

Le bois employé dans la construction actuelle est, dans une large mesure, le produit d'un système fortement industrialisé. Il est récolté, transporté, transformé, calibré, séché, abouté, collé, traité, emballé, expédié. Cette succession d'opérations, souvent réalisées dans des lieux éloignés les uns des autres, engendre une consommation d'énergie et une logistique lourde. Le matériau perd alors une part de sa qualité environnementale initiale.

L'enjeu est double, comment travailler écologiquement avec du bois en relocalisant la valeur ajoutée issue de sa transformation ?

Pour apporter une réponse à cette problématique ce travail se concentre sur le bois d'industrie. Il représente les parties moins nobles de l'arbre : les faibles sections, les fourches, les éléments présentant une forte courbure. Aujourd'hui ces pièces sont transformées en panneaux, en papier ou en bioénergie. L'ambition est de proposer une étape supplémentaire au cycle de vie de ce bois à faible valorisation industrielle, en l'employant structurellement brut et rond.

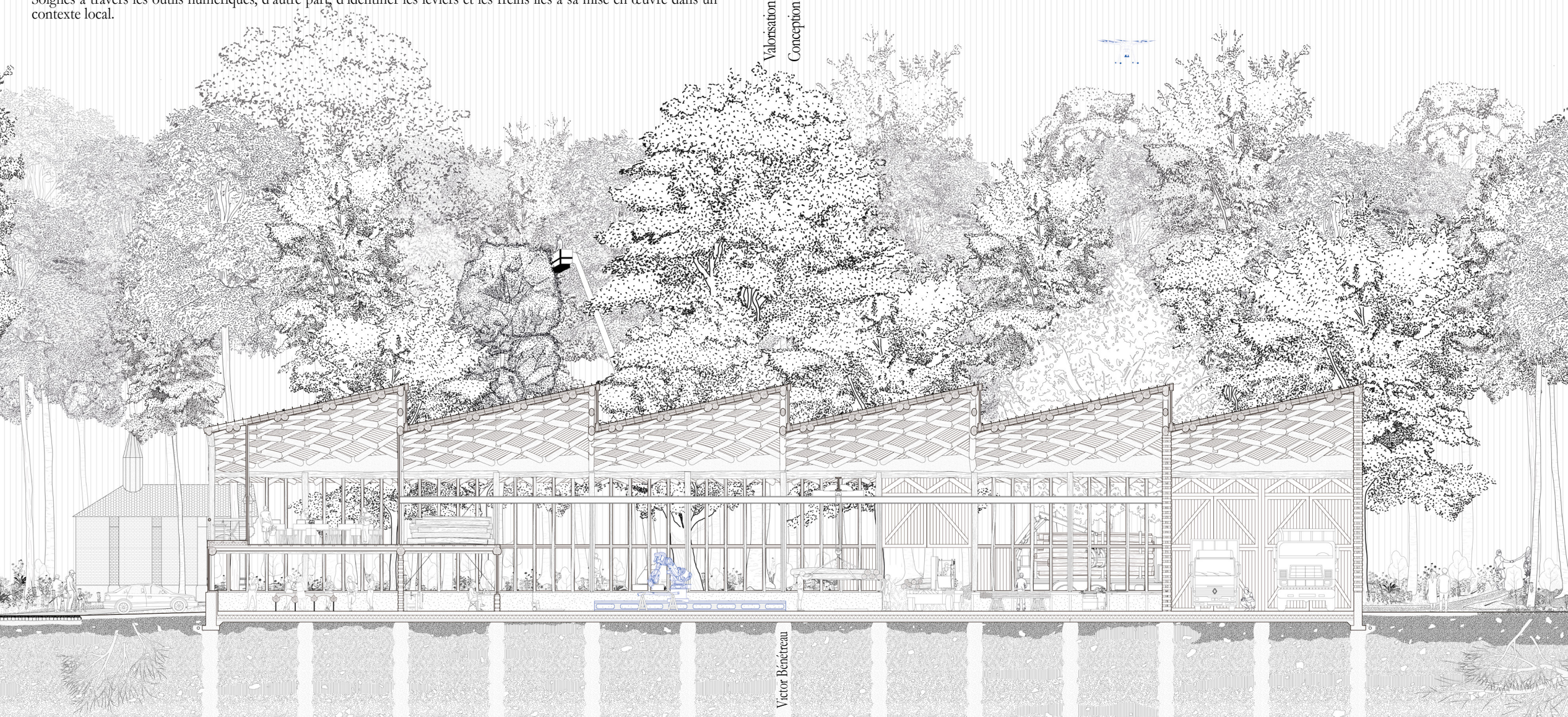
Valoriser un bois rond impose toutefois de repenser nos outils et nos méthodes. Deux thèses, menées sous la direction du professeur Yves Weinand au Laboratoire des constructions en bois IBOIS de l'EPFL, posent les bases de ce travail, celle de Petras Vestartas « Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver », qui porte sur le processus de conception avec du bois rond en offrant un outil pour la génération des jonctions bois-bois et le tracé du parcours outils robotique. La seconde thèse, est celle de Damien Gilliard « Biotope-aware round wood architecture », l'ambition est de relier la forêt au secteur de la construction en proposant un outil de gestion forestière basée sur le référencement de la ressource dans un catalogue numérique exploitable, ensuite, dans la phase de conception.

L'objectif de cet écrit est d'une part de documenter un processus de valorisation du bois rond appliquée à la forêt de Soignes à travers les outils numériques, d'autre part, d'identifier les leviers et les freins liés à sa mise en œuvre dans un contexte local.

Valorisation du bois d'industrie en bois d'œuvre :

Conception numérique en bois rond, du relevé forestier au projet architectural

Valorisation du bois d'industrie en bois d'œuvre : Conception numérique en bois rond, du relevé forestier au projet architectural





Valorisation du bois d'industrie en bois d'œuvre :
Conception numérique en bois rond, du relevé forestier au projet architectural

LBARC 2131
Atelier de recherche en / sur l'architecture
Éco-Architectures

Expert
Prof. EPFL Yves Weinand

Co-promoteurs
Prof. UCL Sandrine Meyer
Prof. UCL Benoit Thielemans
Prof. UCL Geoffrey Van Moeseke

UCLouvain
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme

Remerciements

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au professeur Yves Weinand pour m'avoir suivi en tant qu'expert mais également pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire IBOIS de l'EPFL durant l'été 2024. Cette expérience a nourri de manière déterminante les réflexions développées dans ce travail. Mes remerciements s'adressent également à Sandrine Meyer, Benoît Thielemans et Geoffrey Van Moeseke, pour l'accompagnement exigeant, rigoureux et stimulant qu'ils ont su instaurer tout au long de ce mémoire. Je souhaite enfin remercier mes amis et ma famille pour leur soutien constant durant cette période d'écriture, et tout particulièrement Émilie Du Mortier et Myrtice Geist, avec qui j'ai partagé ces mois de travail. Je remercie enfin Damien Gilliard pour l'enthousiasme qu'il partage autour de son sujet de thèse, ainsi que pour l'opportunité qu'il m'a donnée d'expérimenter la robotique durant mon stage.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	9
2	LA FORÊT DE SOIGNES COMME POINT DE DÉPART	11
2.1	HISTOIRE	12
2.2	UNE FORÊT FRAGILE	15
2.3	GESTION FORESTIÈRE	15
3	LA FILIÈRE BOIS	19
3.1	DÉVELOPPER LA FILIÈRE BOIS, UNE VOLONTÉ GOUVERNEMENTALE	20
3.2	SONIAN WOOD COOP	22
3.3	LA TRANSFORMATION DU BOIS EN WALLONIE	23
3.4	AMBITIONS DE LA PROPOSITION DANS LA FILIÈRE BOIS ACTUELLE	25
3.5	DÉFINITION D'UN CADRE PROPICE	26
3.5.1	DISTRIBUTION LOCALE	26
3.5.2	MODERNISATION DE LA FILIÈRE	26
4	MÉTHODOLOGIE	29
4.1	DÉVELOPPEMENT DE CONNAISSANCES	30
4.1.1	ENTRETIENS	30
	<i>ANDREA SETTIMI</i>	
	<i>CORENTIN DALON</i>	
	<i>DAMIEN GILLARD</i>	
	<i>JUSTIN GOOSE</i>	
	<i>YVES WEINAND</i>	
4.1.2	ENCADREMENT PÉDAGOGIQUE	31
4.1.3	QUELQUES ANNÉES DE CHARPENTERIE	31
4.1.4	STAGE D'ÉTÉ AU LABORATOIRE DE RECHERCHE IBOIS	31
4.2	EXPÉRIMENTER PAR LE PROJET	32

4.3	STRUCTURE DE L'ÉCRIT DES ÉTAPES DU PROCESSUS	32
5	DÉFINIR UN PROCESSUS	33
5.1	RELEVER	35
5.1.1	TROIS ENJEUX : GÉRER, SÉLECTIONNER, VALORISER	35
5.1.2	LE SCAN	35
5.1.3	LA PHOTOGRAMMÉTRIE	37
5.1.4	L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE	38
5.1.5	OBTENIR UN RELEVÉ COMPLET	38
5.2	CARACTÉRISER	39
5.2.1	L'ABSENCE DE RÉGLEMENTATION	39
5.2.2	CARACTÉRISATION MÉCANIQUE	39
	<i>PAR ULTRASON</i>	
	<i>PAR CONTRAINTE</i>	
5.2.3	CARACTÉRISER EN DEUX TEMPS	41
5.3	CATALOGUER	41
5.3.1	UN OUTIL POUR LA GESTION FORESTIÈRE	42
5.3.2	TRAITEMENT DES DONNÉES NUMÉRIQUES	42
5.3.3	BIOMASS BOILER HOUSE	45
5.4	CONCEPTION NUMÉRIQUE	46
5.4.1	CONCEVOIR AVEC DES CYLINDRES	46
5.4.2	DÉTERMINER UNE SECTION	46
5.4.3	FIXER DES PLANS DE COUPES INVARIANTS	48
5.4.4	OBTENIR LA GÉOMÉTRIE FILAIRE	50
5.4.5	EXPLOITER LA CAPACITÉ DE CALCUL INFORMATIQUE	50
5.4.6	EMPLOYER LE CATALOGUE : UN PROCÉDÉ ITÉRATIF	51
5.4.7	TROUVER LE BON ASSEMBLAGE	52
	<i>JOINERY SOLVER</i>	
	<i>BOIS OU MÉTAL ?</i>	
5.5	TAILLER	58
5.5.1	INDUSTRIEL OU MANUEL : RÉFLEXION PAR ANALOGIE AUTOUR DU PRÉFABRIQUÉ BOIS	58

5.5.2	INDUSTRIEL	60
	<i>ALIGNEMENT DU SCAN À LA PIÈCE PHYSIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT DE LA CNC</i>	
	<i>L'USINAGE ROBOTIQUE</i>	
5.5.3	L'ÉLECTROPORTATIF	63
5.5.4	A LA MAIN	64
5.5.5	UN PROCESSUS LOURD À DÉPLOYER	66
	<i>ÉCONOMIQUE</i>	
	<i>LOGISTIQUE</i>	
6	PROJET : ENTRE GESTION ET VALORISATION	69
6.1	OBJECTIF	74
6.2	PROGRAMME	74
6.3	LES SYSTÈMES CONSTRUCTIFS EMPLOYÉS	75
6.3.1	POUTRE EN TREILLIS	75
6.3.2	RÉCIPROQUE	77
6.3.3	POTEAUX - POUTRES	77
6.3.4	LE PLANCHER TERRE-BOIS	77
6.3.5	LA MAÇONNERIE EN BOIS CORDÉ	77
7	CONCLUSION	81
8	BIBLIOGRAPHIE	83
8.1	RÉFÉRENCES	84
8.2	ENTRETIENS	86
9	LISTE DES ILLUSTRATIONS	87
10	ANNEXES	91

1 INTRODUCTION

Face aux défis environnementaux contemporains, la question des matériaux de construction devient centrale dans les stratégies de transition écologique du secteur du bâtiment. Il représente à lui seul 40% des émissions de CO² dans le monde, en grande partie dues à la combustion. Dans ce contexte, le bois apparaît comme un matériau prometteur. Ressource renouvelable, capable de stocker du carbone et de se prêter à de multiples usages, il incarne dans l’imaginaire collectif une réponse sobre et écologique face aux matériaux issus de l’industrie lourde.

Cependant, cette image flatteuse mérite d’être nuancée. Le bois employé dans la construction actuelle est, dans une large mesure, le produit d’un système fortement industrialisé. Il est récolté, transporté, transformé, calibré, séché, abouté, collé, traité, emballé, expédié. Cette succession d’opérations, souvent réalisées dans des lieux éloignés les uns des autres, engendre une consommation d’énergie et une logistique lourde. Le matériau perd alors une part de sa qualité environnementale initiale. C’est une observation que l’on peut également faire avec le hêtre de la forêt de Soignes, 20 000m³ sont abattus annuellement, 75% sont transformés en Asie avant de réintégrer le circuit européen sous forme de produit fini. (RTBF, 2020)

L’enjeu est double, comment travailler écologiquement avec du bois en relocalisant la valeur ajoutée issue de sa transformation ?

Pour apporter une réponse à cette problématique ce travail se concentre sur le bois d’industrie. Il représente les parties moins nobles de l’arbre : les faibles sections, les fourches, les éléments présentant une forte courbure. Aujourd’hui ces pièces sont transformées en panneaux, en papier ou en bioénergie. L’ambition est de proposer une étape supplémentaire au cycle de vie de ce bois à faible valorisation industrielle, en l’employant structurellement brut et rond.

Valoriser un bois rond impose toutefois de repenser nos outils et nos méthodes. Deux thèses menées sous la direction du professeur Yves Weinand au Laboratoire des constructions en bois IBOIS de l’EPFL, qu’il dirige, posent les bases de ce travail, celle de Petras Vestartas « Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver », qui porte sur le processus de conception avec du bois rond en offrant un outil pour la génération des jonctions bois-bois et le tracé du parcours outils robotique. La seconde thèse est en cours, c’est celle de Damien Gilliard « Biotope-aware round wood architecture », l’ambition est de relier la forêt au secteur de la construction en proposant un outil de gestion forestière basée sur le scan morphologique, la reconnaissance d’essences et le référencement de la ressource dans un catalogue numérique exploitable, ensuite, dans la phase de conception.

L’objectif de ce travail est double : d’une part, documenter un processus de valorisation du bois rond appliquée à la forêt de Soignes à travers les outils numériques, d’autre part, identifier les leviers et les freins liés à sa mise en œuvre dans un contexte local.

2 LA FORÊT DE SOIGNES COMME POINT DE DÉPART

2.1 HISTOIRE

L'origine de la forêt de Soignes remonte à la fin de la dernière glaciation, il y a plus de 10 000 ans, période durant laquelle, le lœss¹, à l'origine des sols actuels, s'est déposé. L'atmosphère évolue, transformant la toundra en forêt. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019*)

Vers 2000 av. J.C., le climat tend vers une stabilisation permettant ainsi la progression de la forêt sur les terres. Le hêtre fait son apparition et progressera graduellement à partir de cette époque. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019*)

Les Celtes marquent le début des premières exploitations significatives de la forêt, bien que la qualité moyenne de ses sols l'épargne des défrichements. Néanmoins, la population commence à exploiter intensément la forêt pour le bois de feu, le bois d'œuvre, la cueillette, ainsi que pour le pâturage des animaux. L'absence de gestion conduit à une dégradation progressive de l'état de la forêt. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019*)

Sous Charlemagne, le massif sonien est peu à peu isolé de la forêt charbonnière². C'est la chasse, activité préférée de la noblesse de l'époque, qui empêchera sa disparition. Au fil du temps, des coupes sont effectuées, notamment le long des cours d'eau, permettant l'installation de communautés religieuses. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019*)

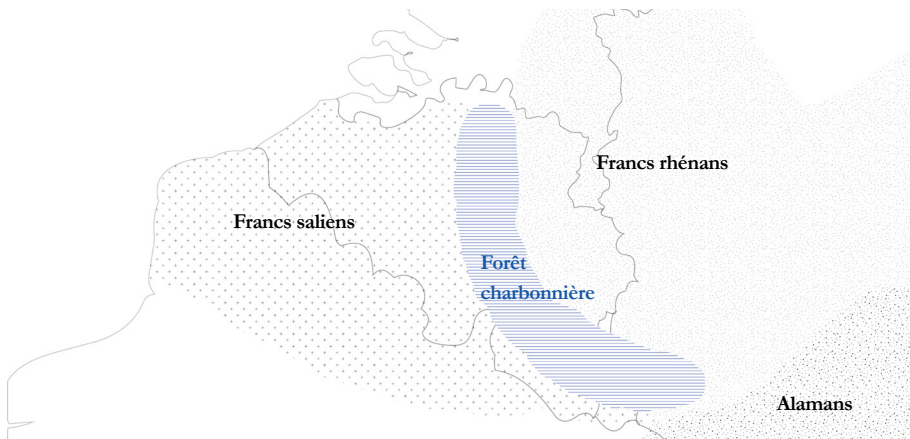


Fig1- La forêt Charbonnière entre les royaumes francs vers 480

1 Le lœss est un dépôt sédimentaire détritique meuble formé par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne, dans les régions désertiques et périglaciaires.

2 La forêt charbonnière était un vaste massif d'hêtres et de chênes couvrant le nord de la Belgique jusqu'à la Sambre, qui formait une frontière naturelle à l'Antiquité. Son nom vient de l'exploitation du bois pour la production de charbon destiné à la métallurgie.

Au XIII^e siècle, la superficie de la forêt de Soignes se stabilise à 12 000 hectares et n'évoluera que peu jusqu'en 1830. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019*)

C'est au XIV^e siècle qu'un premier corps forestier est chargé de préserver l'intégrité de la forêt et l'établissement d'un premier code forestier. Créant ainsi la première administration de la forêt. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019*)

C'est durant le règne de Charles Quint que la gestion sylvicole s'organise. Des coupes régulières sont alors planifiées selon la méthode du tire-et-aire³, avec une révolution⁴ de 80 ans. Cette pratique a perduré jusqu'au début du XX^e siècle. C'est également à cette période que les seigneurs, propriétaires de parcelles, pratiquent des coupes intensives à visée économique, tandis que la population locale prélève bois de feu et d'œuvre dans un contexte de précarité croissante. La forêt est alors, encore une fois, dégradée. Cette démarche mettra néanmoins à profit la régénération naturelle existante et sera assistée par des plantations ciblées complémentaires afin d'assurer une diversification efficace des essences. Ces essences seront sélectionnées sur des critères écologiques précis : adaptation pédologique et hydrique, résilience aux sécheresses estivales et aux précipitations hivernales accrues, contribution significative à la biodiversité locale ainsi qu'une valeur économique potentielle avérée (*Bruxelles Environnement Livre 2, 2019*).

Une phase de restauration débute au XVIII^e siècle, elle consiste en la limitation des droits d'usage et la reforestation des vides avec des plants issus de pépinières. L'architecte de jardins autrichien Joachim Zinner est nommé directeur des plantations en 1785. Il a pour objectif de développer la production de bois par la plantation de hêtres avec une révolution de 100 ans. C'est un entretien de la ressource typique d'un traitement en futaie régulière⁵, à l'origine de la physionomie actuelle de la hêtraie cathédrale.

En 1830, la révolution belge a lieu et la Société Générale, craignant la nationalisation de ses biens, vend 60% de la forêt à des acquéreurs privés. La majorité des terrains seront défrichés, faisant brutalement chuter la superficie de la forêt de Soignes à 4 400 hectares.

Au cours du XIX^e siècle, la stratégie de Zinner est remise en question pour sa brutalité. En 1890 le plan d'aménagement impose la suppression du traitement en futaie régulière, remplacé par un traitement en futaie jardinée par groupes et mélange d'essences. La révolution est prolongée à 120 ans puis 168 ans, ralentissant l'exploitation en faveur du vieillissement de la forêt. Cette politique a créé un déséquilibre important avec pour conséquence « l'issue inévitable de devoir procéder à des rajeunissements massifs ». (*Bruxelles environnement livre 1, 2019 : 31-52*)

3 La méthode du tire-et-aire consiste à la mise à blanc sur de vastes étendues, tout en maintenant une réserve de 30 à 50 arbres par hectare durant une révolution supplémentaire. Ce mode de gestion conduit à une monotonie paysagère et est critiqué pour ses impacts négatifs sur la biodiversité et l'esthétique des forêts

4 La révolution, en sylviculture, désigne la durée totale du cycle de croissance d'un peuplement forestier, de sa régénération jusqu'à sa coupe finale.

5 Cette méthode consiste à conserver des arbres d'âges similaires, dans une parcelle déterminée.



Fig.2- Physionomie actuelle de la hêtraie de la forêt de Soignes dite « cathédrale »

2.2 UNE FORÊT FRAGILE

La sensibilité au vent est l'une des principales pathologies de la forêt de Soignes. Les sols argileux rendent difficile le développement des racines, qui sont en grande partie présentes entre deux et trois mètres de profondeur. Les racines superficielles des hêtres, combinées à la faible capacité de restauration des sols acides, augmentent le risque de déracinement lors des tempêtes. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019 : 82*) Ces événements météorologiques entraînent régulièrement des pertes importantes d'arbres dans les parties les plus exposées de la forêt.

Les prévisions climatiques pour la forêt de Soignes montrent une augmentation attendue de la température moyenne de 3°C d'ici 2100, avec une fréquence d'événement de fortes pluies croissante. Une hausse des précipitations de 20% est attendue en hiver, tandis que les étés seront plus secs, avec une réduction de 25 % des pluies. Ces changements affecteront la capacité des arbres à survivre, en particulier les hêtres, déjà sensibles aux fluctuations hydriques et climatiques. (*Bruxelles environnement livre 1, 2019 : 59*)

2.3 GESTION FORESTIÈRE

La forêt de Soignes, couvrant aujourd'hui 4 400 hectares, est un écosystème ancien. Désormais géré selon des principes stricts de durabilité pour répondre aux défis écologiques, climatiques, et économiques. Les approches modernes favorisent une gestion raisonnée, alliant protection de la biodiversité et exploitation contrôlée du bois.

Le plan de gestion de la forêt de Soignes présente une série d'objectifs sylvicoles, établis afin d'accompagner durablement l'évolution écologique du massif tout en répondant aux impératifs historiques, paysagers, récréatifs et économiques actuels. Structuré selon plusieurs enjeux complémentaires, il définit une stratégie globale pour guider les interventions futures sur une durée de 24 ans. La complétude de ces objectifs est estimée à environ 80 ans. Il constitue ainsi une direction claire mais ouverte à l'ajustement en fonction de l'évolution des connaissances scientifiques et des évaluations intermédiaires régulières (*Bruxelles environnement livre 2, 2019 : 46*).

La première orientation du plan de gestion prévoit de conserver un patrimoine historique et paysager significatif en maintenant 20% des hêtraies équiennes⁶, connues pour leur aspect dit « cathédrale ». Ces peuplements sont caractérisés par leur structure régulière et homogène, fruit de la gestion précédemment décrite. En parallèle, il est prévu de créer progressivement des peuplements équiens similaires composés de chênes pédonculés et sessiles, représentant à terme 9% de la surface sylvicole. Ces plantations permettront non seulement de renforcer la résilience climatique, mais aussi de produire un bois d'œuvre

6 Le terme « équien » en sylviculture désigne un peuplement forestier dont les arbres ont sensiblement le même âge.

de grande valeur économique, tout en conservant l'architecture « cathédrale » de la forêt. (*Bruxelles Environnement Livre 2, 2019 : 124-133*).

Un autre axe majeur concerne la diversification progressive des peuplements existants afin d'améliorer leur résilience écologique face au dérèglement climatique et aux pressions environnementales. Ainsi, 12% des hêtraies équiennes actuelles évolueront vers des futaies irrégulières à base de hêtre. Cette transformation se fera grâce à des coupes progressives, imitant les perturbations naturelles comme les chutes d'arbres ou les tempêtes, en régénérant le hêtre par îlots. La sélection des arbres à abattre sera rigoureusement établie selon des critères précis : le diamètre d'exploitabilité dépassant 60 cm, l'état sanitaire général déclinant ou un risque significatif de dégâts en cas d'intempéries. À l'inverse, les arbres conservés seront ceux présentant un bon état phytosanitaire, une importance écologique notable ou une valeur paysagère forte, favorisant ainsi une biodiversité riche et stable. L'objectif est donc clairement de diversifier progressivement la structure sylvicole, tout en introduisant ponctuellement d'autres essences indigènes adaptées à la station telles que le chêne, l'érable ou le charme, sans toutefois déstabiliser les peuplements existants (*Bruxelles Environnement Livre 2, 2019 : 149*).

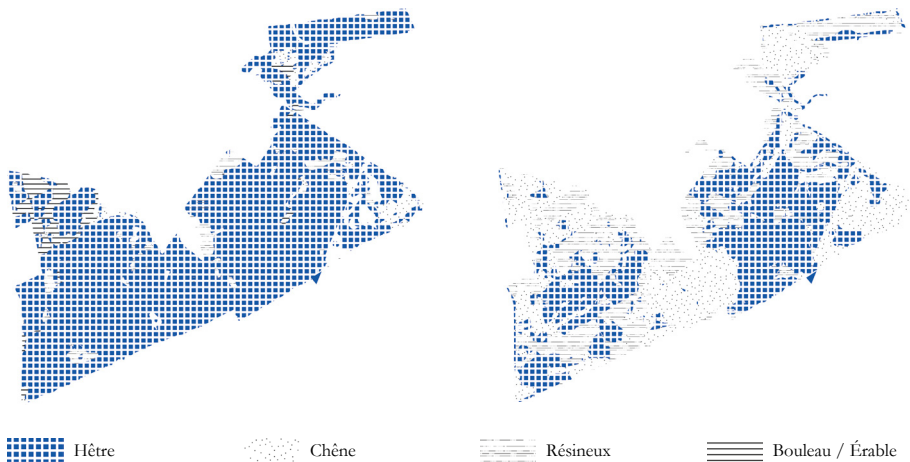


Fig.3- Peuplements actuels et objectif de diversification des peuplements

De même, une seconde approche visant à diversifier les peuplements touchera 13% des hêtraies actuelles. Ces zones connaîtront une transformation vers des peuplements mixtes composés d'essences variées. Le rajeunissement des peuplements est essentiel pour pérenniser le massif. Les interventions prendront la forme de coupes de régénération de peuplements vieillissants, d'éclaircies ciblées ou de coupes de transformation adaptées aux contextes locaux permettant ainsi de protéger les jeunes arbres durant leur pousse. En complément de ces objectifs principaux, une amélioration significative est envisagée

pour la gestion des forêts alluviales⁷ et des chênaies mixtes existantes, représentant environ 17% du massif. La stratégie consiste à préserver et renforcer leur biodiversité ainsi que leur capacité écologique, notamment par des coupes sélectives ciblées, qui consistent en le retrait de bouquets en minimisant l'impact de chaque intervention sur la forêt. Le renouvellement est alors constant et discret. Il permet une régénération continue et un maintien durable des habitats spécifiques à ces milieux. De plus, le maintien de 6% des peuplements résineux, initialement introduits pour des raisons paysagères et économiques, est également prévu afin de conserver une diversité d'écosystèmes et d'offrir une palette variée d'habitats (*Bruxelles Environnement Livre 2, 2019 : 124-133*).

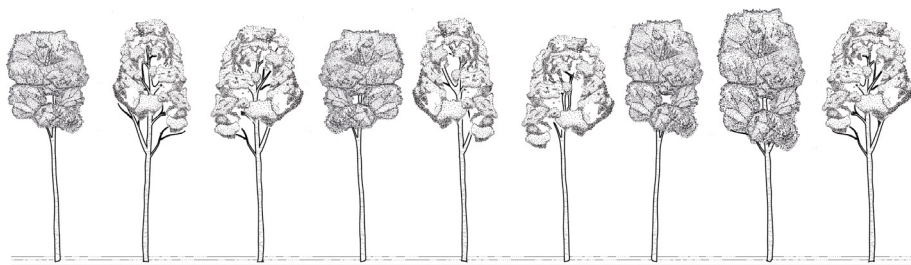


Fig.4- Cycle de sylviculture : Hêtraie cathédrale proche de la phase d'effondrement



Fig.5- Cycle de sylviculture : Coupes de régénération et plantation de semis



Fig.6- Cycle de sylviculture : Objectif de diversification des âges et peuplements

⁷ Une forêt alluviale est située sur les berges de cours d'eau, soumise à des crues régulières, avec une végétation adaptée aux sols humides et riches en sédiments.

Enfin, une attention particulière sera portée au suivi scientifique et à l'évaluation régulière des résultats intermédiaires. Des inventaires forestiers périodiques et des indicateurs clés (état sanitaire, diversité des essences, réussite de la régénération naturelle et assistée) permettront de mesurer précisément l'efficacité des interventions et d'adapter la stratégie en conséquence. Cette démarche proactive garantit une gestion adaptative capable d'intégrer en continu les avancées scientifiques et les réalités écologiques observées sur le terrain (*Bruxelles Environnement Livre 2, 2019 : 231*).

Une fois abattus, afin de limiter les dommages au sol et à la végétation environnante, le débardage des arbres est effectué à l'aide de méthodes douces. L'utilisation de tracteurs forestiers et l'utilisation de chevaux réduit le compactage des sols et minimise la perturbation des écosystèmes sensibles. (*Bruxelles environnement livre 2, 2019 : 94*)



Fig.7- Chevalet de débardage manuel utilisé pour l'extraction de grumes en Forêt de Soignes

3 LA FILIÈRE BOIS

3.1 DÉVELOPPER LA FILIÈRE BOIS, UNE VOLONTÉ GOUVERNEMENTALE

En 2020, la Belgique comptait 63 scieries en Wallonie, 32 en Flandre, et aucune à Bruxelles (Schrijnwerk, 2020). Cette répartition illustre l'importance de la Wallonie dans la filière bois, qui est également la seule région à intégrer explicitement ce secteur dans son plan de relance. Le plan wallon accorde une attention particulière à la modernisation de la filière, à la valorisation locale des ressources forestières et à la promotion des circuits courts. À l'inverse, les plans de relance flamand et bruxellois, bien qu'ils n'évoquent pas directement la filière bois, s'inscrivent dans des objectifs convergents tels que la transition écologique, la relance économique par l'innovation, la création d'emplois locaux non délocalisables, et la modernisation des infrastructures. Ces bases communes ouvrent la voie à des partenariats interrégionaux, particulièrement pertinents pour la forêt de Soignes, qui s'étend sur les trois régions.

Dans le cadre du plan de relance de la Wallonie, un budget de 8 millions d'euros a été attribué à la filière bois, reflétant une volonté claire de dynamiser ce secteur stratégique. Ce budget cible principalement deux objectifs : d'une part, rapatrier la plus-value de la transformation du bois en réduisant l'exportation brute, et d'autre part, adapter la filière pour répondre aux enjeux climatiques et économiques via des outils et infrastructures modernisés (Plan de relance de la Wallonie, 2021 : 86). Ces investissements visent à donner aux entreprises wallonnes un avantage compétitif, tout en s'inscrivant dans une dynamique durable.

Deux objectifs sont donc ciblés : le rapatriement de la plus-value de la transformation du bois allié au ralentissement de son exportation, et l'adaptation du secteur en lui donnant « les outils pour faire face techniquement, commercialement et donc économiquement à une matière première issue d'une forêt plus résiliente », ceci dans l'optique de redonner un aspect compétitif aux entreprises wallonnes (Wallonie, 2022). Le budget est réparti d'un côté à la recherche visant le développement « de nouveaux produits, procédés ou services valorisables par des entreprises wallonnes impliquées dans le projet », et au développement destiné « aux entreprises qui souhaitent effectuer un développement expérimental afin de développer un nouveau produit, procédé, design industriel ou service répondant à une demande du marché et devant être commercialement exploitable à court terme ». (Wallonie, 2022).

La seconde partie du budget est attribuée à la modernisation de la chaîne de transformation, notamment par l'introduction de technologies numériques et de procédés automatisés. Cela inclut l'amélioration et le développement d'outils de surveillance de la santé des forêts et l'optimisation des flux dans le cadre de l'économie circulaire et dans une optique durable. Le gouvernement wallon appuie sa volonté de dynamiser les circuits courts ainsi que les emplois locaux et non délocalisables tout en appuyant le potentiel de la filière bois en Wallonie, car seuls deux tiers de l'accroissement annuel sont exploités. L'article

est conclu par l'espoir du gouvernement de voir des projets novateurs naître pour servir le secteur (Wallonie, 2022).

Un premier impact est économique, avec le recyclage des déchets de bois issus du secteur de la construction et de la chaîne de production. Également en maximisant la valeur ajoutée locale, afin de stimuler l'économie régionale, de renforcer la compétitivité des entreprises et de créer de nouvelles opportunités de marché. Ensuite, le dividende environnemental, en diminuant l'empreinte carbone grâce à la transformation locale, réduisant ainsi le transport sur de longues distances, tout en optimisant l'utilisation des ressources naturelles. De plus, le projet contribue indirectement à la préservation des écosystèmes forestiers en réduisant la pression sur les forêts et en soutenant des pratiques circulaires respectueuses de la biodiversité et de la pérennité forestière. La démarche portée par la Sonian Wood Coop à Bruxelles illustre cette logique, comme abordé plus loin en 3.2.

L'un des points centraux du plan de relance est de dynamiser les circuits courts, notamment via des mécanismes comme les ventes « de gré à gré ». Ce système permet aux propriétaires publics et privés de vendre leur bois directement aux transformateurs locaux, évitant ainsi les intermédiaires et limitant les exportations massives. Bien que cette initiative soit prometteuse, son utilisation reste marginale en raison de craintes liées à une potentielle perte de revenus pour les vendeurs (Filière Bois Wallonie, 2021). L'ancienne ministre de l'Environnement wallon, Céline Tellier, a insisté durant son mandat pour prioriser ces ventes dans les forêts domaniales. Celles-ci étaient encadrées par des plafonds stricts : 35 000 euros par lot et une limite de 15 % du volume total mis en vente par adjudication publique à l'échelle de la Wallonie. Une autre mesure, la vente systématique des chênes de plus de 120 cm de circonférence aux scieurs locaux. Cependant, elle précise que, bien qu'encouragées, ces mesures ne peuvent être imposées aux autres acteurs publics. Les martelages⁸ doivent alors être réalisés en concertation avec chaque propriétaire. (Parlement de Wallonie, 2022)

Bien que les ambitions soient présentes, certains défis restent à relever. Le manque de résultats des ventes de gré à gré reflète une réticence des acteurs publics et privés à prioriser les transformateurs locaux, principalement par peur de réduire leurs marges (Filière Bois Wallonie, 2021).

De plus, la modernisation des infrastructures nécessitera un accompagnement technique, éducatif et financier pour les petites entreprises locales, souvent peu équipées pour absorber ces changements. Le risque est que seules les plus grosses entreprises puissent

8 Le martelage est l'opération consistant à marquer les arbres destinés à l'abattage ou à la conservation selon les objectifs de gestion forestière, en vue de la planification des coupes. En adaptant le martelage aux demandes des scieries locales, on peut valoriser au mieux les arbres sur pied : par exemple, en sélectionnant des chênes dépassant 120 cm de circonférence pour une valorisation locale plutôt qu'une exportation.

bénéficier des avancées technologiques proposées, accentuant ainsi les inégalités dans la filière.

3.2 SONIAN WOOD COOP

La forêt de Soignes produit 20 000m³ de bois annuellement. Ce sont plus de 75% de l'exploitation forestière qui est exportée en Chine. La cause est financière, des acheteurs Belges acquièrent le bois durant des enchères publiques proposant des prix sur lesquels ne peuvent s'aligner les scieries locales. Le prix de transformation en Chine est suffisamment inférieur pour permettre d'acheter les lots chers, de les exporter pour les transformer puis de les réimporter en Belgique sous forme de mobilier. La concurrence asiatique devient alors insoutenable pour les scieries locales, ce qui conduit à une pénurie d'approvisionnement pour les entreprises belges. (Parmentier I, 2020)

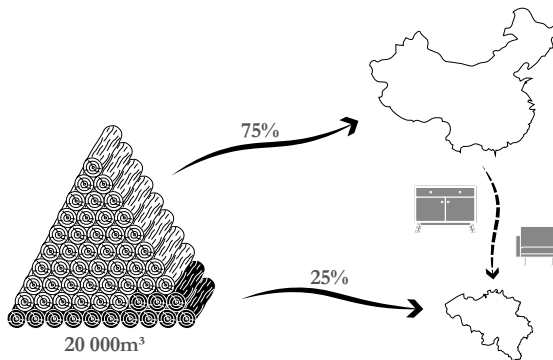


Fig8- Production annuelle de la forêt de soignes et destinations

La Sonian Wood Coop veut agir et exploiter le bois de la forêt de Soignes localement. La coopérative opte pour une scierie mobile afin d'assurer la première transformation du bois pour ensuite la revendre à des acteurs locaux, notamment des menuisiers, architectes et designers. « On travaille avec eux pour créer une sorte de carnet de commandes avant de scier le bois. On est assez satisfait de la réaction des différents secteurs parce que la forêt de Soignes a un cachet, une provenance très intéressante pour des projets en architecture et en design » explique Stephan Kampelmann, co-fondateur de Sonian Wood Coop et chercheur en économie circulaire de l'ULB (RTBF, 2020).

Le réalisme économique du projet est tout de même questionné. Stephan Kampelmann ne doute pas de la faisabilité et met en avant la qualité homogène du bois, les quantités industrielles prêtes à être valorisées et compare le point de départ de ce marché à celui d'autres villes qui y parviennent avec des bois d'alignement ou des arbres dans les parcs.

Frédéric Petit, président de la fédération belge des exploitants forestiers, émet tout de même une réserve. Selon lui, le marché chinois est difficile à concurrencer, rendant le

projet réaliste uniquement à petite échelle, appuyant la difficulté de transformer toute la production de la forêt de Soignes et soulignant l'impact marginal comparé à l'ensemble de la filière bois (RTBF, 2020).

3.3 LA TRANSFORMATION DU BOIS EN WALLONIE

Une fois abattus, les arbres sont « compartimentés », la division se fait entre le fût, les branches principales et le reste. Selon des critères de qualités définis, la section, la longueur, la rectitude, les pathologies et les défauts, les pièces seront dédiées à une transformation adaptée.

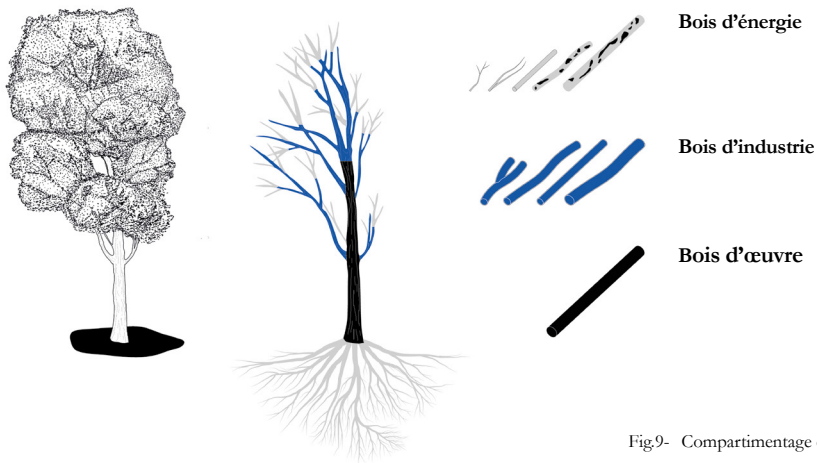


Fig9- Compartimentage de l'arbre

Le bois d'œuvre regroupe les pièces rectilignes, saines, de bonne qualité structurale et avec un diamètre minimal généralement fixé à 30 cm (60cm pour celles provenant de la forêt de Soignes). Il est utilisé en charpente, construction bois, menuiserie, ainsi que pour la réalisation de parquet, de lambris ou de bardage. Le chêne est l'essence offrant le meilleur rendement économique, cependant, c'est environ 85 % de ces grumes qui sont exportées vers la Chine. Le bois est expédié par voie maritime brut, sans transformation locale, excluant toute valorisation via la filière bois wallonne. (Hout Info Bois, 2023)

Le bois d'industrie regroupe les pièces saines, mais impropres au sciage en raison d'une trop faible valeur ajoutée. Cette catégorie inclut les bois irréguliers ou d'un diamètre compris entre 7 et 30 cm, les branches, les fourches, ainsi que les arbres présentant des défauts internes tels que des nœuds importants, des fissures ou un cœur excentré. À cela s'ajoute les sous-produits générés tout au long du processus, comme les copeaux et sciures, qui sont recyclés. Il est principalement destiné à la fabrication de panneaux dérivés et de pâte à papier. (Hout Info Bois, 2023)

Le bois d'énergie regroupe les éléments impropres à la transformation : bois mécaniquement peu performants, trop fins, morts ou altérés, ainsi que les résidus issus de l'industrie du bois et du marché. Destiné à la combustion, il sert à produire de la

bioénergie en libérant le dioxyde de carbone séquestré durant la croissance de l'arbre, qui sera ensuite recapté par la forêt. Il est à noter que les petites branches sont laissées au sol en forêt de Soignes pour favoriser la régénération des sols et la biodiversité (*Bruxelles Environnement Livre 2, 2019*)

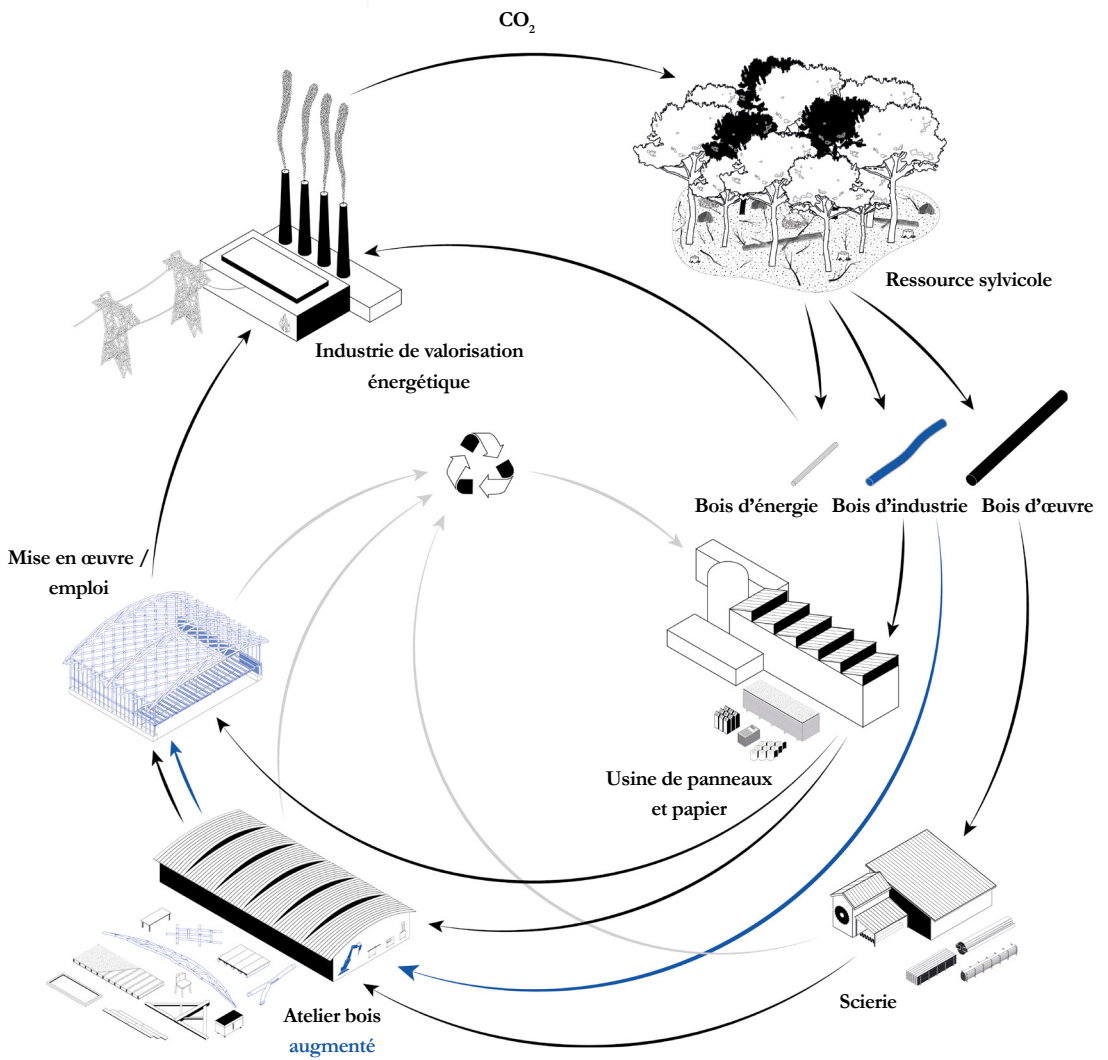


Fig.10- Filière bois wallonne : cycle de vie et proposition de valorisation du bois d'industrie en bois d'œuvre

3.4 AMBITIONS DE LA PROPOSITION DANS LA FILIÈRE BOIS ACTUELLE

Ce travail de fin d'études propose de valoriser le bois d'industrie en bois d'œuvre, en introduisant une étape supplémentaire à son cycle de vie afin d'en réorienter l'usage vers des applications structurelles. Actuellement, ce bois, souvent déclassé en raison de son irrégularité morphologique ou de sa faible section, est majoritairement dirigé vers des filières à faible valeur ajoutée (panneaux, pâte à papier, bioénergie). Pourtant, une part significative de ces éléments est saine et mécaniquement apte à des usages structurels au même titre que le bois d'œuvre tel qu'on le qualifie aujourd'hui. Ce potentiel sous-exploité est le levier principal de ce travail.

Autrefois, le charpentier de marine sélectionnait directement en forêt les arbres dont la courbure naturelle répondait à la morphologie des coques qu'il concevait. La recherche ciblait des fourches, courbures et déformations particulières, transformant ces caractéristiques naturelles en atouts constructifs. Cependant, cette pratique artisanale est devenue marginale après le XIX^e siècle, avec l'essor de l'industrie bois, rompant le lien entre la ressource forestière disponible et le produit fini employé en construction.

L'ambition de ce projet n'est pas de remplacer un marché existant mais d'ouvrir une nouvelle voie, complémentaire à celles déjà établies. Cette approche permet la valorisation locale d'une ressource aujourd'hui peu exploitée, stimulant ainsi une dynamique économique complémentaire sans entrer en concurrence avec les filières classiques locales. Le procédé numérique proposé et détaillé dans la partie 5 de ce travail, vise à intégrer efficacement cette nouvelle étape au cycle de vie du bois en articulant plusieurs travaux de recherches.

Sur le plan économique, l'introduction d'une valorisation locale du bois d'industrie en bois d'œuvre conserve la valeur ajoutée sur le territoire régional. Ce processus dynamise la compétitivité des entreprises locales, favorisant l'émergence d'emplois non délocalisables dans divers secteurs tels que la gestion forestière, la caractérisation mécanique et morphologique des arbres, l'usinage robotisé ainsi que la mise en œuvre des structures bois. En privilégiant une chaîne d'approvisionnement courte et intégrée, ce modèle contribue également à réduire les coûts logistiques et l'empreinte environnementale liée au transport international des ressources sylvicoles.

Au-delà de ces bénéfices économiques, la réorientation du bois d'industrie vers des usages structurels permet un déphasage sur la durée de vie d'un bâtiment de la libération du carbone séquestré dans les arbres. Cette approche encourage la mise en œuvre d'un modèle circulaire, puisque les éléments en bois rond, une fois leur usage architectural initial terminé, restent recyclables dans leur intégralité, préservant ainsi la disponibilité à long terme de la matière.

De plus, cette démarche représente une opportunité pour développer un savoir-faire local spécifique, conciliant ainsi les impératifs d'une gestion forestière raisonnée et les attentes architecturales contemporaines. Elle ouvre la voie à des innovations techniques, notamment en matière de conception numérique et d'assemblages adaptés aux caractéristiques intrinsèques du bois rond (Gilliard, 2024). Enfin, elle renforce la résilience économique et environnementale du territoire, contribuant à la pérennité des écosystèmes forestiers par une exploitation plus respectueuse des ressources sylvicoles.

3.5 DÉFINITION D'UN CADRE PROPICE

3.5.1 DISTRIBUTION LOCALE

La stratégie proposée s'appuie sur la vente de gré à gré du bois d'industrie à faible prix, permis par sa faible valeur actuelle sur le marché. Ce cadre théorique repose sur une coopération des acteurs publics et privés dans l'objectif de privilégier une revente locale systématique. Nous l'avons observé plus tôt, les vendeurs sont réticents à ce type de ventes de par la peur de réduire les marges. La mise en place d'un tel dispositif nécessiterait un investissement initial du gouvernement ou de l'Europe visant à compenser les pertes immédiates de revenus liées à l'abandon partiel ou total de la vente à l'exportation.

À travers ce cadre, l'état ou l'union européenne contribuerait ainsi à créer les conditions économiques nécessaires pour amorcer un cercle vertueux : l'approvisionnement régulier des infrastructures locales en bois d'industrie favoriserait la structuration de filières courtes, générant progressivement une demande accrue de transformation locale. Cet investissement initial aurait pour conséquence directe une stimulation économique régionale, l'émergence de nouveaux savoir-faire et l'augmentation significative du nombre d'emplois non-délocalisables.

Dans une logique de moyen à long terme, cette dynamique économique garantirait non seulement un retour sur investissement financier, mais également social, par la revitalisation d'un tissu industriel local. Le soutien initial des grandes instances pourrait être progressivement réduit à mesure que la filière gagnerait en autonomie et en compétitivité. L'économie locale, ainsi renforcée, pourrait dès lors envisager un détachement progressif de sa dépendance aux circuits de transformation internationaux.

3.5.2 MODERNISATION DE LA FILIÈRE

Ce modèle permettrait de maintenir l'activité des grandes infrastructures, essentielles au traitement de volumes importants de bois d'œuvre, tout en confiant la valorisation spécifique et sur mesure du bois d'industrie à des structures plus modestes. Deux typologies d'ateliers pourraient remplir ce rôle.

D'une part, l'émergence d'ateliers bois augmentés, digitalisés dès leur création. Et d'autre part, les scieries et ateliers existants ayant la volonté et la capacité de se moderniser en intégrant des outils numériques ou robotiques dans leur processus de fabrication. Toutefois, cette modernisation constitue un investissement conséquent, pour deux raisons : le coût de l'équipement robotique et celui du technicien qualifié capable de manipuler le robot. Un soutien financier public, sur le modèle évoqué précédemment, pourrait être un véritable levier pour ces infrastructures, d'autant plus qu'un budget spécifique a déjà été prévu par le gouvernement wallon afin d'accompagner la modernisation de la filière.

J'ai pu échanger avec Damien Gilliard sur la réelle capacité de digitalisation des petites entreprises. Il est vrai que l'intégration d'un robot au processus de transformation est un changement important. Par ailleurs, de mon expérience de charpentier, les valeurs artisanales et manuelles sont fortement ancrées. L'idée de partager son atelier avec un outil numérique n'est généralement pas la bienvenue. Cependant, l'évaluation de la capacité d'une entreprise à se moderniser étant une notion en dehors de mes compétences, je retiendrai ici un potentiel nuancé de digitalisation des infrastructures existantes et une nécessité de proposer plusieurs techniques de valorisation pour offrir plus de chances à nos artisans. Il est néanmoins essentiel de préciser que l'introduction de ces technologies ne vise pas à remplacer l'activité artisanale existante mais à la compléter, permettant ainsi aux ateliers de maintenir leur savoir-faire traditionnel tout en bénéficiant de nouvelles capacités techniques.

4 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de recherche de ce travail s'articule autour de deux axes principaux, le développement de connaissances et l'expérimentation.

4.1 DÉVELOPPEMENT DE CONNAISSANCES

4.1.1 ENTRETIENS

ANDREA SETTIMI

Position : Architecte et doctorant au laboratoire IBOIS de l'EPFL « Augmented Carpentry: Computer Vision-assisted Framework for Manual Fabrication »

Échanges : été 2024 durant mon stage à Lausanne

Expertise sur la construction bois, la conception numérique et la charpente en réalité augmentée

Sujets abordés : La place de la technologie dans un métier artisanal, les enjeux à la digitalisation, la conception paramétrique et l'auto-construction.

CORENTIN DALON

Position : Architecte praticien, Bento architecture

Entretien : réalisé le 14/04/25 à Bruxelles

Expertise sur la construction en terre crue

Sujets abordés : la maçonnerie en bois cordée, compatibilité terre-bois, taux d'humidité à la mise en œuvre, composition du liant, plancher terre-bois, mise en œuvre et risques à anticiper

DAMIEN GILLIARD

Position : Architecte et doctorant au laboratoire IBOIS de l'EPFL « Biotope-aware round wood architecture »

Entretien : réalisé le 09/02/25 en distanciel et de nombreux échanges durant mon stage d'été 2024 à Lausanne.

Expertise sur le processus de valorisation du bois rond proposé, du scan forestier à la disposition des pièces dans le modèle filaire.

Sujets abordés : Enjeux et freins du processus, nuage de points, caractérisation mécanique, optimisation du positionnement, le relevé, le catalogue, la CNC, les assemblages, digitalisation des petites structures, conception paramétrique, l'évolution des forêts occidentales, le bois vert et échanges sur sa thèse.

JUSTIN GOOSSE

Position : Ingénieur civil des constructions et assistant de recherche à l'EPL

Entretien : réalisé le 11/03/25 à Louvain la Neuve

Expertise sur les structures bois rond, la conception numérique et l'usinage robotique.

Sujets abordés : reproduction du banc d'essai à la défonceuse et retour d'expérience, pertinence des assemblages, projet robot-tronc, son travail de fin d'études, caractérisation

mécanique des grumes, critique des choix structurels du projet, pertinence du processus proposé, expérience sur l'usinage robotique, travail par essence, traitement du bois et les points d'attention à avoir dans la conception bois rond.

YVES WEINAND

Position : Professeur dr. ingénieur, architecte et directeur du laboratoire Ibois à l'EPFL

Entretiens : réalisé le 09/12/24, 27/12/24, 27/02/25, 02/04/25 en distanciel et l'été 2024 durant mon stage à l'IBOIS

Expertise sur la construction bois et la digitalisation du processus

Sujets abordés : La toiture du projet de Rossinière, la structure de mon travail, les enjeux à la valorisation du bois rond, les enjeux des structures préfabriquées, la place du numérique et de l'automatisation dans le secteur du bois, la relation homme-machine, le projet en lien avec cet écrit et maintenir la singularité dans un procédé industriel.

4.1.2 ENCADREMENT PÉDAGOGIQUE

Durant la réalisation de ce travail j'ai été accompagné hebdomadairement dans le cadre des cours de séminaire de recherches en éco-architectures (partie écrit) et d'atelier de recherches en éco-architectures (partie projet). Les trois enseignants étaient : Sandrine Meyer, Benoît Thielemenas, Geoffrey Van Moeseke.

EXPÉRIENCES PRATIQUES

4.1.3 QUELQUES ANNÉES DE CHARPENTERIE

Ma carrière professionnelle a commencé en 2014, à l'âge de 16 ans, lorsque j'ai fait le choix de m'orienter vers un métier manuel : la charpente. J'ai été formé à la fois sur les chantiers, où j'ai acquis les compétences pratiques du métier, et au sein des Compagnons du Devoir et du Tour de France, où l'apprentissage se poursuit le soir et le week-end, à l'atelier ou sur la table à dessin.

Pendant ces quatre années de formation, j'ai développé une maîtrise de la charpente traditionnelle, tout en devenant un ouvrier polyvalent et efficace sur le terrain. Le rythme du Tour de France m'a amené à changer d'entreprise et de ville tous les six mois, enrichissant ainsi mon expérience professionnelle par la diversité des contextes, des méthodes et des savoir-faire rencontrés.

4.1.4 STAGE D'ÉTÉ AU LABORATOIRE DE RECHERCHE IBOIS

L'été 2024, j'ai eu l'opportunité d'intégrer le laboratoire IBOIS dans le cadre de mon stage de master durant 11 semaines, pour participer à un projet concret mêlant recherche, expérimentation et mise en œuvre : le futur centre d'activités Gare Grand Chalet à Rossinière. Ce bâtiment communal multifonctionnel était l'occasion de concrétiser des

années de recherche sur la construction bois, en valorisant la ressource forestière locale par des procédés numériques. Ma mission, supervisée par le professeur Yves Weinand et menée en binôme avec Maxim Andrist, consistait à concevoir la toiture du bâtiment, une double nappe arquée en bois rond, à en définir le procédé d'exécution, à anticiper la taille et l'assemblage, à participer à la commande des bois et à produire un prototype à l'échelle 1:1 (non exécuté faute de temps).

Mon rôle a principalement consisté à développer le script paramétrique sur Grasshopper⁹, permettant de générer, adapter et contrôler la géométrie de la toiture en bois rond. Ce script constituait l'interface principale entre la géométrie architecturale, la logique constructive et les contraintes matérielles. Ce stage a été l'opportunité d'associer mes compétences de charpentier à mes connaissances en architecture et en conception numérique, dans un cadre de recherche appliquée et de collaboration avec les acteurs de terrain.

4.2 EXPÉRIMENTER PAR LE PROJET

J'ai expérimenté les étapes du processus en les appliquant au projet associé à cet écrit. Le processus a été, autant que possible, exploré et testé. Cependant certaines étapes, comme la caractérisation mécanique ou l'imagerie hyperspectrale, n'ont pu être expérimentées faute de moyens. Le projet architectural se trouve en annexe et est donc consultable dans son entièreté.

4.3 STRUCTURE DE L'ÉCRIT DES ÉTAPES DU PROCESSUS

Les étapes du processus sont décrites suivant une structure prédéterminée. Le premier paragraphe explique pourquoi l'étape est nécessaire, ses enjeux liés au contexte ou au reste des étapes. Ensuite j'explique comment réaliser l'étape en m'appuyant sur des travaux existant, c'est l'état de l'art enrichi par des commentaires personnels issus des entretiens réalisés. Pour finir, lorsque c'est le cas, j'expose mon expérience en lien avec l'expérimentation réalisée.

⁹ Grasshopper est un environnement de programmation visuelle paramétrique intégré à Rhinoceros 3D (logiciel de modélisation 3d), permettant de créer des géométries complexes et adaptatives par assemblage logique de composants sans script écrit.

5 DÉFINIR UN PROCESSUS

Les premières parties avaient pour objectif de déterminer un contexte, puis une ambition, celle de valoriser le bois d'industrie en bois d'œuvre. Plusieurs éléments conduisent à la proposition du processus numérique décrits dans cette partie du travail.

Le premier élément est exposé par le plan de gestion, le hêtre est l'essence la plus présente en forêt de Soignes, mais, du fait de la gestion passée, les arbres sont âgés, fragile et mal enracinés de par la nature des sols humides et acides. Il est nécessaire de diversifier les essences et les âges des peuplements, pour ce faire les gestionnaires forestiers ont besoin de données précises et à jour.

Le deuxième s'observe dans le fonctionnement de la filière bois. Le bois d'industrie est transformé en bioénergie, en panneaux ou en pâte à papier par de multiples étapes de transformation. Seulement, une partie de ce bois est sain et résistant, seul son diamètre ou sa morphologie justifie sa destination actuelle. En ciblant du bois avec un diamètre compris entre 10 et 30 cm, les fourches d'arbres, ainsi que les pièces trop irrégulières pour être déroulée ou débillardée, on se place sur un nouveau marché. Évitant ainsi la concurrence chinoise contre laquelle on ne peut s'opposer frontalement et offrant une étape supplémentaire à son cycle de vie. De plus, la mortalité accrue des arbres âgés liée au dérèglement climatique provoque un rajeunissement général des forêts. Nous serons alors amenés à travailler avec des sections plus petites. Le travail du bois juvénile accepte des cycles plus courts et permet une meilleure adaptation (Gilliard, 2024). Cependant pour valoriser un bois rond et irrégulier, il est nécessaire de connaître sa morphologie et ses caractéristiques intrinsèques.

Le troisième est ciblé par la sonian wood coop, le bois abattu en forêt de Soignes, 20 000m³ annuel, part à 70% vers la chine. Un autre chiffre, 60%, c'est la proportion de chênes abattus en Wallonie qui est transformé en Chine. (RTBF, 2018) Outre l'impact écologique lié au transport, c'est une perte économique directe pour la filière, qui se prive à la fois de la transformation et de l'usage de cette matière. La structuration d'une filière locale, capable de capter et de transformer ce bois sur place, représente donc un levier concret pour redonner sens et valeur à une ressource abondante, tout en répondant à des enjeux de durabilité, d'emploi et de souveraineté matérielle.

Le quatrième est politique, avec une volonté gouvernementale de dynamiser et moderniser la filière bois. Un budget est proposé pour financer la digitalisation et la recherche au sujet de la transformation locale du bois. Ce sont deux éléments clés dans la faisabilité de l'application du processus.

Le processus a pour ambition de couvrir les besoins des acteurs à chaque étape du cycle, de l'arbre à la poutre et de les articuler pour offrir une continuité théorique, reliant ainsi la ressource sylvicole au secteur du bâtiment.

5.1 RELEVER

5.1.1 TROIS ENJEUX : GÉRER, SÉLECTIONNER, VALORISER

Le scannage des forêts est un élément clé, il permettrait de réintégrer le choix de l'arbre selon la structure souhaitée tout en étant un atout de taille pour la gestion forestière. Les critères de choix d'abattage dépendent du type de forêt. Dans une forêt protectrice, comme la forêt de Soignes, le choix se fait dans un but d'entretien et de préservation, comme nous avons pu l'observer dans le plan de gestion. Dans une forêt productive les critères sont tout autres, ils respectent cependant une législation stricte en Europe. Celle-ci porte d'ailleurs ses fruits, puisque la surface de nos forêts représente aujourd'hui 22.5% du territoire Belge, en constante augmentation. (Dehaen & Ponthiere, 2022)

Ici, se trouve un enjeu majeur rendu accessible par le scannage des forêts : concilier la dynamique de production sylvicole avec une démarche protectrice adapté au type de gestion forestière voulue. Un catalogue caractérisant les arbres destinés à l'abattage pourrait alors être dressé au niveau régional voire national qui permettrait de répondre à la demande tout en travaillant avec des coupes protectrices. (Weinand, 2021 : 94)

5.1.2 LE SCAN

Le scan de la forêt se déroule en deux phases. Il faut premièrement effectuer un scan au sol en saison hivernale afin d'obtenir, pour chaque arbre, sa morphologie. Un second scan, celui-ci aérien, est nécessaire, permettant de compléter le nuage de points avec les parties non visibles au sol. C'est à dire la partie supérieure des éléments non verticaux. A savoir, les branches et les ramifications. Une fois les deux scans compilés grâce à la géolocalisation, nous obtenons un relevé morphologique précis de la ressource sylvicole locale. (Gilliard, 2024)

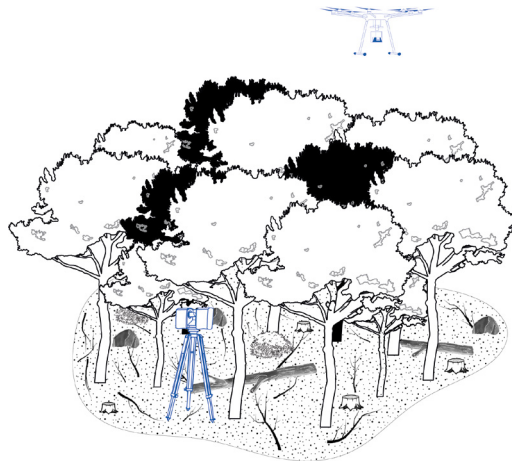


Fig.11- Représentation du scan terrestre et aérien

L'obtention du nuage de points se fait grâce à la technologie LIDAR (Light Detection And Ranging). Il s'agit d'une technique de télédétection active qui mesure la distance entre un capteur et une cible en chronométrant le temps que met une impulsion laser pour effectuer un aller-retour. Ce sont plusieurs millions d'impulsions, dans les 3 dimensions, qui sont émises pour chaque scan. Chaque faisceau de lumière frappe une surface et est réfléchi vers le capteur. En enregistrant le temps de vol de chaque impulsion et l'intensité lumineuse, le système calcule la distance précise entre le capteur et la surface réfléchissante. Ces mesures, combinées aux informations de position et d'orientation du capteur, permettent de géo-référencer chaque point dans un environnement 3d. (YellowScan, 2024)

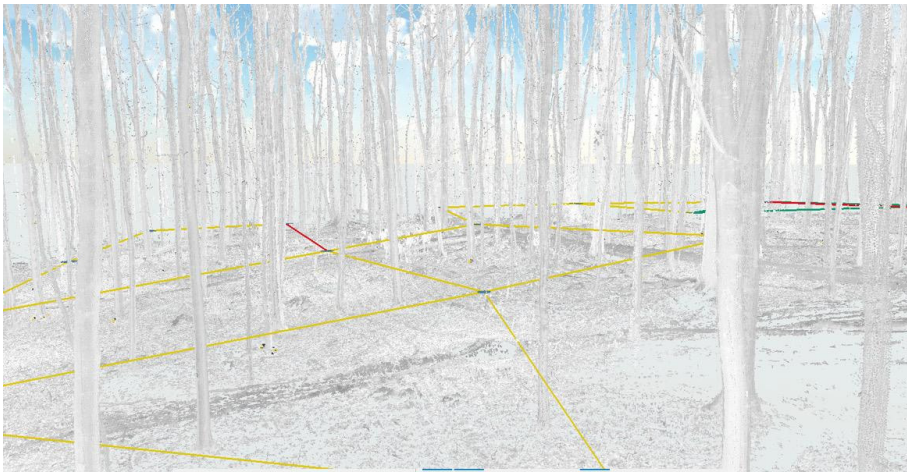


Fig.12- Résultat brut du scan réalisé en forêt de Soignes en Février 2025

Le balayage scanner peut se faire de plusieurs façons. Le TLS (Terrestrial Laser Scanning) emploie un laser statique, généralement sur trépied, cette méthode nécessite plusieurs prises avec différentes orientations, pour capturer un objet. Au sol et fixe c'est l'approche la plus précise pour un relevé morphologique des troncs, les parties non visibles à l'œil ne sont pas relevées. (YellowScan, 2024) Cependant le procédé est long car la zone capturée mesure entre 20m et 50m de diamètre, et le recouvrement nécessaire au bon alignement des scans est important, de l'ordre de 60%. Aussi la registration¹⁰ peut mener à des imprécisions additionnelles malgré un relevé initial précis à quelques millimètres près.

Complémentaires, le MLS (Mobile Laser Scanning) et le ULS (UAV¹¹ - borne Laser Scanning) sont des méthodes de balayage mobile. Le laser est alors monté sur un véhicule terrestre ou aérien afin de balayer rapidement une grande surface. La précision est

¹⁰étape d'assemblage des scans sur ordinateur

¹¹ Unmanned Aerial Vehicle

toutefois affectée par le facteur déplacement du scanner. Plus il y a d'éléments à prendre en compte pour géo-référencer un point, plus l'erreur est grande. (Gilliard, 2024) Le ULS se présente comme une solution sans alternative si l'on souhaite obtenir une morphologie précise du dessus des branches ainsi que des ramifications.

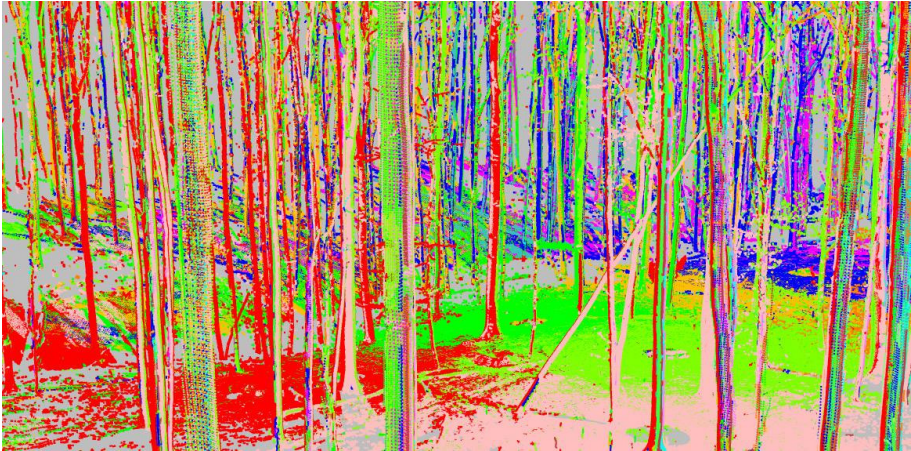


Fig.13- Résultat du scan après registration. Ici, chaque scan est représenté par une couleur distincte.

5.1.3 LA PHOTOGRAMMÉTRIE

La photogrammétrie est une méthode qui consiste à la reconstitution d'une scène en 3D depuis des clichés, eux, en 2D. En prenant une multitude de photographies d'un même objet avec des angles et des distances variables il va être possible de déterminer la position des points dans l'espace. Cette technique repose sur le principe de triangulation, c'est-à-dire la capacité à déterminer la position d'un point dans l'espace en identifiant sa correspondance sur au moins deux images prises depuis des positions connues. Une fois les clichés capturés, un logiciel de traitement trace une « ligne » vers un point de correspondance. L'intersection de ces lignes permet de calculer les coordonnées XYZ du point recherché. (Artec 3D, 2025)

Cependant, contrairement au LiDAR, un modèle photogrammétrique ne contient pas d'échelle. Pour y remédier, il est possible de placer des cibles autour de l'objet à relever. Ces cibles présentent des points facilement identifiables comme les sommets d'un cube ou l'intersection d'un pixel noir et d'un pixel blanc sur un damier. Ces marqueurs, standardisés, sont automatiquement reconnus par les logiciels de traitement et permettent ainsi d'aligner les images et d'étalonner le modèle 3d généré.

La photogrammétrie, bien que moins précise que le lidar, permet d'obtenir la colorimétrie des points. C'est aussi une méthode nécessitant peu de moyens, un appareil photo

numérique peut suffire. Son emploi est pertinent dans notre cas pour compléter les données du scan.

5.1.4 L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE

Une forêt est composée de plusieurs essences d'arbres. Nous l'avons observé dans le plan de gestion de la forêt de Soignes, la diversité des peuplements est nécessaire pour une biodiversité riche et variée. Cet écrit propose un processus corrélant gestion forestière résiliente et valorisation du bois. Il est donc nécessaire de connaître en plus de la morphologie ou de l'emplacement de chaque arbre, ses caractéristiques distinctifs. Certains sont propres à chaque arbres, pathologie et stress hydrique par exemple. D'autres dépendent de l'essence. La densité du bois diffère, impactant la résistance mécanique, la possibilité ou non d'être exposé aux intempéries, la sensibilité aux attaques fongiques et aux insectes xylophages. Il est donc nécessaire d'avoir connaissance de ces éléments afin de garantir une gestion forestière fine ainsi qu'une valorisation juste des arbres abattus.

L'article « Tree Species Classification of Drone Hyperspectral and RGB¹² Imagery with Deep Learning Convolutional Neural Networks » explore le potentiel du deep learning afin de classer trois essences d'arbres, le pin, l'épicéa et le bouleau, dans une forêt finlandaise. La méthode proposée combine des images RVB classiques, des images hyperspectrales (33 bandes), et des modèles de hauteur de canopée, en les traitant à l'aide de réseaux de neurones convolutifs en trois dimensions (3D-CNN)¹³. Contrairement à une caméra RVB, qui ne capte que trois bandes (rouge, vert, bleu), l'imagerie hyperspectrale enregistre les données dans des dizaines de bandes du spectre lumineux, y compris dans l'infrarouge proche. Cela permet de détecter des caractéristiques invisibles à l'œil nu, comme la teneur en chlorophylle, le stress hydrique, la structure des tissus foliaires¹⁴ ou la composition des pigments, qui sont des caractéristiques distinctives pour différencier les espèces d'arbres. Les résultats montrent que l'association des données RGB et hyperspectrales permet une classification automatisée des arbres avec une précision de 98 %. (Nezami et al., 2020)

5.1.5 OBTENIR UN RELEVÉ COMPLET

Pour obtenir un relevé de la ressource sylvicole complet, il est nécessaire de combiner les techniques. Le scan LiDAR au sol offre la modélisation des troncs, complété par un scan aérien en saison hivernale, ainsi, la modélisation 3d est assurée. Si la colorimétrie est souhaitée, la photogrammétrie est nécessaire, elle est aujourd'hui intégrée dans les

12 L'imagerie RGB, ou RVB en français, est une méthode d'acquisition d'image reposant sur la capture de trois bandes spectrales correspondant au rouge, au vert et au bleu, permettant une restitution visuelle en couleurs naturelles proche de la perception humaine.

13 Un réseau de neurones convolutifs en trois dimensions (3D-CNN) est un algorithme d'intelligence artificielle qui analyse des blocs de données 3D, ici des images avec profondeur spectrale, pour reconnaître des formes, motifs ou objets en tenant compte à la fois de l'espace et des variations internes, comme la couleur ou les longueurs d'onde.

14 Caractéristiques physiques, anatomiques et morphologiques d'une feuille

scanners mais augmente la durée de chaque scan. Ensuite, bien qu'encore peu développé, il est possible de compléter la donnée par un relevé hyperspectral, permettant la détection des essences et potentiellement des pathologies. A ce jour il n'existe pas d'outil permettant de rassembler ces informations en une base de données exploitable. C'est l'objet d'une partie de la thèse de Damien Gilliard qui devrait être publiée en 2027. Il s'agirait d'une connaissance précieuse de la ressource sylvicole offrant la possibilité d'une gestion forestière plus fine.

5.2 CARACTÉRISER

5.2.1 L'ABSENCE DE RÉGLEMENTATION

Bois rond : Le bois rond est le bois abattu ou façonné en grume, bille, rondin avant sa première conversion industrielle. Cette dénomination exclut le bois de feu, le bois destiné à la pâte à papier, bois de mine, bois de traverses, grumes de déroulage, etc. (Hout Info Bois 2023)

L'intérêt structurel du bois rond réside dans la conservation de l'intégrité des fibres lignocellulosiques. En préservant ainsi l'homogénéité et la continuité de la structure interne, le nombre de points faibles est réduit. Cela confère au matériau des propriétés avantageuses vis à vis de la résistance mécanique aux efforts de compression et de flexion. (Gilliard, 2024)

Cependant, aucune norme européenne n'existe actuellement pour le classement structurel des bois ronds utilisés comme éléments porteurs. Ainsi, une caractérisation mécanique individuelle de chaque grume est nécessaire avant la mise en œuvre.

Cette exigence entraîne des démarches administratives et techniques supplémentaires pour les concepteurs. De plus, l'absence de cadre normatif entraîne généralement l'application d'un coefficient partiel de sécurité (γ) supérieur à la valeur standard prévue par l'Eurocode 5 ($\gamma = 1,3$). L'augmentation de ce coefficient conduit au surdimensionnement des sections. (Hout Info Bois, 2023)

5.2.2 CARACTÉRISATION MÉCANIQUE

Comme l'objectif est de concevoir en réduisant les étapes de transformations du bois, le travail se fait avec un bois ni équarri, ni scié, un bois rond avec ses défauts et ses qualités.

Seulement, la mise en œuvre d'un bois rond, comme tout autre élément structurel, est régie par la connaissance de ses capacités structurelles qui détermineront sa classe afin d'optimiser son rôle dans l'édifice (FCBA, 2015). Afin de permettre une plus grande utilisation du bois rond dans le domaine de la construction il est nécessaire de pouvoir évaluer ses propriétés mécaniques.

Plusieurs méthodes sont possibles pour caractériser les grumes, elles peuvent être semi-destructives ou non destructives.

PAR ULTRASON

Une méthode de caractérisation par ultra son a été développée sur quatorze échantillons dimensionnés et déjà classés selon la norme EN 408:2012 (Structures en bois - Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques). Le test consiste à mesurer, grâce à l'appareil Sylvatest Trio, le temps nécessaire au passage de l'onde ultrasonore, entre les têtes émettrices et réceptrices, en comparant avec les résultats d'un second appareil, le Fakopp Microsecond Timer, qui permet de mesurer le temps de propagation des ondes entre les deux têtes de l'appareil. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux d'une stimulation en flexion. Dans le cadre de cette étude qui a testé des échantillons de bois lamé-collé, avec, par conséquent des propriétés très contrôlées, les résultats étaient fiables. (Nowak T., 2015).

Justin Goosse a une expérience à ce sujet qu'il m'a partagé lors d'un entretien. Il a procédé à des essais à choc longitudinal, autrement dit à la mesure des vibrations émises suite à une impulsion mécanique. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux des essais par contrainte. Il s'avère que la caractérisation par choc longitudinal est une méthode peu répétable et peu fiable selon son expérience. Les résultats obtenus avaient une précision de 10%. Ce manque de précision peut s'expliquer par un nombre élevé de défauts internes, la fluctuation de l'humidité qui impact la propagation de l'onde ou bien l'endroit où le choc est émis. Pour anticiper la fissuration du bois lors de son séchage il est possible de faire une fente entre 30% et 50% de son diamètre. Lors des essais, selon le côté de la fente où l'impact était donné les résultats variaient. (Goosse, 2025)

La caractérisation mécanique par ultra son a pour avantage de ne pas altérer le matériau, la mesure est rapide, le résultat immédiat. Grâce à un équipement mobile c'est une méthode qui pourrait être déployée pour l'évaluation des propriétés mécaniques des grumes sur pied. (Gilliard, 2024) Offrant ainsi une pré-évaluation du potentiel structurel de la pièce en forêt.

PAR CONTRAINTE

Une seconde méthode, présentée dans l'article : « Recherche d'un protocole expérimental non destructif de caractérisation mécanique des grumes » consiste à l'application de contraintes sur une grume en deux séries de cinq cycles à l'ELS¹⁵ interrompues par un

¹⁵L'ELS ou État Limite de Service correspond à la condition de calcul vérifiant le bon fonctionnement de la structure en usage courant, sans déformation excessive ni gêne pour les usagers. Dans cette étude l'ELS a été établi à 60 % de la contrainte de rupture en flexion.

chargement à l'ELU¹⁶. Cela permet d'obtenir les propriétés mécaniques de la grume à la première série puis de pouvoir les comparer avec les résultats de la seconde vérifiant ainsi l'impact du chargement à l'ELU. Comme il y a une stimulation mécanique il y a un risque d'endommager le bois. Trois éléments notables permettent d'identifier une dégradation de la grume. Une rupture sur le graphique force-déplacement lors du cycle ELU, une mauvaise stabilisation du module de Young¹⁷ durant la sollicitation forte ou l'apparition de fissures. (Dehaen & Ponthiere, 2022)

Ces observations au cours de l'essai permettent de l'interrompre si nécessaire et ainsi conserver la grume pour un usage autre. En conclusion de ce travail, les auteurs mettent en évidence une réglementation inadaptée pour le bois rond, ils précisent aussi que cette méthode permet une indication sur la qualité de la grume et non un classement (Dehaen & Ponthiere, 2022).

5.2.3 CARACTÉRISER EN DEUX TEMPS

Suite à l'échange avec Justin Goosse et les résultats obtenus par les tests par ultrason, la proposition de caractérisation des grumes se déroule en deux phases. La première est la caractérisation des arbres sur pied afin d'avoir une première idée des caractéristiques mécaniques et les inclure dans les données compilées dans le catalogue. Ensuite, après usinage, une caractérisation mécanique aurait lieu afin d'obtenir un résultat précis après transformation.

L'intérêt de procéder en deux temps est de faire une première sélection dans la ressource, savoir si elle est potentiellement exploitable comme bois d'œuvre, ou non. Le second test permet de s'assurer de la résistance mécanique de la pièce et ainsi de rassurer les différents partis.

5.3 CATALOGUER

Le catalogue permet la corrélation entre une gestion forestière durable et la production d'éléments finis. Cependant pour parvenir à ce résultat il faudrait compiler les données morphologiques, hyperspectrales et la caractérisation sur pied par ultra-son de chaque arbre. La création d'une telle base de données n'a pas encore été réalisée à ma connaissance.

¹⁶L' ELU ou État Limite Ultime correspond à la condition de calcul en ingénierie structurelle correspondant à la charge maximale qu'une structure peut supporter sans rupture.

¹⁷Le module de Young, noté « E » est la grandeur physique exprimant la rigidité d'un matériau, définie comme le rapport entre contrainte et déformation dans le domaine élastique ($E = \sigma/\epsilon$). Plus E est élevé, plus le matériau est rigide.

5.3.1 UN OUTIL POUR LA GESTION FORESTIÈRE

Le premier intérêt est celui d'offrir une aide à la décision sylvicole grâce à une donnée précise sur l'ensemble de la forêt. Pour chaque arbre, il serait possible de connaître son diamètre, sa taille, sa courbure, ses ramifications, son essence et son influence sur son voisinage. De plus, par comparaison dans le temps, on pourrait quantifier sa croissance et observer l'apparition de déformation ou de maladies. Ces données individuelles servent aussi à l'analyse générale, l'évolution de l'âge ou de la repartirions des essences.

La gestion pourrait alors s'affiner, favorisant des coupes sélectives, progressives et un emploi de la biomasse anticipé.

5.3.2 TRAITEMENT DES DONNÉES NUMÉRIQUES

Une fois le scan réalisé, il doit être nettoyé afin de conserver uniquement les parties qui nous intéressent. Ce nettoyage peut se faire par l'exclusion de points selon le nombre de voisins qu'il a dans un certain rayon, selon une coordonné x, y ou z (exclusion du sol par exemple) ou même en fonction de la direction d'une normale calculée. Les éléments restants peuvent, eux aussi, être simplifiés, afin d'alléger le nuage de points, réduire la capacité de stockage nécessaire et de faciliter la manipulation. (Gilliard, 2024)

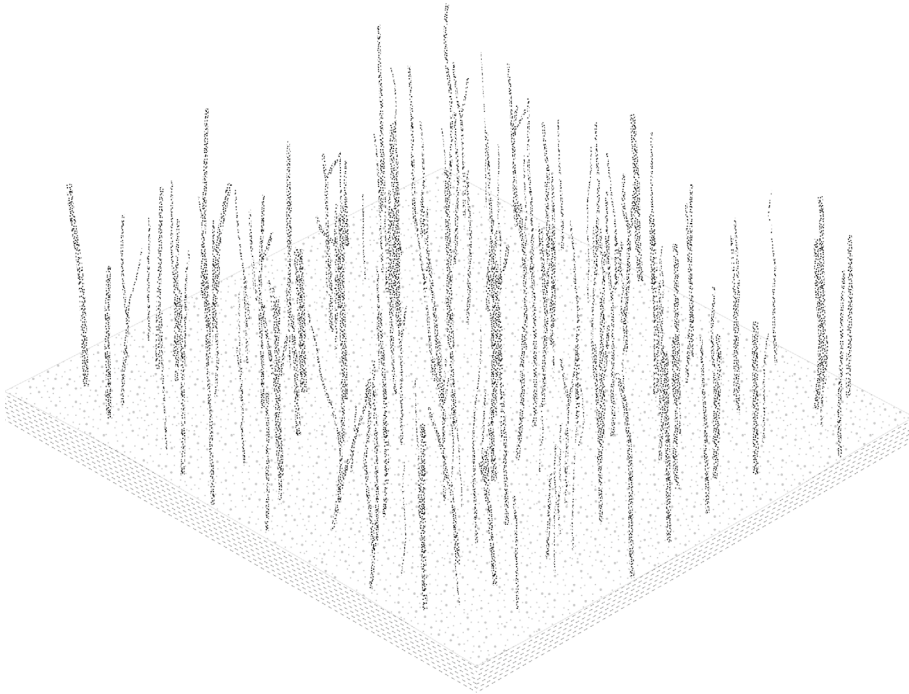


Fig.14- Illustration du résultat du nuage de points après traitement complet

Dans l'article « Design method for roundwood construction using database of trees » Il est expliqué qu'une fois le nettoyage préliminaire effectué le nuage de points a été voxélisé¹⁸ puis segmenté à l'aide de TreeIso (Xi & al, 2022) avant de procéder à un dernier nettoyage manuel des défauts résiduels. Ainsi chaque arbre peut être manipulé individuellement. (Gilliard & al, 2025)

L'axe neutre de chaque élément doit être généré afin de pouvoir, ensuite, positionner la pièce sur la structure filaire. Pour simplifier la forme, des cercles sont générés à intervalles réguliers le long de cet axe. Le rayon est déterminé par la population de points environnantes. (Gilliard & al, 2025)

Ainsi une base de données a été dressée cataloguant pour chaque arbre : nuage de points, géolocalisation dans la forêt, diamètre moyen, hauteur du nuage de points, représentation de l'axe neutre. (Gilliard & al, 2025)

WOOD CHIP BARN



Fig.15- Vue proche de dessous, Wood Chip Barn, AA School Design + Make

Wood chip barn est une structure en treillis construite en 2017 afin de stocker des copeaux de bois pour, ensuite, alimenter la chaudière biomasse du site.

¹⁸processus qui consiste à transformer un nuage de points en une grille régulière de petits cubes appelés voxels.

Ce projet avait pour objectif d'exploiter la capacité de résistance aux moments des fourches d'arbre en exploitant les propriétés anisotropes du matériau. Et donc, de travailler avec une mise en œuvre brut des fourches.

Ici un premier relevé photographique a été réalisé, compilant 204 hêtres sur pied. Cette première base de données a permis une sélection visuelle de 40 fourches pour l'abattage.

Ensuite ces fourches ont été modélisées en trois dimensions grâce à la photogrammétrie, pour ensuite être positionnée sur le modèle filaire. Vingt-cinq ont été retenues et mises en œuvre. (Sheil & al, 2017)

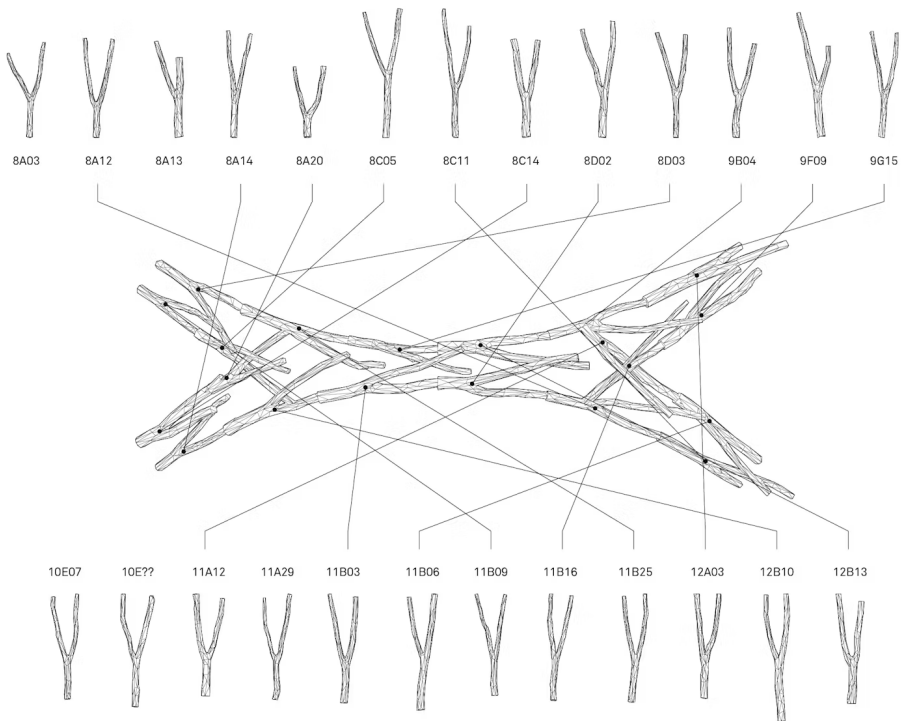


Fig.16- Emplacement des fourches sélectionnées dans la structure de Wood Chip Barn, AA School Design + Make

Le bâtiment se présente comme une démonstration et une validation du processus proposé. Cependant on observe une dissociation entre la gestion forestière et de l'exploitation du bois, ainsi qu'une faible automatisation dans la sélection et le positionnement des pièces.

5.3.3 BIOMASS BOILER HOUSE



Fig.17- Vue extérieure de la Biomaas Boiler House AA School Design + Make

Construit en 2015, le bâtiment abrite la chaudière biomasse du campus de Hooke Park. L'objectif était de travailler avec le cintrage naturel de certains arbres, en l'occurrence des douglas. Une pré-sélection visuelle a été effectuée pour cibler les pièces avec une courbures prononcée. Une fois repérées, les cibles ont été scannées sur pied puis un catalogue numérique a été dressé. (AA school, 2015)

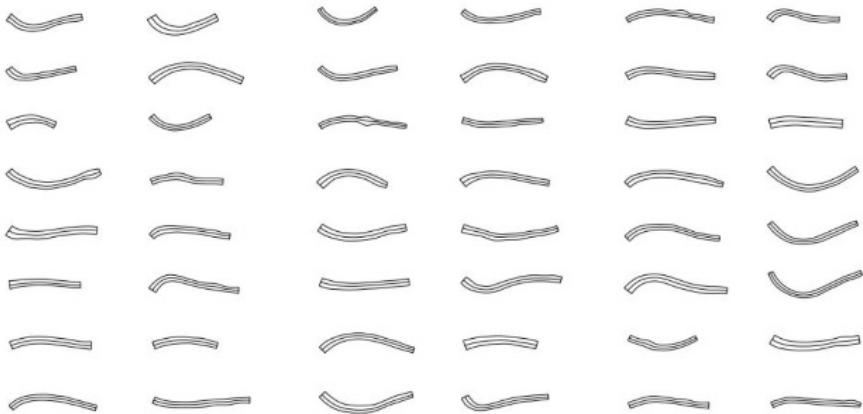


Fig.18- Fragment du catalogue dressé pour la construction de la Biomaas Boiler House AA School Design + Make

La courbure du bâtiment a été dessinée pour correspondre approximativement à la morphologie des pièces disponibles. Pour le positionnement des pièces une approche itérative a été mise en place. Deux critères étaient ciblés, la réduction de l'écart entre l'axe

théorique et l'axe réel ainsi que l'alignement des tangentes aux extrémités afin d'obtenir une continuité à l'aboutage¹⁹.

5.4 CONCEPTION NUMÉRIQUE

La conception architecturale implique l'agencement d'éléments les uns par rapport aux autres, généralement à partir de composants standardisés aux géométries planes et régulières. Cette régularité facilite leur articulation spatiale et la définition de l'enveloppe bâtie. Dans le cadre de ce travail, chaque pièce présente une morphologie unique. Suite aux entretiens et à la recherche de documentation que j'ai fait, j'en conclus qu'il n'existe pas de documentation détaillant une méthode de conception numérique spécifique à l'architecture en bois rond.

La partie relative à la conception architecturale sera développée par mes soins sous la forme d'un retour d'expérience²⁰. Celle-ci articulera plusieurs recherches qui seront énoncées lorsque mobilisées.

5.4.1 CONCEVOIR AVEC DES CYLINDRES

Durant une phase de conception plus standard l'architecte vient articuler les éléments en ayant une morphologie prédéfinie de ceux-ci. Cela permet une visualisation en temps réel des nœuds constructifs et facilite donc la résolution des détails techniques. Les pièces du catalogue sont coniques et morphologiquement indéfinies à cette étape-ci. Dans plusieurs travaux comme (Vestartas, 2021) ou (Geno & al, 2022), on peut observer une représentation simplifiée des éléments aux étapes intermédiaires. Ces travaux portent sur l'échelle micro, c'est à dire sur un fragment, un prototype ou un assemblage. Je propose alors de reproduire cette approche à l'échelle macro, la structure dans son entièreté, et donc de faire abstraction de l'irrégularité des pièces en employant des cylindres dans le modèle 3d. L'abstraction est toutefois uniquement visuelle et non conceptuelle. Cela offre un gain de temps considérable reportant le positionnement du bois rond à une étape ultérieure. (Le positionnement est expliqué dans le paragraphe « employer le catalogue : un procédé itératif »)

5.4.2 DÉTERMINER UNE SECTION

L'emploi de formes simplifiées permet de déterminer les sections comme à l'habitude d'un architecte en prédimensionnant la structure. Nous savons alors que telle pièce reprend telle charge et doit donc avoir une retombée²¹ de x . Dans notre cas la retombée x est un minimum, c'est à l'architecte de déterminer l'écart qu'il tolère par rapport à ce

¹⁹ L'aboutage consiste à joindre deux pièces de bois bout à bout dans le sens longitudinal.

²⁰ Expérience constituée de la conception paramétrique d'une toiture doublement arquée durant mon stage master en été 2024 ainsi que de la conception du projet en lien avec cet écrit.

²¹ La retombée d'une poutre correspond à sa dimension verticale, qui détermine son inertie et donc sa capacité à reprendre les charges appliquées verticalement.

critère de retombée Dans l'exemple ci-dessous j'ai dimensionné les solives du plancher, avec une retombée de 26cm. C'est à dire que j'impose verticalement un minimum de 26cm de bois depuis un plan horizontal défini tout en tolérant de façon arbitraire un maximum de 32cm. Ce plan horizontal régulier pourrait être imposé pour permettre la pose d'un parquet par exemple. Il constitue donc la limite haute de la matière, c'est à dire un plan de coupe. Sur l'espace de travail le cylindre prendra le diamètre minimum, 26cm.

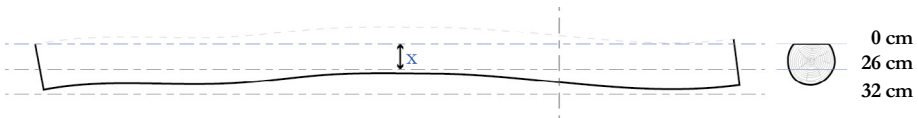


Fig.19- Illustration de la définition du minimum et du maximum admis

La tolérance admise sur la section des pièces soulève une question : pourquoi accepter plus de matière que structurellement nécessaire ? Plusieurs raisons justifient cette approche. D'abord, les troncs et les branches sont naturellement coniques : il est donc impossible de trouver, dans un catalogue forestier, une pièce de plusieurs mètres avec une retombée constante de 26 cm. Ensuite, les éléments disponibles peuvent présenter une courbure naturelle. Pour tolérer les spécificités morphologiques, il est nécessaire d'admettre une marge géométrique : plus la tolérance est importante, plus le système accepte de courbures variées. En offrant une conception plus souple, on augmente les correspondances potentielles dans le catalogue. Enfin, les pièces utilisées proviennent de bois d'industrie, réorientées vers un usage structurel par une revalorisation intermédiaire dans leur cycle de vie. Sans cette intervention, elles auraient été transformées en panneaux ou utilisées pour la bioénergie. En cas de démolition, ces filières restent accessibles. Il n'y a donc ni gaspillage ni excès, mais au contraire un prolongement optimisé de la valeur du matériau.

5.4.3 FIXER DES PLANS DE COUPES INVARIANTS

Concevoir avec du bois rond c'est concevoir avec un part d'inconnu. Lorsque l'architecte conçoit avec un bois équarri il travaille avec des faces qui sont des plans connus. En alignant plusieurs pièces équarries on obtient un plan plus grand. C'est selon le plan créé par l'alignement des faces supérieures des solives qu'un plancher va être posé ou selon le plan d'alignement des faces extérieures des poteaux que les châssis vont être posés.

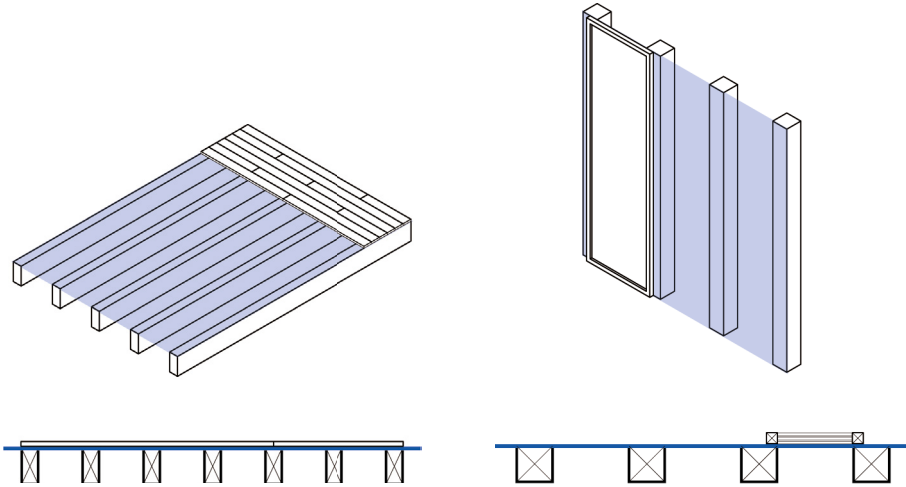


Fig.20- Illustration du principe de plan de construction sur du bois équarri

Ce principe est prépondérant en construction. A la différence de l'équarrissage qui aplanit quatre faces, il est possible de reproduire ce schéma de réflexion en créant une face plane sur notre bois rond.

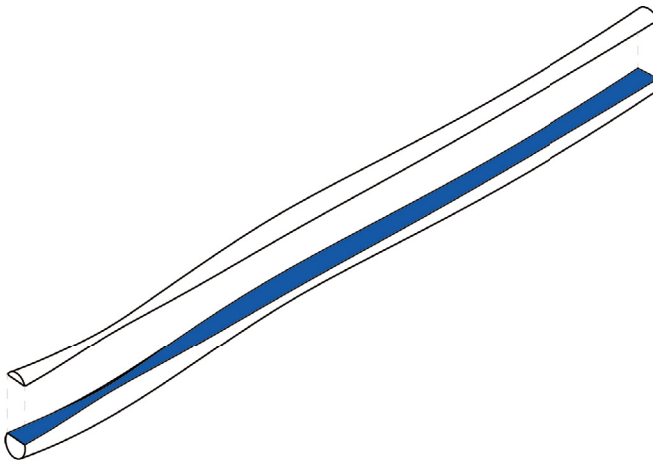


Fig.21- Création d'une face plane sur une grume

Ainsi, avec des pièces irrégulières il est possible de travailler avec des plans de références fixes et donc de reproduire une façon de travailler connue.

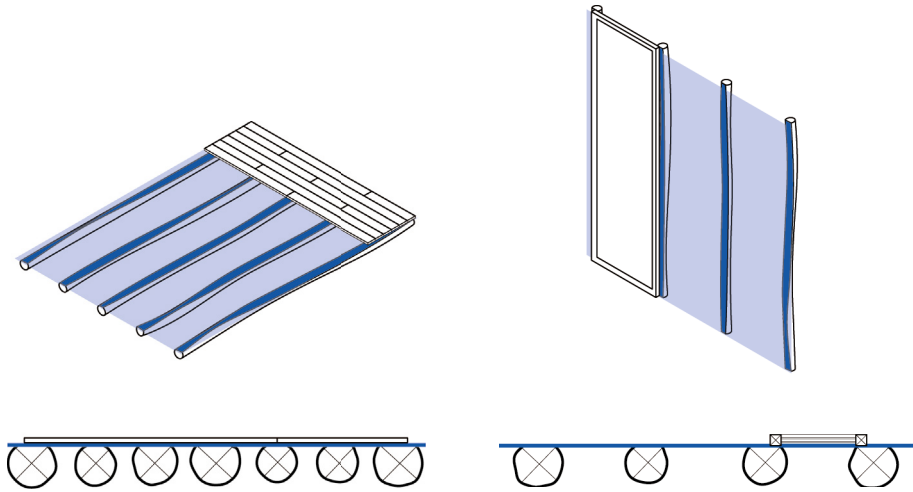


Fig.22- Illustration du principe de plan de construction sur du bois rond

La conception repose alors sur la définition cohérente de l'ensemble des plans de coupe nécessaires à la mise en œuvre du bâtiment. Dans la mesure du possible, il est souhaitable de limiter le nombre de ces plans, car ils allongent le temps d'usinage, interrompent la continuité fibreuse du bois et entraînent une perte de matière, réduisant ainsi les performances mécaniques intrinsèques. Le choix de plans invariants est guidé par plusieurs facteurs. Le premier est le degré de standardisation du projet : la dimension économique fait pleinement partie de la réflexion architecturale. Un châssis sur mesure engendre des coûts bien supérieurs à ceux d'un châssis standardisé. Définir un plan commun peut ainsi permettre de réduire les coûts, en offrant une plus grande flexibilité dans le choix des matériaux, en optimisant le temps de pose, ou encore en facilitant le levage grâce à une meilleure précision dans le positionnement de la structure. Le second est la volonté d'obtenir une surface plane, un choix architectural, une demande du maître d'ouvrage ou autre.

Dans le cadre du projet lié à cet écrit plusieurs plans ont été fixés. Le premier est celui permettant la pose des châssis sur la face extérieure des poteaux, protégeant ainsi le hêtre, sensible aux intempéries. Ce choix a été motivé par la volonté de travailler en contact du matériau et non de s'en détacher comme le proposerait une façade rideau vitrée. De cette façon l'emploi de matériaux non-locaux était réduit. D'autres plans invariants ont été créés pour permettre la pose des blocs de plancher en terre préfabriqués.

Les plans invariants permettent d'apporter des éléments connus dans l'emploi d'un matériau morphologiquement non connu. L'idée est alors de travailler avec des volumes

capables théoriques, les cylindres, qui permettront de placer les arbres scannés grâce à la correspondance de leurs axes. Ceux-là pourront ensuite être usinés selon des plans de coupes qui sont prédéfinis. La morphologie de la pièce employée devient moins contraignante, il ne reste plus qu'à s'assurer que sa section est comprise dans le domaine choisis en relation avec les contraintes structurelles ou spatiales et que la surface d'intersection entre le plan et le volume de la pièce placée répond aux besoins pour lesquels il a été créé. Un support pour un châssis, un appui, une fixation ou autre.

5.4.4 OBTENIR LA GÉOMÉTRIE FILAIRE

Une fois le catalogue dressé il est nécessaire de faire le lien entre des pièces singulières et la réalisation de l'ouvrage. L'objectif est d'obtenir l'axe de chaque élément préalablement placé selon une géométrie simplifiée pour procéder au placement des pièces du catalogue, étape expliquée dans le paragraphe « Employer le catalogue : un procédé itératif »

Pour ce faire on peut employer un script grasshopper afin de retracer les axes des cylindres. Celui-ci reprend le centre des deux extrémités d'un cylindre afin de retracer son axe et associer à cette donnée le diamètre de la géométrie simplifiée. Ces deux données serviront de critères de sélection des grumes.

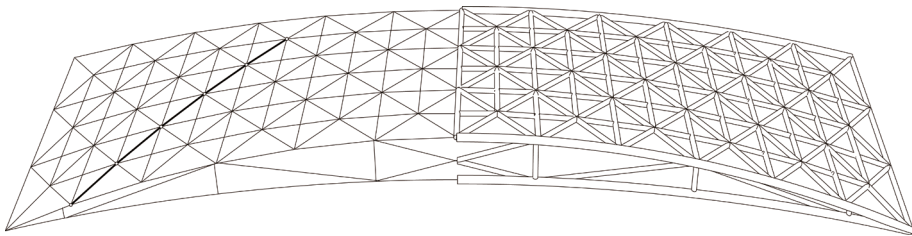


Fig.23- Conception filaire d'un shed : illustration des critères de sélection d'une pièce

5.4.5 EXPLOITER LA CAPACITÉ DE CALCUL INFORMATIQUE

Les géométries étant complexes, l'intégration du numérique à la phase de conception devient alors nécessaire. Suite à une conception adaptée, l'outil permet l'optimisation des éléments dans une structure. À travers « optimisation », on entend le positionnement de chaque élément en fonction de sa morphologie et en particulier de son axe neutre. La bonne gestion de l'axe neutre est essentielle pour garantir des assemblages robustes et une structure fiable. (Gilliard, 2024) La capacité de calcul informatique permet de traiter un plus grand nombre de possibilités, incluant ainsi le tronc, la fourche, la branche ou même la cime de l'arbre. Les catalogues peuvent être hétéroclites, contenant des pièces non régulières, courbes ou même courtes. Des travaux ont déjà été réalisés, comme la thèse de Petras Vestartas visant l'automatisation des jonctions bois-bois. Avec le développement

de systèmes constructifs incluant le bois rond, une fourche d'arbre pourrait obtenir la classification de bois d'œuvre.

5.4.6 EMPLOYER LE CATALOGUE : UN PROCÉDÉ ITÉRATIF

Une fois le modèle filaire réalisé il est nécessaire de positionner les pièces sur celui-ci. L'enjeu est de disposer les éléments dans la structure avec une précision permettant la juste réalisation des assemblages.

Afin d'avoir un paramètre de vérification quant à la faisabilité de l'assemblage entre deux troncs, (Geno & al, 2022) propose, dans leur article « Parametric design and robotic fabrication of whole timber reciprocal structures, de comparer deux facteurs ». Le facteur « O », qui correspond à la distance minimale entre les axes centroïdaux théoriques des deux troncs au point de connexions dans la phase filaire de la conception. C'est la distance idéale lorsque que les axes neutres sont droits. Le facteur O est déterminé par la formule suivante $O = (\text{Diamètre tronc 1} + \text{Diamètre tronc 2}) / 4$. Le facteur « E » reprend le même principe mais cette fois avec les axes réels des pièces employées. E prend donc en compte la courbure effective des troncs. Ensuite pour chaque nœud la différence est faite entre O et E. Si celle-ci est trop importante alors la connexion n'est pas validée. Il est alors nécessaire de disposer la pièce autrement, essayer une autre pièce ou adapter la conception filaire (O). (Geno & al, 2022)

Actuellement, le positionnement automatisé des éléments du catalogue dans le modèle filaire n'est pas développé. Damien Gilliard travaille sur le développement d'une méthode itérative. C'est l'objet de l'article « Design method for roundwood construction using database of trees » pour l'ICS 2025. L'objectif visé est de permettre la connexion, négligeant, dans cette phase, l'excentricité potentielle des éléments. Premièrement, depuis le modèle filaire, pour chaque élément, le nombre de connexions va être déterminé afin de donner un niveau de priorité aux pièces. Plus le nombre d'assemblages prévus pour un élément sera élevé, plus les chances de trouver une pièce adéquate seront faibles. Ensuite un échantillon d'arbres candidats va être créé, la sélection se fait selon deux critères, le diamètre, incluant une tolérance et la longueur. Une fois les nœuds déterminés et les candidats sélectionnés, vient le positionnement. Contrairement à des pièces équarries, le bois rond n'a pas d'orientation prédéfinie, un processus itératif de positionnement est alors déployé afin de réduire la différence entre O et E jusqu'à un résultat voulu. L'arbre reçoit un score de précision. Celui avec le meilleur résultat est alors sélectionné et définitivement placé dans la structure. Dans ce travail, a été mis en avant deux facteurs majeurs influençant la précision du positionnement. Le premier est l'angle entre deux éléments, s'il est trop faible l'imprécision augmente. Et le second est la rectitude de la pièce, en cas de courbures prononcées l'erreur d'ajustement peut passer de 1 cm pour une pièce droite à 10 cm. (Gilliard & al, 2025)

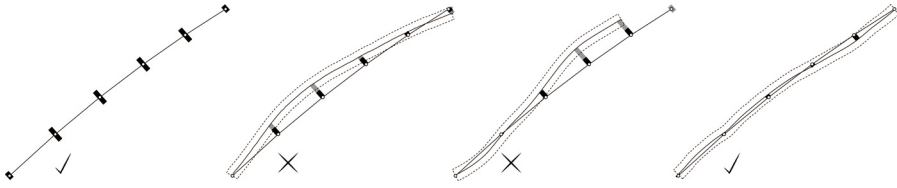


Fig.24- Illustration du procédé de sélection de pièces du catalogue

5.4.7 TROUVER LE BON ASSEMBLAGE

L'assemblage assure la transmission des efforts d'un élément à l'autre, garantissant la continuité du comportement structurel et la stabilité de l'ensemble. Il permet de répartir les charges mécaniques entre les pièces tout en résistant aux sollicitations exercées sur l'ouvrage. Dans le cas du bois rond, il doit également composer avec la variabilité morphologique de chaque élément, en assurant un contact suffisant et une répartition adaptée des efforts.

Maxim Andrist a travaillé durant dans son travail de fin d'études sur l'assemblage traditionnel japonais Ari-Kake en construction bois. Il expose que l'adaptation au bois rond est possible mais rendue difficile par la variabilité des sections ce qui impacte la régularité de l'assemblage et l'alignement des pièces verticales avec les éléments horizontaux. Pour pallier à cela il explique qu'il faut une présélection précise de la ressource puis une régulation de la section latérale mais aussi le fraisage d'une surface plane pour l'accueil de la paroi. Il conclue que l'Ari-Kake conditionne fortement le choix des troncs employés et inévitablement la morphologie de la structure et donc, dans le cas d'une paroi, qu'une structure composite bois rond/panneaux est plus adaptée, faisant le lien de compatibilité avec le prototype de structure réciproque de Petras Vestartas, End-Side Joints. (Andrist, 2021)

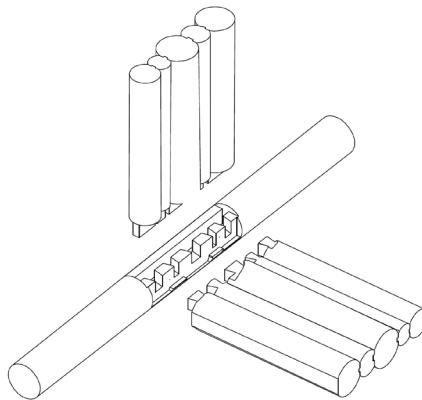


Fig.25- Essai d'adaptation de l'assemblage Ari-Kake au bois rond par Maxim Andrist

L'enjeu du choix d'assemblage est alors de combiner transmission des efforts, liberté morphologique et compatibilité à l'usinage robotique, notion qui sera abordée plus tard dans l'écrit.

JOINERY SOLVER

Petras Vestartas a développé un algorithme qui traite la conception et la fabrication des raccords bois-bois. Le programme procède suivant les étapes suivantes : détection des éléments à assembler, recherche de la zone de connexion, création de l'assemblage, visualisation 3D et enfin génération du tracé de l'outil de taille. Quatre typologies de jonctions sont traitées, l'assemblage abouté, l'assemblage co-latéral, l'assemblage en angle et l'assemblage croisé. (Vestartas, 2021).

ASSEMBLAGE ABOUTÉ (END-END JOINT)

L'assemblage abouté est employé lorsque deux éléments sont disposés dans la continuité l'un de l'autre, selon un axe longitudinal commun. L'aboutage permet de réassembler des pièces courtes, dans une même direction afin d'obtenir un élément plus long tout en assurant la continuité mécanique. Ce type d'assemblage est performant en compression mais très peu en traction, il est tout de même possible d'ajouter une clé ou une cheville pour compléter l'assemblage. Dans le cas du bois rond, ce principe est compliqué par la conicité naturelle des troncs, la variabilité de leur diamètre ainsi que par les irrégularités de la surface. Le Joinery Solver, répond à cette complexité par une stratégie de génération d'interfaces adaptatives, calculées à partir des axes centraux extraits de la géométrie scannée. L'algorithme produit une surface d'assemblage qui tient compte de la section réelle de l'extrémité des deux éléments, et propose un emboîtement compatible avec les tolérances d'usinage. (Vestartas, 2021)

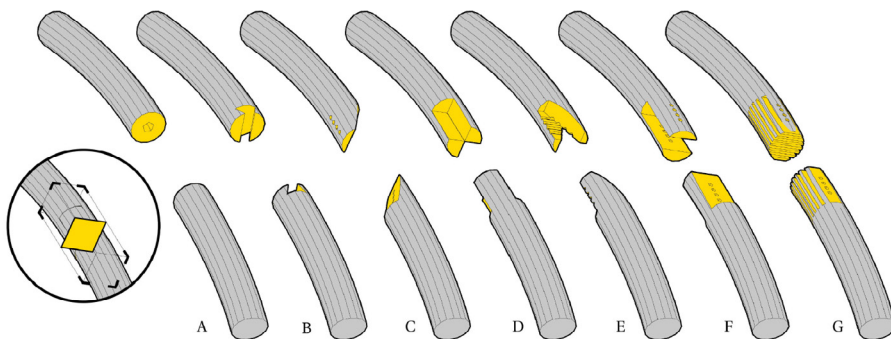


Fig.26- a) coupe à onglet b) clé papillon c) coupes à sifflets désaboutées d) coupe à sifflet double e) coupe à sifflet double crantées f) enfourchement g) entures multiples

ASSEMBLAGE CO-LATÉRAL (SIDE-SIDE JOINT)

Les assemblages co-latéraux sont employés lorsque deux pièces sont disposées parallèlement l'une à l'autre et qu'on souhaite les joindre par leurs flancs. Ce type d'assemblage peut être déployé pour la réalisation de plans pleins mono matériaux (ex : mur ou plancher) ou des voiles (ex : toiture complexe). Leur rôle principal est de transférer les charges latérales et d'assurer la cohésion géométrique dans des assemblages non alignés. Ce sont des assemblages qui nécessitent une grande précision, autant à la conception qu'à la réalisation. Le Joinery Solver relève les surfaces de contact optimales en calculant la normale moyenne dans la zone d'intersection des deux éléments parallèles. À partir de ces données, le système propose un surfaçage, un rainurage ou un chevillage oblique, tout en respectant les contraintes d'outillage. (Vestartas, 2021)

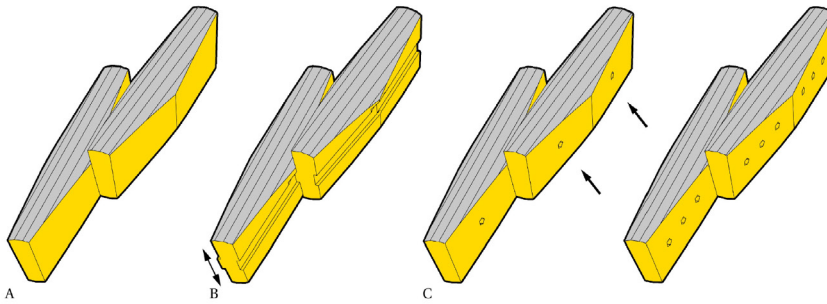


Fig.27- a) surfaçage b) rainurage c) chevillage oblique

ASSEMBLAGE EN ANGLE (SIDE-END JOINT)

L'assemblage en angle (side-top joints) sont utilisés lorsque deux pièces de bois se rencontrent selon une configuration non coaxiale, typiquement à l'intersection entre la face latérale d'une pièce verticale (comme un poteau) et la face inférieure ou supérieure d'un élément horizontal (comme une poutre). L'assemblage de ce type le plus fréquent est le tenon-mortaise, il est employé pour transmettre des efforts verticaux et horizontaux dans des configurations où les axes des éléments à joindre forment un angle.

L'application au bois rond présente une double difficulté : garantir un appui suffisant malgré les courbures et respecter les directions fibreuses pour éviter les ruptures localisées. Le Joinery Solver détecte les points d'intersection entre les axes des deux éléments et calcule les surfaces de contact possibles en tenant compte des rayons locaux et des angles. En s'appuyant sur ces données un assemblage est alors généré ainsi qu'un surfacage plan afin d'assurer une surface de contact mécaniquement viable. L'algorithme ajuste ensuite la géométrie de l'assemblage pour qu'elle soit robotiquement usinable. (Vestartas, 2021)



Fig.28- Test du Joinery Solver sur un assemblage tenon-mortaise en bois rond

ASSEMBLAGE CROISÉ (CROSS JOINTS)

L'assemblage croisé (cross joints) est employé lorsque deux pièces de bois se croise, généralement à proximité de leur centre de gravité. Ce type de jonction est fréquemment employé dans des structures réciproques, en treillis ou autre configuration où plusieurs éléments doivent coexister en un même point sans continuité d'axe. L'utilité principale de ce type d'assemblage réside dans sa capacité à organiser spatialement des éléments structurels qui se croise, tout en assurant leur cohésion et continuité mécanique par un point de jonction unique. La réalisation d'un joint croisé impose de prendre en compte non seulement l'angle d'intersection entre les pièces, mais aussi leurs rayons variables et leurs axes courbes. Le Joinery Solver identifie les points d'intersection entre les axes des pièces, puis génère les surfaces d'assemblage en respectant les contraintes robotiques, tout en assurant un contact suffisant pour la transmission des efforts dans plusieurs directions.

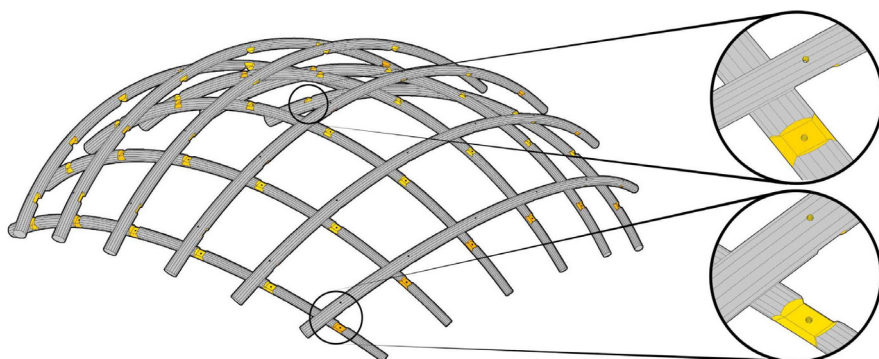


Fig.29- Assemblage à mi-bois adapté au bois rond et à l'usinage robotique

BOIS OU MÉTAL ?

Dans son travail de fin d'études « Recherche d'assemblages colonne-colonne-poutres pour bâtiments multi-étagés en bois rond » Hugo De Coster explore les possibilités d'assemblage bois-bois colonne/poutre. Le cas d'un bâtiment d'un étage est étudié en travaillant le nœud que forme les quatre éléments. Les faibles surfaces de contact ne permettent la transmission des charges que d'un seul étage. Pour pallier à la fragilité de l'élément central et assurer une résistance au feu suffisante une section de 60 cm est nécessaire entraînant une mobilisation trop importante de la matière. De ce constat l'étude est poursuivie à travers l'ajout d'éléments et l'essai de différentes morphologies. L'intégration d'une pièce de support horizontale en feuillus D30 offre une nette augmentation de la capacité de reprise de charge sans dénaturer l'assemblage, poussant ainsi le potentiel de construction de R+1 à R+4 à moindre de coût. Au-delà de la conception d'un bâtiment en R+4, l'auteur nous explique que l'ajout d'une console est

nécessaire complexifiant la jonction des éléments et, qu'à partir de R+6, l'intégration d'éléments en métal ou en béton est nécessaire. (De Coster, 2023)

C'est un travail qui est aujourd'hui poursuivi par une équipe de recherche dont Justin Goosse fait partie. Durant l'échange que nous avons eu ensemble il m'a montré l'avancée de leurs recherches et des essais à ce sujet. L'assemblage étudié était la queue d'aronde.

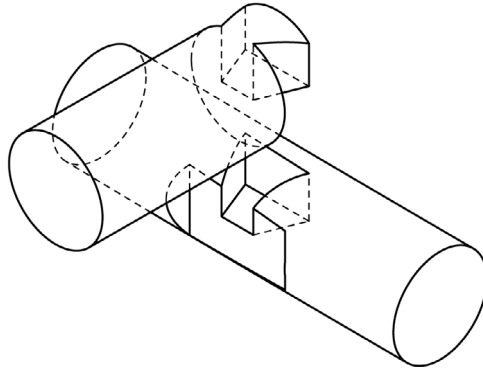


Fig.30- Illustration d'un assemblage en queue d'aronde adapté au bois rond entre deux éléments horizontaux

Plusieurs difficultés ont été rencontrées. Le degré de liberté de l'assemblage, l'emboîtement vertical impose le dégagement de la matière au-dessus de l'assemblage. Lorsque qu'une colonne doit reprendre quatre poutres au même niveau alors la colonne devient entièrement équarrie au-dessus de la jonction. L'assemblage présente, dans ce cas, une perte de matière signifiante, une difficulté à l'usinage et une reprise de l'effort tranchant pas optimale par rapport à la quantité de matière employée. Justin me disait que la recherche visait à résoudre un assemblage bois-bois mais qu'un assemblage métallique serait une solution efficace. (Goosse, 2025)

Je comptais employer la queue d'aronde pour la jonction entre les poutres porteuses et les solives. Après discussion, il s'avère que la queue d'aronde ne permet pas d'employer toute la capacité structurelle de la pièce du fait de son entaille à mi-bois. Un risque de fissuration est présent à la jonction entre la face horizontale et la face verticale de l'assemblage. Pour pallier à cela une vis pourrait être placée de bas en haut afin de maintenir les fibres ensemble et, donc, de mieux reprendre le cisaillement. Une autre solution est d'employer un assemblage métallique. Celui résout les problèmes de reprise de charges, l'usinage est plus rapide car il suffit de faire une coupe franche et de défoncer l'emplacement de la pièce métallique et le métal est potentiellement réutilisable en état dans le cas d'une déconstruction.

Le choix entre un assemblage bois-bois et un assemblage métallique dépend de plusieurs critères, tant structurels que constructifs. Le premier concerne la quantité de matière retirée dans la section utile de la pièce. Un assemblage bois-bois nécessite souvent des entailles profondes ou emboîtements, ce qui peut affaiblir la pièce. Plus cette ablation est importante, plus la résistance résiduelle de la section diminue. Le second critère porte sur les degrés de liberté nécessaires lors de l'assemblage : un assemblage métallique, souvent préfabriqué et boulonné, autorise des tolérances plus larges et peut faciliter la mise en œuvre. Les efforts à reprendre déterminent également ce choix : les assemblages bois-bois bien réalisés sont efficaces pour transmettre des efforts normaux, notamment en compression, grâce au bon contact entre les surfaces. En revanche, pour les efforts tranchants ou combinés, les assemblages métalliques offrent une meilleure performance mécanique. Le coût, la complexité d'usinage ou la démontabilité sont autant d'autres paramètres à considérer dans le choix du type d'assemblage.

5.5 TAILLER

5.5.1 INDUSTRIEL OU MANUEL : RÉFLEXION PAR ANALOGIE AUTOUR DU PRÉFABRIQUÉ BOIS

Le préfabriqué bois en architecture se révèle être un outil essentiel pour répondre aux enjeux techniques, économiques, et écologiques de la construction contemporaine. Je propose d'explorer ses opportunités et limites à travers quatre secteurs distincts : la rénovation du patrimoine, le marché public, le marché privé, et la réhabilitation, secteur vers lequel le marché tend fortement. Chacun de ces contextes révèle des spécificités qui mettent en lumière le potentiel et les défis des procédés industriels ainsi que des approches artisanales.

Dans le domaine de la rénovation du patrimoine, comme en témoigne la restauration emblématique de Notre-Dame de Paris, l'approche artisanale s'impose comme une composante essentielle pour garantir le respect de l'intégrité historique et la préservation de l'authenticité des ouvrages. Des savoir-faire séculaires, comme l'équarrissage manuel ou la forge d'outils, dans ce cas-ci, jouent un rôle crucial dans la restitution fidèle de ces structures. Toutefois, ces méthodes artisanales s'intègrent aujourd'hui à des outils numériques avancés qui améliorent la précision, la gestion, et la planification des chantiers.

Dans les marchés publics, tels que les logements sociaux, la préfabrication industrielle se distingue par son efficacité organisationnelle et économique. La production simultanée des éléments en usine et les travaux sur site permettent de réduire les coûts, de respecter des délais rigoureux, et de minimiser les erreurs grâce à une précision accrue. Toutefois, cette approche standardisée peut freiner l'adaptabilité aux spécificités locales et culturelles. Une intégration de techniques hybrides, combinant la préfabrication avec des interventions artisanales, pourrait combler cette lacune. En s'appuyant sur des outils performants, il est possible d'allier fiabilité et rapidité avec une conception qui reste

ancrée dans les contextes régionaux, offrant ainsi une réponse nuancée aux exigences des appels d'offres publics.

Le marché privé, en revanche, bénéficie d'une plus grande liberté dans les choix technologiques et organisationnels, favorisant ainsi des approches plus flexibles. L'exemple du complexe Ritz-Carlton Nujuma conçu par Foster + Partners illustre comment la préfabrication peut répondre à des ambitions esthétiques élevées tout en respectant des contraintes environnementales. Grâce à des procédés industriels précis et rapides, combinés à des interventions artisanales soignées, ce projet démontre le potentiel compétitif de l'hybridation. Cette collaboration homme-machine offre des solutions sur mesures qui valorisent les identités architecturales locales tout en s'inscrivant dans une démarche durable et innovante.

Enfin, la réhabilitation, secteur vers lequel le marché tend, représente un terrain d'expérimentation idéal pour conjuguer innovation technologique et savoir-faire artisanal. Contrairement à la construction neuve, la réhabilitation impose des contraintes uniques : travailler dans des structures existantes, respecter le patrimoine bâti, et s'adapter à des configurations variées. Les outils numériques et l'automatisation de certaines tâches, offrent une précision indispensable pour optimiser les coûts et les délais, tandis que l'intervention artisanale reste essentielle pour répondre aux imprévus et préserver l'identité des bâtiments.

Ce processus hybride proposé dans ce TFE, à la croisée de l'artisanat et de l'industrialisation, propose un savoir-faire ancré dans son contexte et non-délocalisable. En automatisant les étapes les plus répétitives et exigeantes physiquement, il améliore non seulement la sécurité des travailleurs, mais également leur confort. Cette automatisation libère les artisans des tâches routinières, leur permettant de se consacrer à des interventions à haute valeur ajoutée, telles que les ajustements spécifiques ou les finitions complexes. Ce repositionnement rehausse l'attractivité du métier en valorisant l'expertise humaine.

De plus, ce processus tire parti de la précision et de la rapidité inhérentes aux techniques industrielles, garantissant une exécution optimisée tout en respectant les normes en vigueur. Cette précision facilite également les démarches administratives en fournissant des données fiables et en renforçant la confiance des maîtres d'ouvrage et des ingénieurs, qui voient dans ces approches une sécurité supplémentaire sur le plan technique et normatif. Ce modèle démontre ainsi qu'il est possible de conjuguer innovation et tradition pour répondre aux défis de l'architecture contemporaine.

Toutefois, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne l'emploi du bois rond dans les marchés publics. La caractérisation mécanique du matériau reste complexe et pénalisée par les coefficients normatifs actuels, tels que le coefficient gamma. Comme le propose Yves Weinand, la mise en place de coefficients de sécurité négociés entre ingénieurs

et maîtres d'ouvrage, pourrait dynamiser l'innovation. Cela permettrait une meilleure intégration du bois brut dans les projets publics tout en valorisant des processus hybrides.

En conclusion, le préfabriqué bois, lorsqu'il est conçu avec flexibilité et innovation, devient un levier puissant pour relever les défis de l'architecture contemporaine. Ce travail s'inscrit dans cette réflexion en proposant un processus qui répond aux enjeux techniques, organisationnels, écologiques, et humains. Il contribue à dessiner un avenir où la collaboration entre artisanat et industrialisation peut non seulement préserver, mais aussi enrichir l'identité architecturale tout en répondant aux impératifs économiques et environnementaux de notre époque.

Dans cet écrit nous nous concentrerons sur l'automatisation et la découpe robotique. Cependant, l'enjeu étant la valorisation du bois de la forêt de Soignes, la taille à la main ou à l'aide d'outils électroportatifs seront abordés afin d'en déterminer leur pertinence et leurs champs d'application.

5.5.2 INDUSTRIEL

ALIGNEMENT DU SCAN À LA PIÈCE PHYSIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT DE LA CNC

Pour la bonne exécution des découpes, un premier défi est celui de positionner la pièce dans la CNC²² de façon identique à l'espace virtuel d'où a été généré le code.

Dans l'article « Parametric design and robotic fabrication of whole timber reciprocal structures », il est expliqué qu'un système de coordonnées local est défini pour chaque pièce à partir de son axe et d'un troisième point de référence physique. L'objectif est de créer un plan XY de référence qui permettra au robot de calculer une transformation (rotation + translation) entre le modèle numérique et la pièce physique. Cette étape permet de reprogrammer les trajectoires d'usinage en fonction de la position réelle du tronc, sans exiger un positionnement parfaitement identique d'une pièce à l'autre. L'axe de la pièce est défini par le point central de chaque about, appelé R et S, ils constituent l'axe X de ce plan. Dans l'étude, un cube de calibration de 60mm a été fixé sur chaque tronc au moment du scan, le centre de celui donne le troisième point nécessaire à la création du plan. Durant mon entretien avec Justin Goosse, il m'a partagé que ce cube, nécessaire durant tout le processus, définissait la précision de l'usinage. Cependant, cette pièce physique constitue une contrainte lors des manipulations des troncs, car elle ne doit en aucun cas être déplacée, au risque de compromettre l'alignement entre le tronc scanné et sa position réelle. Maintenant que le plan XY est créé physiquement et numériquement, il doit être communiqué au robot. Pour ce faire, le TCP (Tool Center Point) du robot est alors positionné manuellement sur les points R, S, et le centre du cube. (Geno et al., 2022)

²² Acronyme de Computer Numerical Control, il désigne une machine-outil pilotée par ordinateur, permettant l'usinage de pièces selon des trajectoires définies numériquement.

Cette méthode est chronophage car elle nécessite une intervention humaine pour chaque nouvelle pièce. Il existe une autre approche permettant l'automatisation de l'alignement. Elle consiste en le montage d'un moyen de scanner dans l'environnement d'usinage du robot. La kinect 360, peu coûteuse, est fréquemment employée. C'est une caméra à lumière structurée qui projette un motif connu sur une surface. La modélisation 3d de la surface est calculée en fonction de la déformation du motif. Il est à noter que ce type de caméra est sensible aux variations de lumière. Dans un atelier, sur le temps d'un usinage, cette sensibilité est négligeable. Le lien entre le scan immédiat de la pièce prête à être usiné et son scan d'origine peut se faire via un programme qui calculera et communiquera la transformation (rotation + translation) au robot. (Vestartas, 2021)

L'USINAGE ROBOTIQUE

Une CNC (Computer Numerical Control) est une machine-outil commandée par ordinateur, capable d'exécuter automatiquement des opérations d'usinage telles que le fraisage, le perçage ou la découpe à partir d'un modèle numérique.

Le nombre d'axes dont elle dispose définit ses capacités de mouvement. Une machine à 3 axes agit selon les directions X, Y, et Z. À partir de 4 axes, des rotations s'ajoutent autour de ces axes : A (rotation autour de X), B (autour de Y), et C (autour de Z). Une machine 5 axes permet ainsi d'orienter l'outil dans l'espace et de suivre des géométries complexes.

Le bras robotique prolonge cette logique. Doté de six axes articulés, il offre une liberté de mouvement plus large. Il peut orienter l'outil dans toutes les directions, et intervenir sur des zones difficilement accessibles avec une CNC conventionnelle. L'un de ses avantages majeurs est de pouvoir usiner sous la pièce sans la retourner, étape qui peut être cependant être réalisée avec une CNC en ajoutant un tour sur la table d'usinage. (Gilliard, 2024) L'ajout d'un septième axe, un rail motorisé sur lequel le robot se déplace, étend la portée de la cellule robotique et permet l'usinage de pièces longues.

EXPÉRIENCE PERSONNELLE

Durant mon stage effectué à l'Ibois durant l'été 2024 j'ai pu expérimenter, avec l'aide de Damien Gilliard, l'usinage robotique et les étapes qui le précèdent. Cela a été l'occasion de tester la méthodologie ainsi que les outils proposés dans la thèse de Petras Vestartas. Nous avons d'abord sélectionné un tronc avec une forte irrégularité, que nous avons scanner à l'aide d'un scanner mobile. J'ai ensuite dessiné les assemblages dans l'environnement rhino, l'objectif était d'essayer trois assemblages type à savoir le tenon mortaise, le mi-bois et la coupe franche. Le plug-in grasshopper Raccoon a permis de générer le parcours de l'outil, deux mèches de diamètre différent ont été utilisées afin d'expérimenter le changement d'outil. L'usinage s'est fait grâce à la CNC 5 axes Maka B170, un sixième axe, permettant la rotation du tronc sur lui-même, a été utilisé.



Fig.31- a) modèle 3d issu du scan et visualisation du parcours de l'outil b) fraisage du mi-bois c) résultat de la découpe industrielle

5.5.3 L'ÉLECTROPORTATIF

Dans son travail de fin d'études intitulé « Validation expérimentale d'assemblages de structures réciproques composées de troncs d'arbres », Justin Goose emploie une défonceuse pour réaliser des mi-bois sur des troncs. Le banc de découpe est constitué d'une défonceuse fixé sur un châssis mobile qui repose sur le gabarit. La pièce à usiner est placée dans celui-ci, l'alignement de la pièce physique à son scan est réalisé à l'aide d'un téléphone avec comme repère le QR code. Il explique avoir codé un script sur grasshopper pour déterminer l'emplacement des découpes. Des coordonnées correspondants à la graduation des profils en aluminium latéraux sont alors calculées lui permettant de respecter les plans de coupes. Cette méthode permet de reproduire le travail d'une CNC trois axes avec un faible budget. (Goosse, 2020) Durant notre entretien il m'a expliqué avoir obtenu une bonne précision d'usinage et que dans un premier temps il s'agissait d'une solution efficace pour son travail. Plus tard, au vu de ses résultats, on lui a proposé d'étendre son travail à l'usinage robotique. Par comparaison, certains freins sont à relever. Premièrement le temps d'exécution, deux heures par assemblages, résultant de multiples manipulation et réglages, ce qui impacte également la précision. Ensuite les 3 axes limitent fortement les possibilités. Il m'explique que si la pièce présente une courbure trop importante elle dépasse du gabarit et obstrue les déplacements de la défonceuse. Ensuite l'axe Z avait une liberté de seulement 65mm, ce qui contraind la profondeur des assemblages possibles. Et pour finir, les assemblages doivent suivre le fil de bois, c'est à dire qu'au niveau d'une courbure, le fond d'un assemblage en mi-bois doit être aligné à la tangente de cette courbure. Avec seulement trois axes cet alignement n'est pas possible, rendant alors la méthode limitée à un usage restreint. (Goosse, 2025)

Ces limites soulignent l'enjeu du passage à l'usinage robotique pour le bois rond. Là où une CNC trois axes impose des compromis en termes de profondeur de coupe, d'orientation des assemblages et d'adaptation à la courbure naturelle du bois, un bras robotique à six axes, associé à un septième axe de déplacement, offre une liberté d'action bien plus grande et par conséquent une rapidité d'exécution et une précision accrue.

L'intérêt de l'électroportatif réside dans sa capacité à reproduire les logiques de la fabrication numérique sans recourir à des équipements industriels coûteux. Elle offre un point d'entrée concret dans la manipulation de pièces de bois rond à partir de données scannées. Cette approche pourrait offrir une solution transitoire à des infrastructures souhaitant transformer du bois rond mais n'ayant pas le budget ou la volonté de se digitaliser.

L'évolution naturelle de cette méthode vers l'usinage robotique souligne ainsi l'importance d'un outillage évolutif, capable de s'adapter aux formes réelles du matériau et aux ambitions du projet architectural.

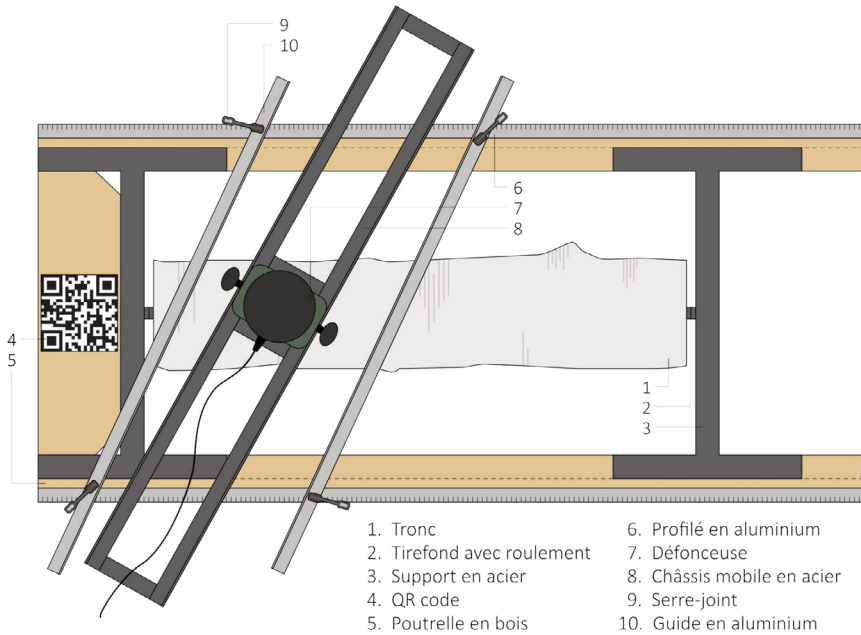


Fig.32- Configuration du banc de découpe réalisé par Justin Goosse

5.5.4 A LA MAIN

Durant mon stage j'ai également pu faire un essai de découpe à la main.. L'objectif était de pouvoir comparer avec l'usinage à la CNC, alors ce sont les trois mêmes assemblages qui ont été testés, sur la même pièce mais différemment positionnés. La première étape était de positionner la pièce selon le plan de référence à l'aide d'un niveau. C'est un plan fictif qu'on appelle en charpente traditionnelle, le ramèneret.



Fig.33- Positionnement de la pièce à tailler selon le plan de référence, Septembre 2024

La seconde étape était de référer un plan vertical qui, en croisant le plan horizontal, forme l'axe de la pièce de bois. On pourrait nommer cet axe RS en référence à la méthode d'alignement du scan pour l'usinage robotique. Le tracé des plans sur la pièce sert de référence pour le reste du tracé. Les côtes sont données depuis Rhinoceros 3D selon ces plans fictifs qui sont les seuls éléments connus, avec les extrémités, sur lesquels se baser. En utilisant un niveau il est alors facile de tracer un plan de coupe parallèle au plan de référence souhaité. En plaçant le niveau d'aplomb on trace parallèlement au plan vertical, ici employé pour le tracé du tenon et en le plaçant de niveau on trace parallèlement au plan horizontal, utilisé pour le tracé du mi-bois.



Fig.34- Tracé du tenon, Septembre 2024

J'ai ensuite effectué les découpes à la scie égoïne et au ciseau à bois. La coupe franche et le tenon étaient correctement positionnés et justement taillés. Cependant le mi-bois, adapté au bois rond, est constitué de neuf plans de coupes, dont beaucoup sont obliques. Le tracé de l'assemblage a été difficile et après taillage, j'ai observé une imprécision importante sur l'angle des plans de coupes obliques. Il n'y a eu qu'un seul essai, ce qui est insuffisant pour généraliser et je n'ai pas l'habitude de travailler des pièces irrégulières. D'autres charpentiers, spécialisés en fuste²³ par exemple, aurait très certainement mieux abordé

²³ Terme désignant une construction en rondins bruts empilés, taillés et assemblés par entailles.

l'assemblage. J'en conclus que l'usinage à la main reste une solution mais nécessite un savoir-faire tout à fait particulier.



Fig.35- Résultat de la découpe manuelle, Septembre 2024

5.5.5 UN PROCESSUS LOURD À DÉPLOYER

Le processus présenté a beaucoup à apporter, et ce, sur l'entièreté de la filière, de la forêt à la pièce mise en oeuvre. L'impact pourrait être environnemental, social, économique et architectural. Cependant il n'est pas déployé pour des raisons multiples

ÉCONOMIQUE

Un premier frein réside dans la barrière économique. Le lancement d'un nouveau procédé s'accompagne d'une part d'incertitude : il est difficile de savoir si la solution proposée trouvera sa place sur le marché, si elle suscitera l'intérêt des architectes, et si les acteurs de la filière bois seront prêts à s'y engager. L'investissement initial, nécessaire à la mise en place des outils, à la formation et à l'adaptation des pratiques, est souvent conséquent, tandis que le retour sur investissement reste incertain. Pour dépasser cet obstacle, la réalisation d'une étude de marché ciblée pourrait permettre de mieux évaluer les besoins, d'identifier les freins spécifiques à chaque maillon de la chaîne, et de constituer un dossier solide pour solliciter des financements publics. Ces soutiens, qu'ils soient régionaux, nationaux ou européens, dans le cadre de programmes liés à la modernisation de la filière bois, pourraient enclencher une dynamique. Avec une impulsion politique en appui, le procédé gagnerait en crédibilité et en attractivité, favorisant ainsi l'adhésion progressive des acteurs concernés.

TECHNIQUE

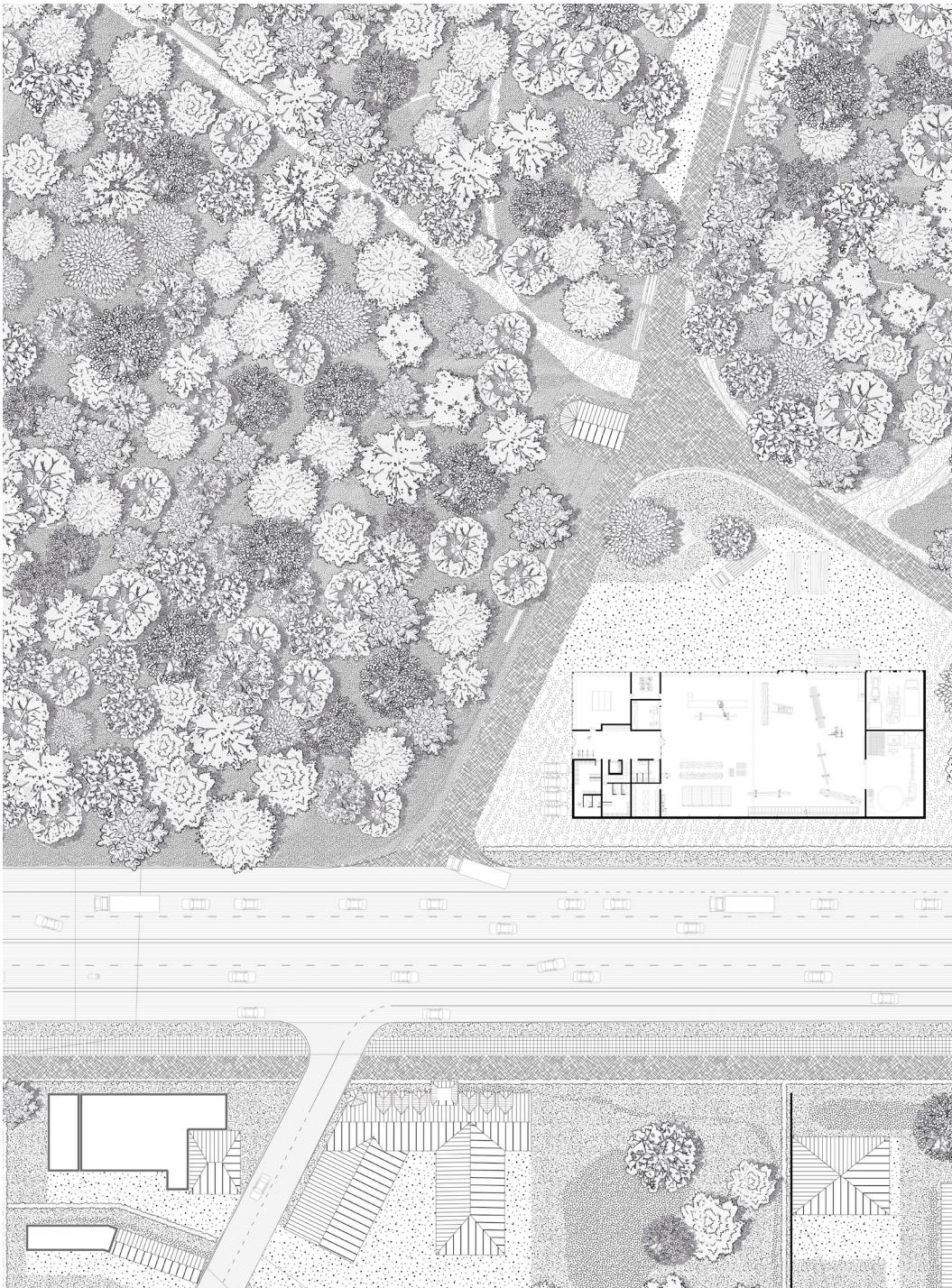
Un second frein identifié est d'ordre technique. Bien que chaque étape du processus soit aujourd'hui documentée et accompagnée de premières solutions, certaines d'entre elles demeurent incomplètes ou encore en cours de développement. C'est notamment

le cas de l'optimisation du placement des éléments dans la structure, ou de la création d'un catalogue capable de centraliser des données multiples telles que la morphologie, l'essence, la pathologie ou encore la position géographique des pièces. Ces étapes, bien qu'engagées, nécessitent encore des ajustements méthodologiques et opérationnels. La résolution technique se construit ainsi par approches successives, en traitant chaque problématique de manière indépendante. L'enjeu, dans un second temps, sera de faire converger ces solutions partielles au sein d'un système intégré, capable de relier relevé forestier, traitement de données, modélisation et fabrication, dans un flux cohérent. C'est dans cette articulation que réside le véritable potentiel du processus, mais aussi sa principale complexité.

LOGISTIQUE

La logistique constitue un enjeu central qui peut devenir un frein si elle n'est pas anticipée. La chaîne de production repose sur une série d'interventions successives qui nécessitent une coordination précise entre acteurs. Qui est responsable du relevé en forêt ? Qui post-traite les données du relevé ? Qui gère le catalogue numérique ? Comment ces informations sont-elles transmises aux concepteurs, ingénieurs et fabricants ? Et surtout, comment le catalogue est-il consulté et exploité au sein du processus de conception ? Ces questions exposent à la fois le défi logistique et son potentiel socio-économique. En effet, la définition des rôles pourrait favoriser l'émergence de nouveaux postes au sein des entreprises : opérateur de scan forestier, responsable de base de données sylvicoles, technicien en traitement de nuage de points, etc. Cela ouvre des perspectives encourageantes, en créant un lien dynamique entre la forêt et l'atelier, on favorise une économie circulaire ancrée localement, dans laquelle chaque acteur, du forestier au charpentier, est impliqué dans une chaîne de valeur partagée.

6 PROJET : ENTRE GESTION ET VALORISATION



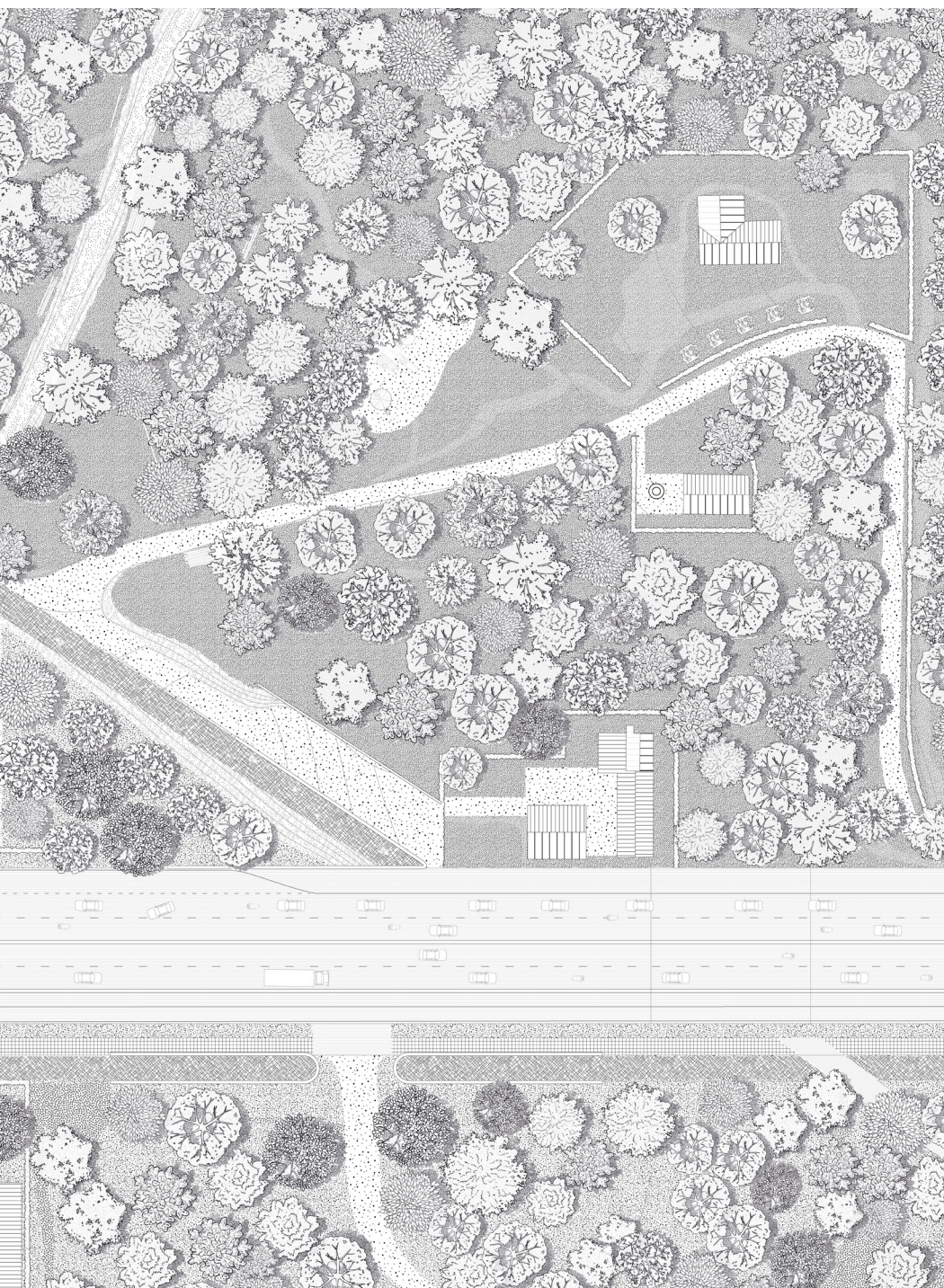


Fig.36- Plan d'implantation du projet d'architecture





Fig.37- Coupe longitudinale du projet d'architecture

6.1 OBJECTIF

L'objectif du projet est de proposer un outil capable d'encourager et d'initier la mise en place du processus décrit en Forêt de Soignes. Il s'agit de mettre à disposition le matériel et l'infrastructure nécessaires à une gestion forestière adaptée, visant à transformer le bois d'industrie, souvent délaissé, en bois d'œuvre à forte valeur ajoutée. Le projet entend également donner de la visibilité à cette pratique, renforcer le lien entre la forêt et le secteur de la construction, tout en formant les personnes aux nouveaux métiers qu'elle implique. Il s'inscrit ainsi dans une dynamique de développement territorial, en soutenant l'émergence d'une filière locale, durable et innovante, fondée sur l'articulation entre ressource forestière, outils numériques, savoir-faire artisanaux et production architecturale. L'ambition est d'esquisser les fondations d'un modèle reproductible et adaptable à d'autres contextes forestiers similaires.

6.2 PROGRAMME

Ce projet propose d'accueillir la brigade 2, chargée de la gestion de la partie Est de la forêt de Soignes (partie bruxelloise). La brigade 1, à l'ouest, a récemment reçu un bâtiment regroupant des locaux de vie (réfectoire, salle de réunion, bureaux), pratiques (séchoir, sanitaires, vestiaires) techniques et logistiques (espaces de travail, véhicules et outils). Avec un équipement complet, et une situation stratégique, la brigade a les conditions idéales pour exercer son rôle. La seconde brigade, à l'est, est moins équipée. Il y a eu un projet de rénovation de leurs locaux en 2019, mais je n'ai pas trouvé de suite à ce projet. En me rendant sur place, le constat était le même.



Fig.38- Zones d'influence des brigades et axes de distribution routiers et ferroviaires

Le programme du projet reprend alors celui du bureau B612 architectes qui était en charge de la brigade 1. Ainsi, en m'appuyant sur un projet qui a nécessité plusieurs années avant d'être achevé, je m'assure de répondre aux besoins de la brigade.

A cet espace vient se greffer une scierie « augmentée ». La capacité a été calculée selon la superficie de la forêt de Soignes (4383 hectares), avec une densité de 300 arbres adultes par hectare et environ 15% pouvant être exploités suite à des coupes progressives, comme l'indique le plan de gestion. Le diamètre ciblé est compris entre 10 et 30 cm, ce qui représente environ 50% des arbres abattus. Il y a alors un potentiel entre 10 000 et 20 000 arbres par an à traiter selon l'évolution des cycles de gestion. La scierie est dimensionnée pour transformer 25 à 30 arbres par jour, ce qui laisse la possibilité de l'agrandir à terme ou alors d'ouvrir une seconde scierie sous le même modèle, après avoir formé des professionnels dans cette première.

Les locaux sont adaptés pour deux équipes d'une dizaine de personnes chacune, divisée entre gestion et production. Plusieurs domaines sont alors définis, la gestion forestière incluant le scan et le traitement des nuages de points, la publication de la ressource disponible, l'administratif et le devis, puis la partie production avec l'usinage à la CNC, la caractérisation mécanique, le traitement, le stockage puis l'envoi de la commande.

6.3 LES SYSTÈMES CONSTRUCTIFS EMPLOYÉS

Ce projet a été l'occasion d'explorer à la fois le processus de fabrication et la conception architecturale en intégrant le bois rond comme matériau principal. L'enjeu était de composer en tenant compte des atouts et des limites propres au matériau et à la méthode. Dans cette section, je présente certains choix appliqués au projet, que j'ai jugés pertinents pour tirer parti de la diversité offerte par le catalogue. Plusieurs systèmes constructifs ont été mobilisés afin de répondre à la variabilité des longueurs, des sections et des caractéristiques spécifiques des pièces disponibles.

6.3.1 POUTRE EN TREILLIS

Dans la même dynamique que wood chip barn, la poutre en treillis offre la possibilité de travailler avec des fourches, éléments du catalogue plus complexe à mettre en oeuvre. De plus elle permet de franchir une grande portée avec des éléments courts.

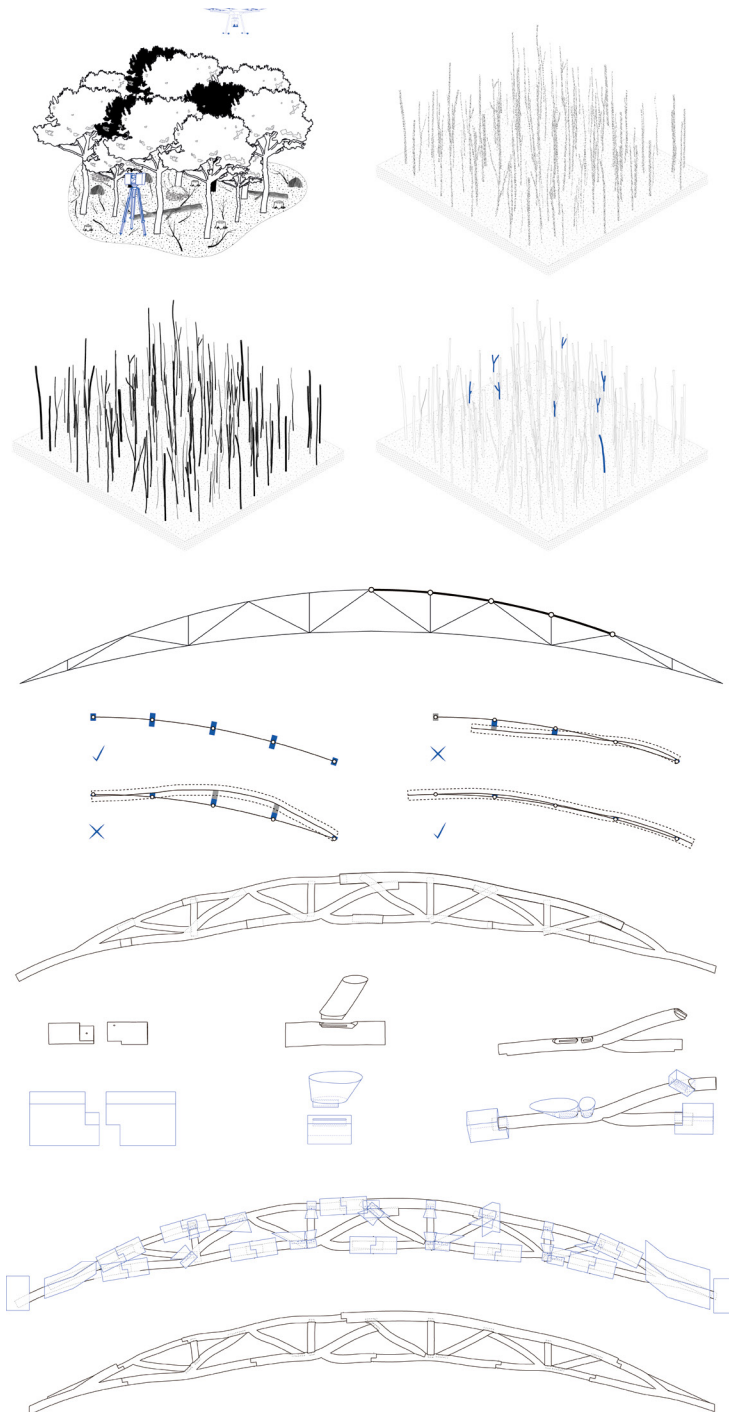


Fig.39- Application du processus proposé pour la conception d'une poutre treillis a) relevé forestier b) données brutes c) création du catalogue forestier d) conception en filaire e) sélection et positionnement des pièces sur le modèle filaire f) conception numérique des assemblages et positionnement

6.3.2 RÉCIPROQUE

La structure réciproque permet de franchir des grandes distances en employant des éléments courts et donc de section modeste. Aussi, la courbure de celle-ci est motivée par la volonté de travailler avec des assemblages bois-bois. La concavité favorise un travail axial au niveau des assemblages, plus adéquate au matériau.

6.3.3 POTEAUX - POUTRES

La structure poteaux - poutres nécessite des sections plus massives pour supporter la toiture et le plancher. Cependant elle décharge les éléments intermédiaires qui peuvent alors être de section plus faible, et de courbure plus importante.

6.3.4 LE PLANCHER TERRE-BOIS

Le plancher a pour référence celui du projet Hortus de Herzog & De Meuron. Seulement eux l'ont réalisé de façon, expérimental, in situ. Je propose plutôt l'emploi de voûtes préfabriquées en terre terradek. Ce choix est motivé par la volonté d'employer des éléments standardisés, de montrer que malgré un matériau irrégulier, la construction peut l'être. Les blocs terradek sont posés sur deux solives avec un angle taillé. La transposition entre structure lamellé collée et bois rond était relativement simple. Deux plans invariants ont été positionnés pour assurer le repos du bloc en terre, ainsi, en s'assurant du respect de la surface de contact, la solive peut présenter une courbure ou des sections variables.

6.3.5 LA MAÇONNERIE EN BOIS CORDÉ



Fig40- Rendu de matérialité d'un mur maçonné en bois cordé - Arcus Center for Social Justice Leadership / Studio Gang

Le mur mis en œuvre repose sur un système en bois cordé, composé de bûches traversantes de 30 cm, visibles des deux côtés du mur. Ces bûches, disposées à plat, assurent la fonction structurelle. Elles sont posées sur un lit de mortier terre-sable, qui

sert à la fois d'assise et de joint, à la manière d'un mur en brique. Ce choix de mortier permet une bonne régulation hygrométrique et accepte les mouvements liés au retrait du bois. Il est ainsi possible de monter le mur avec du bois encore humide, à condition de laisser sécher l'ensemble avant d'appliquer les enduits intérieurs.

La composition verticale du mur comprend 11 cm de mortier terre-sable de part et d'autre assurant l'assise des bûches complété en son centre par 8 cm de chènevotte en vrac, pour une épaisseur totale de 30 cm. Cette couche de chènevotte, bien que traversée par les bûches, joue un rôle d'isolant partiel : elle améliore la régulation thermique, limite les effets de conduction latérale dans les joints et stabilise l'humidité dans l'épaisseur du mur.



Fig.41- Mise en œuvre d'un mur en bois cordé

Dans les espaces chauffés, une couche intérieure de 6 cm de chaux-chanvre projetée est ajoutée, suivie d'un enduit de finition à la chaux de 2 cm. Ce complément améliore la performance thermique tout en maintenant la capacité du mur à respirer. Tous les matériaux utilisés sont perspirants, garantissant un séchage homogène dans le temps et évitant les risques de condensation.

Dans la dynamique de valorisation du bois rond, ce système constructif permet d'avoir une approche manuelle et artisanale tout en intégrant des chutes, des pièces de très faible diamètre ou fortement courbées. Ainsi une étape au cycle de vie est ajoutée à ces pièces qui pourront elles aussi, une fois démontée, être transformées en bioénergie ou en panneaux de particules.

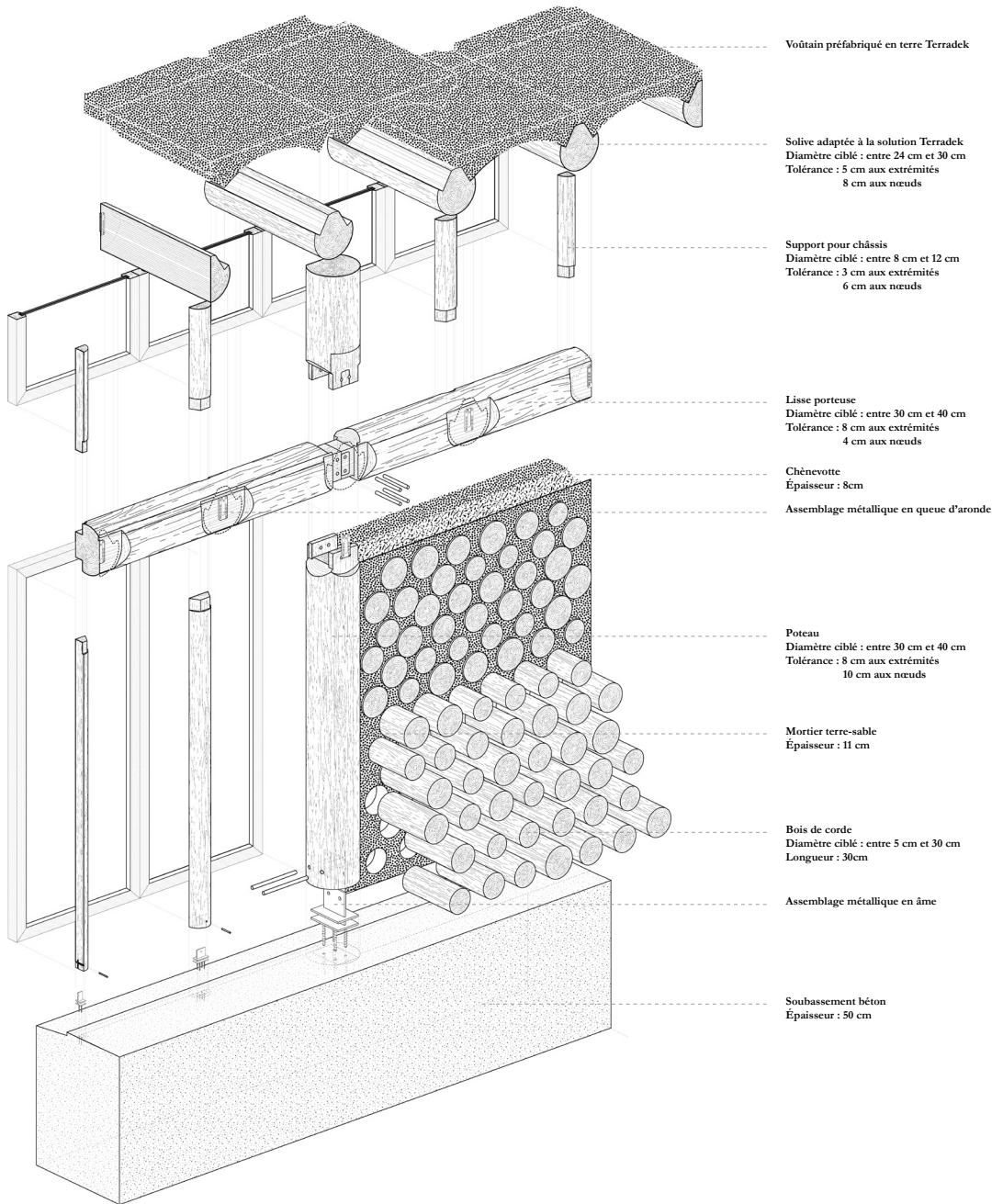


Fig.42- Nœud constructif en axonomie éclatée

7 CONCLUSION

Ce travail de fin d'études a proposé une voie alternative de valorisation du bois d'industrie, en l'orientant vers un usage structurel fondé sur ses qualités intrinsèques, jusque-là négligées. En articulant numérisation forestière, conception numérique et fabrication assistée, il inscrit la matière dans un processus continu, du relevé à la mise en œuvre, et ce en circuit court. Le bois rond n'est plus un résidu de la filière, mais une ressource active, requalifiée dans une logique d'économie circulaire.

Les bénéfices identifiés sont multiples. Sur le plan environnemental, le processus allonge le cycle de vie du matériau en différant la libération du carbone séquestré sur toute la durée d'usage du bâtiment, estimée entre cinquante et cent ans. Une fois démonté, l'élément reste pleinement réintégré dans le cycle industriel du bois. Le processus évite les opérations de transformation lourdes (sciage, séchage, rabotage, aboutage) réduisant ainsi les consommations énergétiques et les pertes de matière. La proximité de la ressource et de sa mise en œuvre limite les exportations, diminue l'empreinte carbone liée au transport et favorise une logique de circuits courts. Sur le plan économique, la démarche permet de réinjecter la valeur ajoutée localement, de renforcer les ateliers de transformation à petite échelle ainsi que de créer des emplois non délocalisables. Enfin, sur le plan constructif, elle offre une alternative aux systèmes industrialisés en valorisant la singularité morphologique des troncs, fourches et branches.

Ces perspectives sont toutefois contrebalancées par plusieurs freins. L'absence de cadre normatif pour le bois rond structurel complique son emploi dans les marchés publics et les projets soumis à contrôle réglementaire. Le coût d'accès à l'équipement robotique constitue un obstacle pour les petites structures. Enfin, la réticence d'une partie des acteurs vis-à-vis de la numérisation des pratiques limite encore l'adoption du processus à plus large échelle. Ces verrous appellent des réponses techniques, institutionnelles et pédagogiques adaptées.

Pour autant, le potentiel de la démarche demeure considérable. En reconstituant un lien direct entre ressource forestière et production architecturale, elle permet d'imaginer une filière résiliente, locale, et attentive aux dynamiques forestières. Le développement d'outils dédiés tel que les catalogues numériques, protocoles de caractérisation, assemblages paramétriques, constitue une condition indispensable à sa mise en œuvre à plus grande échelle. Leur mise au point exige un travail de recherche appliquée, interdisciplinaire et collaboratif, associant praticiens, ingénieurs, chercheurs et institutions publiques. Ce travail s'inscrit dans cette dynamique, et ouvre une trajectoire à poursuivre.

8 BIBLIOGRAPHIE

8.1 RÉFÉRENCES

AA School (2015) AA Design + Make – Biomass Boiler House. Hooke Park, Dorset: AA Publications. https://issuu.com/aaschool/docs/aa_design___make_-_biomass_boiler_h

ADEME (2018) Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie : Ressource biomasse et bonnes pratiques d'approvisionnement — Fiche 14

Andrist, M (2021) Construction en bois rond pour un habitat collectif dans la forêt de St-George <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/a3b7ca90-bbfb-4137-8279-80b679bbce93>

Artec 3D (2025) Qu'est-ce que la photogrammétrie ? Mars 2025. <https://www.artec3d.com/fr/learning-center/what-is-photogrammetry>

Bruxelles environnement (2019) Livre 1 : Plan de gestion de la Forêt de Soignes bruxelloise

Bruxelles environnement (2019) Livre 2 : Objectifs et mesures de gestion

Concheiro, I., Picon, A., Catsaros, C., & Weinand, Y. (2021) Les Cahiers de l'Ibois 2 / Ibois Notebooks 2

De Coster, H (2023) Recherche d'assemblages colonne-colonne-poutres pour bâtiments multi-étagés en bois rond https://dial.uclouvain.be/downloader/downloader.php?pid=thesis%3A40936&datastream=PDF_01&cover=cover-mem

Dehaen, M., & Ponthiere, P.-L. (2022) Recherche d'un protocole expérimental non destructif de caractérisation mécanique des grumes <https://thesis.dial.uclouvain.be/entities/masterthesis/5920ea0a-486e-4ede-a3c5-fbea2f240eaf>

Ibois (2021) <https://www.epfl.ch/labs/ibois/techtransfers/ongoing-projects/centre-dactivite-gare-grand-chalet/>

FCBA, I. (2015) Fiches produits ouvrage bois : Bois ronds Structuraux.

Filière Bois Wallonie (2021) <https://www.filiereboiswallonie.be/news/exportations-de-chene-vers-la-chine-nuances-et-eclairages>

Frochaux, M. (2021) Rencontres romandes du bois.

Geno, J., Goosse, J., Van Nimwegen, S., & Latteur, P. (2022) Parametric design and robotic fabrication of whole timber reciprocal structures. Automation in Construction. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104198>

Gilliard, D. & Weinand Y. (2025) Design method for roundwood construction using database of trees International Conference on Structures and Architecture

Goosse, J., & Latteur, P. (2020) Validation expérimentale d'assemblages de structures réciproques composées de troncs d'arbres. https://dial.uclouvain.be/downloader/downloader.php?pid=thesis%3A26720&datastream=PDF_01&cover=cover-mem

Gouvernement wallon. (2021) Plan de relance de la Wallonie : Réinventer la Wallonie de demain. <https://www.wallonie.be/fr/plan-de-relance>.

Hout Info Bois (2023) Guide pour le bon usage du bois dans la construction : Prescriptions et mise en œuvre. <https://www.houtinfo Bois.be/wp-content/uploads/2023/02/Bois-Guide-pour-le-bon-usage-%C2%A9-Hout-Info-Bois.pdf>

Hout Info Bois (2023) La filière : organigramme et description <https://www.houtinfo Bois.be/la-foret-et-le-bois/la-filiere-bois-belge-2/la-filiere-bois-belge/>

IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) (2015) Caractérisation du bois énergie mobilisé et consommé en France : analyse des données de l'Inventaire forestier national. Rapport pour l'ADEME, 16 décembre 2015. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/restitution_16122015_ADEME_vf.pdf

Nezami, S., Khoramshahi, E., Nevalainen, O., Pölönen, I., & Honkavaara, E. (2020). Tree Species Classification of Drone Hyperspectral and RGB Imagery with Deep Learning Convolutional Neural Networks. <https://doi.org/10.3390/rs12071070>

Nowak T., H.-B. K., Jasienko J. (2015) Contrôles non destructifs du bois – corrélation des résultats des tests par ultrasons et par ondes de contrainte sur les éléments en bois lamellé-collé. Annales de l'Université des Sciences de la Vie de Varsovie - SGGW. Sylviculture et technologie du bois.

Parlement de Wallonie (2022) « Question écrite n°109433 : Ventes de gré à gré dans les forêts domaniales. » <https://www.parlement-wallonie.be/pwpages?iddoc=109433&cp=interp-questions-voir&type=28>

Parmentier I (2020) <https://ingridparmentier.ecolo.be/2020/01/27/question-orale-concernant-lexploitation-du-bois-issu-de-la-foret-de-soignes-et-sa-destination/>

RTBF. (2018) Industrie du bois: le marché belge déstabilisé par les exportations en Chine <https://www.rtf.be/article/industrie-du-bois-le-marche-belge-destabilise-par-les-exportations-en-chine-9865178>

RTBF. (2020) Les hêtres de la forêt de Soignes exploités en Chine: une coopérative veut changer la donne. <https://www.rtf.be/article/les-hetres-de-la-foret-de-soignes-exploites-en-chine-une-cooperative-veut-changer-la-donne-10405616>

Sheil, R., Menges, A., Glynn, R., & Skavara, M. (2017) Fabricate 2017

Schrijnwerk (2020) https://schrijnwerk.pmg.be/fr/dossier/EVSbe2146W02_00/enquete-sur-le-secteur-du-sciage-en-belgique?

Vestartas P. (2021) Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8/full>

Wallonie F. B. (2022) Plan de relance filière bois.

Xi Z and Hopkinson C (2022) “3d graph-based individual-tree isolation (treeiso) from terrestrial laser scanning point clouds,” Remote Sensing <http://dx.doi.org/10.3390/rs14236116>

YellowScan (2024) Les bases du nuage de points LiDAR. <https://www.yellowscan.com/fr/knowledge/lidar-point-cloud-basics>

8.2 ENTRETIENS

Dalon, C (2025) Entretien réalisé en Avril 2025

Gilliard, D (2024) Entretiens réalisés durant l’été 2024

Goosse, J (2025). Entretien réalisé en Mars 2025

Settimi, A (2024). Entretien réalisé en Août 2024

Weinand, Y (2024). Entretiens réalisés en Août 2024 et Décembre 2024

9 LISTE DES ILLUSTRATIONS

Fig.1- La forêt Charbonnière entre les royaumes francs vers 480 - réalisée par l'auteur - Bruxelles environnement (2019) Livre 1 : Plan de gestion de la Forêt de Soignes bruxelloise <https://environnement.brussels/media/1229/download?inline>

Fig.2- Physionomie actuelle de la hêtraie de la forêt de Soignes dite « cathédrale » - réalisée par l'auteur

Fig.3- Peuplements actuels et objectif de diversification des peuplements - réalisée par l'auteur - Bruxelles environnement (2019) Livre 2 : Objectifs et mesures de gestion <https://environnement.brussels/media/1229/download?inline>

Fig.4- Cycle de sylviculture : Hêtraie cathédrale proche de la phase d'effondrement - réalisée par l'auteur - Bruxelles environnement (2019) Livre 1 : Plan de gestion de la Forêt de Soignes bruxelloise <https://environnement.brussels/media/1229/download?inline>

Fig.5- Cycle de sylviculture : Coupes de régénération et plantation de semis - réalisée par l'auteur - réalisée par l'auteur - Bruxelles environnement (2019) Livre 1 : Plan de gestion de la Forêt de Soignes bruxelloise <https://environnement.brussels/media/1229/download?inline>

Fig.6- Cycle de sylviculture : Objectif de diversification des âges et peuplements - réalisée par l'auteur - réalisée par l'auteur - Bruxelles environnement (2019) Livre 1 : Plan de gestion de la Forêt de Soignes bruxelloise - Service public de Wallonie (2015) https://www.foret-de-soignes.be/wp-content/uploads/2020/12/DNF_plan-de-gestion-Foret-de-Soignes.pdf

Fig.7- Chevalet de débardage manuel utilisé pour l'extraction de grumes en Forêt de Soignes - réalisée par l'auteur

Fig.8- Production annuelle de la forêt de soignes et destinations - réalisée par l'auteur- Bruxelles environnement (2019) Livre 1 : Plan de gestion de la Forêt de Soignes bruxelloise <https://environnement.brussels/media/1229/download?inline>

Fig.9- Compartimentage de l'arbre - réalisée par l'auteur - IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) (2015) Caractérisation du bois énergie mobilisé et consommé en France : analyse des données de l'Inventaire forestier national. Rapport pour l'ADEME, 16 décembre 2015. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/restitution_16122015_ADEME_vf.pdf

Fig.10- Filière bois wallonne : cycle de vie et [proposition de valorisation du bois d'industrie en bois d'œuvre](#) - réalisée par l'auteur - Hout Info Bois (2023) La filière : organigramme et description <https://www.houtinfobois.be/la-foret-et-le-bois/la-filiere-bois-belge-2/la-filiere-bois-belge/> - Lignum (2019) "Économie circulaire: utiliser les matières premières renouvelables en cascade." https://www.lignum.ch/auf_einen_klick/news/lignum_journal_holz_news_schweiz/news_detail/economie-circulaire-utiliser-les-matieres-premieres-renouvelables-en-cascade/

Fig.11- Représentation du scan terrestre et aérien - réalisée par l'auteur

Fig.12- Résultat brut du scan réalisé en forêt de Soignes en Février 2025 - réalisée par l'auteur

Fig.13- Résultat du scan après registration. Ici, chaque scan est représenté par une couleur distincte - réalisée par l'auteur

Fig.14- Illustration du résultat du nuage de points après traitement complet - réalisée par l'auteur

Fig.15- Vue proche de dessous, Wood Chip Barn, AA School Design + Make

Fig.16- Emplacement des fourches sélectionnées dans la structure de Wood Chip Barn, AA School Design + Make

Fig.17- Vue extérieure de la Biomaas Boiler House AA School Design + Make

Fig.18- Fragment du catalogue dressé pour la construction de la Biomaas Boiler House AA School Design + Make

Fig.19- Illustration de la définition du minimum et du maximum admis - réalisée par l'auteur

Fig.20- Illustration du principe de plan de construction sur du bois équarri - réalisée par l'auteur

Fig.21- Création d'une face plane sur une grume - réalisée par l'auteur

Fig.22- Illustration du principe de plan de construction sur du bois rond - réalisée par l'auteur

Fig.23- Conception filaire d'un shed : illustration des critères de sélection d'une pièce - réalisée par l'auteur

Fig.24- Illustration du procédé de sélection de pièces du catalogue - réalisée par l'auteur

Fig.25- Essai d'adaptation de l'assemblage Ari-Kake au bois rond par Maxim Andrist Andrist, M (2021). Construction en bois rond pour un habitat collectif dans la forêt de St-George <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/a3b7ca90-bbfb-4137-8279-80b679bbce93>

Fig.26- a) coupe à onglet b) clé papillon c) coupes à sifflets désaboutées d) coupe à sifflet double e) coupe à sifflet double crantées f) enfourchement g) entures multiples Vestartas P. (2021). Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8/full>

Fig.27- a) surfacage b) rainurage c) chevillage oblique Vestartas P. (2021). Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8/full>

Fig.28- Test du Joinery Solver sur un assemblage tenon-mortaise en bois rond Vestartas P. (2021). Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8/full>

Fig.29- Assemblage à mi-bois adapté au bois rond et à l'usinage robotique Vestartas P. (2021). Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8/full>

Fig.30- Illustration d'un assemblage en queue d'aronde adapté au bois rond entre deux éléments horizontaux - réalisée par l'auteur

Fig.31- a) modèle 3d issu du scan et visualisation du parcours de l'outil b) fraisage du mi-bois c) résultat de la découpe industrielle - réalisée par l'auteur

Fig.32- Configuration du banc de découpe réalisé par Justin Goosse - Goosse, J., & Latteur, P. (2020) Validation expérimentale d'assemblages de structures réciproques composées de troncs d'arbres. https://dial.uclouvain.be/downloader/downloader.php?pid=thesis%3A26720&datastream=PDF_01&cover=cover-mem

Fig.33- Positionnement de la pièce à tailler selon le plan de référence, Septembre 2024 - réalisée par l'auteur

Fig.34- Tracé du tenon, Septembre 2024 - réalisée par l'auteur

Fig.35- Résultat de la découpe manuelle, Septembre 2024 - réalisée par l'auteur

Fig.36- Plan d'implantation du projet d'architecture - réalisée par l'auteur

Fig.37- Coupe longitudinale du projet d'architecture - réalisée par l'auteur

Fig.39- Application du processus proposé pour la conception d'une poutre treillis a) relevé forestier b) données brutes c) création du catalogue forestier d) conception en filaire e) sélection et positionnement des pièces sur le modèle filaire f) conception numérique des assemblages et positionnement - réalisée par l'auteur

Fig.40- Rendu de matérialité d'un mur maçonné en bois cordé - Arcus Center for Social Justice Leadership / Studio Gang

Fig.41- Mise en oeuvre d'un mur en bois cordé - MaisonResponsable (2021) https://www.maison-responsable.fr/construire-renover/materiaux-durables/maison_bois_corde/

Fig.42- Nœud constructif en axonométrie éclatée - réalisée par l'auteur

10 ANNEXES

BIOMASS BOILER HOUSE



© AA 2015

Auteurs

Sattaveesa Sahu, Yingzi Wang (AA Design and Make students)

Institution

Architectural Association School of Architecture – Design + Make Programme

Encadrement

Site managers: James Stubbs, Oscar Emanuel. Timber professionals: Jack Hawker, James Vooght. Engineers: Charlotte Briggs, Coco Van-egeeraat.

Lieu

Hooke Park, Dorset, Royaume-Uni

Année

2015

Source / publication

<https://hookepark.aaschool.ac.uk/biomass-boiler-house/>

Description du projet

La chaufferie biomasse, conçue par les étudiants en design et mécanique Sattaveesa Sahu et Yingzi Wang, a été achevée en janvier 2015. Le bâtiment abrite la chaudière, le stockage des copeaux et le ballon tampon du réseau de chauffage urbain qui alimente désormais l'ensemble du campus de Hooke Park. Des troncs de sapin de Douglas, naturellement courbés, ont été scannés en 3D afin de constituer une base de données géométriques. À partir de ces formes, un mur aux courbes sinueuses et harmonieuses a été réalisé par empilement de poutres.

Environ 250 arbres courbés du parc Hooke ont été scannés, et les données relatives à leur axe et à leur diamètre de conicité ont été extraites des maillages de numérisation. Des routines automatisées ont permis de déterminer la position optimale de chaque tronc courbé dans le mur, selon des critères visant à générer des courbures harmonieuses et continues. Ces courbures s'inscrivent dans une stratégie paysagère architecturale et contribuent également à la stabilité structurelle du mur.

Le bâtiment est implanté sur une pente existante afin de simplifier son fonctionnement, les copeaux de bois étant acheminés par une trappe située au niveau du toit. L'objectif architectural était que le bâtiment s'inscrive dans le prolongement des contours topographiques du site, une intention traduite par la superposition des éléments de sa structure et la courbe fluide de ses murs. (AA 2015)



© AA 2015



© AA 2015

WOOD CHIP BARN



© AA 2016

Auteurs

Zachary Mollica, Swetha Vegesana, Sahil Shah, Vivian Yang, Mohaimeen Islam

Institution

Architectural Association School of Architecture, Design + Make Programme, Hooke Park

Encadrement

Martin Self, Jack Draper, Charley Brentnall, Toby Burgess Ingénierie : Francis Archer, Naotaka Minami, Coco Van-egeraat

Lieu

Hooke Park, Dorset, Royaume-Uni

Année

2016

Source / publication

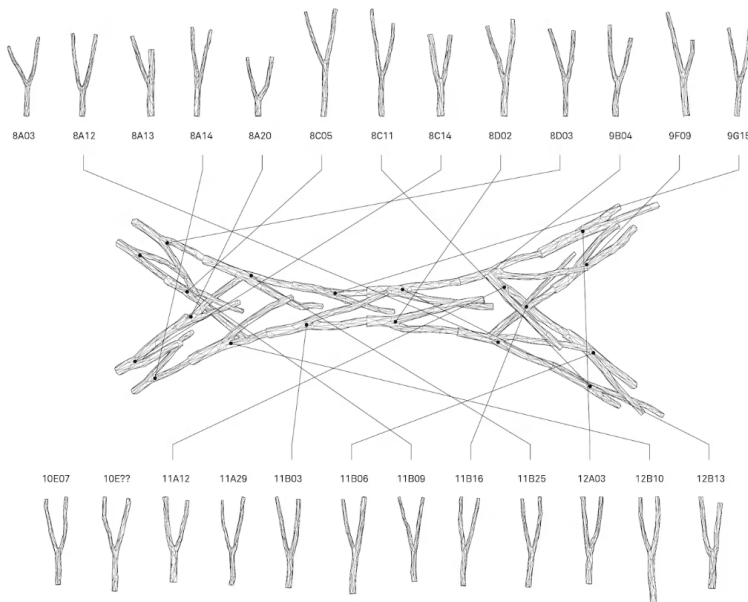
<https://designandmake.aaschool.ac.uk/project/wood-chip-barn/>

Description du projet

Mesurant 25 x 10 x 8 m, la structure principale arquée du hangar à copeaux de bois, fabriquée par robot, est composée de 20 fourches de hêtre distinctes, provenant directement des bois environnants. Grâce à des méthodes de conception et de fabrication numériques, la forme et la capacité structurelle intrinsèques de l'arbre sont directement intégrées et exploitées dans la construction architecturale. D'une capacité de près de 400 m³, le hangar permet à Hooke Park de transformer et d'utiliser son propre bois pour la production de chaleur renouvelable. Ce projet visait à développer un processus et les outils nécessaires à l'utilisation de parties complexes de l'arbre, négligées par les pratiques forestières et de construction bois conventionnelles.

Après avoir étudié les hêtraies de Hooke Park, une base de données numérique de 204 éléments fourchus potentiels a été créée. À partir de l'analyse des matériaux disponibles, le concept structurel a été élaboré. Sur la base de cette structure, 25 fourches ont été prélevées en forêt, ramenées sur le campus et scannées en 3D avec précision par photogrammétrie. Un script d'organisation sur mesure, développé sous Rhino/Grasshopper, a permis de générer l'agencement final des fourches en collaboration avec notre équipe d'atelier et les ingénieurs d'Arup. Ce modèle numérique a ensuite été converti en informations de fabrication, permettant au bras robotisé à 6 axes de transformer chaque fourche en un élément fini. Un gabarit d'assemblage précis a permis de pré-assembler ces grands éléments avec exactitude dans le Big Shed avant leur transport sur site pour l'assemblage final. (AA 2016)

Processus de conception : <https://vimeo.com/157159413?fl=pl&fe=cm>



WOODLAND CABIN



© AA 2020

Auteurs

Wyatt Armstrong, Hilla Gordon, Ciro Romer, Nasia Pantelidou, Shengning Zhang

Institution

Architectural Association School of Architecture – Design + Make Programme

Encadrement

Martin Self, Zachary Mollica, Jack Draper, Simon Withers

Lieu

Hooke Park, Dorset, Royaume-Uni

Année

2019–2020

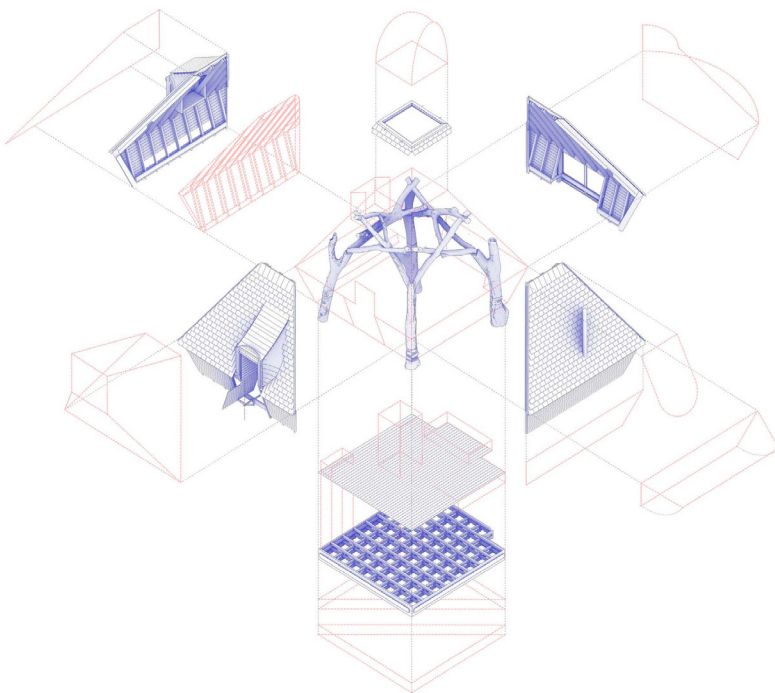
Source / publication

<https://pr2020.aaschool.ac.uk/Wyatt-Armstrong,-Hilla-Gordon,-Ciro-Romer,-Nasia-Pantelidou,-Shengning-Zhang>

Description du projet

La Cabane est une structure en bois qui relève le défi d'unir géométries organiques et usinées. S'inscrivant dans la lignée de projets antérieurs développés à Hooke Park, la Cabane vise à appliquer des techniques de conception et de fabrication ambitieuses à l'échelle domestique. Elle met en œuvre une approche de préfabrication qui intègre la logique d'assemblage au sein même des composants de la structure. La structure principale – quatre colonnes reliées par un élément de contreventement – repose sur une série de plots en béton. Composée d'éléments arborescents ramifiés, la fabrication robotisée a permis d'articuler une série d'assemblages en bois qui marient des faces produites numériquement à celles façonnées à la main. L'enveloppe se compose d'un plancher et de quatre panneaux qui s'emboîtent le long de leurs joints. Quatre ouvertures orientent le bâtiment vers son site, offrant une entrée dynamique et des perspectives étagées qui prolongent l'espace intérieur vers le paysage et le ciel. Un agencement intérieur flexible a guidé une première exploration du mobilier intégré. L'élément central de celui-ci est un foyer en céramique sculpté par robot – aboutissement d'une recherche sur la préparation et la cuisson d'argile extraite du lit d'une rivière locale. Avec cet aménagement, la cabane commence à fonctionner comme un espace domestique informel que les étudiants et le personnel peuvent occuper et aménager à leur guise. (AA 2020)

Processus de conception : https://pr2020.aaschool.ac.uk/submission/uploaded_files/DESIGN-AND-MAKE/Woodland%20Cabin-Cabin_Wyatt.gif



FIELD STATION



© AA 2023

Auteurs

Romain Odin-Lepoutre, Garrett Nelli, Lin Yao, Zhu Yulin, Duan Chongyuan, Arangil Karuvadath Malavika, Zhang Zhijiao, Zhong Xiaojing, Liu Ting, Cai Hanxing

Institution

Architectural Association School of Architecture, Design + Make Programme, Hooke Park

Encadrement

Emmanuel Vercruysse, Kate Davies, Will Gowland, Wyatt Armstrong, Dmitrii Fedorov, Simon Withers, Martin Self, Jack Draper, Sam Baldwin, Francis Archer, Thomas Parker, Gary Edwards, Ciaran Malik

Lieu

Hooke Park, Dorset, Royaume-Uni

Année

2022–2023

Source / publication

<https://hookepark.aaschool.ac.uk/portfolio/field-station/>

Description du projet

Ce projet met en œuvre une application robotique innovante permettant d'utiliser du bois rond de petit diamètre (50-90 mm, généralement un sous-produit de l'exploitation forestière) comme matériau principal pour la toiture d'une station de recherche de 100 m² à Hooke Park. L'utilisation de ce bois, jusqu'alors sans valeur marchande, encourage une refonte radicale de la filière bois et un positionnement stratégique des technologies de pointe dans la production d'architectures en bois.

Nichée au cœur de la forêt industrielle de Hooke, la station de terrain est un abri polyvalent : elle sert de base de recherche et d'enseignement, d'abri pour notre forestier et les promeneurs de passage, de salle de classe en plein air pour les écoles forestières locales, et de lieu de rencontre informel pour des conférences et des événements. À plus long terme, la station est conçue comme un observatoire permettant de suivre l'évolution des paysages agricoles environnants, visibles depuis la station, dans le cadre d'un programme de renaturation, et de l'évolution de la croissance et de l'exploitation forestières alentour.

Le projet a abouti à une charpente de toit légère et démontable, assemblée sans fixations mécaniques permanentes ni collage. Conçue pour le démontage, cette charpente se compose de deux plans de membrures maintenus ensemble par des tiges filetées, qui compriment toutes les branches diagonales en bois rond, permettant ainsi l'utilisation d'assemblages à tenons simples. (AA 2023)



ARCH PROTOTYPE MADE USING RAW-TIMBER



© EPFL IBOIS 2021

Auteur

P. Vestartas

Institution

EPFL, Laboratoire de construction en bois IBOIS

Encadrement

Direction de thèse: Prof. Yves Weinand

Lieu

Lausanne, Suisse

Année

2021

Source / publication

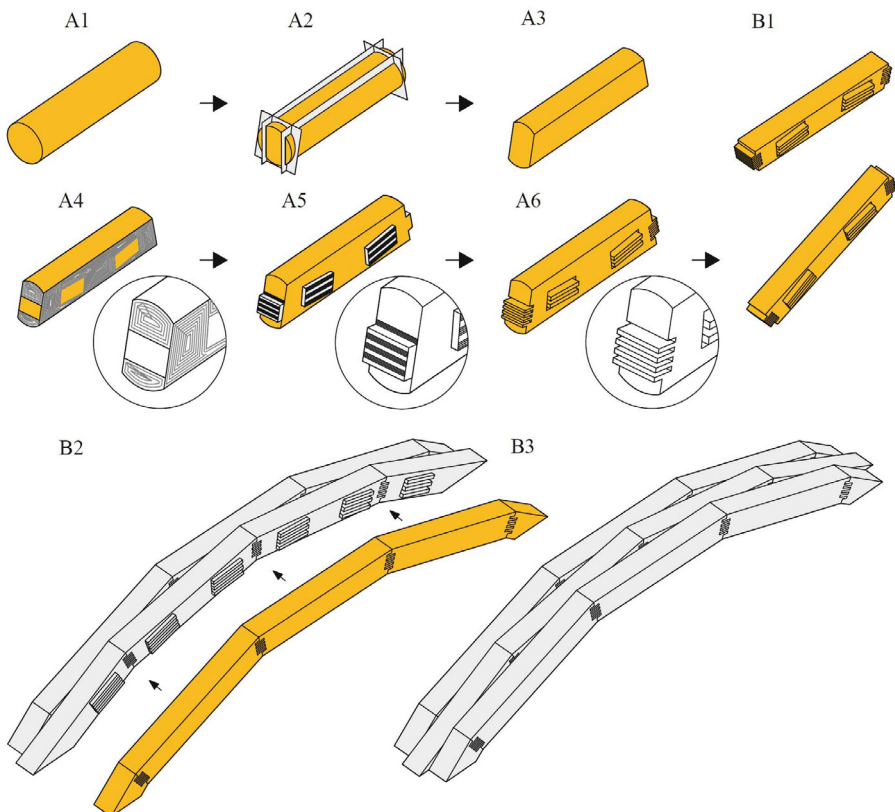
Vestartas, Petras. 2021. Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver. Thèse EPFL <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8>

Le chapitre s'appuie sur P. Vestartas, N. Rogeau, J. Gamero and Y. Weinand. Modelling Workflow for Segmented Timber Shells using Wood-wood Connections. Design Modelling Symposium Berlin 2019. Impact: Design with all Senses, p. 596-607, Berlin, Germany, September 23-25, 2019. DOI:10.1007/978-3-030-29829-6_46.

Description du projet

La thèse développe un workflow “design-to-fabrication” pour le bois scié brut, visant à relier la conception CAO et la fabrication FAO à l’aide d’un cadre unique et d’un outil de génération d’assemblages (Joinery Solver). Elle répond au constat d’un déficit d’outils numériques intégrés pour valoriser des stocks de bois locaux, en articulant modélisation, spécification des joints et génération de parcours d’usinage.

Le prototype sert à valider physiquement une chaîne complète: prise en compte de la forme du stock, discrétisation d’une géométrie cible, définition d’une séquence d’assemblage, génération des assemblages, représentation 3D et génération du tool-path CNC, le tout exécuté dans un même framework logiciel afin d’éviter des ruptures d’interopérabilité. Les résultats soulignent que le prototype en planches bénéficie d’une préparation plus “fluide” du modèle et du tool-path, tandis que le prototype en bois brut demande davantage de temps de préparation du parcours d’outil et appelle des investigations supplémentaires. (Vestartas, 2021)



ASSEMBLY OF A RAW WOOD NEXORADE



© EPFL IBOIS 2021

Auteur

P. Vestartas

Institution

EPFL, Laboratoire de construction en bois IBOIS

Encadrement

Direction de thèse: Prof. Yves Weinand

Lieu

Lausanne, Suisse

Année

2021

Source / publication

Vestartas, Petras. 2021. Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver. Thèse EPFL <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8>

Le chapitre s'appuie sur P. Vestartas, A. Rezaei Rad, and Y. Weinand. Robotically-Fabricated Nexorades from Whole Timber. International fib Symposium on the Conceptual Design of Structures, Switzerland, 2021

Description du projet

La thèse développe un workflow “design-to-fabrication” pour le bois scié brut, visant à relier la conception CAO et la fabrication FAO à l’aide d’un cadre unique et d’un outil de génération d’assemblages (Joinery Solver). Elle répond au constat d’un déficit d’outils numériques intégrés pour valoriser des stocks de bois locaux, en articulant modélisation, spécification des joints et génération de parcours d’usinage.

Le prototype vise à valider un workflow de génération systématiques de structure réciproques à partir de bois ronds. Il articule quatre blocs méthodologiques: 1) génération géométrique globale, 2) génération locale des assemblages, 3) analyse structurelle, 4) laser-scanning et fabrication robotique. Le système s’inscrit dans un cadre intégré combinant ressources issues de la forêt locale, traitement géométrique, assemblages bois-bois, numérisation laser et fabrication numérique

Le prototype documente l’assemblage d’une structure réciproque en bois rond au niveau du nœud “top to side”. Elle montre a) deux variantes de joints side-to-top ainsi qu’une rainure destinée à la fixation de panneaux, b) une connexion assemblée, c) le principe d’“engagement window” formé par quatre joints side-to-top, et d) un prototype intégrant des panneaux fixés. (Vestartas, 2021)

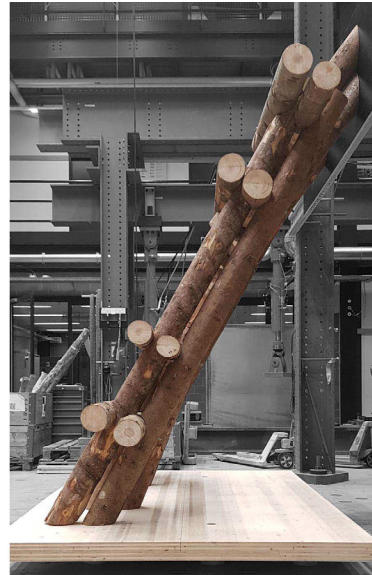
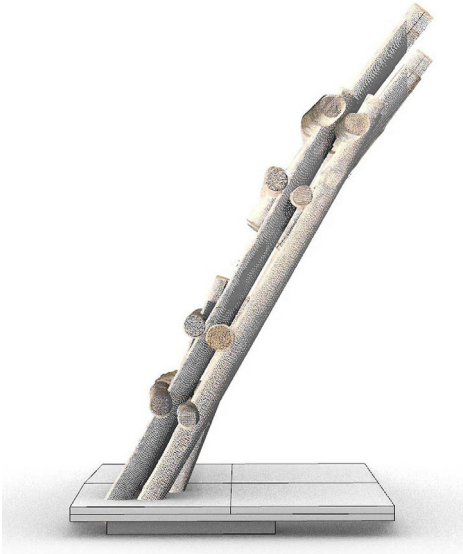


© EPFL IBOIS 2021



© EPFL IBOIS 2021

PROTOTYPE COMPARISON BETWEEN THE DIGITAL MODEL AND THE SCANNED TREES



© EPFL IBOIS 2021

Auteur

P. Vestartas

Institution

EPFL, Laboratoire de construction en bois IBOIS

Encadrement

Direction de thèse: Prof. Yves Weinand

Lieu

Lausanne, Suisse

Année

2021

Source / publication

Vestartas, Petras. 2021. Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver. Thèse EPFL <https://infoscience.epfl.ch/entities/publication/554eb1e3-2930-4b6d-b584-6ba91b6d43b8>

Le chapitre s'appuie sur: P. Vestartas, A. Rezaei Rad, and Y. Weinand. Robotically-Fabricated Nexorades from Whole Timber. International fib Symposium on the Conceptual Design of Structures, Switzerland, 2021.

Description du projet

La thèse développe un workflow “design-to-fabrication” pour le bois scié brut, visant à relier la conception CAO et la fabrication FAO à l’aide d’un cadre unique et d’un outil de génération d’assemblages (Joinery Solver). Elle répond au constat d’un déficit d’outils numériques intégrés pour valoriser des stocks de bois locaux, en articulant modélisation, spécification des joints et génération de parcours d’usinage.

Ici l’objectif est de comparer le modèle numérique du prototype et un stock de bois réellement scanné, utilisée non pas en contrôle a posteriori, mais en contrôle a priori afin de détecter des collisions potentielles entre pièces et d’ajuster le modèle de conception en fonction du stock disponible.

Le prototype s’inscrit dans la section 9.5 de la thèse “Assignment Problem”, qui formalise la manière dont un stock réel altère un design initial. La procédure décrite est séquentielle: 1) scan simultané de l’ensemble des poutres, puis découpage du nuage de points en éléments individuels; 2) squelettisation de chaque nuage de points par une méthode de “Cylinder-fit”; 3) attribution d’un coût à chaque poutre sur base de sa longueur et de ses rayons; 4) assignation des poutres au modèle via une méthode hongroise (Hungarian method), avec comme critère de recherche la longueur des poutres et un indexage destiné à sélectionner la géométrie pertinente dans un groupe d’éléments auto-similaires. Une fois l’assignation obtenue, le modèle initial est mis à jour à partir des scans orientés. (Vestartas, 2021)

