

LES CAHIERS
DE L'IBOIS

IBOIS
NOTEBOOKS



LES CAHIERS
DE L'IBOIS

IBOIS
NOTEBOOKS

3

LES CAHIERS
DE L'IBOIS

IBOIS
NOTEBOOKS

3

STÉPHANE BERTHIER
CHRISTOPHE CATSAROS
MARIO RINKE
PETRAS VESTARTAS
SANDRA VUILLEUMIER

EPFL PRESS

SOMMAIRE / CONTENTS

INVENTER LE MATÉRIAU APPROPRIÉ POUR L'ÈRE DU RÉÉQUILIBRAGE ENVIRONNEMENTAL

9 Christophe Catsaros

LES ASSEMBLAGES DE LA CHARPENTE EN BOIS: À LA RECHERCHE DU NOEUD PARFAIT

21 Stéphane Berthier

STRUCTURES DYNAMIQUES

41

Mario Rinke

L'UTILISATION DU BOIS BRUT IRRÉGULIER À USAGE STRUCTUREL

57

Sandra Vuilleumier

/

INVENTING A MATERIAL FOR AN ERA OF ENVIRONMENTAL BALANCE

139

Christophe Catsaros

TIMBER FRAME JOINERY: IN SEARCH OF THE PERFECT JOINT

151 Stéphane Berthier

DYNAMIC CONSTRUCTS

169 Mario Rinke

IRREGULAR TIMBER USE IN WOODEN STRUCTURES

185 Sandra Vuilleumier

73 IMAGES

UNE MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION
À FABRICATION POUR LE BOIS BRUT SCIÉ /
DESIGN-TO-FABRICATION WORKFLOW
FOR RAW-SAWN-TIMBER

103 Petras Vestartas

199 LES AUTEURS / THE AUTHORS

INVENTER
LE MATÉRIAU
APPROPRIÉ
POUR L'ÈRE
DU RÉÉQUILIBRAGE
ENVIRONNEMENTAL

Christophe
Catsaros

L'histoire de l'architecture comporte des moments charnières; des réalisations qui entrent dans l'histoire comme autant de tournants et qui conditionnent l'évolution globale de la construction d'un point de vue formel, économique et structurel. Les passionnés d'architecture comme les architectes eux-mêmes semblent apprécier ces repères, qui permettent de penser la globalité du point de vue de quelques réalisations incontournable. Le récit de la modernité architecturale, aussi objectif soit-il, n'échappe pas à ce déterminisme au carrefour de l'histoire de l'art, du goût d'une époque, de ses hantises et de ses besoins. Il existe quelques repères modernes qui servent de support à la fresque linéaire du panorama de la construction du XX^e siècle. Avec le temps, ces réalisations finissent par incarner bien plus que des moments d'innovation. Elles deviennent, par une sorte de glissement métonymique, les symboles d'un changement de cap, et peut-être même de l'époque dans son ensemble.

La maison Dom-Ino est un exemple caractéristique de ce type de repère. Imaginée au début de la Première Guerre mondiale, elle s'expose comme un principe visant à reconstruire rapidement des maisons détruites par la guerre. Un modèle constructif pour se prémunir contre le pire. L'histoire a donné raison à Le Corbusier. La guerre a été terrible, suivie d'une seconde confrontation encore plus terrible et généralisée, qui a nécessité un gigantesque effort de reconstruction reposant essentiellement sur les vertus constructives du béton.

Si le modèle corbuséen fait le pari d'une telle évolution, il ne peut contenir, au moment de sa formulation, tous les éléments qui contribuent à sa réussite. Le récit simplifié de la modernité se satisfait de cette causalité évidente faite d'un modèle et de son adoption quasi

planétaire. En tant que récit, il met l'accent sur les aspects formels, la malléabilité, la facilité d'exécution, l'abondance de la matière première, toutes ces vertus étant érigées au rang de qualités structurantes pour le projet moderne. Si le béton a réussi à incarner la modernité architecturale, au point d'en devenir la matérialisation, ce n'est pas seulement par sa manière de donner corps au programme moderne. L'histoire de l'architecture du XX^e siècle s'arrête trop souvent à ce récit idéalisé, de la rencontre entre un programme et un matériau. Elle s'engage rarement sur la voie de l'analyse critique multi-factorielle qui lui permettrait de comprendre sa propre évolution.

Faute d'avoir engagé ce travail, la doxa moderniste a longtemps entretenu une compréhension objective des formes architecturales et urbaines qu'elle engendrait. Cette modernité un peu trop indulgente avec ses propres contradictions, cultivait l'idée d'un aboutissement de



→ **74** l'architecture, conviction corroborée par le constat qu'elle s'appliquait de manière similaire aux économies de marché et aux sociétés collectivistes. Le moderne se voulait universel et se targuait de pouvoir s'appliquer de la même manière aux quatre coins du monde. Les variations d'adaptation, qu'elles soient climatiques, culturelles ou topologiques, ne changeaient pas ses fondamentaux. Cette modernité a pu à juste titre se projeter comme la phase ultime du développement de l'humanité. La croyance dans l'aboutissement de la modernité persiste encore dans le principe d'une architecture générique, ou dans l'idée d'une architecture non référentielle soutenue par Olgiati. Il s'agit d'une chimère grise pour l'essentiel, c'est-à-dire faite en béton. Avec le recul, ce qui relevait du style dans le programme moderne apparaît



→ **75** assez nettement. Elle fut de nature idéologique pour les instigateurs qui en tiraient profit et de l'ordre du conditionnement imposé pour ceux à qui elle s'appliquait. On apprenait à vivre une vie moderne, comme on apprend à exécuter une danse ou à jouer d'un instrument. À ce jeu, on peut être pionnier ou suiveur, dresseur ou chien savant. Cette foi inconditionnelle dans les vertus du fonctionnalisme a duré jusqu'à la première fissure de l'édifice conceptuel qui coïncide avec les premiers échecs en grandeur réelle de l'urbanisme moderne. Le fracas de la démolition des bâtiments de Pruitt Igoe à Saint-Louis dans le Missouri au milieu des années 1970 a sonné le glas de cette innocence moderne.

Cette première faille, mais aussi les efforts pour y remédier, fussent-ils structuralistes, brutalistes ou post-modernes, ont montré que la modernité architecturale n'échappe pas aux déterminismes sociaux, économiques et esthétiques. C'est la rencontre d'une technicité, d'un programme sociétal, d'un imaginaire collectif et d'une industrie qui lui a permis de se couler dans un moule qu'elle imaginait définitif; celui d'un coffrage en béton. Si le métal et le verre ont également eu leur mot à dire dans le conditionnement de l'idiome moderne, c'est le béton, tel qu'idéalisé par Le Corbusier avec son système Dom-Ino, qui a tenu la place de système constructif de référence tout au long du XX^e siècle. Dans ce récit, le béton rendait possible un urbanisme plus réactif, un habitat plus sain et des constructions plus adaptées à leur fonction. Devenu synonyme de progrès, d'hygiène, et de stabilité statique, ce matériau en est venu à signifier la rationalité. Quant aux tentatives de penser la modernité sous d'autres formes, si l'histoire ne les a pas oubliées, l'ampleur de

la domination du béton les a simplement marginalisées. Les expressionnistes et la brique, les libertaires et le gonflable, ainsi que les quelques expérimentateurs en bois ont contribué au scénario d'un monde qui aurait pu advenir mais n'a jamais quitté le registre de l'utopie ou de l'expérimentation. Face à ces variations minoritaires, le béton a érigé à perte de vue ses bâtiments rationnels et ordonnés. La ville née de la rencontre entre le consumérisme et la mécanisation était générique et immuable, supposée parfaite dans sa façon de répondre aux besoins de la famille moderne. Jusqu'à ce qu'on se rende compte qu'il lui manquait ce supplément d'âme qui rend la ville supportable.

LE BÉTON ET SA VÉRITABLE RAISON D'ÊTRE

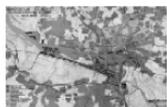
Il a fallu d'autres failles, semblables à celle de Pruitt-Igoe, pour y voir clair. Sarcelles, la Grande Borne¹, Les Poètes à Pierrette², Le Mirail à Toulouse et les tours des quartiers nord de Marseille. La désagrégation d'un modèle de société a révélé la part de négatif qui s'était glissée discrètement dans la formule magique ; le poison caché dans le ciment. Ce que la modernité avait versé avec enthousiasme dans le coffrage de la reconstruction devait beaucoup plus à l'effort de guerre qu'à un quelconque idéal de vivre ensemble. L'effort de guerre allemand pour fortifier les côtes européennes contre le débarquement attendu, mais surtout le traumatisme de la destruction des villes dans l'effort pour vaincre les puissances de l'Axe. L'ampleur de cet événement et ses répercussions sur le

1 Catsaros, Christophe. « La cité des enfants perdus », *Archistorm*. Nov./Déc. 2010.

2 Catsaros, Christophe. « Les poètes réduits au silence ? », in *D'Architectures* n° 188, Société d'Éditions Architecturales. Lyon, Février 2010. p. 20.

cours de l'histoire ne sont pas suffisamment appréciées. Entre 1939 et 1945, des quartiers et des villes entières ont été rayés de la carte. Des villes historiques comme Varsovie et Cologne, des métropoles industrielles denses comme Tokyo, Londres et Berlin, et même des villes qui se croyaient à l'abri des bombes, comme Dresde, ont été détruites³. Le caractère traumatique de cet épisode historique se révèle dans le peu de place qu'il occupe dans l'histoire de l'architecture, voire dans l'histoire tout court. La commémoration des bombardements reste vive dans quelques cas qui ont marqué les esprits, comme Hiroshima ou Rotterdam. Partout ailleurs, le souvenir des bombes a été discrètement écarté de la mémoire collective. Qui se souvient du bombardement de La Chapelle à Paris, ou du bombardement de Hambourg, qui a tué presque autant de civils que celui de Nagasaki?

Loin de toute prétention mémorielle, cette destruction mérite une plus grande attention. Elle a joué un rôle déterminant dans le déroulement du XX^e siècle et dans l'évolution de ses formes architecturales et urbaines.



→ **76** La vulnérabilité des villes denses aux charpentes inflammables a été une occasion inespérée pour les idéologues du béton de mettre en avant leur modèle constructif et organisationnel. Les villes de la reconstruction n'étaient pas censées brûler ou se briser à la moindre déflagration⁴. Le désir de créer un habitat à l'abri des bombardements incendiaires est la moins apparente des raisons qui ont lancé les camions-toupie à la conquête des villes du monde entier. D'autres facteurs ont contribué à ce que ce modèle devienne dominant : la facilité d'approvisionnement, dans certains cas, la reconversion à des fins civiles d'une industrie du béton structurée par l'effort de guerre.



Sans le mur de l'Atlantique, la reconstruction aurait-elle été aussi massivement en béton ? La peur de revivre l'Armageddon des tempêtes de feu⁵ qu'ont connu l'Allemagne et le Japon reste la raison la plus certaine et la moins connue du destin bétonné de la modernité.

→ **77**

D'UNE GUERRE À L'AUTRE

Du système Dom-Ino de 1914 pour reconstruire la Flandre meurtrie, à l'éclatement de la trame urbaine moderniste pour éviter la propagation du feu de bâtiment en bâtiment, la modernité semble devoir autant à la destruction qu'à l'inventivité de ses pionniers. Aussi, pour comprendre quelle sera la prochaine révolution architecturale, est-il utile d'étudier attentivement la conjoncture actuelle et plus particulièrement les modalités d'effondrement de notre propre modèle dominant.

Si la prédominance du béton au cours de la seconde moitié du XX^e siècle est dû à l'angoisse inspirée par une tragédie refoulée, il se pourrait que le prochain changement dans l'évolution des techniques de construction soit à son tour motivé par la prévention d'une catastrophe annoncée. Pour les générations qui ont



→ **78**

connu la Seconde Guerre mondiale, la catastrophe était la guerre mécanisée et la destruction dont elle était capable. La nôtre repose sur les perturbations du climat qui pourraient prendre des proportions telles que l'environnement

- 3 Lindqvist, Sven. *Une histoire du bombardement*, coll. « Sciences humaines ». La Découverte. Paris, 2012.
- 4 Düwel, Jörn. *A Blessing in Disguise: War and Town Planning in Europe 1940-1945*, DOM publishers. Paris, 2013.
- 5 Sebald, Winfried Georg. *On the Natural History of Destruction*, Hamish Hamilton. London, 2003.

qui nous est aujourd'hui favorable cesserait de l'être. L'ampleur et le type de menace sont différents, mais la façon dont elle façonne les mentalités n'est pas sans rapport. L'éco-anxiété des jeunes du troisième millénaire ressemble au pacifisme radical des jeunes à l'issue de la Seconde Guerre mondiale. À la faveur de cette analogie, on peut penser que la réponse globale de nos sociétés sera, comme dans les années 1950, l'adoption de formes d'habitat capables de nous protéger de la catastrophe. Le retour massif au bois, considéré comme matériau de construction privilégié, irait dans ce sens. Il ne s'agirait plus d'utiliser le bois accessoirement, comme bardage ou comme attribut ornemental, mais de laisser le bois dicter les règles du jeu en imposant son propre rythme. Ce bois n'aurait plus besoin d'imiter le comportement d'autres matériaux pour prouver qu'il peut servir. Il n'aurait plus besoin d'être aussi solide ou aussi léger que le métal, ou aussi résistant au feu que le béton. Il pourrait être ce qu'il est, et redéfinir les normes, les critères et les priorités en fonction de ses propres qualités. Ce bois imposerait une approche holistique capable de penser ensemble la production, l'utilisation et la reconversion d'un matériau. Il s'agirait de construire en fonction de la quantité de matière disponible dans un territoire. L'identité constructive de chaque région découlerait de cet équilibre entre ce qui y pousse et ce que l'on peut en faire. Cette limitation, qui fait hurler les promoteurs immobiliers, serait un garde-fou contre les excès spéculatifs qui se multiplient partout dans le monde. En Chine, la spéculation immobilière a généré 100 millions d'appartements vendus mais laissés vides par leurs acheteurs⁶. En Espagne, la quantité de bâti inoccupé produit au moment de la crise de 2008 équivaut à la superficie du canton de Vaud. Une prévalence

progressive du bois local dans la construction rendrait impossible ce genre de dérives, essentiellement dues à la promesse de développement illimité inhérente au béton. Le bois rend possible un développement ajusté à la capacité de renouvellement durable de la ressource sylvestre. Si ce type de changement sociétal semble aujourd'hui hors de portée, il n'est pas impossible que, comme en 1945, la destruction fasse bouger les lignes et avec elles le champ des possibles. Plus nous nous enfonçons dans la crise climatique, plus ses conséquences poussent des pans entiers de la société à une radicalité qu'elle peut difficilement accepter aujourd'hui. Faire du bois un régulateur global du développement avant l'effondrement de notre écosystème serait un moyen de provoquer le changement avant que la catastrophe ne se produise. Il s'agirait dans ce cas de prévenir au lieu de guérir.

L'ASSEMBLAGE TRÈS ARCHITECTONIQUE DES STRUCTURES BOIS

Avant le XX^e siècle et les grands bouleversements de la modernité, c'est la pierre qui a incarné en Occident le « bien construit ». C'était la pierre de taille, stable et durable, qui était la parfaite métonymie de l'architecture. La modernité a réussi à substituer le béton à cette pierre idéalisée, faisant porter au nouveau matériau la promesse d'un habitat plus hygiénique et d'une ville plus en accord avec les défis de l'époque mécanique.

Si l'architecture venait à nouveau à changer de référentiel, quelles seraient les qualités symboliques qui porteraient cette mutation ? Le bois durable et

6 Soules, Matthew. *Icebergs, Zombies, and the Ultra Thin : Architecture and Capitalism in the Twenty-First Century*, Princeton Architectural Press. New York, 2021.

ajustable pourrait-il remplacer le béton devenu un peu trop polluant et invasif pour occuper à lui seul la fonction de matériau-archétype de l'architecture en général? Comment la construction en bois en viendrait-elle à signifier l'architecture dans sa globalité? Quelles seraient les arguments et les images archétypales de cette imbrication d'une époque et d'un matériau réinventé? Il est fort probable que les assemblages bois/bois, longtemps relégués au rang de bizarreries japonisantes, trouveraient leur place dans cette échelle de valeurs qui donne à l'architecture ses références, ses moyens de penser et concevoir. Il est également probable que l'excellence du charpentier (ou de son avatar mécanique), capable de visualiser en négatif la forme exacte qui manque pour imbriquer deux éléments distincts, en vienne à signifier l'intelligence tectonique dans ce qu'elle peut avoir d'absolu. L'art de l'ajustement, de l'assemblage bien pensé, redeviendrait «l'art de bâtir» par excellence. L'architecture changerait alors de caractérisation. Elle serait moins solide, générique, moulée, entière, compacte, immuable, mécanique et d'un seul tenant. Elle deviendrait plus légère, intelligente, articulée, démontable, robotique ou manuelle, mais surtout locale et ajustée. L'architecture cesserait progressivement d'être évaluée à l'aune de la superficie de ses réalisations pour se mesurer à l'intelligence de ses assemblages et à l'inventivité de ses structures. L'excellence architecturale changerait à nouveau de critères, entraînant l'époque sur la voie d'une expressivité tectonique et d'une nouvelle alliance de l'ingénierie et de l'architecture.

**LES ASSEMBLAGES
DE LA CHARPENTE
EN BOIS:
À LA RECHERCHE
DU NOEUD PARFAIT**

**Stéphane
Berthier**

Les *198 assemblages du bois* d'Elias Guenoun¹, paru en 2014, est un ouvrage qui compile autant de liaisons en bois qu'il y a de positions dans le Kamasutra. Ce n'est pas un manuel de construction mais plutôt un « beau livre d'architecture », uniquement constitué d'axonométries muettes. Il se laisse feuilleter avec délice et chaque représentation offre au lecteur l'occasion d'une contemplation esthétique. Pourtant ces assemblages ne sont jamais situés dans une charpente, ni cotés ni légendés autrement que par leurs noms. Les dessins ne représentent que leur exactitude géométrique et leur intelligence astucieuse, à l'exclusion de toute autre information technique.

*L'encyclopédie des métiers de la charpente de l'ossature bois*² publiée par les Compagnons du Devoir considère les assemblages comme les points névralgiques où s'apprécie le travail qualifié, et souligne qu'ils deviennent la principale source de désordres s'ils sont mal exécutés. Ils sont le juge de paix de la dextérité du charpentier comme de la qualité des bois employés ; en un mot, les assemblages recèlent la part la plus importante de l'art des charpentes. La réalisation de ces dernières a très tôt exigé des savoirs de représentation pour tracer les pièces aux bonnes longueurs et leurs extrémités aux bons angles afin de parfaire les jonctions des arêtes de l'ouvrage en un nœud précis. Historiquement, ces savoirs étaient transmis par les maîtres compagnons à leurs apprentis, le soir après la journée de travail. Preuve de sa richesse et de son intérêt historique, cette somme de savoirs que l'on nomme en France l'*art du trait*, a été classée au patrimoine immatériel de l'humanité par l'UNESCO en 2019. C'est d'ailleurs cet ensemble de moyens graphiques empiriques, avec ceux de la stéréotomie des tailleurs de pierre, que Gaspard Monge rassembla en un système cohérent

pour constituer la géométrie descriptive à la fin du XVIII^e siècle. Nul doute qu'une grande part de la poésie de la charpenterie tient à la beauté de ses assemblages qui referment avec précision les figures géométriques, à cet « art de la fabrication » que pointait Kenneth Frampton dans sa définition de la tectonique³. C'est sans doute aussi ce qui manque à de nombreux ouvrages du XX^e siècle industriel qui vit peu à peu disparaître les assemblages bois au profit des connecteurs métalliques et réduisit les éléments de bois au rôle de barres reliées par des nœuds d'acier. Si ces connecteurs ont permis à la charpenterie de rentrer de plain-pied dans la modernité et de rivaliser de performance avec les matériaux modernes, ils lui ont peut-être aussi fait perdre une partie de son identité ancestrale. L'époque contemporaine accueille donc avec plaisir le renouveau des assemblages bois dont l'exécution est désormais confiée aux outils numériques.

Ce rapide aperçu historique permet d'envisager en première approximation que l'évolution des assemblages témoigne de trois âges successifs : artisanal, industriel puis numérique, l'un ne faisant pas nécessairement disparaître l'autre. Il existe encore une persistance des savoirs artisanaux des Compagnons du Devoir, notamment employés dans le domaine du patrimoine, chargés aujourd'hui de rebâtir la charpente de Notre-Dame de Paris. Les charpentes industrielles à connecteurs métalliques concernent toujours l'essentiel du marché en ce

1 Guenoun, Elias. *198 assemblages du bois*, Éditions Form[e]s. Choisy-le-Roi, 2014.

2 Les Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers de la charpente et de l'ossature bois*, Lib. du Compagnonnage. Paris, 1977.

3 Frampton, Kenneth. *Studies in tectonic cultures*, MIT Press. Cambridge (MA), 1995.

début de XXI^e siècle tandis que nous assistons à l'émergence de la fabrication digitale, sans que cette dernière ne puisse encore rivaliser économiquement avec les méthodes du XX^e siècle, même si probablement les assemblages de la « forêt » de Notre-Dame seront réalisés sur des robots de taille. Mais avant de développer plus avant les caractéristiques de ces trois âges, nous ne saurions être tout à fait complet sans un rapide détour par l'Asie, et notamment le Japon.

Les assemblages de tradition japonaise ont été importés de Chine avec le bouddhisme aux V^e et VI^e siècles avant de se développer de manière autonome sur l'archipel. Ils sont universellement célèbres pour leur haut degré de raffinement. Encore plus qu'en Europe ils portent témoignage de l'excellence des savoir-faire du maître charpentier, avec la particularité que le plus beau des assemblages est celui qui sait disparaître dans l'épaisseur de la pièce de bois pour ne laisser au regard que le fil du trait de coupe entre les pièces. La conception japonaise des charpentes ne recourant que très rarement à la triangulation, ces liaisons sont le plus souvent orthonormées à la faveur de conceptions par empilement⁴, qui ne connaissent pas toutes les complexités européennes de l'art du trait dans des configurations obliques. Elles sont en revanche d'une précision mécanique et d'une sophistication remarquable, destinées à reprendre des efforts accidentels qui peuvent survenir lors de typhons ou de secousses sismiques. Cela induit de nombreux dispositifs de clés, de queue d'arondes ou de tête de marteau dans des assemblages normalement sollicités pour certains types de contraintes mais qui devront le cas échéant « travailler à l'envers »⁵, comme par exemple lorsque le vent impose des efforts de traction à un poteau. Toutefois, ni

les vents ni les éventuels séismes ne sauraient expliquer à eux seuls le niveau de raffinement des assemblages nippons. La dimension anthropologique de la sacralisation du savoir-faire artisanal dans un pays où un maître-artisan peut recevoir le titre honorifique de « trésor national vivant » explique sans doute en partie cette surenchère de perfection. Pour suivre la pensée de Roland Barthes⁶, si l'assemblage est un signe, alors l'excellence du charpentier est son signifié. La démonstration du savoir-faire y est peut-être une fin en soi. Il est significatif que le *Takenaka* à Kobé se nomme « musée des outils de la charpenterie ». Sa visite présente la particularité de mettre en avant l'évolution des outils, des forges, des aciers et des moyens d'affutage et de ne présenter l'évolution des charpentes que comme la conséquence de celle des outils, en second plan. La démonstration est édifiante : à mesure que l'outil s'améliore, les assemblages deviennent plus précis et plus complexes. Alors l'architecture s'élanche, ose des portées et des hauteurs nouvelles, s'enrichit, se cisèle de modénatures. Il semble que jamais en Europe une histoire de l'architecture ait pu être présentée à partir d'une histoire des outils, et par extension, de l'habileté des artisans. Nous devons noter aussi que la précision des assemblages japonais tient pour partie dans la qualité du bois d'*inoki* dont le grain et la finesse autorise un travail de taille extrêmement délicat dont on peut extraire des copeaux de l'épaisseur d'une feuille de papier à cigarettes, plus difficile à obtenir avec les essences européennes.

4 Engel, Heino. *Measure and Construction of the Japanese House*, Tuttle Publishing. Clarendon (VT), 1985.

5 Graubner, Wolfram. *Assemblages du bois, l'Europe et le Japon face à face*, Éditions Vial. Paris, 2020.

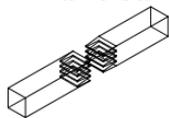
6 Barthes, Roland. *L'empire des Signes*, Éditions Points. Paris, 2007.

ÂGE I: ASSEMBLAGES EN BOIS

Mais quel que soit le contexte culturel, asiatique ou européen, les assemblages du bois sont soumis aux mêmes sollicitations mécaniques et s'ils sont initialement conçus pour résister aux effets que la gravité exerce sur une construction, ils doivent aussi parer à d'autres sollicitations verticales ou horizontales. En outre, ils résistent plus facilement aux efforts de compression, puisque toute la section de la pièce de bois participe à la résistance, qu'aux efforts de traction, de cisaillement ou de torsion, qui demeurent leur talon d'Achille. La grande majorité des assemblages existent aussi bien au Japon qu'en Europe, la distinction s'opérant plutôt sur le raffinement que sur le fonctionnement mécanique. En Asie comme en Europe, ce sont principalement les efforts de compression qui les maintiennent en place en assurant une pression sur toute la surface de la section. Dans l'inventaire que dresse Wolfram Graubner⁷, la plupart des assemblages présentés existent dans les deux régions, et se distinguent plus dans leurs variations que dans leur nature. Il existe plusieurs tentatives de classement typologique des assemblages, dont aucune ne donne tout à fait satisfaction. Graubner⁸ propose un classement par géométrie: assemblages en longueur, en oblique, à angle droit, de plans, sans considération pour les sollicitations mécaniques auxquelles ils doivent faire face tandis que les Compagnons du Devoir⁹ proposent une approche par sollicitations quitte à ce qu'un même assemblage se retrouve dans plusieurs catégories. Dans sa postface aux *198 assemblages*¹⁰, Elias Guenoun explique avoir renoncé à toutes ses ambitions classificatrices initiales à mesure qu'avancait son travail d'inventaire. Cependant, tous les

assemblages bois ont en commun de faire s'emboîter, d'une manière ou d'une autre, une partie évidée et son équivalent saillant, dans de multiples configurations spatiales, sous différentes sollicitations physiques. Leur niveau de sophistication est le produit de leurs complexités géométrique et mécanique. Nous essayerons de montrer comment s'enrichissent trois des principaux assemblages du bois, les entures, les embrèvements et les assemblages d'angle depuis leur plus élémentaire expression, maintenus en place par simple contact par le poids propre de la charpente, jusqu'à leurs variantes plus complexes, selon l'importance des efforts de traction, flexion, ou cisaillement auxquels ils sont soumis en fonction de leur position dans le schéma statique de la charpente.

Les entures sont des liaisons destinées à rallonger une pièce de bois dans sa direction longitudinale. En règle générale, cette enture, lorsqu'elle concerne une poutre, est réalisée au droit de l'appui ou à proximité immédiate de ce dernier. Tant que les deux sections raccordées sont maintenues en contact par compression de l'une sur l'autre, un appui à mi-bois, simple ou oblique, peut suffire. Mais des sollicitations latérales peuvent apparaître, sous l'effet du vent par exemple, et les deux parties de la poutre peuvent se déplacer perpendiculairement à leur axe longitudinal. Les charpentiers ont donc inventé



→

82

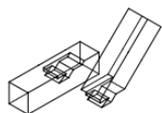
7 Graubner, Wolfram. *Assemblages du bois*, Éditions Vial. Paris, 2020.

8 *Ibid.*

9 Les Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers de la charpente et de l'ossature bois*, Lib. du Compagnonnage. Paris, 1977.

10 Guenoun, Elias. *198 assemblages du bois*, Éditions Form[e]s. Choisy-le-Roi, 2014.

tout une gamme de compléments de profils à sifflets pour maintenir les pièces en place. Une éclisse ou un tenon peuvent jouer le même rôle, et partant, toute sorte de variantes sont imaginables. Mais nos deux parties de la poutre peuvent aussi s'écarter l'une de l'autre dans le sens longitudinal. Pour éviter cette déformation, l'appui à mi-bois oblique devient un *trait de Jupiter* dont le profil s'oppose à l'éloignement des deux pièces. Ce dernier peut être complété par des coins ou des chevilles pour un meilleur contact des surfaces. Notons ici que les chevilles ne sont jamais sollicitées dans les assemblages, elles servent seulement à maintenir la pression qui assure le contact entre les deux pièces. Cet assemblage à trait de Jupiter peut aussi être muni de feuillures si la liaison est sujette à l'arrachement et cumuler les dispositifs précédents contre le glissement latéral : tenon avec ou sans épaulement, sifflet, etc. L'assemblage complexe peut être décomposé par analyse des contraintes qu'il subit dans les trois directions de l'espace. L'enture peut aussi rallonger un poteau et devra de la même manière s'opposer aux déplacements verticaux ou horizontaux sous l'effet du vent. L'architecture japonaise prend souvent le risque de descendre les poteaux en bois très près du sol, sans socle ou soubassement en pierre comme souvent en Europe. Les pieds de poteaux ayant tendance à pourrir dans cette configuration, on y observe fréquemment de belles entures à trait de Jupiter qui permettent le remplacement régulier de la partie gâtée par l'humidité, dont les profils savants s'opposent à l'arrachement autant qu'aux déplacements latéraux.



→

83

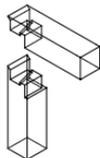
L'embrèvement est quant à lui un assemblage oblique que l'on retrouve, par exemple, entre l'arbalétrier et l'entrait sur une ferme latine. Ce

nœud présente des efforts verticaux qu'un simple appui transmettrait sans difficulté, mais aussi des poussées horizontales qu'il convient de bloquer par une entaille dans l'entrait, ménagée à bonne distance de l'about de la pièce, de telle sorte à conserver un talon suffisant pour résister au cisaillement longitudinal. Comme ce même cisaillement serait trop important pour un maigre tenon taillé dans la section de l'entrait, c'est toute la largeur de la pièce qui est alors sollicitée. Une nouvelle fois, selon les efforts considérés, cet embrèvement peut être simple, double ou triple. Il peut être complété d'un tenon avec ou sans épaulement pour garantir sa stabilité perpendiculairement au plan de la ferme, ou bien être enfourché, comme si le tenon était une partie de l'entrait plutôt qu'une partie de l'arbalétrier. Comme pour les entures, la longue liste des variantes tient autant à l'analyse de chaque sollicitation mécanique qu'aux us et coutumes des compagnons selon leur origine géographique et leur savoir-faire. On notera l'existence aujourd'hui presque disparue d'une interprétation de l'embrèvement pour réaliser des poutres adentées qui reconstituaient une forte hauteur statique à partir de deux poutres moins épaisses superposées dans le sens de la longueur. Leur profil de contact en zig et zag, avec ou sans clavette de calage bloquait le glissement des deux poutres l'une sur l'autre sous l'effet de la flexion. Ce mode constructif a récemment été redécouvert en 2019 par les ingénieurs Jacques Anglade et Nicolas Barthes pour le collège Elsa Triolet à Thaon-les-Vosges réalisé par les architectes Cartignies et Canonica¹¹. Cette expérimentation visait à proposer une alternative aux poutres en bois

11 Berthier, Stéphane. « Nouvelles richesses » in *D'Architectures* n° 284, Société d'Éditions Architecturales. Lyon, Octobre 2020. pp. 59-95.

lamellé collé pour franchir les 8 m de largeur d'une salle de classe, dans une démarche éco-responsable.

Les assemblages d'angle permettent le plus souvent de relier une pièce de charpente en flexion à son appui. L'angle formé peut se situer dans le plan vertical



→

84

comme lorsqu'une traverse rencontre un poteau, ou bien dans le plan horizontal lorsqu'une solive repose sur un sommier. À l'intersection des plans verticaux et horizontaux, on trouve des assemblages d'angles tridimensionnels, délicats à réaliser. À partir de leur version élémentaire de

tenons insérés dans une mortaise, bien adapté aux efforts dans l'axe, le dispositif se complexifie comme pour l'enture et l'embrèvement, selon les contraintes supplémentaires auxquelles il est soumis. Ainsi, les sollicitations latérales peuvent être contrées par des épaulements, ou bien l'assemblage peut présenter des tenons multiples. La mortaise peut être débouchante afin que l'extrémité du tenon soit renforcée de queues de renard qui sont des sortes de coins qui augmentent la friction contre les parois de la mortaise pour s'opposer aux efforts d'arrachement. Une autre astuce consiste à faire déboucher le tenon sur une longueur suffisante et le bloquer avec une clé. Lorsque la liaison forme l'extrémité des deux pièces, plusieurs systèmes d'enfourchement peuvent intégrer des clés ou des tenons à queue d'aronde, pour lutter contre l'ouverture de l'assemblage par arrachement. Le célèbre assemblage nippon *saobiki-dokko* réunit quatre traverses coplanaires sur un fin poteau et développe des trésors d'astuces pour assurer la continuité mécanique entre les bois. Son ordre de montage, incluant dans certains cas la translation, voire la rotation d'une des pièces assemblées, est digne d'un casse-tête dit chinois.

Nous pourrions continuer l'inventaire encore longtemps, en abordant les assemblages de plans, les entailles à mi-bois, les paumes, les moisements, les clavetages de planches, etc., mais tous procèdent de la même logique partant d'un dispositif de base assez simple, peu à peu enrichi d'amendements visant à résister aux efforts nombreux auxquels ils sont soumis. Les 198 *assemblages* de Guenoun peuvent aussi être lus comme des énigmes qu'il faut résoudre en identifiant dans leurs profils les contraintes qui les parcourent. Les différentes solutions consultables dans les monographies d'assemblages peuvent se cumuler en de multiples variantes qui donnent l'impression d'une infinité de possibilités. Dans certaines situations, considérant la perte de matière qu'occasionnent ces tailles sophistiquées, ces nœuds savants et fragiles servent plus à la démonstration de la virtuosité du charpentier qu'à la bonne résistance de l'ouvrage. Ces nombreuses tailles et auxiliaires complémentaires diminuent d'autant la section utile et conduisent souvent à un surdimensionnement général de la pièce de bois, à partir du dimensionnement du maillon faible qu'est l'assemblage. Le temps passé à leur réalisation devient rédhibitoire à mesure que l'évolution des conditions de travail tend à augmenter le coût de la main-d'œuvre en comparaison du coût de la matière.

ÂGE II: ASSEMBLAGES MÉTALLIQUES

Les clous et autres clameaux, connus de longue date, ont toujours été utilisés avec une extrême parcimonie avant la révolution industrielle. Ces pièces de forgeron étaient chères et employées à bon escient lorsque la situation le nécessitait. La fabrication industrielle des clous au XIX^e siècle a radicalement changé la donne en abaissant

leur coût à presque rien. Cette invention a notamment permis le développement du mode constructif nord-américain *balloon frame* constitué de simples planches clouées formant des châssis répétés en n travées courtes. Ce mode constructif favorisa la conquête de l'Ouest et le déplacement rapide de populations non qualifiées puisqu'une scie, un marteau et une boîte de clous suffisaient à construire des habitations certes frugales mais avec rapidité et économie¹². Pour la première fois dans l'histoire de la charpenterie, la contrainte de l'assemblage bois disparaît. Le dispositif est encore semblable aujourd'hui dans les constructions dites « à ossature légère », les clous ayant simplement été remplacés par des vis. L'évolution est similaire dans le domaine des fermettes industrielles, dont le système constitué de barres triangulées en traction ou en compression fut d'abord assemblé par goussets en contreplaqué cloués, avant d'être remplacés par des crampons à aiguilles mis en place sous presse.

Si la morphologie de l'architecture traditionnelle dépendait en grande partie des possibilités et de la qualité de ses assemblages, l'arrivée des connecteurs métalliques la libère de cette contrainte organique. L'ouvrage suisse *Construire en bois*¹⁵ dresse une liste impressionnante de produits et de possibilités de pièces métalliques, à la manière d'un catalogue de quincaillerie. On citera par ordre de complexité a) les auxiliaires des assemblages en bois, tels que clous, vis, broches et boulons, qui visent à renforcer des liaisons traditionnelles telles que des embrèvements ou des entures, ou parfois même assemblent sans taille préalable les bois comme dans les moisements boulonnés ou dans les ossatures légères vissées ; b) les différents sabots, étriers, ferrures, tôles clouées, etc., qui assurent la liaison, apparente ou

noyée à mi-bois, entre des membrures de bois coplaires; c) les nœuds mécano-soudés qui recèlent la complexité géométrique de jonctions tridimensionnelles. Dans les deux derniers cas, les savoirs empiriques du charpentier disparaissent au profit de ceux de l'ingénieur et sa science du calcul. Notons que les assemblages traditionnels peuvent aussi être renforcés avec des colles telles que les résines époxydiques qui augmentent significativement leur résistance mécanique, tandis que des pièces d'angles munies d'entures collées peuvent assurer des liaisons continues entre la poutre et le poteau en tête de portique.

L'ingénieur Jacques Anglade¹⁴ faisait remarquer que la seconde moitié du XX^e a vu les charpentes en bois se moderniser par transfert des méthodes développées dans le domaine de la construction métallique quelques décennies plus tôt. La charpenterie moderne en bois est une branche tardive de l'art de l'ingénieur et de sa science du calcul plus qu'un développement de l'art du charpentier. Les ouvrages héroïques d'après-guerre sont des squelettes de barres de bois, le plus souvent lamellé-collé (mais qui pourraient tout aussi bien être des barres d'acier), reliées par des connecteurs métalliques. D'un point de vue sémantique, cette période voit les termes architectoniques de *combles droits*, à *pan coupé*, *en étoiles*, à *base polygonales*, *impériaux*, à *bulbes*, etc., céder la

12 Marrey, Bernard. « Le bois, essences et sens », in *Histoire de bois*, Pavillon de l'Arsenal de Paris, Éditions Picard. Paris, 1994.

13 Herzog, Thomas *et al.* « Moyens et techniques d'assemblage », in *Construire en bois*, PPUR. Lausanne, 2007. pp. 106-123.

14 Berthier, Stéphane. « Les charpentes de Jacques Anglade, une contre-culture constructive », in *Criticat* n° 17. Paris, 2016. pp. 64-87.

place aux *grilles, structures plissées, coques* et autres *structures spatiales*. Les *fermes* deviennent des *portiques, arcs à deux ou trois articulations*. Les éléments de constructions comme les *arbalétriers, entrails, poinçons, blochets*, etc., s'appellent désormais *membrures, barres, panneaux ou caissons*. Les assemblages connus sous les noms *d'entures, d'embrèvements, tenon-mortaises, moisements ou clavetages* deviennent des *boulons, broches, crampons, anneaux, boitiers, éclisses, goussets ou étriers*. Nous pourrions poursuivre l'illustration de ces changements sémantiques qui donnent à lire le transfert qui s'est opéré, sans lequel le matériau bois n'aurait sans doute jamais pu rivaliser de performances avec l'acier et le béton. Il est indéniable que les connecteurs métalliques ont changé la face de la construction en bois sans doute plus encore que le développement des bois lamellé-collé en autorisant le transfert d'efforts beaucoup plus importants que ne le pouvaient les assemblages en bois. D'autres part, les pièces métalliques ne sont pas sujettes aux variations hygrométriques et au risque de jeu que l'assemblage prend lorsque le bois sèche. Dès lors qu'un nœud mécano-soudé peut relier théoriquement une infinité de barres dans une infinité de directions, la morphologie architecturale est libérée de la contrainte de l'assemblage. Ces progrès, conjugués à ceux des bois collés, ont donné la possibilité à des pionniers de l'ingénierie du bois comme Robert Lourdin, élève de Jean Prouvé au CNAM, d'explorer le registre des structures spatiales en bois comme les toitures plissées, les nappes tridimensionnelles, les résilles ou les coques, durant les années 1960. Une dizaine de ses réalisations couvrant un large spectre de structures spatiales furent présentées les 30 et 31 mai 1969 lors d'un colloque de l'IRASS au Centre d'Études Architecturales de Bruxelles, sous la direction

de Robert Le Ricolais¹⁵. Ces structures spatiales en bois, bien que réglées par des géométries encore relativement simples comme des portions de sphères ou des paraboloides hyperboliques, ont ouvert la voie à la branche « bois » de l'art de l'ingénieur dont les développements contemporains, aidés par les outils numériques, offrent maintenant profusion de formes architecturales « non standard ». Cette nouvelle génération d'édifices questionne à son tour, à sa manière et avec ses outils, le sujet de l'assemblage.

ÂGE III: ASSEMBLAGES BOIS NUMÉRIQUES

Le développement des outils de conception et de fabrication assistées par ordinateur (CFAO) dans le domaine de la construction en bois ouvre une nouvelle période d'innovation. Les promoteurs de la construction numérique avancent souvent que l'emploi d'assemblage bois présenteraient un avantage compétitif puisque qu'il est entendu que les connecteurs métalliques sont les pièces chères d'un devis de charpente. Dès lors, si les machines-outils peuvent tailler ces liaisons à même les pièces de charpente, alors la construction en bois deviendrait plus économique. L'argument est un peu spéculatif dans la mesure où c'est l'assemblage qui vaut cher puisqu'il est la partie la plus ouvragée d'une charpente, peu importe qu'il soit fait de métal ou de bois. L'économie réalisée sur les connecteurs métalliques se paie d'un façonnage supplémentaire sur robot de taille. Si ces outils sont capables de réaliser la plupart des assemblages

15 Lourdin, Robert. *Structures spatiales en bois*, Cahiers du Centre d'Etudes Architecturales. Bruxelles, 1969.

traditionnels avec un excellent niveau de précision, il n'est pas certain qu'ils soient plus compétitifs. D'autre part, les outils numériques ne changent pas les qualités mécaniques des assemblages bois toujours inférieures à celles des connecteurs métalliques. Toutefois, il est aujourd'hui de plus en plus fréquent de voir des assemblages à tenons-mortaises ou en queue d'aronde remplacer les boîtiers métalliques assez laids, dans les parties de l'ouvrage où la charpente est visible, ou pour le dire autrement, quand un argument architectural le justifie. Dans l'œil de l'observateur, ces liaisons sont peut-être un peu moins belles que les assemblages manuels, sans doute pour les raisons anthropologiques avancées plus haut. Nous n'y admirons plus le talent de l'artisan qui atteint la perfection de son art mais constatons seulement la régularité de la machine.

Dans un autre registre, les travaux de WikiHouse¹⁶ redécouvrent les assemblages de planches clavetées inventées par Philibert De L'Orme au XVI^e siècle. Ce projet collaboratif développé dans les années 2010-2016 propose un modèle de maison conçue comme un kit à monter soi-même à partir d'éléments découpés dans des panneaux de contreplaqué de 18 mm, sur une fraiseuse numérique. Leur charpente est constituée de châssis répétitifs, sur un entraxe d'environ 60 cm, semblable au *balloon frame* nord-américain. Chaque châssis est constitué de deux épaisseurs de contreplaqué, assemblées à pas décalé par des entures à trait de Jupiter. Les traverses horizontales qui liaisonnent ces châssis entre eux sont simplement clavetés de la même manière que les liernes de De L'Orme reliait ses arcs de planches dédoublées¹⁷. Ce mode constructif permet de construire sa maison sans clou ni colle ni vis, ni autre outil qu'un

maillet. Il ouvre une nouvelle voie pour l'auto-construction, même si sa pertinence économique n'est pas encore démontrée, compte tenu des coûts de la matière première utilisée et de la découpe des panneaux sur une fraiseuse numérique.

Mais plus loin que la simple copie-machine des assemblages traditionnels manuels, ces outils de CFAO mènent aussi à des expressions architecturales innovantes comme l'immeuble tertiaire Tamedia réalisé à Zurich en 2013 par l'architecte japonais Shigeru Ban. L'écriture très anatomique de ce squelette de bois rend les différentes articulations lisibles et évoque les heures de gloire du mouvement britannique high-tech des années 1980. Ici, l'architecture de bois se modernise encore par transfert de modèles initialement développés dans le domaine de la charpente métallique. En revanche, les travaux conduit par Yves Weinand au sein de l'Ibois, notamment sur les structures plissées, reposent quant à eux sur un transfert à l'échelle de l'architecture des assemblages de plans connus dans le domaine de la menuiserie. Les différentes charpentes-origami développées par ce laboratoire se sont peu à peu libérées des assemblages de plaques par cornières métalliques¹⁸ pour tailler directement dans les panneaux de CLT des assemblages à queue d'aronde¹⁹. La liaison n'est plus un tiers-élément à la jonction de deux plaques mais une caractéristique morphologique de leurs

16 Berthier, Stéphane. « WikiHouse ou la troisième révolution industrielle à l'épreuve du réel » *Criticat* n° 18. Paris, 2016. pp. 64-87.

17 Les Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers de la charpente et de l'ossature bois*, Lib. du Compagnonnage. Paris, 1977.

18 Berthier, Stéphane. « Le nouvel âge du numérique », in *Les Cahiers de l'Ibois* n°1, EPFL Press. Lausanne, 2020. pp. 39-55.

19 *Ibid.*

rives. Ces assemblages présentent l'avantage de transférer les efforts sur des lignes plutôt que de les concentrer sur des nœuds. La faiblesse mécanique du matériau est alors compensée par la répartition de la contrainte sur tout le linéaire de la pièce.

Ces outils numériques offrent aussi la possibilité de réaliser des assemblages sur des bois tordus, non transformés, comme le montre la charpente expérimentale réalisée par l'AA School à Hooke Park²⁰ en 2016. Cette arche de bois est une structure triangulée faite de branches en forme de fourches. Ces dernières ont été choisies et repérées avec soin dans la forêt, scannées puis découpées avant d'être assemblées entre elles par des dispositifs de tenons-mortaises coniques. Une approche similaire est observable à l'Ibois, qui mène actuellement une recherche sur les structures réciproques constituées de bois ronds non transformés, assemblés par un jeu d'entailles à quart de bois complétées par un faux tenon. Ces travaux nous indiquent la nouvelle puissance des outils de captation numérique des formes naturelles pour les recombinaison selon leurs propriétés morphologiques dans des architectures tout à la fois archaïques et novatrices. Elles nous font imaginer une construction bois qui ferait l'économie des longues, onéreuses et polluantes transformations industrielles du matériau pour trouver le chemin le plus court de l'arbre à l'édifice, en exploitant des bois aujourd'hui impropres à la construction car trop irréguliers. A l'instar des bois tordus qu'utilise la charpenterie japonaise traditionnelle pour réaliser ses poutres maitresses, nous pouvons désormais envisager que la forme architecturale devienne une co-production de la nature et de l'architecte. Notons que la moitié des nœuds de la structure

triangulée d'Hooke Park sont simplement les nœuds naturels des branches fourchues, aux caractéristiques mécaniques inimitables. Et si seul l'arbre savait réaliser un assemblage parfait ?

20 Maniaque, Caroline. « Peut-on inventer en apprenant ? » in *D'Architectures* n° 250, Société d'Éditions Architecturales. Lyon, Déc. 2016-Jan. 2017. pp. 69-107.

STRUCTURES DYNAMIQUES

Mario
Rinke

Le bois s'est de tout temps prêté à de multiples usages, avant tout en raison de sa disponibilité immédiate dans de nombreuses régions. Cela en a fait un matériau de construction si fondamental, qu'en maints endroits, le vocable qui le désigne dans la langue courante équivaut plus ou moins à cette notion de « matériau ». En l'absence de terme pour « substance » en grec ancien, Aristote se serait rabattu sur le mot « bois » (ξύλο). Et la « *materia* » latine serait dès lors une variante romaine de cette désignation, comme l'étaye encore l'appellation « *madera* » pour nommer le bois en espagnol. Dans la tradition philosophique établie par Aristote, cette « substance » est une correspondance amorphe d'une forme idéale sous-jacente, éternelle et invariable¹. L'image, voire la forme concrète, d'une table par exemple est ainsi constante, tandis que le matériau à disposition vient « remplir » celle-ci. Le menuisier utilise ses connaissances et son expérience du matériau pour le transposer, dans ses parties et son tout, dans cette forme. Il ne s'agit là que d'un aperçu succinct des réflexions à la base de l'hylémorphisme, mais il illustre le lien étymologique entre notre représentation abstraite d'une matière et le modèle de matériau originel correspondant qu'est le bois².

Or, ce n'est pas seulement le lien fondamental entre la matière et la forme des objets qui est intimement associé au bois. La formation de structures plus complexes y est aussi étroitement apparentée. Dans la construction, la poutre est également un synonyme du bois : « un long morceau de bois lourd, souvent équarri, convenant à une utilisation en construction³ ». De même que la fibre, constitutive de cette poutre, est à la base des modèles mécaniques de toutes les poutres, afin d'identifier quelle unité minimale de substance est soumise

à compression ou traction par un état de charge. Mais la poutre comme unité de construction – dans le sens où le tronc d’arbre est en principe lui-même finalement disponible pour le bâti – constitue encore la transition entre la formation d’éléments particuliers (pied de table ou solive) et le bâti à partir d’éléments (table ou maison). Traditionnellement, l’élément en bois était façonné au moyen de multiples outils pour son usage à petite échelle, tandis que dans le gros-œuvre, les barres de bois linéaires étaient assemblées en treillis pour édifier des ponts, des maisons ou des machines. La forme et l’ouvrabilité des éléments déterminaient très directement les assemblages possibles et la conception de ces derniers, avec les points de liaison nécessaires, dictait le façonnage des éléments. Bien sûr, cette relation complémentaire se limite ici au seul point de vue matériel, bien qu’elle ne puisse en fait jamais l’être. Le simple lien constructif entre élément et bâti a abouti à des configurations complètement différentes selon l’époque et le lieu, car il ne peut y avoir de formes exclusivement conditionnées par le matériau. D’une part, les formes architecturées résultent toujours de processus, soit de l’implication d’humains et de machines, qui présupposent donc des savoir-faire et des connaissances pratiques⁴. D’autre part, la représentation

1 Flusser a souvent évoqué ces racines terminologiques et conceptuelles. Voir p. ex. Flusser, Vilém. *Form und Material, Vom Stand der Dinge*, Steidl. Göttingen, 1993. pp. 105-112.

2 Moravanszky, Akos. « Sur la relation entre matière et forme et la construction culturelle des matériaux », *Metamorphism*, Birkhäuser. Bâle, 2017.

3 Merriam-Webster. (n.d.). Beam. In Merriam-Webster.com dictionary. Consulté le 28 Janvier 2022.

4 Zwerger, Klaus. *Wood and Wood Joints Building Traditions of Europe, Japan and China*, 3^e édition, Birkhäuser. Bâle, 2015.

formelle du bâti repose sur des abstractions fonctionnelles préalables ou des connaissances théoriques des limites physiques ou géométriques.

RÉGULARITÉS INHÉRENTES AUX STRUCTURES PORTEUSES

Le bois a de tout temps été un matériau de construction largement disponible, facilement transportable et aisément façonnable. La liaison et l'imbrication orientée de barres a joué un rôle clé dans toutes les cultures employant le bois, car c'est la seule manière d'ériger valablement des structures d'une envergure bien supérieure à la taille d'un élément isolé. Malgré la diversité des cultures du bâti, on retrouve une certaine régularité dans toutes les architectures en bois. Il y a ainsi des éléments principaux continus qui participent le plus souvent de manière spécifique à la reprise des charges. Entre ceux-ci se déploient d'autres éléments, souvent plus petits, qui y sont encastés, comme on le voit dans les cultures occidentales, ou qui les traversent, comme on peut l'observer dans les modes de construction chinois. Avec l'insertion d'éléments supplémentaires, on aboutit à un ensemble dont certaines pièces sont porteuses et où d'autres maintiennent ces dernières fermement à leur place, avec des éléments complémentaires qui protègent le bois des intempéries ou servent au fonctionnement de l'ensemble.

Pour diverses raisons, les ponts de bois ont toujours constitué des ouvrages spécialement exigeants. Ils devaient souvent supporter des charges particulièrement lourdes, de surcroît en mouvement, et franchir de larges fleuves. Et ils étaient surtout exposés aux intempéries, ainsi qu'aux crues et au gel ou à de fortes tempêtes.

Avant que les sciences appliquées à la construction ne la réorganisent en de nombreuses disciplines et ne plaquent leurs fondements théoriques sur les formes bâties issues de traditions séculaires, les décisions concernant la mise en œuvre des moyens et des matériaux, ainsi que le déroulement d'un chantier sont, en fonction de l'ouvrage à réaliser, entièrement du ressort des maîtres d'œuvre ou maîtres artisans⁵. Dans la charpenterie de l'époque baroque, lorsque la construction en bois atteint son apogée sous ses formes les plus diversifiées en Occident, il va de soi que le principe guidant les maîtres charpentiers est de s'appuyer sur leur propre expérience ou celle de leur corporation et sur la démarche intuitive. Un principe typique des ponts d'envergure est celui de la démultiplication. Par-dessus l'articulation de la structure et au-delà des multiples niveaux hiérarchiques qui la constituent, les bâtisseurs ont souvent ajouté des éléments porteurs supplémentaires, voire une seconde structure porteuse parallèle au sein du même ouvrage, afin de conférer à l'ensemble une résistance accrue⁶.

Les savoir-faire traditionnels ont aussi été transposés dans de nouveaux environnements culturels, au gré des migrations des architectes et des ingénieurs, mais le plus souvent des artisans. Ainsi, le monde de la construction américain du XIX^e siècle voit la reprise et le développement de quelques vieux modes de bâti européens. Dans ce contexte, le manque de spécialistes formés

5 Picon, Antoine. « The first steps of construction in iron. Problems posed by the introduction of a new construction material » in Mario Rinke & Joseph Schwartz, *Before Steel: The introduction of structural iron and its consequences*, Éditions Sulgen. Niggli, 2010.

6 Peters, Tom F. *Building the Nineteenth Century*, MIT Press. Cambridge, 1996.

et l'éloignement des chantiers se traduit par un abandon de beaucoup des formes constructives très différenciées issues de l'artisanat. La forme des barres se voit unifiée et leurs assemblages simplifiés. Comme beaucoup de très grands ponts sont alors érigés, qui doivent satisfaire aux exigences particulières du réseau ferroviaire émergent ou à celles d'autres types de trafic lourd, les ouvrages doivent être spécifiquement conçus et recevoir des équipements complémentaires. Or, contrairement au domaine européen de la construction fortement marqué par les approches théoriques, on ne procède pas à la modification des modèles de structure courants ou de la forme d'ensemble, mais typiquement à la superposition de structures porteuses entières⁷.

Comme l'illustre l'exemple du Chain Bridge de 1847, le treillis originel en doubles diagonales dans chaque plan n'est pas incontestablement à même de surmonter les charges, d'où l'ajout d'une arche de chaque côté de la charpente. Dans son brevet de 1846, William Howe (1803-1852) explique que pour les membrures verticales, il faut idéalement choisir des tirants d'acier. Dans la mesure où ceux-ci sont encore précontraints par des cales, les diagonales comprimées peuvent être activées dans chaque plan



→

88

dans les deux directions. Au surplus, on y insère l'arche, qui est régulièrement rattachée au treillis aux points de contact afin d'interagir avec ce dernier. Le système porteur en soi ne s'en trouve pas modifié, mais il reçoit de multiples superpositions. Avec celles-ci, outre le renforcement de la capacité porteuse, les bâtisseurs du XVIII^e comme du XIX^e siècle visaient encore un autre effet: la redondance. Grâce à la démultiplication structurale, il est plus simple de remplacer des



→

89

éléments. Et ce dispositif constructif interne pour l'entretien et la réfection en continu de l'ensemble de l'ouvrage était en lui-même multiple, car à côté des porteurs remplaçables, il y avait des revêtements que l'on renouvelait au bout de peu d'années comme pièces d'usure.

NOUVEAUX MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION INDUSTRIELS

Au cours du XIX^e siècle, le fer – d'abord sous forme de fonte, puis aussi de fer forgé – s'impose de plus en plus comme matériau de construction pour les ouvrages d'art. Comparé à ses homologues naturels que sont le bois et la pierre, le fer, bien plus résistant, représente une nouvelle forme de performance qui, vu l'usinage facile de grands éléments, devient dès lors une option de choix pour les nombreux projets nouveaux déployant de grandes portées. Le processus de fabrication implique nécessairement un moulage artificiel, vu que la masse de fer en fusion n'a pas de forme propre. Le concept du moulage est d'abord motivé par la contrainte économique, car le fer est très onéreux en comparaison des autres matériaux de construction disponibles. La mise en œuvre de ce procédé artificiel est une totale nouveauté, raison pour laquelle il s'inspire dans un premier temps des matériaux et des modes de construction qu'il va par la suite remplacer⁸. Dans ce sens, il est en premier lieu un succédané, un substitut plus performant du bois.

7 Rinke, Mario. Kotnik, Toni. « The changing concept of truss design caused by the influence of science », from the proceedings of the First International Conference on Structures and Architecture (Guimaraes, Portugal), Taylor & Francis. London, 2010.

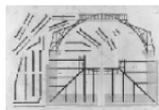
8 Giedion, Sigfried. *Bauen in Frankreich Eisen Eisenbeton*, Klinkhardt & Biermann. Berlin, 2000. p. 19.

Bien que les bases théoriques de la construction moderne s'établissent à peu près en même temps que la diffusion du fer et que l'on assiste en l'occurrence à des avancées complémentaires, les percées théoriques ne peuvent exercer qu'une influence marginale sur les pratiques elles-mêmes. On trouve certes des poutres et des appuis de forme spécifique qui reflètent les nouveaux acquis en matière de sollicitations, mais la théorie émergente reste muette sur la façon dont ils sont assemblés. C'est ainsi qu'à ses débuts, la construction métallique se calque délibérément sur les deux niveaux de mise en œuvre du bois : au niveau primaire, sur l'articulation du bâti et dans le détail, sur la conception des assemblages.

Un des exemples les plus parlants de cette analogie est le dit Iron Bridge, un ouvrage entièrement en fonte réalisé en 1779. Les poutrelles redessinent certes le contour d'une arche en pierre, mais sont au fond de grands éléments de cadre joints par des assemblages de charpenterie.



→ 90



→ 91

On y trouve des queues d'aronde, ainsi que des clavettes et des pinces sur des barres qui, vu la grande résistance du nouveau matériau, sont beaucoup plus petites que des poutres en bois. De même, les premières charpentes de couverture métalliques émulent les modèles courants de leurs ancêtres en bois. Les étroites barres non profilées constituant le comble de la bourse de Paris, achevée par Alexandre-Théodore Brongniart en 1826, forment les mêmes traverses chevauchantes. En raison de la compacité tout à fait différente en regard de la configuration perforée, les entailles entraînent en l'occurrence des déformations des barres elles-mêmes. Fourches, embrèvements ou entures, les assemblages demeurent

typiquement, tout comme pour le bois, sur l'élément de construction lui-même. C'est là encore une des caractéristiques de la construction métallique, avant que les ouvrages classiques en acier n'amènent la standardisation des éléments et la conception des assemblages comme des composants en soi.

Les structures en cadres des bâtiments ordinaires se voient également directement traduites en fer, avec des entrepôts et usines tôt réalisés dans le nouveau matériau. Le métal en barres remplace les pièces de bois selon une articulation identique: des poteaux en fer surmontés de poutres du même matériau portent des voûtes en maçonnerie, souvent même avec l'appui de petits porteurs métalliques secondaires. Cette hiérarchie fondamentale des pièces de bois, avec ses particularités tectoniques est ici reprise en toute analogie. Ainsi, dans ses configurations et la liaison des éléments, l'avènement du fer assoit d'abord une continuité avec le bâti en bois. Le fer y incarne immédiatement des techniques de construction allant de pair avec la conception en bois, qu'il remplace comme nouveau matériau.

Avec l'arrivée du béton armé, qui dès la fin du XIX^e siècle devient une option d'importance croissante face à l'acier et au bois, cette organisation structurale demeure en partie la règle. À la place des porteurs secondaires ou des voûtes en maçonnerie, des dalles en béton sont mises en œuvre, d'abord non armées, puis systématiquement ferrillées⁹. Les poutres sous-jacentes étaient



→

92

9 Rinke, Mario. «Sculptured forms, concealed forces» in: Daniel Mettler & Daniel Studer, *Made of Concrete*, Birkhäuser. Bâle, 2018.

dans un premier temps encore des porteurs métalliques, ce qui correspond au fond aux planchers traditionnels en bois, dont la poutraison avait aussi été reprise dans les ossatures métalliques. Les porteurs en acier et les éléments de béton étaient souvent employés séparément, avant tout pour accélérer le déroulement des travaux grâce à la pré-confection. À des fins de protection incendie, ces porteurs en acier ont ensuite au moins en partie été poussés dans la dalle en béton¹⁰. Cette combinaison d'abord pragmatique de poutres, appuis et dalles de différents matériaux a peu après été transposée pour la première fois en un système cohésif par François Hennebique (1842-1921)¹¹ : son brevet de 1892 décrit des poutres et des dalles en béton reliées de manière continue pour aboutir à une ossature monolithique¹². Il se réfère pourtant, comme beaucoup d'autres promoteurs de systèmes en béton armé, à la « substitution des éléments purement métalliques dans la construction »¹³ ; porteurs et dalles demeurent formellement ancrés dans l'intrication des matériaux.

Dans l'idéal de l'ossature monolithique, où tous les éléments se fondent rigidement les uns dans les autres, on a le concept du moule « rempli » dans son sens le plus littéral. À toutes les échelles, la forme est définie et mise en place comme typologie établie ; il ne reste plus qu'à la matérialiser. Avec le monolithe, il se passe toutefois encore autre chose. Du fait que les parties convergent et que les poutres disparaissent dans les dalles, l'ossature est fixée avec la fonctionnalité de ses éléments. Cette rigidité ne prévoit pas d'adaptations, de renforcements ou de modifications structurelles. Celles-ci doivent intervenir de manière chirurgicale, plutôt qu'organique. La rigidité et la robustesse de l'ossature définie sont un démenti tacite à sa durabilité adaptative.

LE BOIS INDUSTRIEL

À peu près en même temps que la percée internationale du système Hennebique, le bois connaît sa propre avancée vers l'industrialisation. Ce n'est pas un hasard si le développement majeur du bois industriel est issu de la menuiserie artisanale, qui a depuis toujours habilement assemblé de petites pièces. Le maître menuisier Otto Hetzer de Weimar était avant tout actif dans l'aménagement intérieur, où il utilisait des techniques de construction raffinées qui ont abouti à de nombreux brevets. Mais son « élément de bois cintré » breveté en 1906 (DRP 197773) s'appliquait à des charpentes et marqua le début d'une entreprise de construction florissante et, bien au-delà, une disruption dans l'emploi du bois en général ainsi que l'essor d'un mode de bâti industriel tout à fait distinct, avec l'avènement du bois lamellé-collé. Bien que la construction recoure dès le XIX^e siècle à des lamelles de bois collées¹⁴, la mise en œuvre à large échelle ne commence vraiment qu'alors. Vu leur nature artificielle, les éléments de construction, qui dérivent d'un treillis de charpente ordinaire fait de poutres et d'appuis, peuvent théoriquement adopter n'importe quelle section, autrement dit

- 10 Newby, Frank. *Early Reinforced Concrete*, Routledge. London, 2001.
- 11 Delhumeau, Gwenaël. « Le béton en représentation » in *La mémoire photographique de l'entreprise Hennebique, 1890-1930*, Fernand Hazan Editeur. Paris, 1997.
Delhumeau, Gwenaël. *L'invention du béton armé Hennebique 1890-1914*, Éditions Norma. Paris, 1999.
- 12 Hennebique, François. *Troisième congrès du Béton de Ciment Armé*. Le Béton Armé 1 (11). Paris, 1899. pp. 1-5.
- 13 *Ibid.*
- 14 Booth, Geoffrey L. « Laminated Timber Arch Railway Bridges in England and Scotland », *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 44, Maney Publishing. London, 1972. pp. 1-21.

être façonnés selon une quelconque superposition des lamelles. C'est précisément dans cette libre attribution de la forme que réside la nouveauté dans l'approche constructive de Hetzer. L'artisan proposait un nouveau matériau cintré et compact, qui nécessitait bien moins une forme de bâti propre que le bois dont il était constitué¹⁵. Le concept du cintre en faisait d'emblée un élément intégrant plusieurs pièces d'une charpente traditionnelle « moins d'obstruction à la pression de la neige et du vent et permettant un espace intérieur voûté clair et utile »¹⁶.

Cette nouvelle technologie rencontre son plus grand succès là où les grosses pièces de bois ou l'acier sont rares et chers. Ainsi, la Première Guerre mondiale entraîne un bond de la construction moderne en bois. Face aux pénuries de charbon et d'acier, le bois s'impose en Allemagne comme substitut et nouveau matériau de construction industriel également destiné à des ouvrages de grande portée¹⁷. Outre la substitution de ressources pratiquement indisponibles, un principe d'efficacité s'impose dans leur emploi avec l'exigence d'« économiser le bois de toutes les façons possibles [...] et d'atteindre les niveaux de sécurité prescrits en utilisant un minimum de matériau »¹⁸. Avec des lamelles de bois dont l'exécution et la disposition précises sont subordonnées à un modèle de construction prévalant, on reproduit les formes que l'industrie et la science avaient développées au cours du XIX^e siècle pour le moulage du fer. Ce sont des réponses constructives schématisées pour une capacité mécanique à chaque fois déterminée. Les grands éléments caractéristiquement profilés en I qui en résultent émulent la logique de l'architecture en fer et sont donc dans une certaine mesure des copies de celle-ci (fig. 4). En analogie directe avec leurs devancières métalliques, les structures

porteuses en bois en reprennent même en partie les nœuds, lesquels représentent un substitut de goussets en tôle: « Dans une perspective économique, on ne saurait toutefois recommander les goussets, sans compter que leur peinture doit souvent être renouvelée. Les équerres d'assemblage en contreplaqué sont plus indiquées¹⁹. » Les ouvrages en bois ainsi reproduits à tous les niveaux de détail ne sont, de ce point de vue, pas transposés dans un nouveau matériau et une nouvelle logique bâtie, mais affichent l'empreinte directe de la forme technique. Représentation formelle et bâti se sont ici très largement séparés: « Le façonnage du bois est simple, la conception des ouvrages à bien plaire²⁰. »

Pour le bois, c'est avant tout le changement des modes de construction qui est ici décisif: le déplacement de l'attention des bâtisseurs de la configuration des éléments



→

93

au matériau configuré est un signe distinctif de la construction moderne où, couplées aux contraintes économiques, les recherches de l'industrie et de la science ont motivé quelques nouveaux développements et des disruptions.

- 15 Rinke, Mario. « The Form as an imprint of an idea », Mario Rinke & Florian Hauswirth (eds.) *Formful Wood. Explorative Furniture*, Jovis. Berlin, 2019. p. 179.
- 16 UK Patent n° 20684, Otto Hetzer, « Improvements in Composite Wooden Structural Elements, ». Accepté le 11 Avril 1907.
- 17 Rinke, Mario. « Konstruktive Metamorphosen. Holz als immerwährendes Surrogat », in *Holz: Stoff oder Form*, Ders. & Joseph Schwartz, Éditions Niggli. Sulgen, 2014. pp. 263-277.
- 18 Kersten, Carl. *Freitragende Holzbauten. Ein Lehrbuch für Schule und Praxis*, 2^e édition, Springer. Berlin, 1926. p. 1.
- 19 *Ibid.*, p. 71.
- 20 *Ibid.*, p. 2.

LES TECHNIQUES AUJOURD'HUI APPLIQUÉES AU BOIS

À côté des autres matériaux de construction industriels et outre ses atouts écologiques, le bois est avant tout une option pratique dont l'ouvrabilité permet presque toutes les formes et configurations. Ce n'est pas un hasard si aujourd'hui l'architecture numérisée avec ses structures paramétrisées se rabat aussi souvent sur le bois. C'est un matériau de projet qui reçoit ses formes et sa destination via l'interface numérique. Ce sont exactement là les deux extrêmes hautement technicisés de la construction en bois actuelle, qui grâce à une pré-confection précise et complexe vise un montage simple et rapide : le lamellé-collé industriel est de toute manière tributaire d'une certaine préfabrication et se voit aujourd'hui cintré en usine selon la géométrie désirée ou façonné en profils spécifiques, éventuellement variables ; l'usinage au moyen de fraiseuses pilotées par ordinateur crée la géométrie voulue pour l'emplacement exact où la pièce sera mise en œuvre. Et de l'autre côté, les panneaux modulaires usinés en série, pré-isolés, pourvus de fenêtres et prééquipés en technologies d'alimentation relèguent la complexité des installations du bâtiment dans des paquetages inaccessibles²¹. C'est pourtant justement là qu'il y aurait lieu de revenir à de nombreuses leçons utiles, avant tout tirées de la construction en acier, avec laquelle le bois moderne est étroitement apparenté. L'acier a fondamentalement modifié la construction, car il a toujours été conçu de façon modulaire et la précision mécanique de ses assemblages a mis le montage au premier plan – et donc également l'éventuel démontage. L'ossature hiérarchisée demeurerait aussi intrinsèquement mobile, car les éléments étaient

facilement remplaçables. Cela était d'autant plus vrai lorsque la configuration visait une systématique et une uniformité maximale des éléments. Cette rigidité des éléments ménageait toujours aussi une porosité de la structure, une transparence qui assuraient une polysémie, tant à l'espace intermédiaire qu'à ses éléments constitutifs. Si, pour les architectures en bois à venir et l'affirmation de leur modernité, on s'attachait moins à l'effet produit par une forme spéciale qu'à sa (dé)constructibilité grâce à une configuration réfléchie des éléments et des assemblages, le bois aurait alors un plus grand avenir. À l'instar des exemples traditionnels les plus aboutis, il permettrait des bâtis dynamiques qui resteraient toujours modulables. Dans la perspective d'une circularité réellement intelligente, d'anciens et de nouveaux principes tectoniques ne devraient pas seulement assurer une belle longévité à l'ouvrage en bois existant, mais aussi à ses éléments, sur place ou ailleurs.

21 Rinke, Mario. *Offene Holzpakete*, Touch Wood, Lars Müller Publishers. Zurich, 2022.

L'UTILISATION
DU BOIS BRUT
IRRÉGULIER
À USAGE
STRUCTUREL

Sandra
Vuilleumier

Le bois fait partie intégrante de l'histoire humaine. Ce matériau versatile a servi à nous réchauffer, nous nourrir, nous protéger, à concevoir des moyens de transport les plus divers – la liste est longue. La révolution industrielle marque un tournant peut-être irrévocable dans notre rapport au bois et aux forêts. La population migre vers les villes. Nous commençons à tirer notre chaleur du charbon, du pétrole, ou du gaz. La construction se concentre sur la brique, puis le ciment, ainsi que, dans une moindre mesure, les produits de bois



transformé. Quant au transport, que ce soit les trains, les navires, et plus tard les automobiles, ils se tournent vers le métal ou le plastique. Si le bois reste utilisé comme source d'énergie, ou pour construire des échafaudages, notamment ceux de la tour Eiffel, il est relégué à un rôle secondaire. Les forêts perdent de leur importance et sont souvent soit surexploitées, menant à de la déforestation, soit sous-exploitées car elles ne sont plus la source de richesse d'antan. En ce moment, dû en partie à une conscience écologique grandissante, le bois gagne en importance au cœur de la conception architecturale et de la construction, épaulé par des recherches innovantes telles celles menées par Petras Vestartas dans sa thèse dirigée par le Prof. Yves Weinand, dont ce texte s'inspire.

Le bois brut a été utilisé comme élément porteur de structures au moins depuis l'ère Néolithique¹. De nombreuses cultures ont exploité les avantages structurels naturels de cet élément avec une impressionnante ingénuité. Leurs constructions, d'une riche diversité, vont des maisons longues iroquoises avec leurs cadres actifs, aux huttes Tonga ou Samoa de type *grid shell* avec leurs toits de chaume² en passant par les églises de bois rond de la

Russie et de l'Europe préindustrielle, ou les ponts chinois à arches composés de systèmes réciproques datant de la dynastie Song tels le Quighua Rainbow Bridge. Des ingénieurs dans le nord-ouest des États-Unis firent également grand usage de la ressource naturelle abondante et peu onéreuse que constituait le bois des grandes forêts qui recouvraient le territoire. Ils bâtirent notamment des fondations et des éléments porteurs, érigeant ainsi rapidement de nombreux ponts et viaducs de taille impressionnante.

De manière relativement contre-intuitive, l'utilisation de bois brut irrégulier dans les structures en bois a un double précédent historique. On le retrouve dans la construction d'ossatures en bois pour les bateaux, ainsi que dans le travail des joints utilisés pour l'assemblage de granges. Les constructeurs de navires sélectionnaient des arbres appropriés pour le façonnage d'éléments non linéaires en se basant sur leur forme géométrique ou l'orientation des fibres du bois. En alignant le grain des branches qui poussaient sous l'effet de certaines forces extérieures spécifiques, ils arrivaient à construire des navires plus résistants. Historiquement, la construction de navires et de bâtiments est étroitement liée; typiquement, la coupole des églises est souvent moulée sur le modèle d'une coque de navire. Elles utilisent des méthodes de connexion bois-bois et explorent la topologie des arbres afin d'ériger des voûtes faisant usage de joints emblématiques des techniques traditionnelles de construction de navires.

1 Coudart, Anick. *The Reconstruction of the Danubian Neolithic House and the Scientific Importance of Architectural Studies*, EXARC. Amsterdam, 2013, pp. 5-9.

2 Barnes, Shawn. Green, Roger. « From Tongan meeting house to Samoan chapel: A recent Tongan origin for the Samoan tale of Play ». *The Journal of Pacific History*, 43:1. 2008. pp. 23-49.

Le développement de connecteurs peu onéreux et la mécanisation de l'usinage du bois ont mené à une industrie presque exclusivement concentrée sur l'utilisation de bois droit standardisé. Alors que les applications commerciales se concentrent sur des systèmes préfabriqués composés d'éléments linéaires simples, nous observons maintenant un intérêt émergent pour un nouveau type de structures qui adoptent les qualités inhérentes du bois tordu ou fourchu. Un exemple frappant de ces techniques est le revêtement de l'Ashes Cabin, dans lequel du bois naturel irrégulier a été utilisé pour créer un parement à partir de planches pliées. Des éléments de bois courbe ont été assemblés stratégiquement afin de créer des fenêtres, encadrements, auvents, poignées de porte et entrées³. Dans ce projet, des planches droites ainsi que des éléments courbes ont été employés avec un grand succès esthétique. De plus, le gaspillage de matière a été évité en utilisant toute la section des arbres irréguliers.

Auparavant, il était d'usage de concevoir une structure, puis de trouver ou créer des pièces en bois afin de la construire. Le scannage au laser et la génération de modèles en CAO (conception assistée par ordinateur) donne la possibilité d'identifier des éléments constructifs, puis de générer une structure unique qui exploiterait pleinement leurs qualités intrinsèques. L'identification d'un groupe d'arbres avec une courbure naturelle pourrait mener à une variante de la cabane de rondins



→

97

traditionnelle employant des éléments courbes. Un système mural libre dont la forme s'adapte à celle du matériau pourrait ainsi être généré comme c'est le cas pour la Biomass Boiler House—Design and Make, AA⁴.

Les méthodes de conception paramétrique comme celles développées à l'Ibois offrent des solutions de génération automatique de joints pour le bois brut irrégulier. Ceci permet la conception de structures en bois innovantes. En revanche, cette technologie doit réus-



→ **98** s'arriver à s'échapper de son application marginale dans des projets de laboratoire de recherche pour s'intégrer dans l'écosystème de l'industrie du bois. Sinon, peu importe son potentiel, elle n'arrivera jamais à avoir un impact réel. Il doit y avoir un dialogue ouvert entre le secteur forestier suisse, les scieries de moyenne et petite taille, les architectes, et autres intervenants de l'industrie du bois. Nous vivons dans une ère qui a connu une globalisation sans précédent. Nous sommes accoutumés à être entourés d'éléments ayant traversé le globe. Notre béton est constitué de sable importé du monde entier. De même, une grande partie de notre bois de construction provient d'ailleurs, ce qui est d'autant plus regrettable qu'une grande partie des forêts suisses sont sous-exploitées.

Bien que la standardisation possède des avantages certains, il serait possible d'utiliser les caractéristiques naturelles du bois brut courbe, fourchu ou conique pour concevoir des structures uniques, de forme libre, qui exploitent pleinement ses qualités intrinsèques. Un autre défi est qu'actuellement, les constructions en bois brut sont souvent conçues avec des connecteurs additionnels tels des goujons en bois ou en métal, des vis, clous, fils, ou plaques de métal. Il serait intéressant, sous certaines

3 Vestartas, Petras. *Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver*, EPFL thesis 8928. Lausanne, 2021. p. 49, fig. 3.17.

4 *Ibid.*, p. 17.

conditions, de se détourner de ces systèmes constructifs pour donner priorité aux joints bois-bois. Ceci pourrait diminuer le coût de construction tout en simplifiant le processus, réduirait l'empreinte carbone par l'emploi de moins de matériaux et d'éléments, et rendrait la structure plus facile à recycler le moment venu. Alors que les connecteurs mécaniques sont devenus un standard dans l'industrie du bois en raison de leur facilité d'utilisation et de leur fiabilité, la recherche en fabrication robotique explore l'élaboration de systèmes constructifs de joints bois-bois inspirés de techniques de connexion traditionnelles.

En revanche, toute une série de défis, qui ne sont pas purement d'ordre technologique, devraient d'abord être résolus. La foresterie est, avant tout, un écosystème enraciné dans la tradition. Dans la commune de Rossinière, les travailleurs forestiers s'appuient encore sur les phases de la lune et la période de l'année pour décider quand procéder à la coupe du bois. Ils savent que ceci influencera ses qualités intrinsèques, par exemple en déterminant combien de sève sera présente dans le tronc, ou sa rigidité. Dans les régions montagneuses telles que Rossinière, de nombreuses familles ont encore des racines profondément enfouies les rattachant à leur terre d'origine. Ceci force la question de savoir s'il pourrait y avoir un dialogue entre nouvelles méthodologies de conception architecturale, employant des technologies de pointe, et le secteur forestier ? Comment les artisans feront-ils face à leur remplacement par des outillages robotiques et informatiques ? À long terme, quels effets pourrait avoir ce transfert technologique sur leur mode de vie ? De nos jours, les individus qui choisissent de devenir artisans ne le font pas par manque de choix, mais généralement

par intérêt pour la matière qu'ils travaillent. Une solution possible serait d'employer des méthodes de fabrication manuelles dirigées par des outils digitaux, mais ceci ne résoudrait pas le problème du temps de travail long, ni celui de l'erreur humaine.



→

99

Le secteur forestier suisse est dans un état critique ; au cours des dix dernières années, le nombre de scieries Suisses a chuté de 600 à 220. Au lieu d'en tirer profit, celles qui demeurent survivent uniquement grâce à des subsides du gouvernement. Elles sont obligées de s'adapter si elles ne veulent pas disparaître, et c'est exactement ce qu'offrent les solutions développées à l'Ibois en reliant la conception à la fabrication. La possibilité d'employer le bois tordu, fourchu ou de petit diamètre pour un usage structurel plutôt que de le considérer simplement comme une source d'énergie de biomasse destinée au chauffage ou une source de matériau primaire pour la création de papier ou carton augmente immédiatement sa valeur. Le bois de diamètre réduit provient habituellement des activités d'éclaircissage de la forêt très usuelles dans le secteur. Il n'est pas considéré comme du matériel de construction, mais est transformé en copeaux ou en pulpe. Jusqu'à maintenant, les standards industriels se traduisaient même par le fait qu'au vu de sa valeur réduite, il était souvent laissé pourrir en forêt. Au contraire, grâce aux nouvelles méthodes de fabrication digitale, il pourrait être utilisé pour bâtir des constructions de petite taille, tels des chalets ou maisons individuelles, ce qui ferait bondir sa valeur pour l'économie locale.

Suspendue entre tradition et modernité, la foresterie suisse doit également faire face à un éco-blanchiment galopant de l'industrie du bois qui menace de

faire oublier que, pour être réellement écologique, le bois doit être local et minimalement transformé. Est-ce plus écologique de construire avec des plaques de bois lamellé-collé qu'avec du béton ? Oui. L'industrie du bois est moins polluante, consomme moins de ressources naturelles, n'a pas le même impact sur la biodiversité, et ne pollue pas les sols comme le font les industries du béton ou de l'acier. En revanche, le bois importé et transformé vient évidemment avec une empreinte carbone plus élevée que le bois brut. L'emploi de grandes quantités de colle posent aussi problème lorsque la structure arrive en fin de cycle. Mais s'il y a tant de bénéfices à la construction en bois brut, pourquoi n'est-elle pas beaucoup plus répandue ? La réponse est simple : la complexité et le coût de bâtir à base d'éléments non standardisés lui ont dressé une barrière solide. Or, ces problèmes peuvent être résolus par l'application de solutions technologiques modernes tels que les scans, les softwares de CAO et la robotisation, ce qui ouvre de nouveaux champs de possibilités.

Il est important de noter que la modernisation est déjà bien entamée chez les grands industriels du bois. Leurs robots bénéficient déjà souvent de vision par ordinateur et emploient des méthodes de découpe qui suppriment les irrégularités du bois. Le bois scié localement exige l'intégration experte de processus sur mesure comprenant des tours d'usinage, des scies à ruban, des tronçonneuses, des scanners et la CAO. L'utilisation de technologies de scannage dans le domaine du bois n'a, en soi, rien de révolutionnaire. Actuellement, certaines compagnies du secteur ayant déjà investi dans la robotique sont en train de saisir les avantages économiques et structurels du bois brut. En revanche, ces compagnies suivent souvent un modèle commercial centralisé. De

plus, il arrive souvent qu'une seule compagnie dans un large rayon ait l'infrastructure et la capacité de produire des éléments structurels en bois brut, ce qui se traduit par une monopolisation du marché.



→ **100**

À l'inverse de ces compagnies qui sont en position de force, les petites à moyennes entreprises telles que celles de Rossinière, Lausanne ou Chavornay pourraient à peine exister sans aide gouvernementale. Les grandes compagnies centralisées partagent très rarement les découvertes de leurs unités recherche & développement, au détriment du secteur forestier. C'est pourquoi les entreprises du bois local se tournent vers les universités, écoles polytechniques et autres centres de recherche. Nombre d'entre elles sont conscientes de la nécessité de s'adapter face aux menaces incontournables du changement climatique, de la robotisation et autres avancées technologiques qui transformeront le secteur—et elles ne peuvent pas se permettre de se retrouver sur le côté de la route.

Le bois brut pose une série de défis géométriques supplémentaires comparé aux panneaux de bois standardisés. L'usinage de ces derniers est un problème 2D où la broche de fraisage ne peut pas être abaissée de plus d'environ 30 degrés par rapport à la table en raison de l'épaisseur du panneau de bois. L'usinage du bois brut est, lui, un problème 3D; la broche de fraisage doit toujours être dirigée vers l'extérieur, en direction d'un tronc, et ne doit pas rentrer en collision avec la table, ce qui limite la surface de travail à environ 30 cm. De plus, les mouvements de sciage nécessaires pour le bois brut diffèrent du travail de fraisage sur surface plane pré-transformé⁵.

⁵ *Ibid.*, p. 153.

Construire avec du bois brut est un processus complexe. Un ingénieur Allemand connu, cité à ses élèves par Frei Otto, déclarait que le plus grand ennemi du bois est la scie, et préconisait l'utilisation de bois brut non scié, mais il est particulièrement difficile de construire avec du bois brut sans en utiliser une. De plus, l'emploi des qualités naturelles de l'arbre tels ses courbes ou fourches génère son propre champ de difficulté uniques. Si les fourches et branches non utilisées dans la production conventionnelle offrent des opportunités structurelles intéressantes, qui sont bien entendu limitées par leur topologie, ceci pose un défi architectural clair. Il est commun que les fourches se brisent durant la récolte des arbres, et l'utilisation d'éléments uniques les rend très difficiles à remplacer dans la structure où ils sont intégrés.

Plusieurs techniques de construction architecturale utilisant du bois brut ont été prises en considération lors de l'élaboration de l'algorithme de conception de systèmes de connexion. L'une des plus communes consiste à empiler des éléments l'un contre l'autre dans un système de blocs ou murs (*slab and wall systems*) et utilise souvent des joints bois-bois. En revanche, lorsqu'ils sont composés de troncs de bois brut fraîchement récoltés, ces murs ou blocs doivent comprendre un travail précis qui transforme les troncs en pièces constructives standardisées. L'un des autres types de cadres les plus commun, les systèmes de treillis (*trusses*), utilisent principalement du bois dont la forme ronde est obtenue par usinage à la machine et qui sont connectés par des éléments mécaniques. Ceci rend presque impossible l'emploi exclusif de connexions bois-bois pour des structures de grande taille en bois brut⁶.

Deux méthodes de conception architecturale se sont dégagées comme étant particulièrement intéressantes pour la construction de cadres en bois brut sans connecteurs métalliques : les systèmes de maillage (*grid shell*) et les systèmes réciproques (*reciprocal systems*). Les systèmes de type « grid shell » sont confrontés à un certain nombre de difficultés par rapport au bois brut. D'abord, il est impossible de connaître précisément la position exacte d'un point de connexion (*node point*). Deuxièmement, la toiture doit avoir la flexibilité de s'adapter aux variations du bois brut. Troisièmement, il est impossible de prédire chaque particularité du matériau non transformé. La combinaison de tous ces éléments les disqualifie pour la création d'un algorithme intégrant conception et construction.

Les systèmes réciproques sont particulièrement intéressants. On les retrouve déjà dans des constructions chinoises anciennes tels les ponts en arc-en-ciel.



→ **101** Ils réapparaissent dans la construction en bois brut pour plusieurs raisons. Non seulement les poutres se soutiennent les unes les autres pour porter la charge, mais la configuration des cadres réciproques simplifie le système constructif car seulement deux éléments sont connectés en chaque point nodal, et ils peuvent n'utiliser qu'un seul type de joint. En conséquence, la fabrication de ces points peut être automatisée beaucoup plus facilement. Ils permettent également l'utilisation d'éléments courts qui pourraient garantir l'emploi de pièces de bois qui n'ont actuellement peu ou pas de valeur. Enfin, les systèmes réciproques ont des avantages ornementaux. Tout ceci est exemplifié dans le travail de Tetsuro Kurokawa⁷.

6 *Ibid.* p. 39.

7 *Ibid.* p. 42.

Actuellement, si l'industrie s'intéresse au bois brut, c'est car le peu de transformation qu'il nécessite provoque un gain de temps et en fait une option comparative-ment peu coûteuse. Elle ignore en revanche complètement son potentiel pour les économies locales circulaires, et son intérêt par rapport au changement climatique, qui est un problème planétaire global. En conséquence, comme susmentionné, les troncs fourchus, tordus ou de petit diamètre ne sont pas pris en considération par l'industrie. L'application de principes de conception architecturale spécifiques au bois brut augmenterait encore sa compétitivité : bien que théoriquement n'importe quelle poutre puisse être assignée à n'importe quel endroit, en réalité tout algorithme de conception cherchera à faire baisser le coût en optimisant la structure. Chaque élément devra trouver sa place optimale relativement à sa courbure, longueur, diamètre et fourche. Bien sûr, déterminer cet emplacement optimal sans l'assistance d'un algorithme de conception est une tâche herculéenne. Il existe déjà des algorithmes qui peuvent opérer un triage selon des paramètres tels que l'angle des fourches ou la courbe axiale, mais les résultats ne sont pas satisfaisants. Un algorithme combinant ces deux éléments est nécessaire, qui doit aussi être capable d'identifier les éléments clés d'une surface et de proposer des segments de bois adaptés.

Il n'existe pas d'instructions ou d'outils digitaux pour la conception-production de systèmes de connexion bois-bois à partir de bois brut. Il y a une scission entre les grandes compagnies technologiques qui ont adopté la préfabrication de masse, et la foresterie suisse locale dans laquelle il n'y a pas ou peu de digitalisation. Il existe un fossé tout aussi important entre l'expérimentation avec du bois brut et l'automatisation d'applications industrielles. Il

n'y a pas d'algorithme ou de système de base susceptibles d'assister la conception de techniques de connexion pour le bois brut, ce qui implique que les joints sont développés au cas par cas. Ceci se traduit par un processus de modélisation extrêmement chronophage et requiert la génération manuelle des trajectoires d'usinage. Ceci fait de la construction en bois brut avec des éléments irréguliers un processus long, onéreux, et dès lors très peu attractif.

L'implémentation d'un algorithme de génération de structures en bois brut usant de joints bois-bois et largement applicable, comme celui développé à l'Ibois par Petras Vestartas⁸, ferait baisser les coûts et diminuerait le temps de production tout en créant une base solide pour toute recherche future. Dans le passé, des recoupements, un manque de moyens industriels, et la perte du savoir une fois le projet terminé ont tous été des défis à la recherche dans le bâti en bois brut. Pour que le secteur puisse se développer, les processus, outils et algorithmes doivent être partagés non seulement entre les chercheurs et l'industrie, mais avec le grand public. L'une des manières les plus simples de le faire est de rendre tous les algorithmes créés *open-source*, afin qu'ils soient plus largement disponibles.

L'industrie, contrairement à la recherche, emploie de nombreuses personnes qui travaillent ensemble sur des problèmes complexes. Elle a de bien plus grandes ressources financières, et se focalise donc sur des méthodes commerciales fermées. Les solutions industrielles existantes ne sont pas *open-source* et doivent être achetées pour chaque intégration robotique spécifique, ce qui est compliqué pour des intervenants locaux ou des chercheurs opérant avec des ressources souvent très limitées.

8 https://github.com/ibois-epfl/compas_wood

Le fait de se focaliser sur la conception de petites structures à base de bois local pourrait poser question face à une industrie qui veut constamment bâtir plus haut, plus grand, et dont la principale motivation reste le profit. Bien qu'il y ait un contre-mouvement désirant créer des constructions éthiques et écologiques, ceci concerne une infime fraction du secteur. Jusqu'à l'époque industrielle, presque toutes les constructions étaient réalisées à partir de ressources locales, à l'exception des palais, lieux de cérémonies religieuses, et autres bâtiments destinés à des fins spécifiques ou comme ode à l'égo de leurs commanditaires.

Face à un adversaire d'un tel poids, il peut paraître extrêmement optimiste d'espérer que la recherche présentée ci-dessus puisse contribuer au développement d'économies locales, circulaires, et injecter des forces cruellement manquantes dans le secteur. Qu'elle puisse accroître la valeur de leur ressource principale, le bois, portant ainsi un modèle différent de construction locale. De croire que ceci pourrait mener à un changement global de paradigme dans l'industrie de la construction, au vu de l'urgence climatique à laquelle nous sommes actuellement confrontés, et la raréfaction des ressources naturelles nécessaires à la fabrication du béton.

L'industrie a conscience de la tendance actuelle pour la construction écologique ; sa réponse a été, plus d'une fois, de proposer des façades en bois très esthétiques sur des bâtiments autrement construits en... béton. Cette forme d'éco-blanchiment est insidieuse. On pourrait argumenter qu'elle montre effectivement des constructions « en bois » ce qui influence l'œil du public et dynamise le secteur. Mais, pour chacun de ces bâtiments, il aurait pu y avoir à sa place une création en bois innovatrice, responsable, et véritablement écologique.

INVENTER
LE MATÉRIAU
APPROPRIÉ
POUR L'ÈRE DU
RÉÉQUILIBRAGE
ENVIRONNEMENTAL

INVENTING
A MATERIAL
FOR AN ERA OF
ENVIRONMENTAL
BALANCE

IMAGES



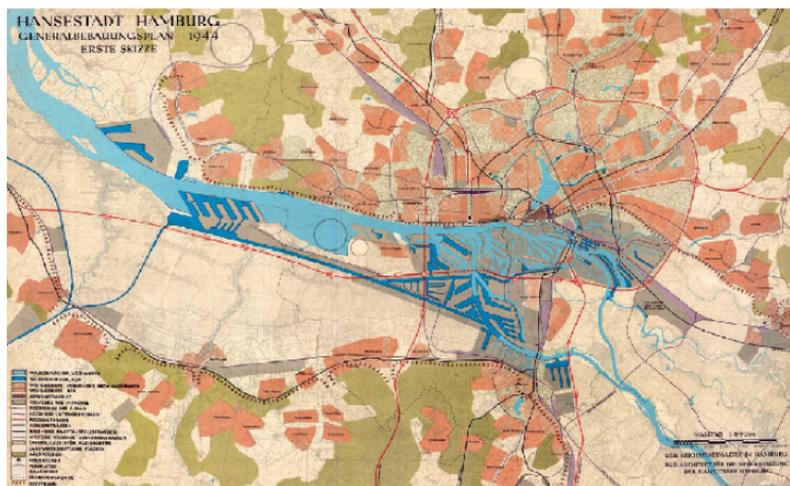
Couverture de l'ouvrage édité
en 1937 par l'Architecture
d'Aujourd'hui: *Des canons,
des munitions? Merci!*
Des Logis... SVP, Le Corbusier.

Cover of the book published
in 1937 by l'Architecture
d'Aujourd'hui: *Des canons,
des munitions? Merci!*
Des Logis... SVP, Le Corbusier.



Vue aérienne de Pruitt-Igoe, à Saint Louis, Missouri. Ce complexe, construit par Minoru Yamasaki en 1951, est entré dans l'histoire comme l'échec le plus spectaculaire du modernisme architectural. Conçu dans un contexte de ségrégation raciale, il a été abandonné par ses habitants aisés et majoritairement blancs après l'abrogation de ces lois en 1956. Le complexe sera définitivement démoli en 1972. (United States Geological Survey)

Aerial view of Pruitt-Igoe, in Saint Louis, Missouri. This complex, built by Minoru Yamasaki in 1951, has gone down in history as the most spectacular failure of architectural modernism. Designed in a context of racial segregation, it was abandoned by its wealthy and predominantly white inhabitants once these laws were repealed in 1956. The complex was definitively demolished in 1972. (United States Geological Survey)



Plan général de la reconstruction de la ville de Hambourg de 1944. Les cours d'eau et les espaces verts agissent comme des zones tampons. Ils divisent le tissu urbain en îlots distincts afin de rendre impossible la propagation d'un incendie comme celui qui a détruit la ville en 1943.

General plan of the reconstruction of the city of Hamburg from 1944. Watercourses and vegetated buffer zones divide the urban fabric into distinct blocks in order to make it impossible for a fire to spread, such as the one that destroyed the city in 1943. (Collection Gutschow)



Dugway proving ground était un centre d'essais d'armes chimiques et biologiques de haute sécurité situé dans l'Utah, aux États-Unis. En 1943, des répliques de maisons allemandes et japonaises y ont été construites, puis détruites intentionnellement afin de perfectionner les méthodes de bombardement incendiaire. L'armée a fait appel à des architectes émigrés allemands, comme Erich Mendelsohn, pour créer des copies aussi fidèles que possible des maisons des quartiers ouvriers. Le but de ces essais était de mettre au point les engins et la stratégie optimale pour déclencher des tempêtes de feu dans les centres urbains.

Dugway Proving Ground was a high-security chemical and biological weapons testing facility in Utah, USA. In 1943, replicas of German and Japanese houses were built there and then intentionally destroyed in order to perfect incendiary bombing methods. The army hired immigrant German architects, such as Erich Mendelsohn, to create as close copies of the houses in working-class neighborhoods as possible. The purpose of these tests was to develop the optimal devices and strategy for unleashing firestorms in urban centers



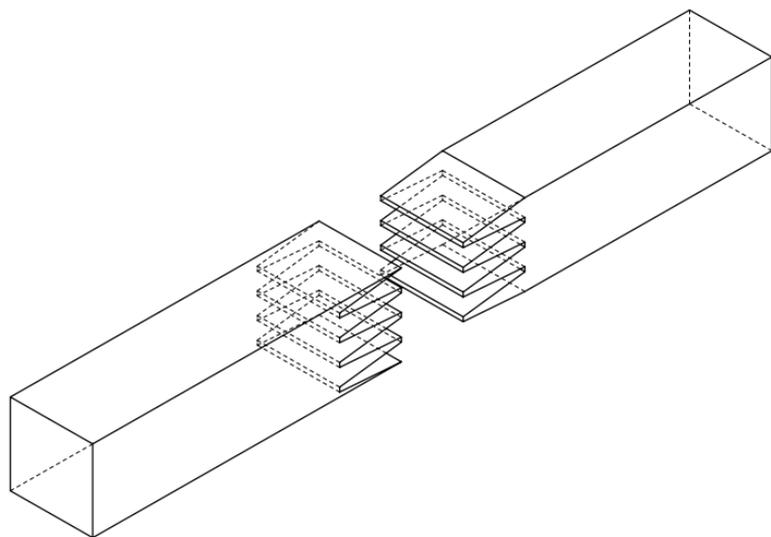
Les visiteurs de la Biennale d'architecture de Venise en 2014 pouvaient difficilement ignorer la construction qui se dressait sur la pelouse à côté du pavillon finlandais: une maquette à l'échelle 1:1 de la célèbre maison Domino de Le Corbusier, réalisée par Valentin Bontjes van Beek pour l'école d'architecture AA.

Visitors to the 2014 Venice Architecture Biennale could hardly ignore the construction that stood on the lawn next to the Finnish pavilion: a 1:1 scale model of Le Corbusier's famous Dom-ino house, made by Valentin Bontjes van Beek for the AA School of Architecture.

LES ASSEMBLAGES
DE LA CHARPENTE
EN BOIS:
À LA RECHERCHE
DU NŒUD PARFAIT

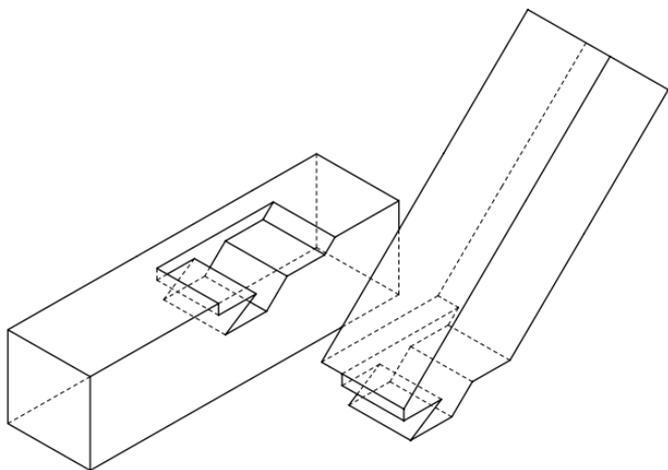
TIMBER
FRAME JOINERY:
IN SEARCH
OF THE PERFECT
JOINT

IMAGES



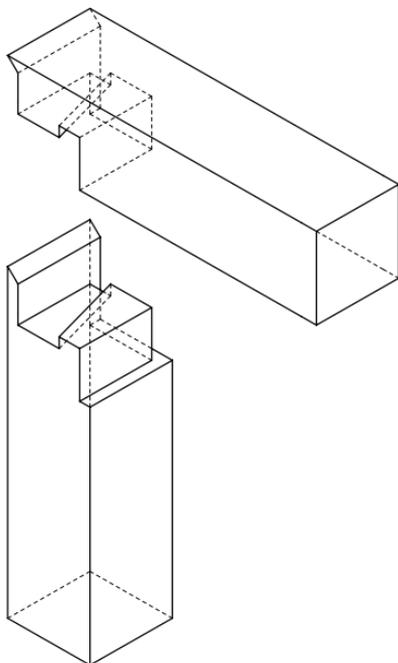
Enture à doigts de gant

Tapered finger splice



Entaille à mi-bois en queue
d'aronde bâtarde avec
embrèvement

Angled housed half-dovetail
cross lap



Assemblage sur angle
à trait de Jupiter en oblique
avec coupe d'onglet

Les dessins de liaisons en bois
sont issus de l'ouvrage d'Elias
Guenoun *198 assemblages
du bois*, initialement publiés
en 2014, et réédités en 2019
par Architectural Notes.
Elias Guenoun est architecte,
enseignant et critique
d'architecture.

Oblique tabled corner
lap with mitered edge

The drawings of wood
connections are from Elias
Guenoun's *198 wood joints*,
originally published in 2014,
and reissued in 2019
by Architectural Notes. Elias
Guenoun is an architect,
teacher, and architectural critic.

STRUCTURES
DYNAMIQUES

DYNAMIC
CONSTRUCTS

IMAGES



Kubelbrücke à Urnäsch, Suisse,
Hans Ulrich Grubenmann, 1780,
avec recouvrement et couverture.
(Photo Mario Rinke, 2013)

Kubelbrücke in Urnäsch,
Switzerland, Hans Ulrich
Grubenmann, 1780, with overlay
and covering. (Photo Mario Rinke,
2013)



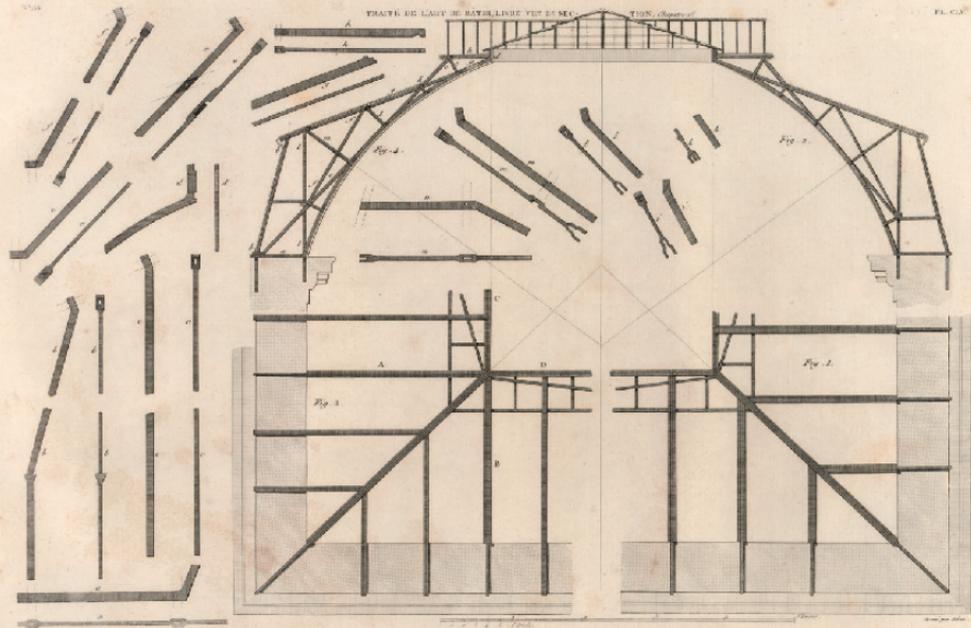
Pont à chaînes surplombant
le Potomac près de Washington,
USA, 1847. (Photo William
Morris Smith, 1865)

Chain Bridge over the Potomac
near Washington, USA, 1847.
(Photo William Morris Smith,
1865)



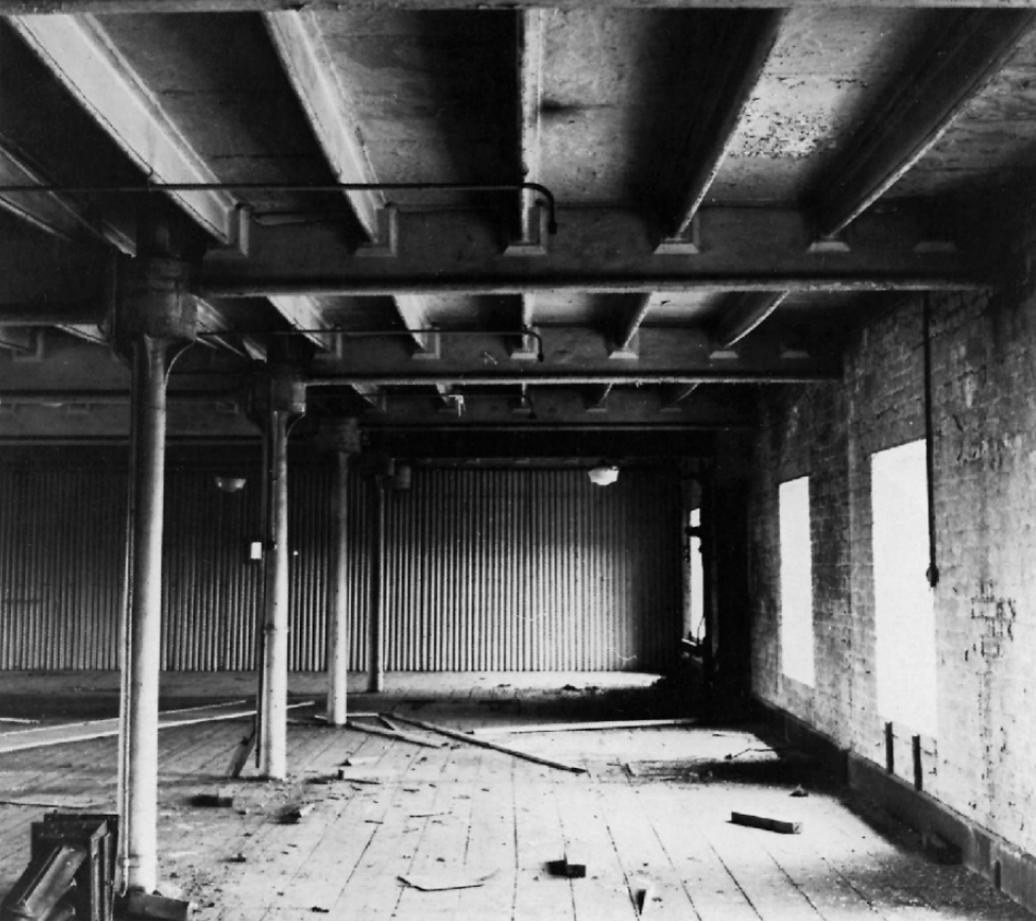
Iron Bridge, Royaume-Uni,
Thomas Farnolls Pritchard
& Abraham Darby III., 1779.
(Photo Wikimedia Commons)

Iron Bridge, United Kingdom,
Thomas Farnolls Pritchard
& Abraham Darby III., 1779.
(Photo Wikimedia Commons)



Structure de toit en fer forgé pour le palais du Louvre, Paris, France, Jacques-Germain Soufflot, Jean-Baptiste Rondelet, 1781. Tiré de J. Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Supplément, pl. CLV.

Wrought-iron roof structure for Louvre Palace, Paris, France, Jacques-Germain Soufflot, Jean-Baptiste Rondelet, 1781. From J. Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Supplément, pl. CLV.



Magasin quadrilatère, Sheerness,
Edward Holl, 1829. (Photo
G. Hartung, *Eisenkonstruktionen*
des 19. Jahrhunderts, 1983)

Quadrangle Store, Sheerness,
Edward Holl, 1829. (Photo
G. Hartung, *Eisenkonstruktionen*
des 19. Jahrhunderts, 1983)



Halle de sport, Leipzig,
Otto Hetzer, 1913.
Tiré de C. Kersten,
Freitragende Holzbauten,
1926.

Sports hall, Leipzig,
Otto Hetzer, 1913.
From C. Kersten,
Freitragende Holzbauten,
1926.

L'UTILISATION
DU BOIS BRUT
IRRÉGULIER
À USAGE
STRUCTUREL

IRREGULAR
TIMBER USE
IN WOODEN
STRUCTURES

IMAGES



Exemple d'un pont en bois construit à base de ressources locales. Darius K. Cedar River Trestle Bridge. *Maple Valley Historical Society Archive*, 1925.

Example of a timber bridge built from locally available resources. Darius K. Cedar River Trestle Bridge (*Maple Valley Historical Society Archive*, 1925)



Le Biomass Boiler House à Hooke Park est un projet de Sattaveesa Sahu et Yingzu Wang qui utilise des techniques de scannage au laser et de l'architecture computationnelle afin de créer des murs en bois brut irrégulier.

The Biomass Boiler House in Hooke Park is a project by Sattaveesa Sahu and Yingzu Wang which utilises scanning techniques and computational architecture to design irregular raw timber walls.



Divers exemples de joints à recouvrement croisé fabriqués robotiquement dans du bois brut (exemple fourni par Petras Vestartas).

Illustrations de la recherche sur le bois brut irrégulier (pp. 103 à 137)

Various cross-lap joints carved in raw timber using a CNC machine (example provided by Petras Vestartas).

Illustrations of the research on irregular raw-sawn-timber (pp. 103 to 137)



Tavillons fabriqués de manière traditionnelle par des artisans à Rossinière, 2021.

Traditionally fabricated shingles laid by an artisan in Rossinière, 2021.



La scierie Blum, à Rossinière, est l'une des scieries de petite taille qui continue à être opérationnelle. Ces scieries font face au défi additionnel du changement des essences locales historiques, comprenant surtout des résineux, par des essences de feuillus, dû au réchauffement climatique.

The Blum sawmill in Rossinière is one of the remaining local sawmills. These sawmills are facing the additional challenge of a shift in the local softwoods by hardwoods, due to global warming.



Pont en bois tissé en Chine.
Un exemple historique, le pont
Arc-en-ciel, est illustré dans une
peinture datant de la dynastie
Song: « Le long de la rivière
durant le festival Quigming »
(~1085-1145).

Woven timber arch bridge in
China. A historic example, the
Rainbow Bridge, is illustrated
on the Song Dynasty painting:
"Along the River During
the Qingming Festival"
(~1085-1145).

L'UTILISATION
DU BOIS BRUT
IRRÉGULIER
À USAGE
STRUCTUREL

Une méthodologie
de conception
à fabrication pour
le bois brut scié

IRREGULAR
TIMBER USE
IN WOODEN
STRUCTURES

Design-to-Fabrication
Workflow for
Raw-Sawn-Timber

IMAGES ET
RECHERCHE

Petras
Vestartas

En montagne, l'industrie du bois exporte une grande quantité de bois brut et importe des produits en bois transformé. Ceci pose problème par rapport à l'empreinte carbone, l'utilisation des ressources locales, ou la compétitivité économique. Le système développé par Petras Vestartas propose un nouveau processus numérique allant de la conception à la production permettant la réalisation de structures à base de bois brut local.

Alors que l'automatisation est établie au sein de l'industrie du bois, elle reste peu intégrée dans les petites industries locales. De grandes sociétés de technologie et robotique fabriquent des structures de bois brut scié, ce qui permet une automatisation de la fabrication, mais elles ne proposent pas de conception architecturale. L'architecte et le fabricant sont deux entités distinctes. L'intégration de la fabrication numérique rend possible la création d'économies circulaires numérisées. Avant, le travail se faisait au cas par cas, sans rechercher l'automatisation, ni créer de méthodes à petite échelle. La thèse de Petras veut transformer le processus du travail menant de la conception à la production des structures de bois brut et proposer de nouvelles techniques open-source applicables à tous types de projets. La méthode est basée sur un algorithme facilitant l'élaboration des raccords bois-bois qui sépare la modélisation et la

Due to a lack of digital tools, the Swiss timber industry in mountain areas largely exports mostly unprocessed lumber and imports finished timber products. By using new digital design-to-production workflows, it has become possible to investigate new building systems for small-scale structures using local timber for local applications.

While automation in raw wood fabrication is a well-studied field, there is a lack of integration into the local timber industry. In addition, a few large robotic companies focus on raw-sawn-timber fabrication, leading to high-level automation in fabrication but without offering any architectural design methods. Architect and fabricator, in the raw wood context, are seen as two different parties. Research in architectural digital manufacturing has demonstrated the potential of designs using raw timber without depending on large centralized timber companies. Often the focus is given to single case studies without investigating the automation in local circular economies resulting in the small-scale semi-automated fab-lab workshops. Consequently, individual design-to-fabrication workflows for whole timber structures must be revisited and propose new open-source, extendable and reusable techniques must be proposed.

conception: l'élaboration (macro) et l'automatisation des raccords bois-bois (micro). L'algorithme devait remplir certains critères. Les méthodes de connexion devaient être réutilisables, il s'agissait donc de créer une base de donnée à partir de multiples projets, d'assurer la génération de raccords bois-bois, de respecter des contraintes de fabrication et de sécurité, d'interconnecter des éléments linéaires et planes, fonctionner grâce à la *collision-based graph method* et d'intégrer l'algorithme dans un environnement de modélisation CAO interconnecté. Enfin, il fallait utiliser des modèles assurant la rapidité des calculs.

Les irrégularités du bois brut sont résolues grâce au balayage laser et l'intégration robotique. La numérisation ouvre de nouvelles possibilités pour la fabrication en bois brut. Elle permet la création de fichiers point-cloud utilisables en CAO, rend possible la configuration robotique sans utilisation de balises, et fournit des directives d'étalonnage pour les scanners lasers. La partie robotique crée un algorithme de génération du chemin-outil, qui abrège la génération d'un fichier de fabrication. La méthode relie l'accessibilité du robot et la détection des collisions à la génération d'articulations en bois.

De plus, la fabrication du bois entier est liée aux configurations d'usinage. Des instructions de mise

A joinery algorithm to ease the drafting process of pair-wise wood-wood connections is first proposed. The idea of the joinery algorithm is based on a design modelling separation into two independent algorithms: a) global architectural design, and b) local automation of wood-wood connections. These are the principal design requirements for the algorithm: a) re-usability of joinery methods for more than one case study, b) joinery library, c) automatic wood-wood connection generation, d) ensuring fabrication constraints e) a fast collision-based graph method, f) joinery algorithm into a common CAD modelling environment, and g) minimal models for fast computation.

Secondly, the geometrical irregularities of raw wood require laser-scanning and robotic integration. The section on scanning proposes novel solutions for raw wood fabrication: a) point-cloud processing, b) market-less alignment within a robotic setup, and c) calibration guidelines for laser scanners. The robotic section proposes a tool-path planning algorithm to shorten the fabrication file preparation. The design recommendations for machining setups are given to ensure secure, stable and accurate fabrication.

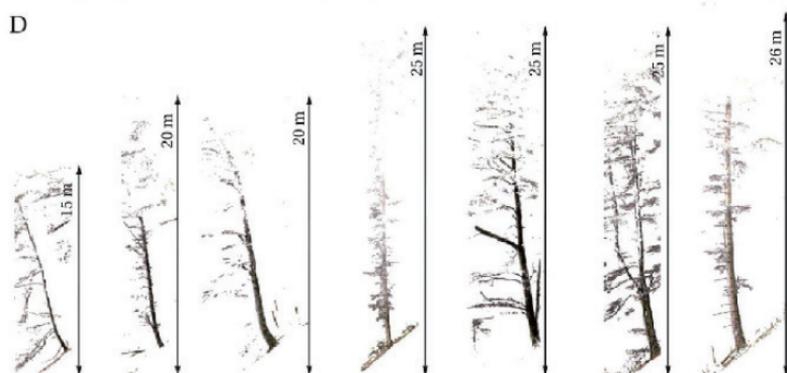
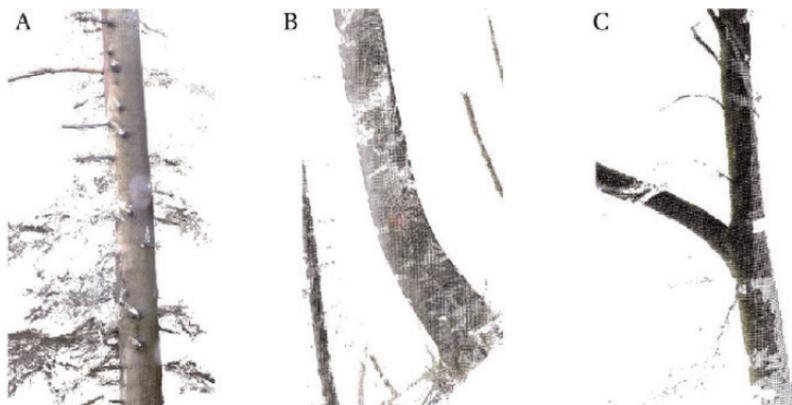
en place des outils de fabrication sont fournies afin d'assurer une fabrication sûre, stable et précise.

La méthode prouve qu'il est possible de détecter les types de joints en bois sur la base d'un modèle architectural plus léger, qui sont utilisables en CAO. Le cadre de conception proposé prend en compte divers types d'éléments en bois, en accordant une attention toute particulière au bois brut scié. Une série de prototypes de raccord bois-bois à base de bois brut scié ont été créés pour valider le processus de travail. Des structures à coque utilisant des connexions latérales ainsi que des nexorades latérales et croisées ont également été construites afin de démontrer le succès du système développé, qui a également permis de réaliser un système d'armature à partir de fourches d'arbres.

En conclusion, Petras présente une méthode allant de la conception au produit fini qui offre une solution renouvelable et locale pour la création de constructions en bois, mise en œuvre avec succès dans plusieurs prototypes. Aucun modèle de conception fixe n'est imposé, ce qui garantit une grande adaptabilité à différentes situations. Les nuages de points offrent une solution de fabrication robotique sans point de référence, et la modélisation permet une planification directe du chemin-outil. Enfin, la méthode est parfaitement applicable hors laboratoire, en extérieur, et utilise un logiciel accessible au public.

Thirdly, timber joinery prototypes are assembled to validate the proposed workflow. Three types are developed: segmented timber shells, nexorades and a truss from tree forks. Additionally, the modelling framework is interconnected with tool-path planning to demonstrate the validity of fabrication involving a joint geometry. Finally, the developed algorithms are open-sourced.

In conclusion, the design-to-fabrication workflow proves that it is possible to detect wood joinery types based on minimal CAD models. From a user perspective, these models do not require hard-coded parametric skills and, as a result, are applicable to CAD modelling interfaces. Finally, the integration of the low resolution referencing system of the laser scanner and the industrial robotic arm into the joinery generation method verifies the link between architectural design and manufacturing processes.



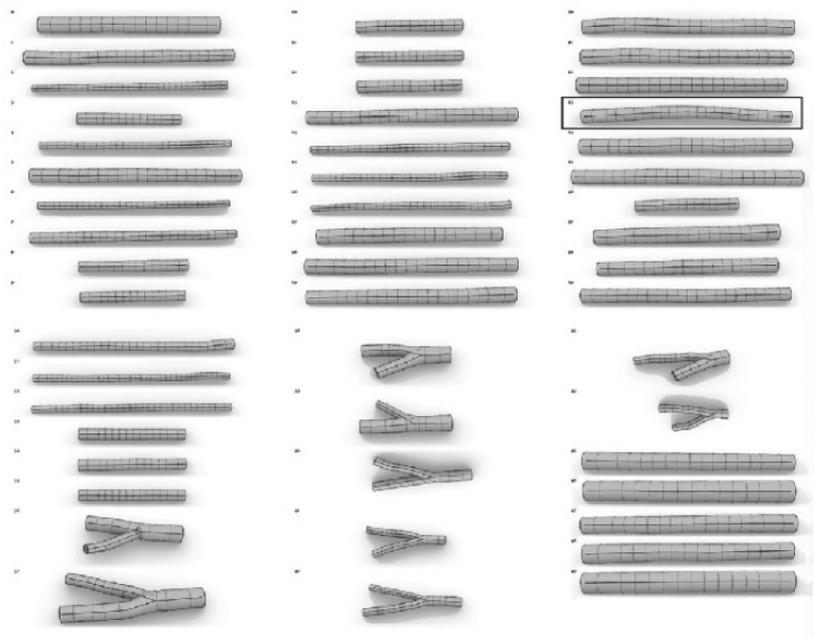
Scannage d'arbres, Rossinière.
Troncs droits, courbés et fourchus.

Tree scans, Rossinière. Straight,
crooked, and forked trunks.



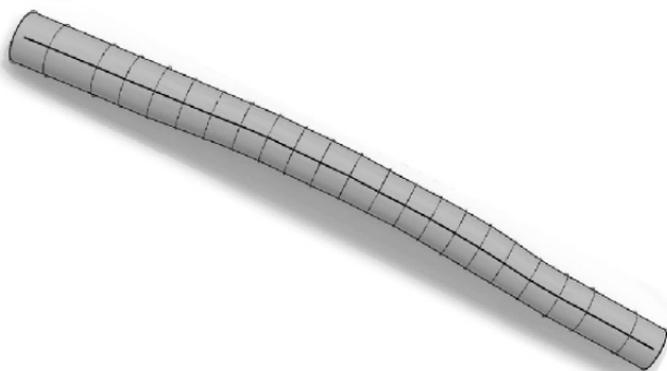
A – Scannage d'un stock d'arbres.
 B – Post-traitement aux géométries primitives.

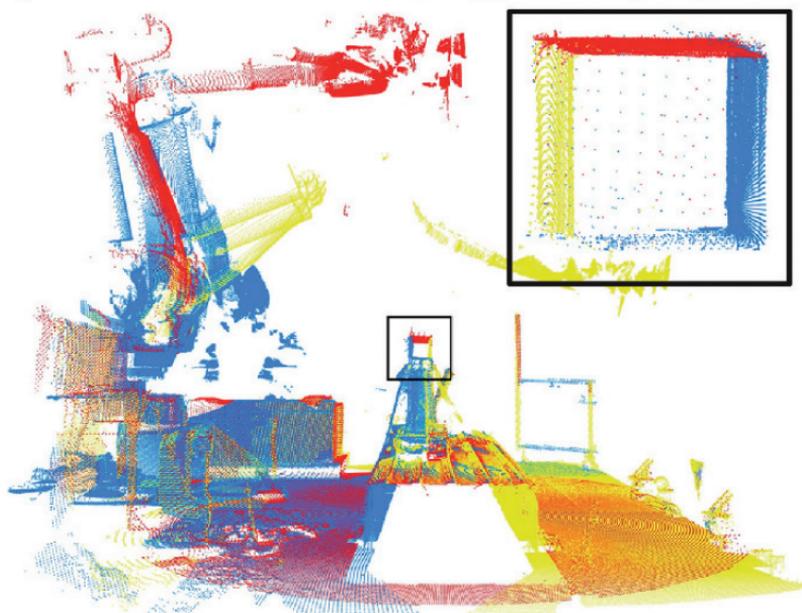
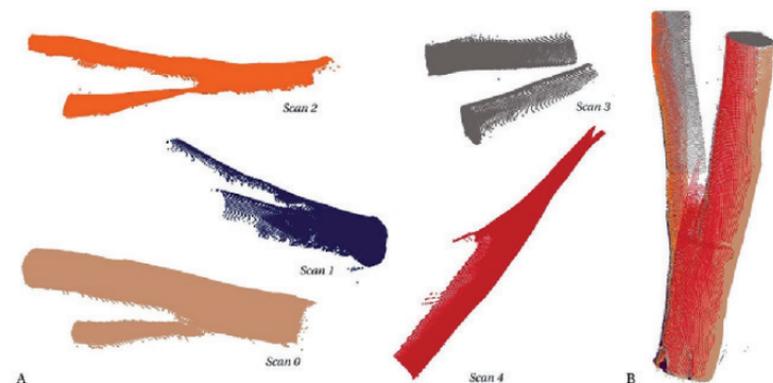
A – Scanning a stock of trees.
 B – Post-processing to primitive geometries.



Stock de troncs représenté
par une liste de cercles
et un axe polyligne.

Tree stock represented by a list
of circles and a polyline axis.



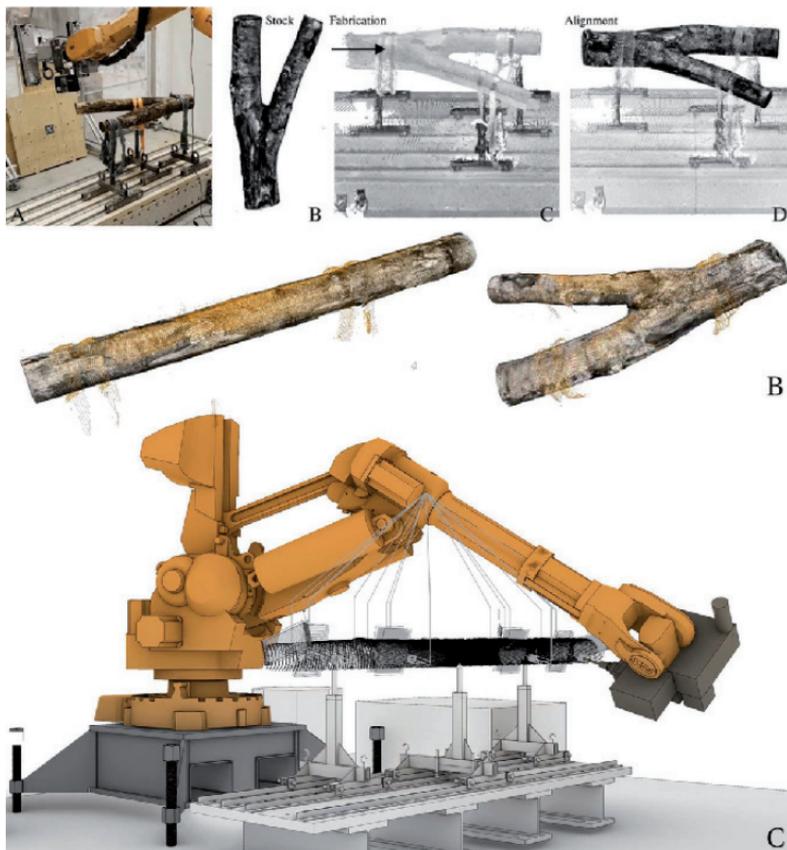


De nombreux scans sont nécessaires pour obtenir l'images d'un élément entier.

Le robot doit être calibré: la position du scanner sur le robot et son sixième axe.

Multiple scans are taken to get a full scan of one timber element.

The robot must be calibrated: the scanner position on the robot and its 6th axis.



Le stock est aligné par un scan créé avant la fabrication par méthode *point-cloud*.

Des chemins-outils sont positionnés dans le point-cloud afin de guider un bras robotique industriel ABB 6400R 6 axes.

Stock is aligned pre-fabrication by a newly created point-cloud file.

Post alignment, tool-paths are positioned within the point-cloud to guide a stationary 6th axis ABB 6400R industrial robot arm.

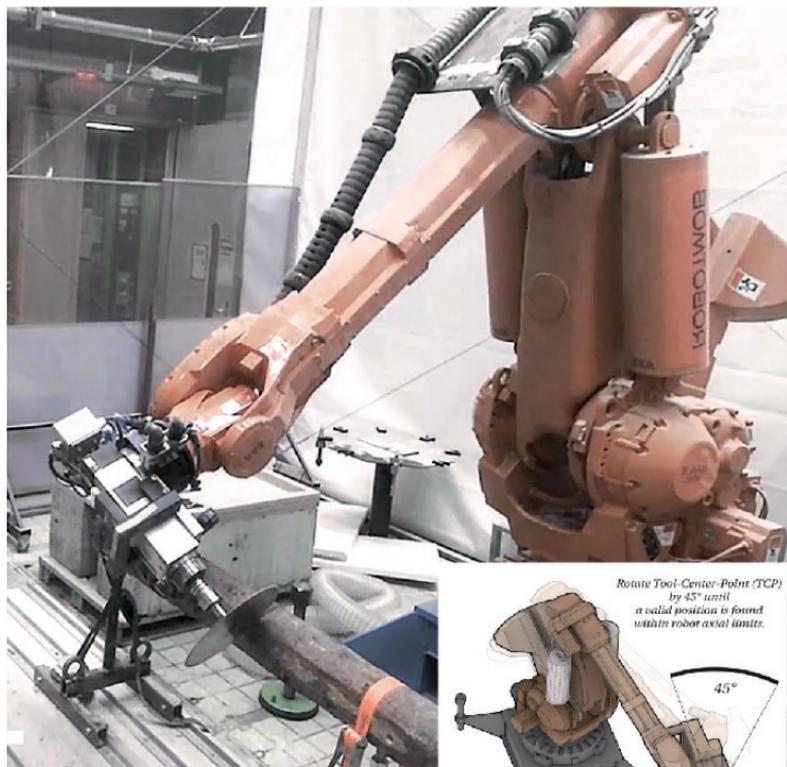


Le processus de découpe est également exécuté avec une CNC 5 axes. Le G-Code est généré avec le logiciel IBOIS raccoon (<https://github.com/ibois-epfl/Raccoon>).

Un système de tours additionnel Axe B permet d'atteindre toutes les faces de découpe d'un tronc droit, à l'exclusion des extrémités.

The cutting process also uses a 5-Axis CNC machine. The G-Code is generated using IBOIS software (<https://github.com/ibois-epfl/Raccoon>).

An additional B-Axis lathe system allows all cutting sides of a straight timber trunk to be reached, excluding the ends.

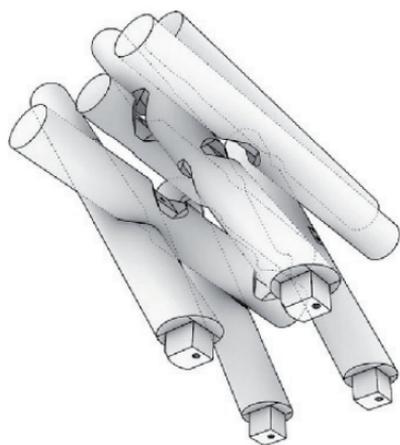


La fabrication avec un bras robotique permet de lier scannage et découpe, car ils sont plus flexibles sur l'intégration de logiciels, comparés aux CNC.

Le chemin-outil doit être analysé en relation avec la portée du robot.

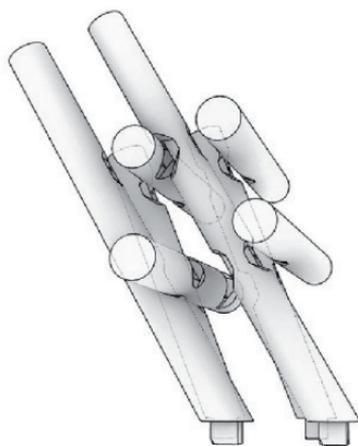
Fabrication with industrial robot arms allows scanning and cutting processes to be linked due to more flexible software integration compared to closed-source CNC machines.

The tool-path must be processed in relation to robot reachability.



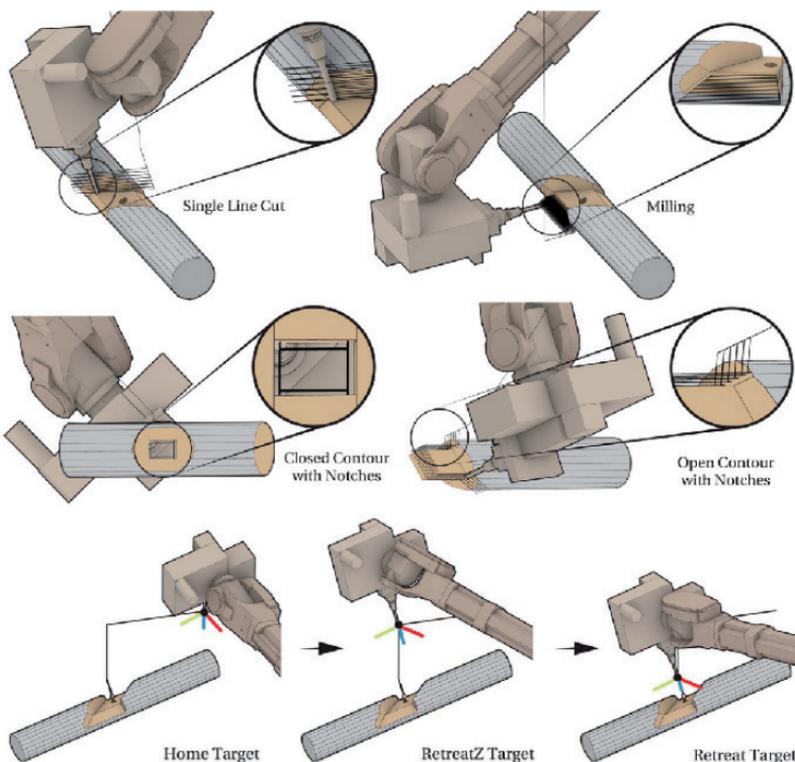
Détail d'une connexion
faisant usage de connecteurs
additionnels.

Système réciproque à double
couche avec des joints croisés
de deux côtés d'une poutre.



Connection detail with
additional fasteners.

Two-layer nexorade with cross
joints on two sides of a beam.

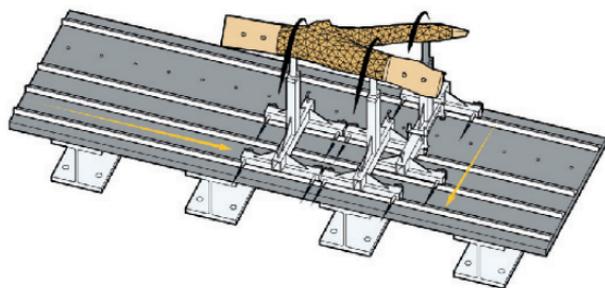
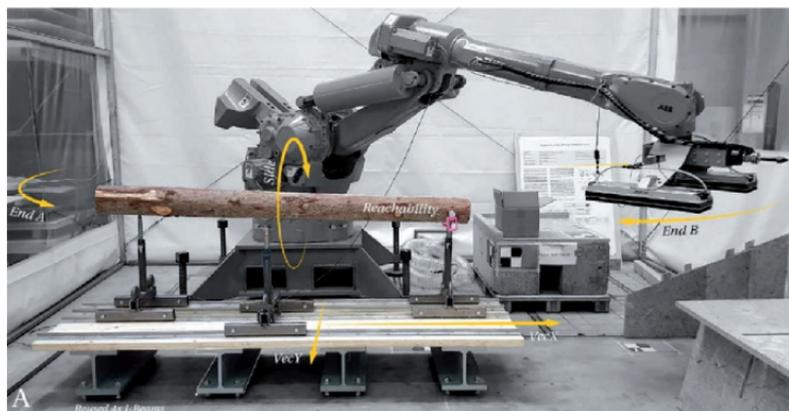


Méthodes de génération du chemin-outil fraisage, perçage, découpe à la scie.

Chaque chemin-outil doit être contrôlé afin de vérifier la portée du robot.

Toolpath generation methods: milling, drilling, saw-blade cutting.

All the tool-paths must be verified in relation to a work-piece to check robot reachability.

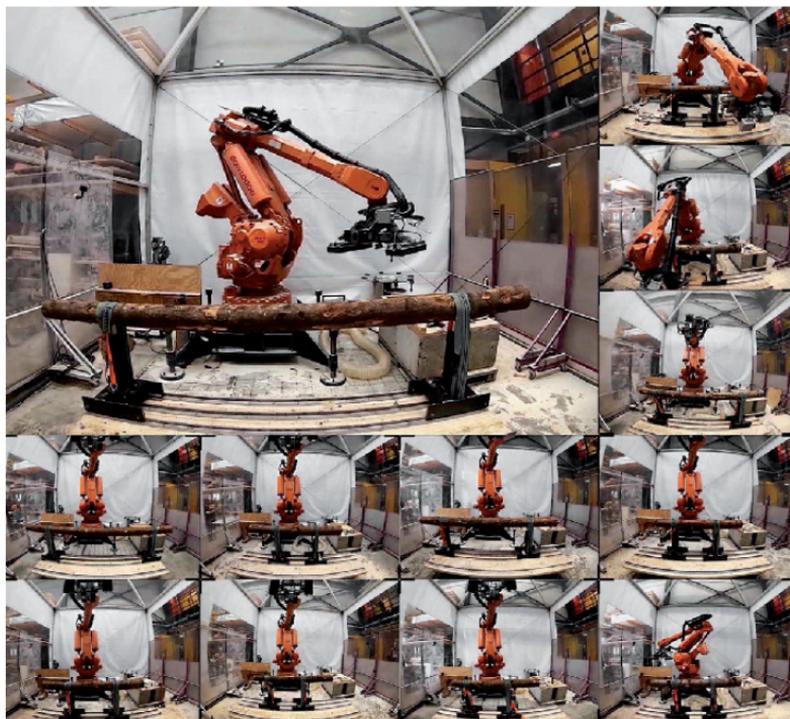


Un système axial est utilisé pour porter des éléments en bois linéaires.

Axial rigs are used to mount linear timber elements.

Le deuxième rail peut fixer des éléments irréguliers tels du bois fourchu.

The second rail can be used to fix irregular objects such as forks.

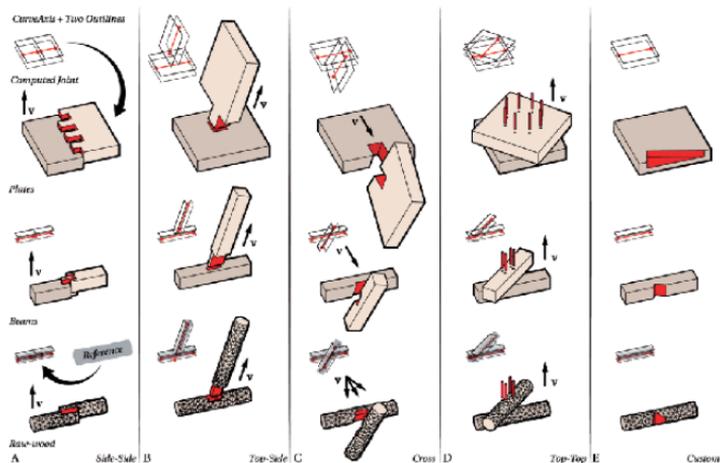


Scannage et découpe se combinent pour créer des joints en bois.

Scanning and cutting work together to cut timber joints.

Système réciproque deux couches créé à partir de stocks réel et digital avec l'algorithme hongrois.

Two layer nexorade from physical and digital stock created with the Hungarian algorithm.



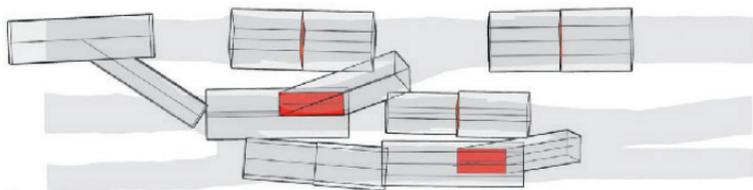
Connexions permettant de réduire une forme 2D ou 3D à des éléments simples, spécifiques à la fabrication d'un matériau. Le but de l'algorithme Joinery Solver (https://ibois-epfl.github.io/compas_wood/latest) est de créer des joints pour divers éléments, y compris des panneaux, des poutres, et du bois brut.

Joinery Solver est né de la recherche sur les structures en panneaux de bois et s'est dirigé vers les poutres linéaires dans des contextes réguliers et irréguliers. Seules des connexions par paires sont utilisées, ce qui demande trois niveaux d'information: un graphique de connectivité suivant les informations d'assemblage, une forme de joint en 3D, et un chemin-outil de fabrication digitale.

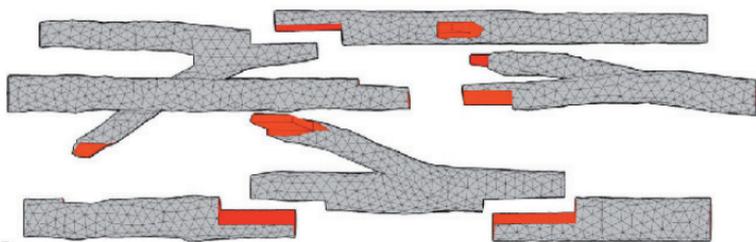
Auparavant, chaque fois qu'un nouveau modèle paramétrique était développé pour un projet spécifique, il ne pouvait pas être réutilisé pour d'autres projets.

Connections allow a 2D or 3D shape to be discretized into simple parts specific to a particular material fabrication technique. Joinery Solver (https://ibois-epfl.github.io/compas_wood/latest) is designed to work regardless of timber shape, including with plates, beams and raw wood.

Joinery Solver originated from research in timber-plate structures which moved to linear beam elements in rectangular and irregular sections. Only pairwise connections are employed, which requires three levels of information: a connectivity-graph to track assembly information, a 3D shape joint shape for the display and a tool-path for digital manufacturing. Previously, each time a new parametric model was hard-coded for a specific project, it was seldom able to be re-used in the other projects.



A



B



C

Les données structurelles sont représentées par la forme minimale du bois avec le volume de découpe. L'idée provient des outils de découpe et du processus de fabrication.

Element data-structure is represented by a minimal timber shape with cutting volumes. The idea is derived from cutting tools and fabrication processes.

Le regroupement des éléments (a) et du maillage de référence – les troncs irréguliers (b) – montre comment un ensemble de lignes pourrait représenter des pièces telles que du bois fourchu.

The grouping of elements and reference mesh—irregular tree trunks—show how multiple lines can represent components such as tree forks.

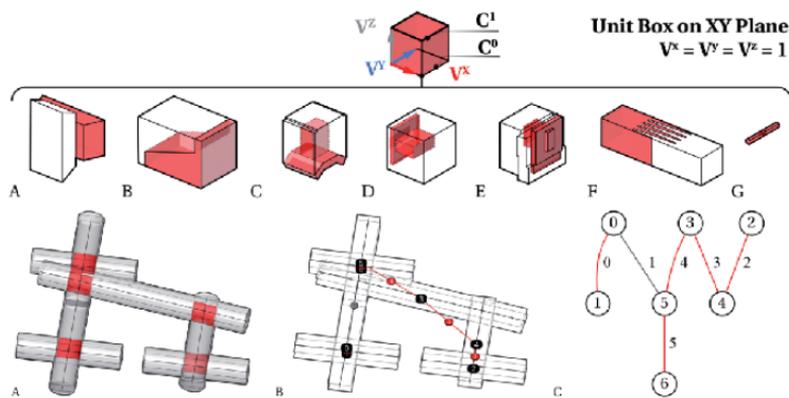
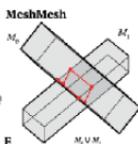
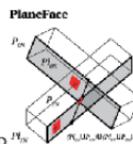
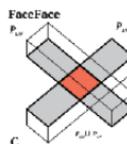
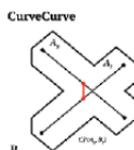
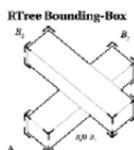
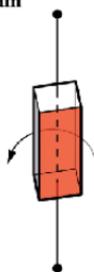


Plate + Beam Properties

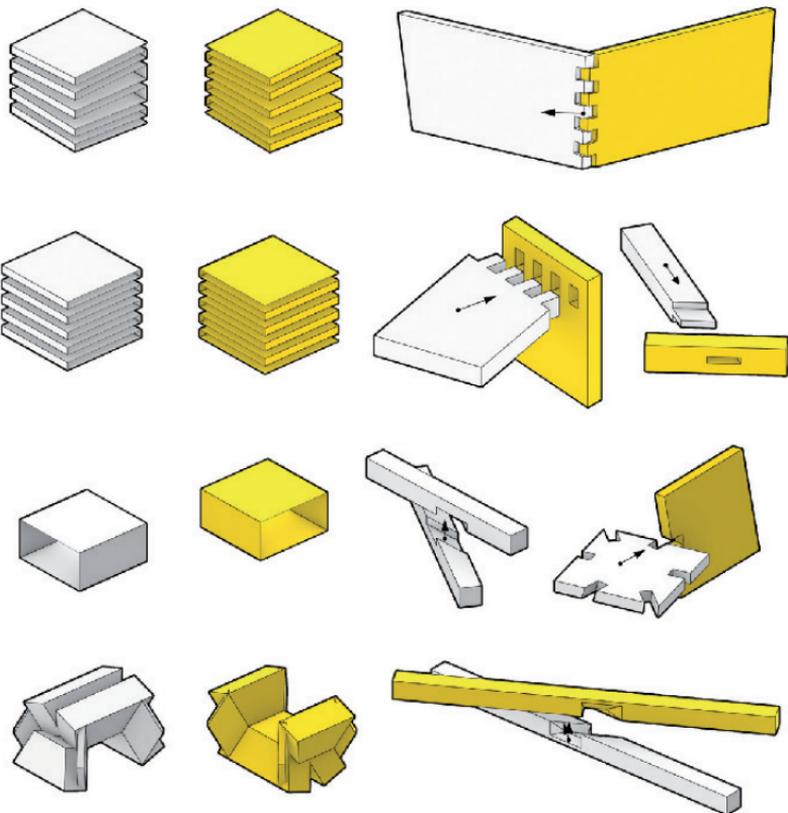


Les zones de connexion peuvent être représentées par des volumes ou des polygones entre les axes des éléments. Les données structurelles du joint stockent la proximité entre les éléments montrés dans b) le graphique 2D et c) le graphique 3D.

Connection areas can be represented by joint volumes or polygons between element axes. The joint data-structure stores adjacency between elements shown in b) 3D graph and c) 2D graph.

Les méthodes de recherche Rtree sont appliquées à la première étape de chaque élément (a). L'intersection courbe-courbe aide à définir les éléments où seules des courbes sont données (b). Les zones de connexion sont identifiées par l'intersection Face-to-Face (c), Plane-to-Face (d), Mesh-to-Mesh (e).

RTree search methods are applied as the first step for all elements (a). The Curve-Curve intersection helps to define elements when only curves are given (b). The joint areas are identified by the Face-to-Face (c), Plane-to-Face (d), Mesh-to-Mesh (e).

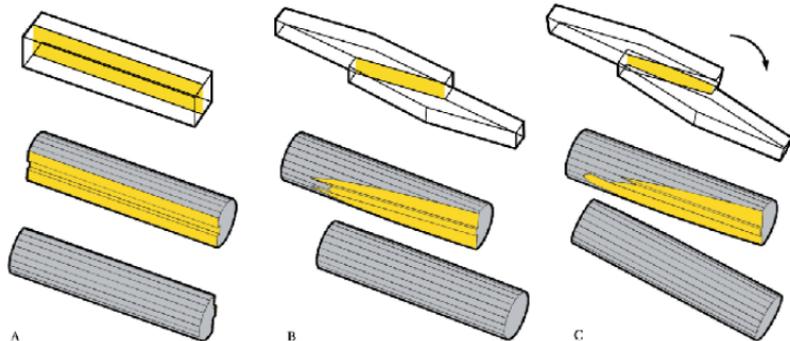
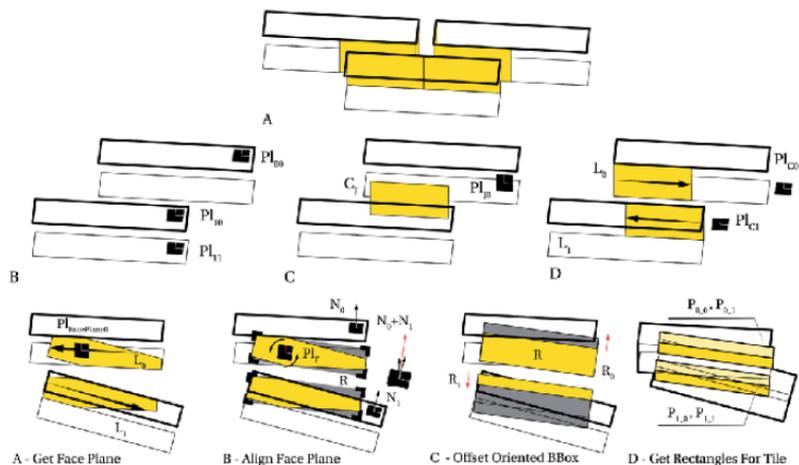


Une série de joints en charnière
entrepassée dessinés dans une
boîte $1 \times 1 \times 1$.

Post-transformation géométrique,
le joint pourrait être découpé
digitalement à partir d'un élément
en bois.

A series of box joints drawn
in a $1 \times 1 \times 1$ unit box.

Post geometrical transformation,
the joint could be digitally cut
from a timber element.

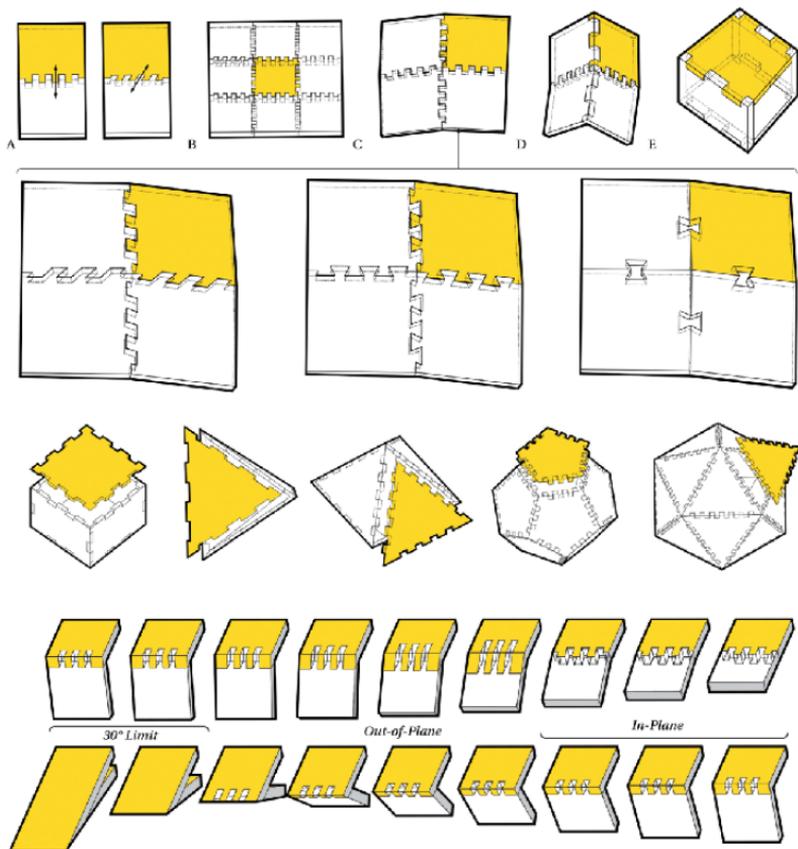


Génération de connexions latérales: a) zone de connexion b) plans supérieurs et inférieurs c) plan inférieur et d) directions des zones de connexion.

Side connection generation: a) connection area, b) top and bottom planes, c) connection area plane, and d) connection area directions.

Géométrie polygonale minimale (haut) et objets de référence du maillage triangulaire pour: a) des objets en parallèle b) une rotation unique c) une double rotation.

Minimal polygonal geometries (top) and reference objects as a triangle mesh for: a) objects in parallel, b) a single rotation, and c) two rotations.

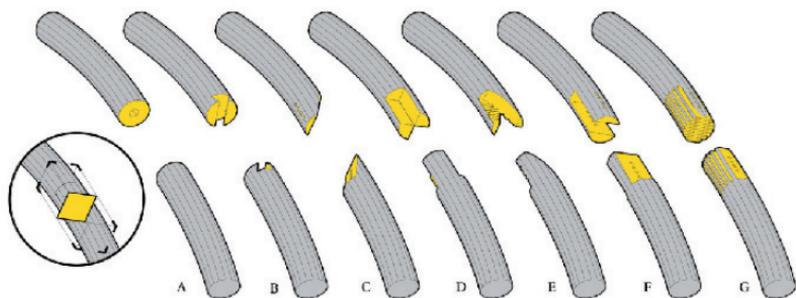
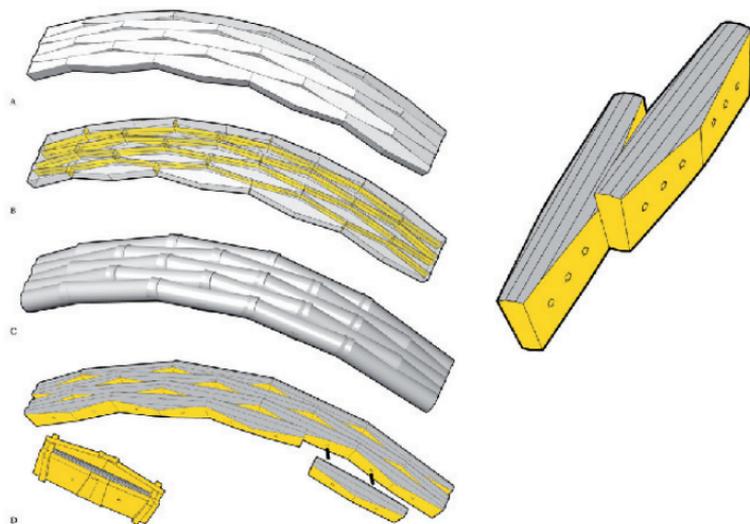


Le jointage est applicable aux panneaux comme aux poutres car les méthodes géométriques sont semblables, indépendamment de la forme de l'élément.

Un joint pourrait être configuré d'après son sens d'insertion, angle de connexion ou type (à onglet, queue d'aronde, clés...)

The joinery is applicable to both timber plates and beam elements since geometrical methods are similar regardless of a timber shape.

A joint could be configured based on its insertion direction, connection angle, or type e.g., miter, dovetails, keys, etc.

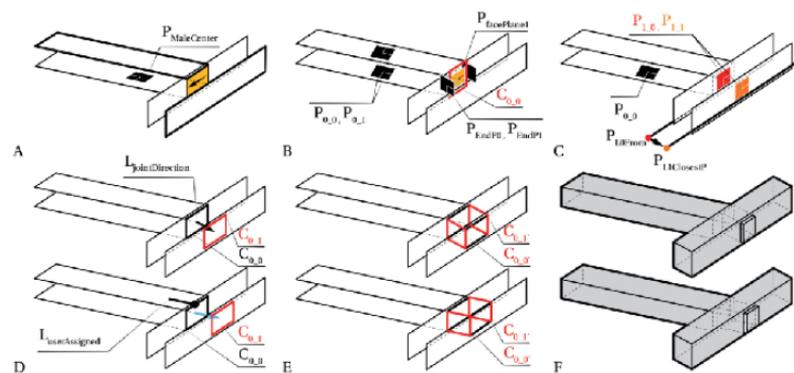
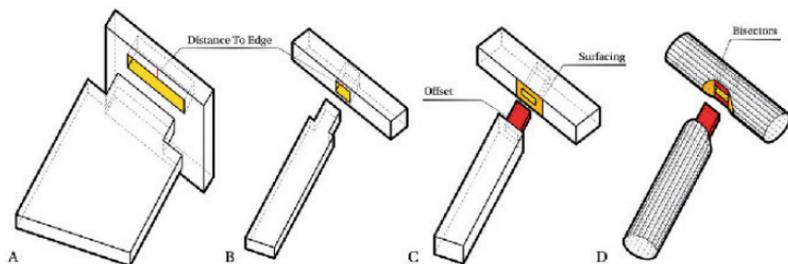


Empilement des poutres pour former un système slab/wall.

Stacking timber linearly to form a slab/wall system.

Les mêmes joints pourraient être utilisés pour connecter une série de poutres linéaires.

The same end joints could be used to join a series of linear beams.

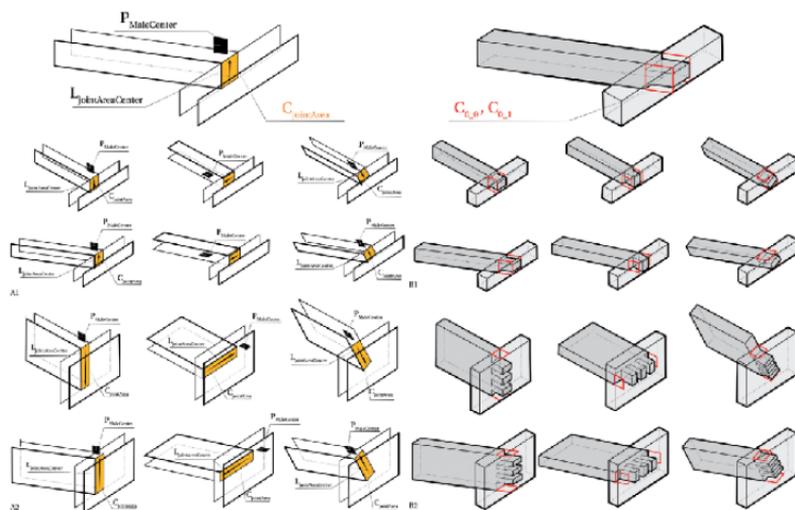


La deuxième topologie est le mode de connexion «dessus vers côté». Le type de joint varie selon l'élément et le nombre de zones de connexion nécessaires.

The second topology is top-to-side connection. The joint type diverges depending on the element type and on how many connection zones are needed.

La génération de la zone de connexion des joints ne change pas. La différence apparaît uniquement dans la sélection des types de joints.

The joint connection zone generation is the same. The only difference is in the selection of joint types.

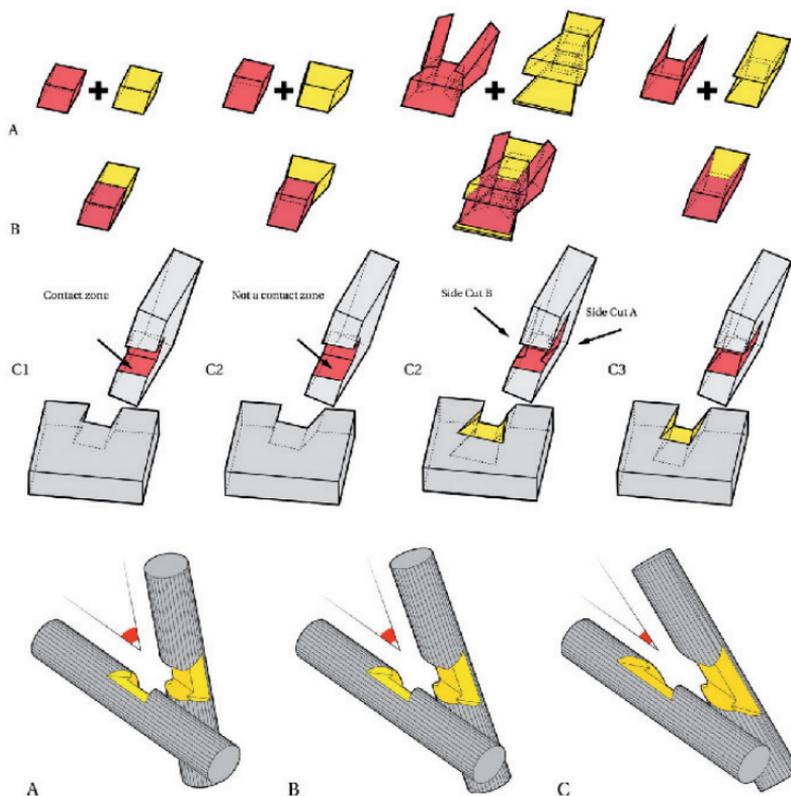


La génération des joints prend en considération le chemin-outil et les collisions potentielles avec la pièce travaillée.

L'orientation des joints peut être influencée par l'orientation polygonale et est représentée par un vecteur dans une zone de connexion.

Joint generation takes into account fabrication tool-path and potential collisions with the work-piece.

Joint orientation can be influenced by polygon orientation and is represented by a vector in a connection zone.

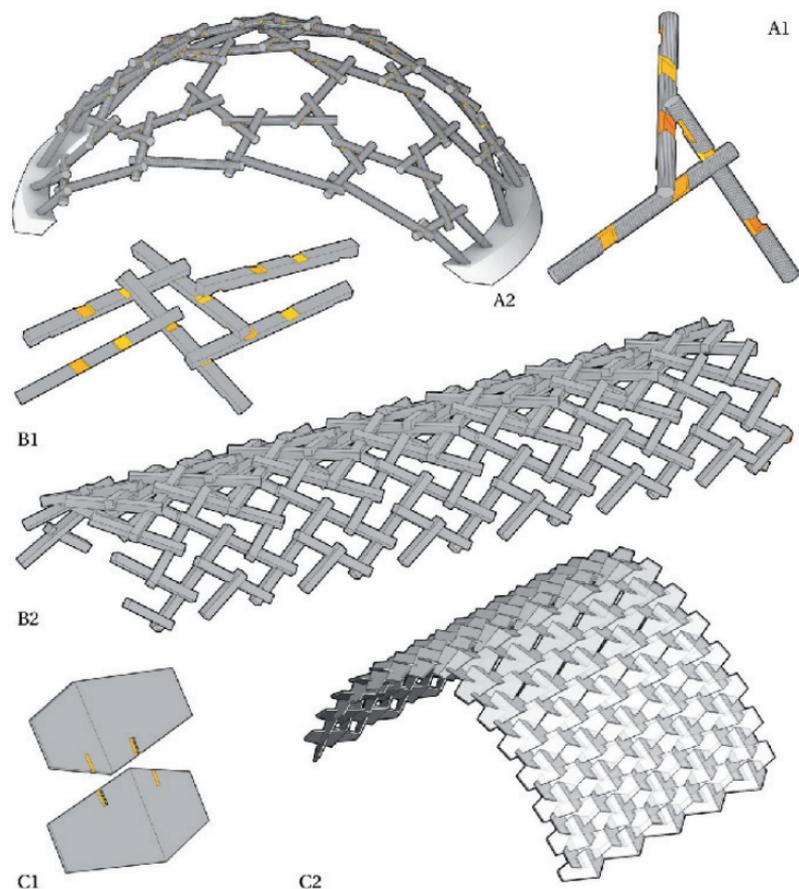


La troisième topologie de jointage crée des connexions aux intersections. Il y a plusieurs sous-catégories selon le nombre et l'emplacement des connexions nécessaires.

Les joints coniques sont appliqués aux sections rectangulaires et rondes, pour le bois droit comme pour le bois courbe.

The third joint topology creates a connections at intersections. Sub-types depend on how many connection areas are needed.

The conical joints are applied to rectangular and round sections including straight and crooked timber.

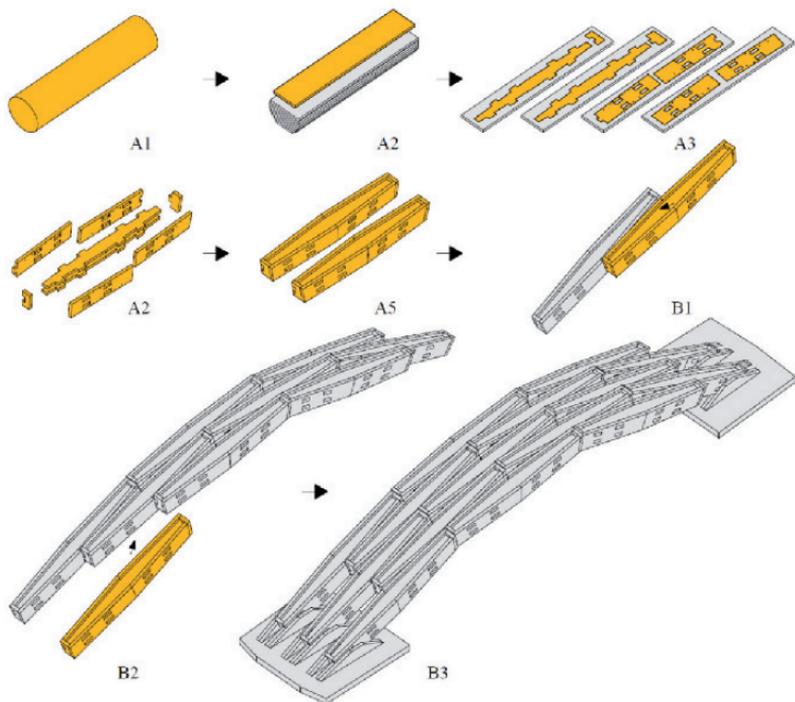


Un échantillon de joints croisés utilisés pour le développement du Joinery Solver.

Les systèmes structurels sont différents, mais les détails de connexion appartiennent à la même classe de joints.

Data-set of cross joints used for developing the joinery solver.

The structural systems are different, but the connection details belong to the same category of joints.



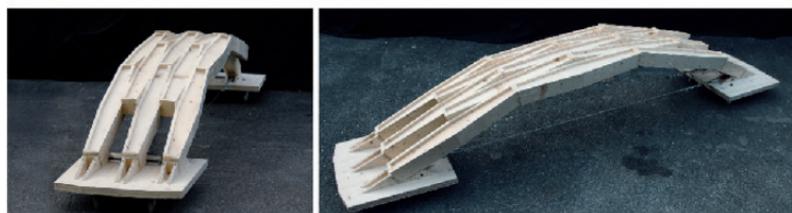
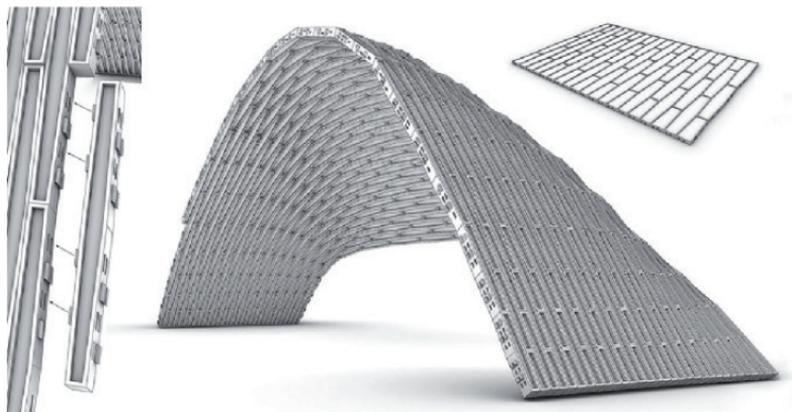
Prototypes physiques : des boîtes hexagonales s'imbriquent et forment une arche.

Les boîtes sont reliées à l'aide de connecteurs additionnels, par exemple des goujons.



Physical prototype test: an arch formed of hexagonal box components.

The box components are interconnected using extra-fasteners, e.g., dowels.



L'arche « boîte » a eu plusieurs versions basées sur des connexions bois-bois.

The box-arch had several design iterations starting from wood-wood connections.

Des connecteurs externes sont choisis au vu de la direction du grain du bois.

The external fastener option was chosen due to the timber grain direction.



Au total, quinze boîtes sont connectées dans ce prototype qui utilise des planches sciées localement.

In total, fifteen boxes were joined together into a shell prototype using locally sawn timber boards.



Test de pièces de bois massif afin de minimiser le processus de découpe.

L'élément pourrait être connecté avec des connexions bois-bois, goujons ou clés.

Solid timber elements were tested to reduce the cutting process.

The element could be connected by wood-wood connections, dowels or keys.

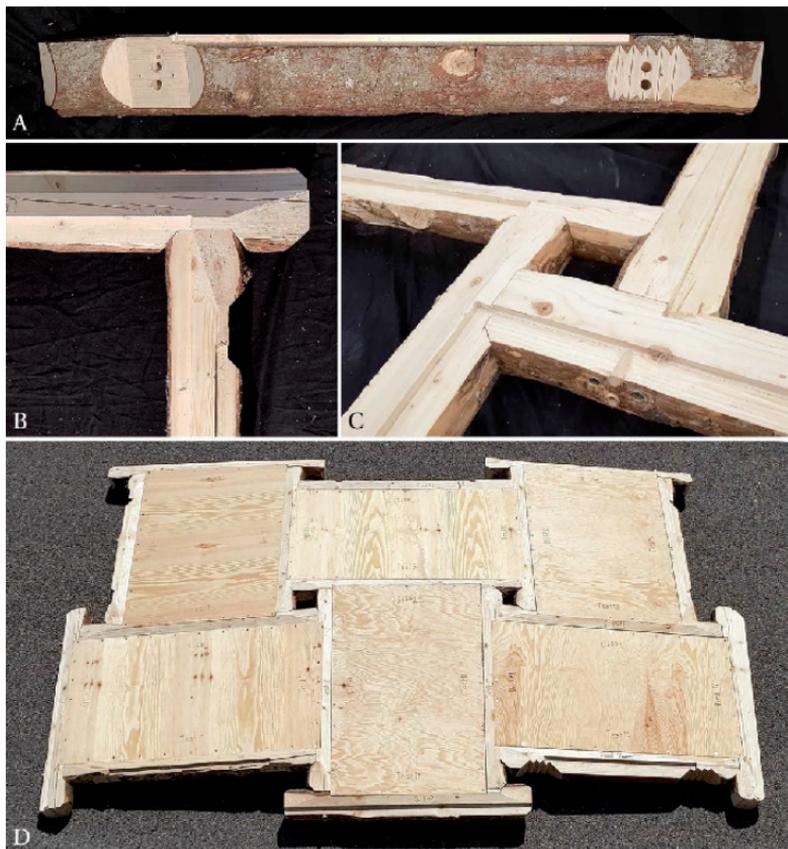


Afin de minimiser l'usinage, du bois brut a été utilisé dans une configuration CNC standard.

To reduce timber processing, raw-wood was used directly in a standardized CNC setup.

Des joints digitiformes sont appliqués de chaque côté d'une poutre pour former une arche.

Finger joints were applied on each side of a timber beam to form an interconnected arch.



Connexions d'extrémités
pour une structure réciproque
en panneaux de bois.

End connections for a braced
reciprocal timber panel structure.

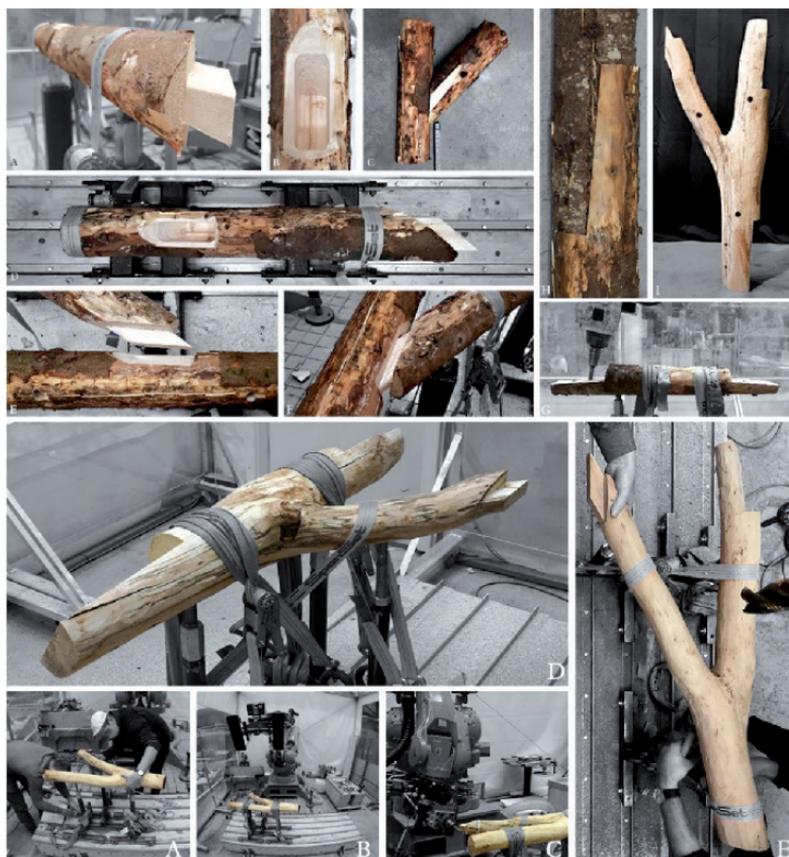


Le bois brut pourrait être utilisé avec des joints qui suivent la direction des fibres, par exemple en tenon-mortaise.

Les côtés doivent être reliés avec des connecteurs externes graduellement inclinés bloquant la séquence d'insertion.

Non-processed timber could be used with joints following the fiber direction, such as tenon-mortise connections.

Side connections have to be joined using external fasteners gradually inclined to block the insertion sequence.

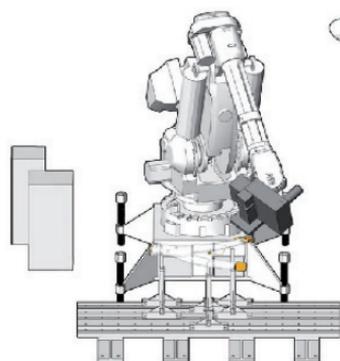


Les prototypes fourchus ont subi des tests préliminaires sur éléments linéaires simples pour réduire le risque d'erreur de fabrication.

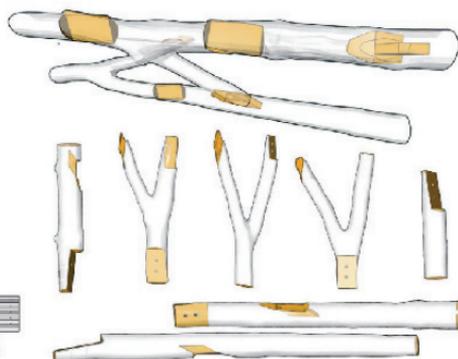
Les troncs ont été scannés et usinés pour créer des connexions côté-côté / côté-haut (joints par approche et tenon-mortaise).

Forked prototypes were pre-tested on simple linear elements to reduce possible fabrication errors.

Forks were scanned and fabricated using side-to-side and top-to-side connections (scarf and tenon-mortise joints).



Fabrication robotique et scans guident le processus de fabrication alors que la génération des joints est liée à la conception.



Robotic fabrication and scans guide the cutting process, whereas joinery generation is linked to the design process.

**INVENTING
A MATERIAL
FOR AN ERA OF
ENVIRONMENTAL
BALANCE**

**Christophe
Catsaros**

The history of architecture has its key moments, buildings that defined turning points and conditioned the overall evolution of construction formally, economically and structurally. These historical references, which seem to be cherished by architecture enthusiasts and architects alike, make it possible to envision architecture in its totality from a few exemplary achievements. The narrative of architectural modernity, however objective it may be, is not immune to this determinism fuelled by art history and the taste of an era, with its obsessions and needs, and this linear saga of twentieth-century construction is underpinned by a number of modern works that serve as reference points. Over time, these works have come to embody much more than moments of innovation. By a sort of metonymic shift, they have become symbols for a change of course, and perhaps even for the era as a whole.

The Dom-Ino House is a typical example of this type of reference. Designed at the beginning of the First World War, it is presented as a principle for the rapid rebuilding of houses destroyed by war. A constructive model to prepare for the worst in other words, and history certainly proved Le Corbusier right. The war was terrible, followed by a second, even more horrific and widespread confrontation, which required a gigantic reconstruction effort based essentially on the constructive virtues of concrete. While the Corbusian model puts its trust in this evolution, at the time of its formulation, it could not contain all the elements that would contribute to its success. Yet, the simplified narrative of modernity is satisfied with the obvious causality of a model and its almost global adoption. As a narrative, it emphasises the formal aspects, malleability, ease of execution and the abundance of raw material, all of which are elevated to

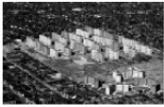


→

74

the status of structural qualities for the modern project. However, it was not only due to the way it gives substance to the modern programme that concrete succeeded in embodying architectural modernity to the point of becoming its materialisation. The history of twentieth-century architecture too often stops at this idealised account of the encounter between a programme and a material. It rarely engages in the multi-factorial critical analysis that would enable it to understand its own evolution.

Having failed to undertake this effort, the modernist doxa has long maintained an objective understanding of the architectural and urban forms that it generated. This modernity, a little too indulgent with regard its own contradictions, cultivated the idea of an end goal for architecture, a certainty that is corroborated by the fact that it applied similarly to market economies and collectivist societies. The modern sought to be universal and confidently assumed that it could be applied in the same way in all parts of the planet. Variations in adaptation, whether climatic, cultural or topological, did not call its fundamentals into question. This modernity rightly liked to project itself as the ultimate phase of human development. The belief in the positive outcome of modernity still persists in the principle of a generic architecture, or in the idea of a non-referential architecture supported by Olgiati. It is essentially a pipe dream, a grey one, that is to say, made of concrete. With the benefit of hindsight, the 'style' aspect of the modern programme stands out quite obviously. It was ideological in nature for the instigators who benefited from it and a form of imposed conditioning for those to whom it was applied. One learned to live a modern life as one learns to perform a dance or play an instrument.



→

75

In this game, one could be a groundbreaker or a follower, a trainer or a dog. This unconditional faith in the virtues of functionalism lasted until the first crack in the conceptual edifice coincided with the first full-scale failures of modern urbanism. The fracas caused by the demolition of the Pruitt Igoe buildings in St. Louis, Missouri, in the mid-1970s sounded the death knell of this modern innocence.

This first failure, but also the efforts to remedy it, whether structuralist, brutalist or postmodernist, showed that architectural modernity does not escape social, economic and aesthetic determinisms. It was thanks to the combination of technicality, a societal programme, collective imagination and an industry that it came to be cast in a mould that it imagined to be definitive; that of a concrete formwork. While metal and glass also had their say in the conditioning of the modern idiom, it was concrete, as idealised by Le Corbusier with his Dom-ino system, that has been held up as a reference constructive system throughout the twentieth century. In this narrative, concrete made it possible to have more responsive urban planning, healthier housing and buildings better adapted to their function. Synonymous, henceforth, with progress, hygiene and static stability, it came to signify rationality. As for the attempts to think modernity in other forms, they have not been entirely forgotten by history, however, the dominance of concrete was such that it simply marginalised them. Expressionists and brick, libertarians and the inflatable, as well as the few experimenters in wood helped to create the scenario of a world that might have been but never left the register of utopia or experimentation. Alongside these minority variations, concrete erected its rational and orderly buildings as far as the eye could

see. The city born of the encounter between consumerism and mechanisation was generic and unchanging, assumed to be perfect in the way it responded to the needs of the modern family. Until the realisation that it was lacking that something that makes the city bearable.

CONCRETE AND ITS TRUE PURPOSE

It took other failures, similar to that of Pruitt-Igoe, to make things clear: Sarcelles, La Grande Borne,¹ Les Poètes in Pierrette,² Le Mirail in Toulouse and the towers of the northern districts of Marseille. The disintegration of a model of society revealed the negative dimension that had slipped discreetly into the magic formula; the poison hidden in the cement. What modernity had enthusiastically poured into the formwork of reconstruction owed much more to the war than to any ideal of living together—the German effort to fortify the European coasts against the expected landings, but above all the trauma of the destruction of cities in the campaign to defeat the Axis powers. The magnitude of this event and its impact on the course of history are not sufficiently appreciated. Between 1939 and 1945, whole districts and cities were wiped off the map. Historic cities like Warsaw and Cologne, dense industrial metropolises like Tokyo, London and Berlin, and even cities that thought they were safe from the bombs, like Dresden, were destroyed.³

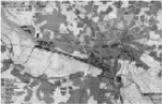
1 Catsaros, Christophe. “La cité des enfants perdus”, *Archistorm*. Nov./Dec. 2010.

2 Catsaros, Christophe. “Les poètes réduits au silence?”, in *D'Architectures* n° 188, Société d'Éditions Architecturales. Lyon, Février 2010. p. 20.

3 Lindqvist, Sven. *Une histoire du bombardement*, coll. “Sciences humaines”. La Découverte. Paris, 2012.

The scant attention this historical episode receives in the history of architecture, or even in history itself, attests to how traumatic it was. The commemoration of the bombings remains vivid in a few cases that have left their mark, such as Hiroshima or Rotterdam. Everywhere else, they have been discreetly removed from the collective memory. Who remembers the bombing of La Chapelle in Paris, or the bombing of Hamburg, which killed almost as many civilians as Nagasaki?

Far from any pretence of memorialising, this destruction deserves greater attention. It had a major impact on the rest of the twentieth century and in the evolution of its architectural and urban forms. The vulnerability of dense cities with flammable timber frames was the perfect backdrop against which the ideologists of concrete could put forward their constructive and organisational model. The reconstructed cities were not supposed to burn down or break up at the slightest blast.⁴ The desire to create a habitat safe from incendiary bombing is the least apparent of the reasons that launched the concrete mixer lorry



→

76

into the world's cities. Other factors contributed to the dominance of this model: ease of supply, in some cases, and a concrete industry structured by the war effort being converted to civilian use. Without the Atlantic



→

77

Wall, would the reconstruction have been as massively concrete? The fear of reliving the Armageddon of the fire storms⁵ experienced in Germany and Japan remains the most certain and least well-known reason for modernity's concrete fate.

FROM ONE WAR TO ANOTHER

From the Dom-Ino system of 1914 for rebuilding battered Flanders, to the breaking up of the modernist urban grid to prevent the spread of fire from building to building, modernity seems to owe as much to destruction as to the inventiveness of its pioneers. In keeping with this logic, to understand what the next architectural revolution will be, it is useful to look closely at the current situation, and more particularly at the way our own dominant model is collapsing. If the predominance of concrete during the second half of the twentieth century was due to the anguish caused by a repressed tragedy, it may be that the next step in the evolution of building techniques will in turn be motivated by the prevention of an announced catastrophe.



→ **78** If the predominance of concrete during the second half of the twentieth century was due to the anguish caused by a repressed tragedy, it may be that the next step in the evolution of building techniques will in turn be motivated by the prevention of an announced catastrophe.

For the generations that experienced the Second World War, the catastrophe was mechanised warfare and the destruction of which it was capable. Ours lies in the disruption of the climate, which could reach such proportions that the favourable environment we enjoy today would cease to exist. The scale and type of threat are different, but the way it shapes attitudes is not unrelated. The eco-anxiety of young people in the third millennium resembles the radical pacifism of young people after the Second World War. Pursuing this analogy, one may venture that, as in the 1950s, the global response of our societies will be to adopt forms of habitat capable

4 Düwel, Jörn. *A Blessing in Disguise: War and Town Planning in Europe 1940–1945*, DOM publishers. Paris, 2013.

5 Sebald, Winfried Georg. *On the Natural History of Destruction*, Hamish Hamilton. London, 2003.

of protecting us from catastrophe. The massive return to wood as the preferred building material would be a step in this direction. It would no longer be a question of using wood incidentally, as cladding or as an ornamental attribute, but of letting wood dictate the rules of the game by imposing its own rhythm. It would no longer need to imitate the behaviour of other materials to prove that it can be used. It would no longer need to be as strong or as light as metal, or as fire-resistant as concrete. It could be what it is, and redefine standards, criteria and priorities according to its own qualities. This wood would impose a holistic approach capable of encompassing the production, use, and reconversion of a material in one process. This would mean building according to the quantity of material available in a territory. The constructive identity of each region would derive from this balance between what grows there and what can be done with it. This limitation, bound to make property developers howl in protest, would be a safeguard against the speculative excesses that are multiplying all over the world. In China, property speculation has generated the sale of 100 million apartments that have been left empty by their buyers.⁶ In Spain, the amount of unoccupied building produced at the time of the 2008 crisis was equivalent to the surface area of the canton of Vaud. A gradual prevalence of local wood in construction would make this kind of drift impossible, mainly due to the promise of unlimited development inherent in concrete. Wood creates the possibility of a development that is adjusted to the sustainable renewal capacity of the forest resource. If this type of societal change seems beyond reach today, it is not impossible that, as in 1945, destruction will cause attitudes to change and with them the field of possibilities. The farther we get into the climate

crisis, the more its consequences will push whole sections of society towards a radicalism that it can hardly accept today. Making wood a global regulator of development before our ecosystem collapses would be a way to bring about change before the catastrophe occurs. This would be a matter of prevention rather than cure.

THE HIGHLY ARCHITECTURAL JOINERY OF WOODEN STRUCTURES

Before the twentieth century and the great transformations of modernity, it was stone that typified the notion of 'well built' in the West. Cut stone, with its stability and durability, was the perfect metonym for architecture. Modernity succeeded in replacing this idealised stone with concrete, investing the new material with the promise of a more hygienic home and a city more in harmony with the challenges of the mechanical age.

If architecture were to change its frame of reference once again, what symbolic qualities would support this change? Could sustainable and adjustable wood replace concrete, which has become a little too polluting and invasive to serve, on its own, as the archetypal material of architecture in general? How would timber construction come to signify architecture as a whole? What would be the arguments and archetypal images of this intertwining of an era and a reinvented material? It is highly probable that wood/wood joinery, long relegated to the rank of Japanese oddities, would find its place in this value scale that

6 Soules, Matthew. *Icebergs, Zombies, and the Ultra Thin: Architecture and Capitalism in the Twenty-First Century*, Princeton Architectural Press. New York, 2021.

endows architecture with its references and its means of thinking and designing. It is also likely that the excellence of the carpenter (or his mechanical avatar), capable of visualising in negative the exact shape required to interlock two distinct elements, would signify tectonic intelligence in its absolute potential. The art of adjustment, of well-conceived joinery, would once again become the epitome of the 'art of building'. Architecture would then change its characterisation. It would be less solid, generic, moulded, whole, compact, immutable, mechanical and unsegmented. It would become more lightweight, intelligent, articulated, demountable, robotic or manual, but above all more local and adjusted. Architecture would progressively cease to be evaluated by the surface area of buildings and would be measured by the intelligence of its joinery and the inventiveness of its structures. The criteria for architectural excellence would change again, leading us towards tectonic expressiveness and a new alliance of engineering and architecture.

**TIMBER
FRAME JOINERY:
IN SEARCH
OF THE PERFECT
JOINT**

**Stéphane
Berthier**

Elias Guenoun's *198 assemblages du bois*,¹ published in 2014, is a work that compiles in one volume as many wood joints as there are positions in the Kama Sutra. It is not a construction manual but rather a 'coffee table' architecture book, consisting solely of axonometries free of any commentary. It is a delight to leaf through and each representation offers the reader an opportunity for aesthetic contemplation. However, these joints are never situated in a structural frame, nor are they dimensioned or captioned other than by their name. The drawings represent only their geometric accuracy and astute intelligence, to the exclusion of any other technical information.

*L'encyclopédie des métiers de la charpente de l'ossature bois*² published by the Compagnons du Devoir, considers joints as critical points where craftsmanship can be recognised and emphasises that they become the main source of disorder if they are badly executed. They are the true arbiters of the carpenter's dexterity as well as the quality of the wood used; in a word, the joints are the most important part of the art of carpentry. From very early on, building these structures required knowledge of how to draw the pieces to the right lengths and their extremities at the correct angles in order to perfectly slot the edges of the structure into a precise connection. Historically, this knowledge was passed on by master craftsmen to their apprentices in the evening after the day's work. As proof of its richness and historical interest, this body of knowledge, which in France is called *l'art du trait*, or scribing, was classified as intangible heritage of humanity by UNESCO in 2019. This set of empirical graphic methods, together with those of the stereotomy practised by stonemasons, were brought together into a coherent system at the end of the eighteenth century by Gaspard Monge to

constitute descriptive geometry. There is no doubt that to a large extent the poetics of carpentry lies in the beauty of its joints which precisely incorporate the geometric figures, this ‘art of construction’ described by Kenneth Frampton in his definition of tectonics.³ Undoubtedly, it is also what is missing from many of the engineering works of the industrial twentieth century, during which wood joints gradually disappeared in favour of metal connectors and wooden components were reduced to the role of bars linked by steel nodes. While these connectors allowed carpentry to enter the modern world and to compete with modern materials, they may also have caused it to lose some of its ancestral identity. The contemporary era therefore happily welcomes the revival of wood joints whose execution is now entrusted to digital tools.

From this brief historical overview one can immediately infer that joints have evolved successively through three ages, respectively craftsmanship, industry and digital technology, although each successive age has not necessarily caused the previous one to disappear. The artisanal knowledge of the *Compagnons du Devoir* has persisted, in the field of heritage in particular, and was recently tasked with rebuilding the framework of Notre-Dame de Paris. Industrial frameworks with metal connectors still accounted for the bulk of the market at the beginning of the twenty-first century, while now we are seeing the emergence of digital manufacturing. For the

1 Guenoun, Elias. *198 Wood Joints*, trans. Dean Inkster, Architectural Notes. Paris, 2019.

2 Les Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers de la charpente et de l'ossature bois*, Lib. du Compagnonnage. Paris, 1977.

3 Frampton, Kenneth. *Studies in Tectonic Culture*, MIT Press. Cambridge (MA), 1995.

moment the latter cannot compete economically with twentieth-century methods, even though the joints of the Notre-Dame 'forest' will probably be made using cutting robots. But before developing the characteristics of these three ages further, our overview would not be complete without a quick detour via Asia, and in particular via Japan.

Japanese traditional joinery was imported from China with Buddhism in the fifth and sixth centuries before developing independently on the archipelago. It is universally celebrated for its high degree of refinement. Even more so than in Europe, it bears witness to the excellence of the master carpenter's skills, with the particularity that the most beautiful joint is the one that is designed to disappear into the thickness of the piece of wood to leave only the line of the cut between the pieces. As the design of Japanese frameworks very rarely uses triangulation, these connections are most often ortho-normal, using stacking designs⁴ which are free of all the European complexities of scribing in oblique configurations. They are, however, of remarkable mechanical precision and sophistication, designed to withstand accidental stresses that may occur during typhoons or earthquakes. They consequently incorporate numerous key, dovetail or hammerhead devices in joints that normally undergo certain types of stresses but which may have to 'work the other way around',⁵ as, for example, when the wind subjects a post to tensile stress.

However, neither wind nor the threat of earthquakes alone can explain the level of refinement of Japanese joints. In a country where a master craftsman can receive the honorary title of 'living national treasure', the anthropological dimension of the sacredness of artisanal know-how undoubtedly explains this excess of

perfection in part. To follow Roland Barthes's thinking in this respect,⁶ if joint is a sign, then the excellence of the carpenter is its signifier. The demonstration of skill may be an end in itself. It is significant that the *Takenaka* in Kobe is called the 'Carpentry Tools Museum'. The particularity of the visit is that it highlights the history of tools, forges, steels and sharpening methods and presents the evolution of carpentry as merely a consequence of that of the tools, a secondary process. The demonstration is edifying: as the tool improves, the joints become more precise and more complex. Architecture then takes flight, daring to take on new spans and heights, enriching itself and carving out ornamental features. In Europe, it seems that a history of architecture has never been presented as stemming from a history of tools, and by extension, of the skills of craftsmen. We should also note that the precision of Japanese joints is due in part to the quality of the *inoki* wood, whose grain and fineness allow for extremely delicate carving, from which chips the thickness of a sheet of cigarette paper can be extracted, a result that is more difficult to obtain with European species.

AGE I: WOOD JOINTS

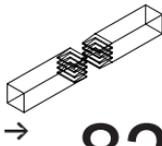
Whatever the cultural context, be it Asian or European, wood joints are subject to the same mechanical stresses and while they are initially designed to resist the effects of gravity on a construction, they must also withstand other vertical or horizontal stresses. Furthermore, they are more resistant to compression forces, since the

4 Engel, Heino. *Measure and Construction of the Japanese House*, Tuttle Publishing. Clarendon, 1985.

5 Graubner, Wolfram. *Assemblages du bois, l'Europe et le Japon face à face*, Éd. Vial. Paris, 2020.

6 Barthes, Roland. *L'empire des Signes*, Éd. Points. Paris, 2007.

entire cross-section of the wood contributes to the load resistance, than to tensile, shear or torsion forces, which remain their Achilles' heel. The vast majority of existing joints are found in both Japan and Europe, with the distinction being made more in terms of refinement than in terms of mechanical function. In Asia as in Europe, it is mainly the compressive forces that hold the joints in place by maintaining pressure over the entire surface of the cross-section. In Wolfram Graubner's inventory,⁷ most of the joints presented exist in both regions, and differ more in their variation than in their nature. Several attempts have been made to classify joints typologically, none of which are entirely satisfactory. Graubner⁸ proposes a classification by geometry—long, oblique, right-angled, flat—without any consideration for the mechanical stresses they have to withstand, while the *Compagnons du Devoir*⁹ propose a stress-based categorisation, even if the same joint can be found in several categories. In his afterword to *198 assemblages*,¹⁰ Elias Guenoun explains that he gave up all his initial classification ambitions as his inventory grew. Nonetheless, what all wood joints have in common is that, in one way or another, they interlock a hollowed-out part and a corresponding solid, in multiple spatial configurations, under different physical stresses. Their level of sophistication is a product of their geometric and mechanical complexity. We will try to show how three of the main wood joints—splices, tongue-and-groove joints and the corner joints—are enriched, from their most elementary expression, held in place through simple contact under the structure's own weight, to their more complex variants, depending on how great the tensile, bending or shearing forces to which they are subjected, in relation to their position in the structure's static scheme.



82

Splices are connections designed to lengthen a piece of wood longitudinally. As a general rule, this joint, when it concerns a beam, is made at or near the support. As long as the two connected sections are kept in contact by compression of one on the other, a simple or an oblique halved joint may be sufficient. However, lateral stresses can occur, for example due to wind, and the two parts of the beam can move perpendicular to their longitudinal axis. Carpenters therefore invented a whole range of slanted sections to hold the parts in place. A splice bar or a tenon can play the same role, and therefore all sorts of variations are imaginable. But our two beam parts can also move apart in the longitudinal direction. To prevent this, the oblique halved joint becomes a scarf joint, whose structural shape prevents the two parts from separating. This can be supplemented by wedges or dowels for better surface contact. It should be noted here that the dowels are never used in the joints, they only serve to maintain the pressure that ensures contact between the two parts. Rabbits can also be added to the scarf joint if the connection is subject to tugging, and combined with the previously mentioned devices to protect against lateral slippage: a tenon with or without a shoulder, bevelling, and so on. The complex joint can be broken down by analysing the stresses it undergoes in the three directions in space. The splice can also extend a column and should likewise resist vertical

7 Graubner, Wolfram. *Assemblages du bois*, Éd. Vial. Paris, 2020.

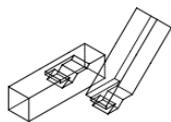
8 *Ibid.*

9 Les Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers de la charpente et de l'ossature bois*, Lib. du Compagnonnage. Paris, 1977.

10 Guenoun, Elias. *198 Wood Joints*, trans. Dean Inkster, Architectural Notes. Paris, 2019.

or horizontal displacement by the wind. Japanese architecture often takes the risk of lowering wooden poles very close to the ground, without a stone base or foundation as is often the case in Europe. As the bases of the posts tend to rot in this configuration, they often feature beautiful scarf joints that allow for the regular replacement of the part spoiled by humidity, whose sophisticated structural shapes oppose tearing as well as lateral shifts.

The tongue-and-groove joint is an oblique connection that can be found, for example, between the principal rafter and the tie-beam on a king post truss. This node undergoes vertical forces that a simple support would transmit without difficulty, but also horizontal thrusts that are blocked by a notch in the tie-beam, made at a good distance from the butt, so as to keep a sufficient heel to resist longitudinal shear. As this same shear would be too strong for a thin tenon cut into the cross-section



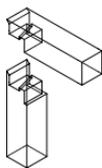
→

83

of the tie-beam, the stress is distributed over the entire width of the part. Once again, depending on the stresses considered, this tongue-and-groove joint can be single, double or triple. It can be completed with a tenon with or without a shoulder to ensure its stability perpendicular to the plane of the truss, or it can be forked, as if the tenon were a part of the tie-beam rather than a part of the principal rafter. As with the splices, the long list of variants depends as much on the analysis of each mechanical stress as on the habits and customs of the craftsmen according to their geographical origin and their know-how. It is worth noting that there is an interpretation of the tongue-and-groove joint, albeit almost extinct today, that is used to create dovetailed beams providing a strong static height from two thinner beams superimposed

lengthwise. Their zig-zag contact profile, with or without wedges, prevents the two beams from sliding over each other under the effect of bending. This construction method was revived in 2019 by the engineers Jacques Anglade and Nicolas Barthes for the Elsa Triolet secondary school in Thaon-les-Vosges built by the architects Cartignies and Canonica.¹¹ The aim of this experiment was to propose an alternative to glulam timber beams to span the 8 m width of a classroom, in an ecologically responsible approach.

Corner joints are usually used to connect a bending structural member to its support. The angle formed may be on the vertical plane, as when a cross-beam meets a column, or on the horizontal plane when a beam rests on a ribbon board. At the intersection of the vertical and horizontal planes, there are three-dimensional corner joints, which are difficult to make. Beyond their basic version of tenons inserted in a mortise, which are well adapted to the forces in the axis, the apparatus becomes more complex, as for the splice and the tongue-



→

84

and-groove joint, according to the additional stresses to which it is subjected. Thus, lateral stresses can be countered by shoulders, or the joint can have multiple tenons. The mortise may be open so that the end of the tenon is reinforced with ‘fox tails’, which are a kind of wedge that increases friction against the walls of the mortise to counteract pull-out forces. Another trick is to pull out the tenon to a sufficient length and lock it with a key. When the connection forms the end

¹¹ Berthier, Stéphane. “Nouvelles richesses” in *D’Architectures* n° 284, Société d’Éditions Architecturales. Lyon, Octobre 2020. pp. 59–95.

of the two pieces, several forked systems can incorporate keys or dovetail tenons to prevent the joint from being pulled apart. The famous Japanese *saobiki-dokko* joint combines four coplanar crossbeams on a thin post and deploys a rich array of tricks to ensure mechanical continuity between the pieces of wood. Its assembly order, including in some cases the translation or even the rotation of one of the assembled parts, is worthy of a so-called Chinese puzzle.

We could keep adding to this inventory, by turning our attention to flat joints, notched halved joints, halved mortise-and-tenon joints, ties, the keying of boards, etc., but they all proceed from the same logic, starting from a rather simple basic device, gradually enriched with adjustments designed to resist the numerous stresses to which they are subjected. The joints presented in Guenoun's *198 assemblages* can also be read as enigmas that must be solved by identifying the stresses that run through them in their profiles. The different solutions that can be consulted in the monographs of joints can be accumulated in multiple variants that give the impression of an infinite number of possibilities. In certain situations, considering the loss of material that these sophisticated cuts cause, these technical and fragile articulations serve more as a demonstration of the carpenter's virtuosity than as a means of ensuring the strength of the structure. These numerous cuts and complementary aids reduce the useful section and often lead to a general oversizing of the piece of wood, starting from the dimensioning of the weak link that is the joint. The time spent on making them becomes prohibitive as the evolution of working conditions tends to increase the cost of labour compared to the cost of the material.

AGE II: METAL JOINTS

Nails and cramp irons have existed for a long time, but prior to the Industrial Revolution they were always used extremely sparingly. They were expensive, forged tools and were used judiciously when the situation required it. The industrial production of nails in the nineteenth century changed everything by reducing their cost to almost nothing. This invention led to the development of the North American balloon frame construction method, which consisted of simple nailed boards forming repeated frames in a series of short spans. This construction method favoured the conquest of the West and the rapid settlement of unskilled populations, since a saw, a hammer and a box of nails were all that were needed to quickly and economically build dwellings, albeit frugal ones.¹² For the first time in the history of carpentry, the constraint of the wood joint disappeared. This system persists in a related form today, in so-called ‘light-frame’ constructions, the nails having simply been replaced by screws. A similar evolution can be seen in the field of small industrial trusses, where the system of triangulated bars in tension or compression was first assembled with nailed plywood gussets, before being replaced by hooks installed using vices.

While the morphology of traditional architecture depended to a large extent on the range and quality of its joinery, the arrival of metal connectors freed it from this organic constraint. The Swiss publication *Construire en bois*¹³ provides an impressive list of products and potential

12 Marrey, Bernard. “Le bois, essences et sens”, in *Histoire de bois*, Pavillon de l’Arsenal de Paris, Éditions Picard, Paris, 1994.

13 Herzog, Thomas *et al.* “Moyens et techniques d’assemblage”, in *Construire en bois*, PPUR, Lausanne, 2007. pp. 106–123.

uses for metal parts, much like a hardware catalogue. These include, in order of complexity: a) items supplementing wood joinery such as nails, screws, pins and bolts, which are intended to reinforce traditional joints such as tongue-and-groove joints or splices, or sometimes even join beams without prior cutting, as in bolted ties or screwed lightweight framing; b) the various shoes, hangers, iron fittings, nail plates, and so on, which provide the connection, exposed or embedded in the halved joint, between coplanar timber members; and c) the mechanically welded nodes that contain the geometric complexity of three-dimensional joints. In the latter two cases, the empirical knowledge of carpenters gives way to that of engineers and their science of calculation. Let us note that traditional connections can also be reinforced with glues such as epoxy resins which significantly increase their mechanical resistance, while corner pieces with glued splices can ensure continuous connections between the beam and the column at the head of the frame.

The engineer Jacques Anglade¹⁴ points out that timber framing was modernised during the second half of the twentieth century due to the transfer of the methods developed in steel construction a few decades earlier. Modern timber framing is a late branch of engineering and its science of calculation rather than a development of the carpenter's art. The heroic structures of the post-war period are skeletons of wooden bars, usually glulam (but could just as easily have been steel) joined by metal connectors. From a semantic point of view, this period saw the architectonic terms of *straight gables*, *chamfered corners*, *star-shaped*, *polygonal*, *convex*, *onion*, and so on, be replaced by *grids*, *pleated structures*, *shells*, *spatial structures* and so on. *Trusses* become *porticos*, or *two- or three-hinged arches*.

Structural elements such as *principal rafters, tie-beams, roof posts, tie braces*, and so on, are now called *chords, bars, panels or box beams*. *Splices, tongue-and-groove joints, mortise-and-tenon joints, ties or keys* have made way for *bolts, pins, clamps, rings, housings, fishplates, gussets or hangers*. These semantic changes—which we could continue to illustrate with further examples—reflect a shift in how wood is used as a material, without which it would probably never have been able to compete with steel and concrete in terms of performance. It is undeniable that metal connectors have changed the face of wood construction even more than the development of glulam timber by allowing the transfer of much greater forces than was possible with wood joints. Furthermore, metal parts are not subject to variations in humidity and the risk of play that occurs in the joint when the wood dries. Given that a welded node can theoretically connect an infinite number of bars in an infinite number of directions, architectural morphology is freed from the constraint of joinery. This development, combined with that of glued wood, provided an opportunity for pioneers in wood engineering, including Robert Lourdin, a student of Jean Prouvé at the CNAM, to explore the register of spatial structures in wood such as pleated roofs, three-dimensional layers, nets or shells, during the 1960s. A dozen of his creations covering a wide spectrum of spatial structures were presented on 30 and 31 May 1969 at an IRASS conference at the Centre d'Etudes Architecturales in Brussels, under the direction of Robert Le Ricolais.¹⁵

14 Berthier, Stéphane. “Les charpentes de Jacques Anglade, une contre-culture constructive”, in *Critical* n°17. Paris, 2016. pp. 64–87.

15 Lourdin, Robert. *Structures spatiales en bois*, Cahiers du Centre d'Etudes Architecturales. Brussels, 1969.

These wooden spatial structures, although still governed by relatively simple geometries such as portions of spheres or hyperbolic paraboloids, paved the way for the 'wood' branch of engineering, whose contemporary developments, aided by digital tools, now offer a profusion of 'non-standard' architectural forms. This new generation of buildings in turn questions, in its own way and with its own tools, the subject of joinery.

AGE III: DIGITAL WOOD JOINTS

The development of computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) tools in the field of timber construction has opened up a new period of innovation. The promoters of digital construction often argue that the use of wood joints has a competitive advantage since metal connectors clearly represent the highest expense in a quote for a framing job. Therefore, if machine tools can cut these connections directly into the structural members, timber construction would become more economical. The argument is somewhat specious in that the joint is the most expensive part of a structure, whether it is made of metal or wood, since it is the part requiring the most craftsmanship. The savings made on metal connectors are offset by the additional processing on a cutting robot. While these tools are capable of making most traditional joints with great accuracy, it is not clear that they are more competitive in terms of cost. Furthermore, digital tools do not change the mechanical qualities of wood joints, which are still inferior to those of metal connectors. However, it is now increasingly common to see mortise-and-tenon or dovetail joints replacing the rather ugly metal boxes in the parts of the structure where the framework is visible, or to put it another way, when there is an architectural

argument for it. In the eye of the observer, these articulations are perhaps a little less beautiful than manual joints, no doubt for the anthropological reasons given above. We no longer admire the talent of the craftsman who achieves the perfection of his art, but merely observe the regularity of the machine.

In another register, the research conducted under the WikiHouse project¹⁶ has led to a rediscovery of the keyed timber invented by Philibert De L'Orme in the sixteenth century. This collaborative project developed from 2010 to 2016 proposes a house model designed as a kit to be assembled from cut-out 18mm plywood panels, on a digital milling machine. The structure is composed of repetitive frames, with a spacing of about 60 cm, similar to the North American balloon frame. Each frame is made of two sheets of plywood, assembled with an offset by scarf joints. The horizontal crosspieces that connect these frames are simply keyed in the same way that De L'Orme's diagonal braces linked his keyed timber vault.¹⁷ This construction method makes it possible to build a house without nails, glue, screws or any tool other than a mallet. It opens up a new avenue for self-building, even if its economic relevance has not yet been demonstrated, given the costs of the raw material used and the cutting of the panels on a digital milling machine.

However, these CAD/CAM tools go further than simply copying traditional manual joints by machine and have led to innovative architectural expressions, such as

16 Berthier Stéphane. "WikiHouse ou la troisième révolution industrielle à l'épreuve du réel", *Criticat* n° 18. Paris, 2016. pp. 64-87.

17 Les Compagnons du Devoir. *Encyclopédie des métiers de la charpente et de l'ossature bois*, Lib. du Compagnonnage. Paris, 1977.

the Tamedia office building built in Zurich in 2013 by the Japanese architect Shigeru Ban. The highly anatomical design of this wooden skeleton makes the various joints legible and evokes the glory days of the British high-tech movement of the 1980s. Here, wooden architecture is further modernised by the transfer of models initially developed in the field of metal framing. On the other hand, the work carried out by Yves Weinand at Ibois, particularly on pleated structures, is based on the transfer of joinery plans known in the field of carpentry to the architectural scale. The various origami structures developed by this laboratory have gradually freed themselves from the practice of joining panels using metal angle sections,¹⁸ to now cut dovetail joints directly into CLT panels.¹⁹ The articulation is no longer a third element at the junction of two sheets but a morphological feature of their edges. These joints have the advantage of transferring the stresses along the lines rather than concentrating them on the nodes. Thus, the mechanical weakness of the material is compensated for by the distribution of the stress along the entire length of the component.

These digital tools also offer the possibility of joining twisted, unprocessed wood, as shown in the experimental roof frame produced by the AA School at Hooke Park²⁰ in 2016. This wooden arch is a triangulated structure made of forked branches. The branches were carefully selected and located in the forest, scanned and cut out before being joined together with conical mortise-and-tenon devices. A similar approach can be observed at Ibois, which is currently conducting research on reciprocal structures made of unprocessed round timber, assembled by a set of quarter joints completed by a false tenon. These studies show the new power of digital tools to scan

natural forms and recombine them according to their morphological properties in architectures that are at once archaic and innovative. They make us imagine a wood construction that circumvent the long, expensive and polluting industrial transformation of the material to find the shortest way from the tree to the building, while using pieces of wood that are currently unsuitable for construction because they are too irregular. Following the example of the twisted wood used in traditional Japanese carpentry to make its master beams, we can now envisage the architectural form becoming a co-production of nature and the architect. Let us note that half the articulations in the triangulated structure of Hooke Park are simply the natural articulations of forked branches, with inimitable mechanical characteristics. And what if only the tree knew how to make a perfect joint?

18 Berthier Stéphane. “Le nouvel âge du numérique”, in *Les Cahiers de l’bois* n°1, EPFL Press. Lausanne, 2020. pp. 39–55.

19 *Ibid.*

20 Maniaque Caroline, “Peut-on inventer en apprenant ?”, in *D’Architectures* n° 250, Société d’Éditions Architecturales. Lyon, Dec. 2016-Jan. 2017. pp. 69–107.

DYNAMIC CONSTRUCTS

Mario
Rinke

Wood has always been a material with many varied uses—and, above all, a material that is readily available in many areas. This has made it a fundamental construction material, to such an extent that, in some regions, it is linguistically equivalent to or close to ‘material’. The absence of a word for ‘substance’ in ancient Greek is believed to have caused Aristotle to instead use the word ξύλο, meaning ‘wood’. According to this theory, the Latin word ‘materia’ is the Roman equivalent of the term (this root word is still preserved in the Spanish word ‘madera’ meaning ‘wood’). In the original philosophical tradition initiated by Aristotle, this ‘substance’ is the amorphous counterpart to the concept of a ‘form idea’, which prevails eternal, unchanged and hidden.¹ The notion—and indeed the concrete form—of a table is thus static, a form that is ‘filled’ with the available material. The carpenter works with the material according to her knowledge and experience, in order to convert it into this form, in its parts and as a whole. This is a simple rendering of the thinking behind hylomorphism, but it illustrates an etymological connection between our abstract concept of ‘material’ and the associated original model substance, wood.²

However, it is not only the fundamental material/form relationship of individual things that is closely associated with wood. Wood also has a significant relationship with more complex structures. In construction, there is the ‘timber’, a key element whose name is a synonym for wood: ‘a long piece of heavy often squared timber suitable for use in construction.’³ The fibres of these timbers are also used as the basis for the mechanical modelling concepts used for all beams, in order to identify the smallest substantial unit that is subjected to pressure or strain in a loading scenario. However, as

the constructive unit in which the tree-trunk is normally ultimately made available for construction, the timber also represents the transition from the forms of the individual parts (table leg or ceiling timber) to a construct made out of parts (a table or house). Traditionally, the wooden part was formed on a small scale using a variety of tools, whereas, on a large scale, the linear wooden rods were linked into a framework in order to produce bridges, houses or machines. These two levels of the construction have always been connected together. The form of the parts and how they could be worked determined, very directly, what constructs could be produced at all, and the conception of these constructs, with the necessary connective points, would dictate the working of the parts. This representation of the complementary relationship is, admittedly, restricted here purely to the material perspective, although in truth it never can be. The simple constructive relationship of part and construct has, at different times and in different places, produced entirely differentiated formations, because there can be no exclusively material-determined form. Construction forms arise, on the one hand, through processes and therefore through people and tools, thus presupposing abilities and practical knowledge.⁴ On the other hand, the

- 1 Flusser references these word and concept roots multiple times. See, for example, Vilém Flusser, *Form und Material, Vom Stand der Dinge*, Steidl, Göttingen, 1993. pp. 105–112.
- 2 Moravanszky, Akos. “On the material-form relationship and the cultural construction of materials”, *Metamorphism*. Birkhäuser, Basel, 2017.
- 3 Merriam-Webster (n.d.): Beam. In Merriam-Webster.com dictionary. Retrieved January 28, 2022.
- 4 Zwerger, Klaus. *Wood and Wood Joints Building Traditions of Europe, Japan and China*, 3rd edition, Birkhäuser. Basel, 2015.

form concept for the construct derives from pre-existing abstract functional considerations, or theoretical knowledge of physical or geometrical limitations.

ORDERINGS IN LOAD-BEARING CONSTRUCTION

Wood has always been a readily available, readily transportable and readily workable construction material. The purposeful connection and interweaving of wooden rods played a key role in all wood-using cultures, as this is the only way to create secure constructs that exceed (by far) the span of the individual part. In spite of the great variety of construction cultures, there is a certain order legible in wood structures. For instance, there are certain main elements that run continuously through and that generally play a specific role in taking the load. In between, there are further elements, often smaller, that run between them and that are inset into them, as we find in Western cultures, or are passed through them, in the manner that can be observed in Chinese construction. With further added elements, the whole results in loadbearing elements and additional elements that secure them firmly in place, plus further elements that protect these timbers from rain or contribute to the functionality of the whole complex.

For a number of reasons, wooden bridges were always particularly demanding constructions. They often had to support significantly heavy loads—which, additionally, would be on the move—and had to span wide rivers. Above all, however, they were exposed to the weather to a particular degree, including floods and icy conditions, or powerful storms.

Before the science of construction differentiated construction into a number of areas and extended its

fundamental axioms throughout the traditional forms of building developed over centuries, decisions on the utilising of resources, materials and the progression of building work were entirely in the hands of the master builder or master craftsman.⁵ In baroque carpentry art, which represents the highest and most differentiated form of Western wood construction, master carpenters were naturally guided by the principle of calling on their own or communal experience and on intuitive working. For larger bridges, the principle of multiplicity is typical. Beyond the ordering of the structure in multiple hierarchical levels, engineers would frequently install further loadbearing members, and sometimes even a second, parallel loadbearing structure within the same construct, in order to give the configuration a greater loadbearing capacity.⁶

The old craft knowledge was also transmitted to new cultural circles, as architects and engineers—but mostly artisans—migrated. American construction in the nineteenth century took a number of old European methods of construction and elaborated on them for their purposes. A lack of taught technical skills combined with remote construction sites led to a decline in many of the heavily differentiated construction forms characterised by craftsmanship. Member forms were unified and connections simplified. Because a number of especially large bridges were created in this context and,

5 Picon, Antoine. “The First Steps of Construction in Iron. Problems Posed by the Introduction of a New Construction Material”, in Mario Rinke & Joseph Schwartz, *Before Steel. The Introduction of Structural Iron and Its Consequences*, Sulgen Editors. Niggli, 2010.

6 Peters, Tom F. *Building the Nineteenth Century*, MIT Press. Cambridge, 1996.

given the emergence of the railway and other heavy traffic, because these bridges are subject to especially heavy demands, constructions had to be specially developed and specially equipped. In contrast to the emphasis on theory in European construction, however, America did not see a change in the general construction pattern or overall form. Instead, whole support structures were typically overlaid.⁷

As is shown by the very clear historic example of the Chain Bridge of 1847, the truss that had been used hitherto, with the doubled diagonals in every field, was not guaranteed to stand up to the load—for this reason, an arch was added on either side of the truss. In his 1846 patent, William Howe describes how steel rods should ideally be chosen for the vertical posts. These are additionally pretensioned with wedges, and this allows the compression diagonals to be activated in both directions. Additionally, arches are added, connected with the framework at regular intervals at the contact points to allow the two to work together. It is not the loadbearing system itself that was changed; instead, multiple ones were superimposed. Construction engineers of the eighteenth and nineteenth centuries alike had another objective in super-



→ **88** imposing these systems besides strengthening the loadbearing effect: redundancy. Multiple arrangements of supports make it easier to swap out construction elements. This internal constructive arrangement for the permanent maintenance and renewal of the whole body was, in itself, also multi-layered; in addition to the exchangeable loadbearing elements, there were



→ **89** claddings that were renewed as parts wore out after a few years.

NEW INDUSTRIAL CONSTRUCTION MATERIALS

Over the course of the nineteenth century, iron—initially cast iron and later wrought iron—increasingly became established as an important construction material for loadbearing structures. In comparison to natural construction materials like wood and stone, iron is far stronger, offering a new level of performance, meaning that it became an option for creating larger components with large spans for the many new construction projects that were flourishing due to their simplified manufacture. The manufacturing process always requires artificial forming, as iron is a fluid mass with no natural form of its own. The concept for its forming is primarily economically motivated, as iron is very expensive in comparison to other available construction materials. The method of carrying out this artificial forming was entirely new. It was thus initially oriented on the materials and the construction forms that it subsequently replaced.⁸ In this sense, it is first and foremost a surrogate, a high-performance replacement for wood.

Although the era during which the use of iron became widespread also saw the development of a theoretical science of construction—and, certainly, we can observe a reciprocal advancement—the influence on

7 Rinke, Mario. Kotnik, Toni., “The changing concept of truss design caused by the influence of science”, from the proceedings of the First International Conference on Structures and Architecture (Guimaraes, Portugal), Taylor & Francis. London, 2010.

8 Giedion, Sigfried. *Bauen in Frankreich Eisen Eisenbeton*, Klinkhardt & Biermann. Berlin, 2000. p. 19.

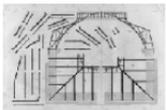
construction from this new penetration of theory was limited. Certainly, there were specially formed beams and columns that reflected the newest insights into loadbearing requirements. The new theory, however, had no answers with regard the connections of the elements. Thus, in early iron construction, wood was intentionally incorporated on both constructive levels—on a large scale, in the ordering of the construct, and, on a small scale, in the forming of the connections between the parts. One of the plainest examples of this analogue conception of connections is the so-called Iron Bridge, a bridge constructed entirely from cast iron in 1779. Whilst the iron rods echo the form of a stone arch, they are essentially large framework pieces, connected together by carpentry joints. We can see dovetail connections, wedges, and brackets on rods—which, due to the great strength of the new material, are far smaller than timber beams. Likewise, early iron roof structures reflect the conventional pattern of their wooden forerunners. The unshaped narrow iron bars of the roof truss of the Paris Stock Exchange, completed by Alexandre-Théodore Brongniart in 1826, replicate the same overlapping struts.



→

90

tion to the penetrated spatial geometry, the overlappings here lead to deformations of the rods themselves. Gables, offsets, overlappings—characteristically, the connections remain on the component itself, just as they would be if wood was used. This is still a typical feature of iron construction, before classic steel structures would unify the elements



→

91

and rethink the connections as components in their own right.

Simple framework structures for conventional buildings were also directly translated into iron. Warehouses and factories were built using iron at an early stage. Linear iron replaced the wooden parts in an identical order: cast iron columns and the beams running across them directly support masonry ceilings, often even by means of smaller secondary iron beams. This hierarchical basic order of wooden parts, the characteristic tectonics, was taken on in an entirely analogue fashion. With



→

92

its spatial arrangement and connection of parts, early iron thus initially created a constructive continuity with wood. Here, iron embodies, very directly, constructive techniques and the associated idea of the order of wood, which it replaced as a new building material.

Early iron-reinforced concrete, which, from the nineteenth century onwards, became an ever more important alternative to steel and wood construction, was also partially inscribed with this construction order. Instead of the secondary supports or the vaulted masonry ceilings, concrete slabs were used, initially unreinforced and later systematically reinforced by iron rods.⁹ The beams beneath them were initially still steel supports. This was essentially similar to the traditional wood beam ceiling, whose beam arrangement was taken on by the steel skeleton. Steel supports and concrete components were frequently used separately, primarily to accelerate the progress of construction by means of prefabrication. For fire safety reasons, these steel supports were then, at least

9 Rinke, Mario. "Sculptured forms, concealed forces" in: Daniel Mettler & Daniel Studer (eds.) *Made of Concrete*, Birkhäuser, Bâle, 2018.

partially, inserted into the concrete ceiling.¹⁰ A short time later, François Hennebique (1842–1921) converted this initially pragmatic combination of beams, supports and slabs composed of various materials into a unified construction system for the first time.¹¹ His patent from 1892 describes concrete beams and slabs that transition continuously into one another, and thus produce a monolithic skeleton.¹² However, as did many others when it came to their iron-reinforced concrete systems, he focused on ‘the replacement of the pure iron elements in construction’;¹⁵ supports and panels remained preserved as forms in this combination of materials.

The ‘filled’ form finds its most radical expression in the ideal of the monolithic skeleton, in which all parts are securely fused with one another. The form, large-scale and small-scale alike, is developed and rendered as a firm typology; then it is materialised. In the monolithic structure, however, something else is taking place. Because all the members are fused together and the beams vanish into the ceiling, the skeleton is fixed, with the equipment of its parts. This rigidity does not allow for adaptations, subsequent reinforcements and structural alterations. They must take place surgically, rather than organically. In its objective, the stiffness and robustness of the skeleton are in silent contradiction to its long-lasting adaptability.

INDUSTRIAL TIMBER

At around the same time that Hennebique’s iron-reinforced concrete system was becoming internationally established, wood experienced an advancement in industrialisation of its own. It is no accident that the most important technical development in industrial timber construction came from joinery, a craft that had always been concerned with bringing small parts together

artfully. The master carpenter Otto Hetzer of Weimar worked primarily on interior fittings, a context in which he perfected refined construction techniques, resulting in numerous patents. The ‘curved wood construction component’ that he patented in 1906 (DRP 197773), however, was intended for roof constructions, and marked the beginning of a very successful timber construction venture. In fact, it was more than that—it marked a new era in timber construction, with laminated wood and its large-format, entirely autonomous mode of industrial construction. Although glued laminated timber (glulam) was being used in construction by the nineteenth century,¹⁴ this event marked the beginning of its widespread use. Its construction elements grew out of the form of a typical framework for a roof construction—thus, beams and posts—but, due to its artificial nature, it can theoretically take on any cross-section, depending on the form created by the layering of the wood lamellae. It was precisely this assigning of form that constituted Hetzer’s innovation in construction thought. The craftsman Hetzer offered a new curved and joined material that demanded its own construction form to a far lesser degree than the

- 10 Newby, Frank. *Early Reinforced Concrete*, Routledge. London, 2001.
- 11 Delhumeau, Gwenaël. “Le béton en representation”. *La mémoire photographique de l’entreprise Hennebique, 1890-1930*, Fernand Hazan Editeur. Paris, 1997.
Delhumeau, Gwenaël. *L’invention du béton armé Hennebique 1890-1914*, Éditions Norma. Paris, 1999.
- 12 Hennebique, François. *Troisième congrès du Béton de Ciment Armé*. Le Béton Armé 1 (11), Paris, 1899. pp. 1–5.
- 13 *Ibid.*
- 14 Booth, Geoffrey L. “Laminated Timber Arch Railway Bridges in England and Scotland”, *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 44, Maney Publishing. London, 1972. pp. 1–21.

wood it originated from.¹⁵ The curve form concept meant that, from the very start, it was configured as an integrative element, one that unified the usually multiple-component roof construction, 'less obstruction to the pressure of snow and wind and affording a clear vaulted interior useful space'.¹⁶

This new technology was above all successful in contexts where large timber formats or steel would be scarce and dear. In particular, the First World War accelerated modern timber construction enormously. In Germany, where a shortage of coal and steel existed, wood took its place as a surrogate and as a new industrial construction material, and it became natural to deploy it in the same way for wide-span structures.¹⁷ In addition to saving on barely available construction material, this was an expression of the need for efficiency of material, the need to 'work with wood as economically as possible [...] and to achieve the prescribed degree of safety with the lowest expenditure of construction material.'¹⁸ The precisely joined wooden lamellae, arranged according to a superior constructive pattern, reproduce those forms that were developed by industry and science for synthetic iron or steel over the course of the nineteenth century. They are schematic, constructive answers to a particular mechanical capacity. The resulting large-format components, with their characteristic 'I' profiles, correspond to the construction logic of steel, transferred to wood, and are thus, to some degree, copies of the same (Fig. 4). As direct analogues of the iron forerunners, the wood structures also partially retained the joints typical for steel, which are correspondingly a sheet metal substitute: 'From an economic point of view, however, metal plates are not to be recommended, apart from the fact that their coating has to



→

93

be renewed frequently. More common are gusset plates made of plywood.¹⁸ Seen in this light, the wooden constructions, which are reproduced at all levels of detail, are not translated into a different material and thus into a different constructional logic but are the direct imprint of the technical form. The idea of form and construction have largely separated here: ‘The processing of the wood is simple, the shaping of the structures is arbitrary.’²⁰

For wood, the change in construction methods is particularly decisive here: the shifted construction focus from the configuration of parts to the configured material is a hallmark of constructive modernity, in which the endeavours of industry and sciences in connection with economic pressure have initiated a number of new developments and upheavals in the construction field.

TECHNICAL TIMBER TODAY

In addition to its ecological advantages, wood, in comparison to other industrial materials, is above all a practical material whose easy workability permits almost any form or joining. It is with good reason that digital architecture today, with its parametrically developed structures, often makes use of wood. It is a projection

15 Rinke, Mario. “The Form as an Imprint of an Idea”, in Mario Rinke & Florian Hauswirth (eds.), *Formful Wood. Explorative Furniture*, Jovis. Berlin, 2019. p. 179.

16 UK Patent n°20684, Otto Hetzer, “Improvements in Composite Wooden Structural Elements”. Accepted 11 April 1907.

17 Rinke, Mario. “The Form as an imprint of an idea”, Mario Rinke & Florian Hauswirth (eds.) *Formful Wood. Explorative Furniture*, Jovis. Berlin, 2019. pp. 263–277.

18 Kersten, Carl. *Freitragende Holzbauten. Ein Lehrbuch für Schule und Praxis*, 2nd edition, Springer. Berlin, 1926, p. 1.

19 *Ibid.*, p. 71.

20 *Ibid.*, p. 2.

material that receives its forms and its place in the grand scheme through the digital interface. Here we have the two high-tech extremes of timber construction today, which deploy precise and complex prefabrication to achieve simple and fast assembly: industrial laminated timber is in all cases dependent upon a certain prefabrication and is curved in the factory according to the desired geometry, or is given a specific, possibly varied cross-section; the joinery with a digitally controlled milling device creates the necessary geometry for the precise position of the subsequent assembly. On the other hand, there are serial modular panels created in the factory, equipped with insulation, windows and service technology, which banish the complexities of technical construction, containing them in invisible and inaccessible packages.²¹ It is precisely here, however, that much can be learned from the world of steel in construction, which has a close relationship to the modern use of wood. Steel has changed construction so fundamentally because it was always meant to be modular and because the connections, with their mechanical precision, placed the central focus on assembly—and, potentially, on disassembly. The hierarchical skeleton thus remained fundamentally mobile inside, because parts were readily exchangeable. This applied still more when the order aimed to create a maximal systematic approach and equality of parts. This rigidity of the parts also enabled a porosity of the structure, a permeability that enabled two things: an ambiguity of the space in between and of its constitutive elements. If, in future wood constructions and their modern character, the perceived goal becomes less a receptivity to specialised form and more (de)constructible properties achieved by virtue of a well thought-out configuration of the parts

and connections, a more secure future for wood would be assured. Very much in the spirit of its most impressive examples from traditional construction, it has permitted dynamic constructs that always remain mobile. Under the banner of a truly intelligent circularity, tectonic principles—old and new—were to enable a long future for concrete timber construction, but were also to do this for its parts, regardless of where they are.

21 Rinke, Mario. *Offene Holzpakete*, Touch Wood, Lars Müller Publishers. Zurich, 2022.

IRREGULAR TIMBER USE IN WOODEN STRUCTURES

Sandra
Vuilleumier

Humankind's history as a species is heavily entwined with timber. It has served to keep us warm, cook our food, build our homes, protect us from wild animals, and transport us places—the list is long. However, the industrial revolution shifted our relationship to forests, perhaps irrevocably. The population migrated to cities. Warmth came from coal, petrol or gas. Construction turned to brick or later concrete, and to a far lesser degree, engineered timber products. Primary modes of transportation such as trains, cars, airplanes and even ships were built in metal or plastic. Timber was still used for fuel or employed to create scaffolds to be taken apart but was relegated to a secondary status. Forests were either over-exploited, leading to deforestation, or under-exploited, no longer providing a source of wealth. Now, due to rising ecological concerns, timber is once again being brought to the forefront of architectural design and construction, bolstered by innovative research such as that of Petras Vestartas, whose thesis, directed by Prof. Yves Weinand, inspired this text.

Minimally processed timber has been used as a load-bearing element in structures since at least as early as the Neolithic¹ period. Cultures have taken advantage of timber's inherent structural qualities with impressive ingenuity in diverse structures ranging from Iroquois actively-bent longhouse frames, Samoa and Tonga grid shell-like thatched² huts, pre-industrial log churches in Russia and Europe and their half-lap joinery, or the reciprocal structures of timber arch bridges in Song Dynasty China. Engineers in the Pacific Northwest of the United States used abundantly available timber as combined foundation piles and above-ground load-bearing elements, rapidly erecting low-cost large bridges and viaducts.



→

96

Contrary to what one may think, irregular timber use in wooden structures has historical precedents both in seventeenth-century framing for naval vessels and in joinery methods for barn construction. Shipbuilders selected appropriate trees for non-linear components based on their geometric form or the strength of the fibre's direction. By aligning the grains of tree branches that grew in response to specific external loads, they could construct stronger vessels. Historically, ship-building and construction are tightly interconnected; typically, the cupola of churches is known to follow the construction of a ship's hull. They utilise joinery methods and explore the topology of trees to build vaulted structures using wood-wood connections inherent to traditional shipbuilding techniques.

The development of inexpensive fasteners and the mechanisation of timber processing led to an industry almost entirely focused on utilising straight, processed timber. While commercial applications focus on repetitive prefabricated systems composed of simple, linear elements, we are now seeing an emerging interest in a new type of structure, which embraces the inherent qualities of bent and forked raw wood. A stunning example of this is the cladding system of Ashes Cabin, in which irregular and natural wood geometries were used to create surface structures from bent planks. Curved timber elements were strategically assembled to create window openings,

- 1 Coudart, Anick. *The Reconstruction of the Danubian Neolithic House and the Scientific Importance of Architectural Studies*, EXARC. Amsterdam, 2013. pp. 5–9.
- 2 Barnes, Shawn. Green, Roger. "From Tongan meeting house to Samoan chapel: A recent Tongan origin for the Samoan tale of Play". *The Journal of Pacific History*, 43:1. 2008. pp. 25–49.

framed views, awnings, door handles and entrances.³ As a result, both straight and curved logs were used with great aesthetic success, while simultaneously reducing waste and exploiting irregular trees.



→

97

Laser scanning and computer-generated designs open up the possibility not of designing a structure and finding timber elements to construct it, but of identifying timber elements and generating a unique structure employing their intrinsic qualities. Identifying an area of trees with naturally grown curvature could lead to a variant of the traditional log-cabin using curved elements to generate a free-form wall system whose shape adapts to the material used, such as the Biomass Boiler House—Design and Make, AA⁴.

Design methodologies such as the one developed at IBOIS offer joint generation solutions for irregular raw wood, which allows for the design of innovative timber structures. However, this technology needs to succeed in leaving marginal, lab-and-research based applications and become a part of the broader ecosystem of timber construction. Otherwise, regardless of its potential, it will fail to have any real impact. There needs to be an ongoing, open dialogue between the Swiss forestry sector, small-scale timber companies, architects and other players in the industry. We are living in an era which has experienced unprecedented globalisation. We are accustomed to being surrounded by elements that have crisscrossed the globe. Our concrete is built with sand from all over the world. Even our timber is imported, which is ironic considering forests in Switzerland are currently heavily under-exploited.

A solution could be to move away from highly processed timber and its subsequently heightened ecological cost. To stop speaking in terms of panels, boards and square beams, which are glue-laminated to span large



→

98

distances, or cross-laminated to make timber joints regardless of orientation. To adopt natural characteristics such as bending, bifurcation and taper to design unique, free-form structures which fully adopt and exploit the inherent qualities of raw wood. To take into account that although unprocessed timber structures are often designed with additional fasteners including timber dowels, screws, textile threads, or engineered metal plates, one could prioritise wood-wood connections. This would not only decrease the cost by simplifying the construction process, drive down the carbon footprint by employing fewer elements and materials, but also make the structure much easier to retire once it has served its time. While mechanical fasteners have become standard practice for jointing timber due to their ease of use and predictable performance, research in robotic fabrication explores complex timber to timber connections inspired by traditional timber joinery.

However, a number of challenges must first be resolved, and these are not only technological. Forestry, is, at its heart, an ecosystem steeped in tradition. In the Swiss commune of Rossinière, forestry workers rely on the phases of the moon and the time of the year for felling trees. They know it will influence the quality of wood,

3 Vestartas, Petras. *Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver*, EPFL thesis 8928. Lausanne, 2021. p. 49, Fig. 3.17.

4 *Ibid.* p. 17.

for example, by determining how much sap is present, as well as by influencing rigidity. In mountain areas such as Rossinière, many families still have deep roots binding them to the land. This begs the question—could there be a working dialogue between new architectural design methodology employing cutting-edge technology and the forestry sector? How will artisans feel about being replaced by machines? What long-term effects could this technology transfer have on their lifestyles? Today artisans often become artisans not because they have no other choice—but because they enjoy the work. A solution could be to proceed through manual fabrication informed by digital tools, but this would still be a time-consuming process not exempt from human error.

Swiss forestry is in a critical condition; over the past ten years, the number of Swiss sawmills has fallen from 600 to 220. Instead of turning a profit, those remaining often only survive due to government subsidies. They need to adapt if they are to remain, and that is exactly what is offered by solutions such as the design-to-fabrication workflow developed at IBOIS. The possibility of exploiting bent, bifurcated or small-radii timber for structural use rather than viewing it as raw biomass material for heating or cardboard critically increases its value. Small-radii timber is often sourced through tree thinning, a common practice in the timber industry, and is usually not considered building material but is transformed into chips or pulp. Up until now, industry standards also often involved leaving this



→ **99** 'unsuitable' wood to rot. Instead, by employing new design methodologies, it could be used to build low-rise small-scale housing, thus giving it added-value for local economies

While it lies suspended between tradition and modernity, Swiss forestry must face a greenwashing of the timber industry which threatens to distract from the simple fact that in order to be most ecological, timber must be local and minimally processed. Is it more sustainable to build with timber plates rather than concrete? Yes. The timber industry is less polluting, consumes less resources, does not have the same impact on biodiversity and is not responsible for chemical pollution in the way that the concrete or steel industries are. However, it remains true that imported, processed timber comes with a heightened carbon footprint. Timber plates employing large amounts of glue pose their own sets of problems once it is time to retire them. There is ‘timber construction’ and timber construction. If there are so many benefits to building with raw timber, why is it not a far more common practice? The answer is easy; the complexity and cost of building with non-standard elements have been and continue to be a solid deterrent. But if these problems could be solved using modern technological solutions such as scanning methods, CAD software and robotisation, then a wealth of possibility would open up.

Any design methodology for raw wood construction must also take into account the effects of global warming on the timber industry. Endemic coniferous species, traditionally used in wood construction in mountainous regions, lose ground every year to deciduous trees. The latter, which is hardwood, and the former, softwood, have a difference in micro-structure when they form reaction wood to compensate for external factors, such as mountain terrain, constant wind or sun directions. In hardwood, reaction wood is formed on the side of the tree central axis which is closer to the correct growth path, and

is called tension wood. In softwood, it is formed on the furthest side to the projected growth path, and is called compression wood. Taking this into consideration is particularly important when designing structures with non-straight timber elements, and any design to construction algorithm should be able to take into account this difference in the qualities of the timber.

It is important to note that the modernisation of methods has reached the greater timber industry. Industrial robots in the timber industry usually have computer-vision and employ cutting methods to alter tree shape irregularity. Locally sawn timber requires a skilled integration of customized workflows employing lathes, band-saws, chain-saws, scanners and CAD. The application of laser scanning to timber processing, in and of itself, is nothing new. Currently, a new branch of robotic timber companies is seizing the economic and structural advantages of raw wood. However, these companies often follow a centralised, commercial model. It is also often the case that only one company in a large region has the capacity to handle structural raw timber elements, which leads to a monopolisation of the market.

Unlike these large companies that hold positions of power, small timber companies such as those in Rossinière, Lausanne or Chavornay could hardly exist without government help. Large, centralized companies share very little of their research and development work, to the detriment of the forestry sector. Since this is unlikely to change, local timber companies are turning to universities, polytechnic schools and other centres of research for solutions. Many of them are aware of the need to adapt in light of the inevitable challenges of climate change,



→ 100

robotisation and other technological advances which will transform the sector—and they cannot afford to be left behind if they are to survive.

Raw wood fabrication poses a series of problems that do not exist when using timber plates. On the one hand, plate-cutting is a 2D problem where a spindle cannot be lowered more than approximately 30 degrees in relation to the table due to the thickness of timber plate. On the other hand, raw wood cutting is a 3D problem; the spindle must always point outwards to a beam and must not collide with the table, which only leaves about 30 cm of space available for cutting. Additionally, the saw-blade cutting movements necessary for raw wood fabrication differ from the flat-end milling process⁵.

Building with raw wood is a complex process. One famous German timber engineer, quoted to his students by Frei Otto, believed that the greatest enemy of wood is the saw. He recommended the use of uncut raw timber. However, it is difficult to build with whole timber without using a saw. Employing the natural qualities of the wood such as bending and tree forks generates its own, unique set of challenges. Forks or branches which are not used in conventional production offer interesting structural qualities, although they are of course limited by the topology between the two branches. This poses a clear architectural challenge. It is common for tree forks to break during the harvesting process, and the use of unique elements makes them very difficult to replace in any structure of which they are a part.

Several existing architectural design methods using raw wood may be considered when designing

5 *Ibid.*, p. 153.

joinery methods. Amongst the most common, slab and wall systems simply stack beams side by side and often use timber joints. However, slabs and walls made from freshly cut trees have to integrate more expensive detailing by transforming timber elements from their natural form into regularised construction elements.

The value of utilising small-radii trees to construct frames quickly became apparent during research. One of the most common types, trusses, is a system that mostly utilises mechanically rounded timber and metal connectors—this greatly reduces the possibility of exclusively employing wood-wood connections for large-scale structures using raw timber, considering the multi-valence truss nodes⁶.

It emerged that two of the most interesting architectural design methods using raw wood are grid shells and reciprocal structures. Grid shells face a number of challenges in raw wood construction. Firstly, a specific node point cannot be precisely determined. Secondly, the roof cover of raw timber grid shells must have the flexibility to accommodate for variations in the wood. Thirdly, it is not possible to predict every peculiarity in the natural material. All those elements combined disqualifies them as a focus for the creation of a design-to-construction workflow algorithm.

Reciprocal structures date back to ancient Chinese constructions such as Rainbow Bridges. They reappeared in raw wood construction for several reasons.



→ **101** Not only do beam elements support each other as a load-bearing system, but the configuration of reciprocal frames simplifies the construction system because only two members are connected at each node, unlike frames or trusses.

The fabrication of such nodes is therefore much more easily achieved or automated. They employ short elements that could re-employ hard wood currently of little value. Reciprocal patterns have ornamental advantages, and they have only one type of joint. This is exemplified in the work of Tetsuro Kurokawa⁷.

Industry currently uses raw wood because it requires little processing, leading to fast fabrication, and is comparatively cheap. It entirely ignores its potential for encouraging local circular economies, as a sustainable solution in the face of climate change, and how architectural design could be applied to round timber construction. As a result, curved, forked or small-radius trees are not even considered part of the industrial chain. While any beam can be assigned to any target curve, it will obviously be a key design element to lower cost by optimising the structure—each beam must find its optimal place considering curvature, length, radii and fork parameters.

Of course, determining this optimal place without the use of algorithms is a herculean undertaking, time-consuming to the point of being practically impossible. Algorithms that sort according to parameters such as fork angle or according to axial curvature already exist, but the results are unsatisfactory. An algorithm combining both elements is necessary, and it also needs to be able to identify critical sections of a surface and find other suitable tree segments.

Currently, there are no guidelines or digital tools for design-to-fabrication workflows for the integral mechanical attachment of raw wood. There is a disconnect

6 *Ibid.* p. 39.

7 *Ibid.*, p. 42.

between large timber companies that embrace mass pre-fabrication technology and local Swiss forestry where digitalisation is absent. There is an equally important gap between experimentation with raw wood and automated industrial applications. There is no standard algorithm or system that could help draft timber joinery for irregular woods, which means the joints are developed on a case-to-case basis; this translates to time-intensive modelling processes and requires manual tool-path generation. This makes raw wood construction using bent or crooked timber a particularly expensive and time-consuming process.

Implementing a broadly applicable joinery algorithm such as the one developed at IBOIS by Petras Vestartas⁸ would lower costs and production time, as well as create a solid base for further research to build upon. In the past, redundancy, a lack of industrial methods and the loss of knowledge once a project was finished have all been challenges to research into raw timber construction. For the field to be able to develop further, the workflows behind case studies need to be shared not just between research laboratories and industry, but with the general public. One of the easiest ways to achieve this is by making any tools developed open-source, in order to help make them available.

Industry, on the other hand, employs large teams of people working on a complex problem. It has many more financial resources and therefore primarily engages in closed commercial methods. Existing industrial solutions are not open-source and must be purchased for a specific robotic integration, which is difficult for local players or researchers operating with very limited means.

One must ask, then, how much difference focusing on the design of small-scale structures using

local timber can truly make in the face of a construction industry which is constantly trying to build higher, bigger, and whose main driver is profit? While there is a growing counter-culture intent on creating sustainable and ethical constructions, it remains a tiny fraction of the bigger picture. Until industrialisation, practically all construction was made using local resources, barring certain exceptions such as palaces, places of religious worship, buildings designed for ‘greater purposes’ or as an ode to the ego of the individual or institution who commissioned them.

Perhaps the research outlined above can play a part in encouraging the growth of local, circular economies, inject some much-needed strength into the sector by increasing the value of their main resource—timber—and thus, slowly encourage a different model for local construction. Hopefully, this could lead to a global paradigm shift of the construction industry, particularly considering the climate emergency we are currently facing and the growing shortage of raw material for cement.

The construction industry is aware of the current fashion for ecological construction; its answer has more than once been to propose aesthetically pleasing wooden facades on buildings otherwise designed in... cement. This form of greenwashing is insidious. One could argue it does show the world ‘wooden’ constructions, thus promoting public awareness and encouraging the sector. Yet for each one of these designs, there could have been an innovative, unique and truly sustainable building in its place.

8 https://github.com/ibois-epfl/compas_wood

LES AUTEURS

THE AUTHORS

Stéphane Berthier est architecte diplômé de l'EPFL et docteur en architecture de l'Université Paris-Sarclay. Il est maître de conférences à l'École Nationale Supérieure de Versailles et chercheur au LEAV. Ses recherches portent sur l'architecture comme milieu d'expérimentation des innovations techniques. Il est aussi associé fondateur de l'agence d'architecture MESOSTUDIO à Paris.

Stéphane Berthier is an architect with a degree from EPFL and a doctorate in architecture from the University of Paris-Sarclay. He is a lecturer at the Ecole Nationale Supérieure de Versailles and a researcher at the LEAV. His research focuses on architecture as a medium for experimenting with technical innovations. He is also a founding partner of the architecture agency MESOSTUDIO in Paris.

Stéphane Berthier

Rédacteur en chef de la revue Suisse *Tracés* de 2011 à 2018, Christophe Catsaros est critique d'architecture indépendant. Il a été assistant curateur au Witte de With de Rotterdam et enseignant à l'ESAC de Cambrai. En 2018, il a lancé « Ecrans Urbains » un cycle de projections à la Cinémathèque Suisse, au croisement de l'architecture et du cinéma, qui se poursuit aujourd'hui à « arc en rêve », à Bordeaux. Il contribue régulièrement aux revues *Artpress*, *Archistorm*, *Volume* et *Architecture d'Aujourd'hui*. Il co-dirige *Archizoom Papers*, une revue numérique attachée à Archizoom, à l'EPFL. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages aux éditions Actes Sud, ainsi qu'aux éditions EPFL Press.

Editor-in-chief of the Swiss magazine *Tracés* from 2011 to 2018, Christophe Catsaros is an independent architecture critic. He was assistant curator at Witte de With in Rotterdam and teacher at ESAC in Cambrai. In 2018, he launched "Ecrans Urbains", a cycle of screenings at the Cinémathèque Suisse, at the crossroads of architecture and cinema, which continues today at "arc en rêve", in Bordeaux. He regularly contributes to the magazine *Artpress*, *Archistorm*, *Volumes* and *Architecture d'Aujourd'hui*. He co-edits *Archizoom Papers*, a digital journal attached to Archizoom, at EPFL. He is the author of *Le Lieu Unique* published by Actes Sud.

Christophe Catsaros

Mario Rinke est professeur à la Faculté des Sciences du Design de l'Université d'Anvers. Il porte un intérêt particulier aux processus de transformation entre les domaines du savoir, des matériaux et des institutions, ainsi qu'à la pensée structurelle. Il se spécialise dans les concepts de matériaux hybrides, le béton armé ancien et le bois industriel ancien (lamellé-collé). Mario Rinke a une formation d'ingénieur en structure et a travaillé dans le domaine de l'architecture pendant quelques années, enseignant et faisant des recherches sur la construction en architecture. Il est titulaire d'un diplôme en génie civil de l'Université Bauhaus de Weimar et d'un doctorat de l'ETH Zurich, et il a travaillé comme ingénieur de conception pour de grands bureaux à Londres et à Zurich. Il a enseigné au département d'architecture de l'ETH Zurich, de l'Université des Sciences Appliquées de Lucerne et de l'Université Tor Vergata de Rome. De plus, il est cofondateur de l'International Association of Structures and Architecture (IASA).

Mario Rinke is a Professor at the Faculty of Design Sciences at the University of Antwerp. Genuinely interested in transformation processes between areas of knowledge, materials and institutions as well as structural thinking, he is specialised in hybrid material concepts, early reinforced concrete and early industrial timber (glulam). Mario Rinke is trained as a structural engineer and worked in the field of architecture for some years, teaching and researching construction in architecture. He holds a Diploma degree in civil engineering from the Bauhaus University Weimar and a PhD from ETH Zurich and worked as a design engineer for major offices in London and Zurich. He taught at the architecture department at ETH Zurich, the Lucerne University of Applied Sciences and the Tor Vergata University Rome. Furthermore, he is a cofounder of the International Association of Structures and Architecture (IASA).

Mario Rinke

Sandra Vuilleumier est aujourd'hui chargée de communication à Ibois, après cinq années passées à Londres en tant qu'analyste de recherche chez Chambers & Partners, puis au service philanthropie de la Queen Mary University of London. Elle est titulaire d'un Master en philosophie et anglais de l'UNIL, axé sur l'environnement et les changements sociétaux. Sa thèse consacrée à la nature et à l'écologie dans *Paradise Lost* de John Milton, étudiait la représentation du monde naturel, les influences du dualisme et du monisme et la façon dont l'industrialisation et les déplacements de population qui en ont résulté ont impacté la connexion de l'être humain au monde naturel. Son parcours multiculturel et son éducation intercontinentale lui offrent une perspective et une compréhension larges. Elle cherche à promouvoir l'architecture et la construction durables en établissant pour l'Ibois un réseau et une plateforme de communication améliorés.

Sandra Vuilleumier is Communications Manager at Ibois, following five years in London as a Research Analyst at Chambers & Partners, then as a Major Donor Prospect Research Officer at Queen Mary University of London. She holds a Master's degree in Philosophy and English from UNIL, focusing on the environment and societal change. She wrote her Master's thesis on nature and ecology in John Milton's *Paradise Lost*, studying the portrayal of the natural world, the influences of dualism vs. monism and how industrialisation and loss of place impacted man's connection to the natural world. Her multicultural background and cross-continental upbringing provide her with a broad perspective and understanding. She is focused on promoting sustainable architecture and construction through establishing an enhanced network and communications platform for Ibois.

Sandra Vuilleumier

Les cahiers de l'Ibois:
Une publication semestrielle,
radiographie sociétale,
écologique, culturelle et politique
de la construction bois.

Responsables éditoriaux:
Christophe Catsaros
et Yves Weinand
Suivi éditorial: Sandra Vuilleumier
Graphisme: Notter+Vigne
Mise en page: Kim Nanette
Traduction: Sandra Vuilleumier
et Alison Kirkland

EPFL PRESS est un label
des Presses polytechniques et
universitaires romandes (PPUR),
qui publie principalement
les travaux d'enseignement
et de recherche de l'École
polytechnique fédérale
de Lausanne (EPFL), des
universités et des hautes
écoles francophones.

© EPFL PRESS / Presses
polytechniques et universitaires
romandes, Lausanne, 2022
Tous droits réservés
Reproduction, même partielle,
sous quelque forme ou sur
quelque support que ce soit,
interdite sans l'accord écrit
de l'éditeur.

Imprimé en Suisse.

PPUR, EPFL
Rolex Learning Center
CM Station 10,
CH-1015 Lausanne
info@epflpress.org
T +41 21 693 21 30
F +41 21 693 40 27
www.epflpress.org

The Ibois notebooks:
A biannual, societal,
ecological, cultural and
political radiography
of timber construction.

Edited by Christophe Catsaros
and Yves Weinand
Editorial follow-up:
Sandra Vuilleumier
Graphic design: Notter+Vigne
Layout: Kim Nanette
Translation: Sandra Vuilleumier
and Alison Kirkland

EPFL PRESS is a label of the
Presses polytechniques et
universitaires romandes (PPUR),
which mainly publishes teaching
and research material of the
Lausanne Swiss Federal Institute
of Technology (EPFL), as well
as French-speaking universities
and colleges.

© EPFL PRESS / Presses
polytechniques et universitaires
romandes, Lausanne, 2022
All rights reserved
Reproduction, even partial,
in any form or on any medium
whatsoever, prohibited
without the written consent
of the publisher.

Printed in Switzerland.

ISBN 978-2-88915-470-8

