblages rigides.

Les éléments drone-compatibles doivent également respecter trois autres critères : un poids maximal de 100 kg, une tolérance d'imprécision sur la position de 5 cm dans toutes les directions, et un emboîtement qui doit rester vertical. Les éléments développés ici à partir de ces critères se basent sur les techniques d'assemblage traditionnelles. L'adaptation de ces assemblages à la construction par drone les rend plus complexes, il est donc essentiel de se baser sur des assemblages initiaux les plus simples possibles. Afin de garantir cette simplicité, les assemblages sont donc uniquement de type bois-bois, aucun connecteur métallique n'étant utilisé.

Ce nouveau mode de construction doit donc s'adapter aux contraintes inhérentes à la fois au drone mais aussi au bois. Les nouveaux éléments de construction ainsi obtenus et les formes qui en découlent sont à l'origine d'un nouveau style architectural. Ces formes peuvent paraître simples, mais sont en réalité le fruit de nombreuses recherches. Ceci exige en effet beaucoup de créativité, car nécessite « d'imaginer, de construire un concept neuf et de proposer une solution originale ». Trois difficultés majeures sont de plus à mentionner :

1) Le côté itératif du processus de conception

Le travail itératif mené dans le cadre de la présente recherche consiste en différentes étapes. Des premières ébauches d'assemblages ont tout d'abord été dessinées. Ces assemblages ont ensuite été modélisés puis imprimés en 3D, afin de mieux les visualiser. Ils ont enfin été construits en bois à taille réelle, afin de les tester. Un retour critique sur les résultats obtenus à chaque étape de ce processus a mené, dans certains cas, à une réadaptation de l'assemblage ; ceci en veillant toutefois à ce qu'aucun moyen plus simple ne permette d'arriver au même résultat.

2) Le large champ de possibilités de développement

Dans le développement d'assemblages drone-compatibles, le champ des possibilités est potentiellement « infini », car beaucoup de types d'assemblages peuvent être adaptables à la construction par drone. Il est donc important de définir un cadre de travail pour réduire le champ de ces possibilités. Pour ce faire, la recherche s'est limitée à des modes constructifs simples : le croisement ou le prolongement de deux éléments, et la réalisation de structures élémentaires en poteaux-poutres ou en bois empilé.

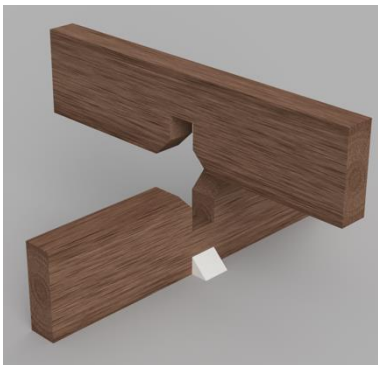
3) Le nombre de sources extérieures disponibles

Une dernière grande difficulté réside dans le fait que les recherches sur la construction de structures en bois à l'aide de drones sont pour l'instant inexistantes. Ce manque de références exige une grande ouverture d'esprit pour imaginer de nouveaux types d'assemblages, sans a priori ou limitation sur la faisabilité des solutions. De plus, les spécificités du bois doivent être prises en compte, sans se laisser influencer par des recherches en cours sur d'autres matériaux drone-compatibles.

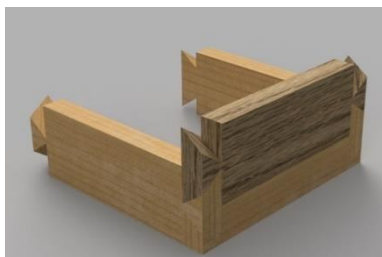
Après plusieurs mois de recherche, de création et d'essais divers, sept types d'assemblages bois-bois (repris ci-dessous) ont été sélectionnés et développés. Deux sont dédiés spécifiquement à la construction par empilement, les cinq autres permettant quant à eux les constructions de type poteaux-poutres drone-compatibles. Ces deux systèmes constructifs présentent en effet l'intérêt de se décomposer facilement en éléments légers.



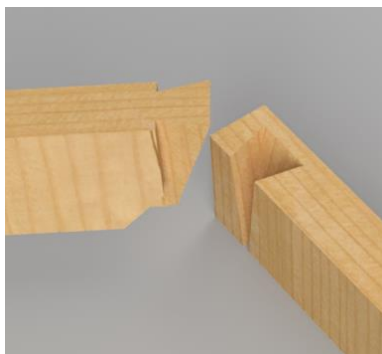
Cet assemblage « à mi-bois adapté » permet de construire des structures par empilement. Il est relativement simple et permet l'emboîtement des différents madriers grâce à des encoches couvrant un quart de la hauteur de l'élément. Pour des raisons techniques, la hauteur minimale des madriers doit être de 30 cm. Ce type d'assemblage a fait l'objet d'un essai en taille réelle avec drone, qui s'est révélé très concluant. Cet essai a permis de valider la capacité du drone à se déplacer et à pivoter en portant un élément long. Il a également confirmé la possibilité d'adaptation de ce type d'assemblage à la construction par drones.



Cet assemblage à mi-bois, similaire au précédent, permet dans ce cas de joindre deux poutres qui se croisent. Deux encoches faisant chacune une moitié de la hauteur de la poutre permettent aux éléments de se croiser dans le même plan horizontal. Ces poutres doivent avoir une hauteur minimale de 15 cm.



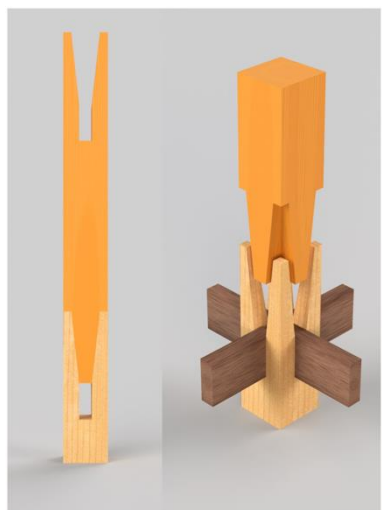
Cet assemblage s'inspire des queues d'aronde utilisées traditionnellement pour la construction par empilement. La forme globale de celles-ci a été conservée, seules les dimensions et les pentes ont été adaptées pour assurer la drone-compatibilité. Les madriers dotés de ce type d'assemblage présentent une section variant de 10 x 30 cm à 15 x 45 cm. Ils permettent de construire des habitations de 2 à 4 étages par empilement.



Cet assemblage en « queue d'aronde adapté » assure la connexion de deux poutres qui se croisent ou qui s'aboutent. Ces poutres doivent avoir une largeur minimale de 15,5 cm pour le croisement et 19,5 cm pour l'aboutage de deux éléments. Dans les deux cas, la hauteur minimale de l'élément est de 10 cm. Ce type d'assemblage offre la possibilité de prolonger des éléments, propriété particulièrement intéressante étant donné le poids de levage du drone limité à 100 kg. Il sera utilisé préférentiellement pour la construction de structures hyperstatiques de type cantilever, où l'assemblage pourra être placé au niveau d'une section de moment nul.



Ce type d'assemblage assure la jonction de deux colonnes. Il nécessite par contre obligatoirement l'utilisation de deux poutres intermédiaires qui se croisent au centre de l'assemblage. La largeur minimale des côtés de la colonne correspond à la largeur de la poutre + 2 x (5+2) cm. Cet assemblage permet de construire une structure poteaux-poutres de maximum 2 étages.



Cet assemblage en « tenon et mortaise adapté » permet soit la jonction de deux colonnes et de deux poutres, soit de deux colonnes uniquement. La largeur minimale des côtés de la colonne correspond à la largeur de la poutre + 2 x (5+5) cm. Les têtes des mortaises doivent avoir une hauteur de l'ordre de 50 cm. Cet assemblage a pu être fabriqué au MIT, à l'aide d'une fraiseuse numérique, à échelle $\frac{1}{2}$. Le fonctionnement de ce type d'assemblage a donc pu être validé, et il pourrait être utilisé pour construire une habitation en structure poteaux-poutres jusqu'à 7 étages.



Cet assemblage est une adaptation du *kawai tsugite*, assemblage traditionnel japonais. Il présente la particularité d'être tri-directionnel, c'est-à-dire que deux mêmes éléments peuvent s'assembler de trois manières différentes. Il permet ainsi la jonction de deux colonnes ou bien d'une poutre et d'une colonne (dans deux directions différentes). Sa forme, bien qu'elle soit particulièrement intéressante, s'avère être relativement complexe. Cet assemblage présente donc un potentiel structural assez limité mais une géométrie intéressante.

Les assemblages illustrés ci-dessus permettent diverses possibilités structurales, et peuvent se combiner l'un à l'autre afin de répondre à différentes situations. Ils constituent ainsi les prémisses de la construction de structures en bois par drone. Certains de ces assemblages ont pour l'instant uniquement été testés par impression 3D à échelle réduite. Afin de valider leur fonctionnement en regard des caractéristiques du bois, il sera indispensable de les concevoir à échelle réelle. Des essais de mise en place par drone devront également être effectués, pour en garantir une bonne mise en œuvre.

A ce stade, la construction par drone présente toujours une limitation majeure. En effet, l'imprécision de 5 cm du drone en regard du positionnement des pièces dans toutes les directions implique des dimensions minimales pour la largeur et/ou la hauteur des éléments. Il n'est donc pas encore possible aujourd'hui de concevoir des éléments de petite taille. Néanmoins, cette imprécision sera certainement réduite dans le futur grâce aux différentes évolutions technologiques.

Il est donc maintenant possible de répondre à la question de base posée par ce travail de fin d'étude : « Est-il faisable de construire par drone des structures en bois ? » oui ! Les sept assemblages développés dans ce cadre montrent la grande diversité de réalisations de structures drone-compatibles en bois. De plus, les premiers essais de mise en place par drone prouvent le bon comportement de l'engin face aux éléments longs que sont les poutres en bois. Même si cette recherche n'en est encore qu'à ses tout débuts, elle est très prometteuse et ce travail est une petite « poutre » à l'édifice d'un « mouvement drone-compatible » dans le bois. Ce mode de construction très futuriste fera probablement partie du quotidien des chantiers de demain...

Bibliographie

Bois

D. BASULTO, *Woods of Net / Tezuka Architects*, article du 21 décembre 2009, En ligne <http://www.archdaily.com/39223/woods-of-net-tezuka-architects>, consulté le 6 juin 2017.

K. CUMMINGS, P. LAWS, *Chapitre 6 : Dynamique de la particule*, Redish Edward & Cooney Patrick, 2004, En ligne <http://www2.cegep-ste-foy.qc.ca/freesite/fileadmin/users/79/pppnya07/chap6/ppp6.1frottementa12.pdf>, consulté le 25 mars 2017.

A. DEPLAZES, J. FISHER, M. RAGONESI, *Lignatec : Construction massive en bois*, Lignum, Zurich, 2007.

A DEPLAZES, *Construire l'architecture, du matériau brut à l'édifice, un manuel*, Darch ETH, 2012.

D. Ed and F. HASSELQVIST, *Timber compression strength perpendicular to the grain*, Lund Institute of Technology, Lund, 2011.

Z. ERDIL, A. KASAL, C.A. ECKELMAN, *Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints* », *Forest Products Journal*, 2005.

Z.W. GUAN, A. KITAMORI, K. KOMATSU, *Experimental study and finite element modelling of Japanese "Nuki" joints — Part one: Initial stress states subjected to different wedge configurations*, *Engineering Structures* 30, 2008.

W. GRAUBNER, *Encyclopedia of Wood Joints*, The Taunon Press, 1992.

HOUTINFOBOIS, *La forêt et le bois*, En ligne <http://www.houtinfo Bois.be>, consulté le 14 mai 2017.

HOUTINFOBOIS, *Etat de la construction bois en Belgique*, étude publiée le 21 mars 2017, En Ligne <http://www.houtinfo Bois.be>, consulté le 27 mai 2017.

J. KOLB, *Bois, systèmes constructifs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2006.

Comité Nationale pour le Développement du Bois, Note technique « Eléments de murs en bois massifs », France.

P. Latteur, *cours de « Structures en bois »*, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2016.

D. LATHUILLIERE, *Thèse de doctorat, Etude du comportement et du renforcement d'appuis sollicités en compression selon un angle donné du bois lamellé-collé*, Université de Lorraine, France, 2015.

P. MARON, *Chap 3 : Adhérence – Frottement*, 2004, En ligne http://maron.perso.univ-pau.fr/meca_old/ch3.htm, consulté le 25 mars 2017.

Y. NAKASHARA, *Japanese Joinery, A Handbook for Joinery and Carpenters*, Hartley & Marks Publishers, 1983.

J. NATTERER, J-L. SANDROZ, M. REY, *Traité de génie civil volume 13 construction en bois : Matériaux, technologie et dimensionnement*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.

OS, *cours en ligne, Forces de frottement*, (2007). En ligne <http://owl-ge.ch/IMG/pdf/frottement.pdf>, consulté le 25 mars 2017.

T. SUMIYOSHI, *Wood Joints in classical Japanese Architecture*, Kajima Institute Publishers, 1991.

C. WEN-SHAO, *Rotational performance of traditional Nuki joints with gap II: the behavior of butted Nuki joint and its comparison with continuous Nuki joint*, Journal of Wood Science, October 2007.

Drone

Fédération professionnelle du drone civil, *Les drones débarquent dans le monde de la sécurité*, En ligne <https://www.cnpp.com/Groupe/Actualites-et-evenements/Page-d-actualites/Les-drones-debarquent-dans-le-monde-de-la-securite>, consulté le 6 mars 2017.

J-F PREVÉRAUD, *Le drone a 100 ans*, En ligne <https://www.industrie-techno.com/le-drone-a-100-ans.36883>, consulté le 6 mars 2017.

PwC. *Clarity from above*, En ligne <http://www.pwc.pl/clarityfromabove>, consulté le 6 mars 2017.

TECHNI DRONE, *cours en ligne, Formation et prestations drone*. En ligne <http://techni-drone.com/services/les-domaines-dapplications/>, consulté le 6 mars 2017.

ANNEXES

ANNEXE 1 : ETUDE DU FROTTEMENT DU BOIS

Coefficient de frottement

Les valeurs présentées correspondent à la hauteur de la planche lorsque l'élément supérieur a commencé à glisser

On obtient ensuite l'angle par trigonométrie (connaissant la longueur de planche)

Douglas							
Support : D2.1 Fibres parallèles à la descente						MOYENNE	ANGLE (°)
D1.1 par	32	29	29	24,5	27,5	28,4	29,60
D1.1 perp	28	24	29	22	28	26,2	27,65
D1.2 par	26	26	23	25	23	24,6	26,20
D1.2 perp	26	26	23	25	23	24,6	26,20
D1.3 par	30	25	28	23	27,5	26,7	28,10
D1.4 par	26,5	27	28	23	27,5	26,4	27,83
D1.5 par	23	24,5	22,5	26	24,5	24,1	25,73
D1.5 perp	19	16	18	18	16	17,4	19,19
D1.6 par	20	17	18,5	24	23	20,5	22,29
D1.6 perp	16	15	15	15	14,5	15,1	16,80

Support : D2.1 Fibres perpendiculaires à la descente							
D1.1 par	22,5	24	22	20	21	21,9	23,65
D1.1 perp	31	27	34	31	28	30,2	31,13
D1.2 par	26	21	20	21	22	22	23,75
D1.2 perp	32	31	26	29	26	28,8	29,94

Support : D3.1 Fibres perpendiculaires à la descente							
D4.1	33	37	29	37	28	32,8	33,26
D4.2	40	31	29	25	25	30	30,96
D4.3 par	31	29	25	33	27	29	30,11
D4.3 perp	25	22	27	28	28	26	27,47
D4.4 par	26	22	31	35	25	27,8	29,07
D4.4 perp	28	25	21	29	29	26,4	27,83

Support : D2.1 PONCE Fibres parallèles à la descente							
D1.1 par poncé	18,5	19	16	17	16	17,3	19,09
D1.1 perp poncé	17	15,5	16	17	16	16,3	18,06

Support : D2.1 PONCE Fibres perpendiculaires à la descente							
D1.1 par poncé	16	15	16	15	14,5	15,3	17,01
D1.1 perp poncé	19	18	17	16,5	17	17,5	19,29

Moyenne brut	26,84
Maximum brut	33,26

Moyenne poncé	18,36
Maximum poncé	19,29

Coefficient de frottement

Les valeurs présentées correspondent à la hauteur de la planche lorsque l'élément supérieur a commencé à glisser

On obtient ensuite l'angle par trigonométrie (connaissant la longueur de planche)

Chêne							
Support : C2.1 Fibres parallèles à la descente						MOYENNE	ANGLE (°)
C1.1 par	23	23	26	29	21	24,4	26,01
C1.1 perp	24	21	24	21	23	22,6	24,32
C1.2 par	19	18	19,5	18,5	18,5	18,7	20,51
C1.2 perp	22	17	17	19	24	19,8	21,60
C1.3 par	19	20	21	22	28	22	23,75
C1.3 perp	17	16,5	14	14	17	15,7	17,43
C1.4 par	27	33	26	28	27	28,2	29,42
C1.4 perp	30	26	26	23	24	25,8	27,29
C1.5 par	31	33	30	26	29	29,8	30,79
C1.5 perp	26	27	29	27	30	27,8	29,07
C1.6 par	25	28	22	23	23	24,2	25,83
C1.6 perp	17	19	20	18	17	18,2	20,00
Support : C2.1 Fibres perpendiculaires à la descente							
C1.1 par	18	23	36	41	22	28	29,25
C1.1 perp	25	21	25	24	25	24	25,64
C1.2 par	16	16	17	17	17	16,6	18,37
C1.2 perp	20	29	21	24	21	23	24,70
Maximum	30,79						
Moyenne	24,62						

Notations utilisées et photos des faces des échantillons :

Face d'échantillon C1.1 :



Face d'échantillon C1.2 :



Face d'échantillon C1.3 :



Face d'échantillon C1.4 :



Face d'échantillon C1.5 :



Face d'échantillon C1.6 :



Face d'échantillon C2.1 :



Face d'échantillon C2.2 :



Face d'échantillon C2.3 :



Face d'échantillon C2.4 :



Face d'échantillon C2.5 :



Face d'échantillon C2.6 :



Face d'échantillon D1.1 :



Face d'échantillon D1.2 :



Face d'échantillon D1.3 :



Face d'échantillon D1.4 :



Face d'échantillon D1.5 :



Face d'échantillon D1.6 :



Face d'échantillon D2.1 :



Face d'échantillon D2.2 :



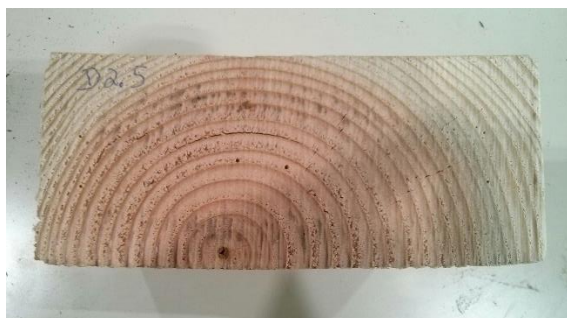
Face d'échantillon D2.3 :



Face d'échantillon D2.4 :



Face d'échantillon D2.5 :



Face d'échantillon D2.6 :



Face d'échantillon D3.1 :



Face d'échantillon D3.2 :



Face d'échantillon D3.3 :



Face d'échantillon D3.4 :



Face d'échantillon D3.5 :



Face d'échantillon D3.6 :



Face d'échantillon D4.1 :



Face d'échantillon D4.2 :



Face d'échantillon D4.3 :



Face d'échantillon D4.4 :



Face d'échantillon D4.5 :



Face d'échantillon D4.6 :



ANNEXE 2 : ETUDE DU GONFLEMENT DU BOIS

Calcul du gonflement

DOUGLAS				Taux d'hygroscopie du bois: w (%)	
Dimension : b =	63 mm			Extérieur	Intérieur
Taux hygro ini w0 =	5 %			Eté	13
				Hivers	19
Coefficient de retrait ou gonflement moyen (%/%)					
Essence	tangentiel	radial	longitudinal		
Douglas	0,27	0,17	0,01		
Gonflement	Hygro initiale	Tangentiel	Radial		
Ext été	5	1,3608	0,8568		
Ext hivers	5	2,3814	1,4994		
Int été	5	1,3608	0,8568		
Int hivers	5	0,3402	0,2142		
	%	(mm)	(mm)		

$$\Delta L = \frac{\beta}{100} * \Delta w * L$$

EPICEA			
Dimension : b =		63 mm	
Taux hygro ini w0 =		5 %	
Coefficient de retrait ou gonflement moyen (%/%)			
Essence	tangentiel	radial	longitudinal
Epicea	0,37	0,19	0,01
Gonflement	Hygro initiale	Tangentiel	Radial
Ext été	5	1,8648	0,9576
Ext hivers	5	3,2634	1,6758
Int été	5	1,8648	0,9576
Int hivers	5	0,4662	0,2394
	%	(mm)	(mm)

CHENE			
Dimension : b =		63 mm	
Taux hygro ini w0 =		5 %	
Coefficient de retrait ou gonflement moyen (%/%)			
Essence	tangentiel	radial	longitudinal
chêne	0,32	0,19	0,01
Gonflement	Hygro initiale	Tangentiel	Radial
Ext été	5	1,6128	0,9576
Ext hivers	5	2,8224	1,6758
Int été	5	1,6128	0,9576
Int hivers	5	0,4032	0,2394
	%	(mm)	(mm)

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique www.uclouvain.be/epl

