



HAL
open science

Contribution à l'étude de l'utilisation de la Stratoconception® pour la conception et la fabrication de composants non-standards pour l'architecture en bois

Victor Fréchar

► To cite this version:

Victor Fréchar. Contribution à l'étude de l'utilisation de la Stratoconception® pour la conception et la fabrication de composants non-standards pour l'architecture en bois. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Lorraine, 2024. Français. NNT : 2024LORR0006 . tel-04537289

HAL Id: tel-04537289

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04537289>

Submitted on 8 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Thèse

Présentée par

Victor FRÉCHARD

Sous la direction de Laurent BLÉRON et Julien MEYER

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : Sciences du Bois et des Fibres

Contribution à l'étude de l'utilisation de la Stratoconception® pour la conception et la fabrication de composants non-standards pour l'architecture en bois

Soutenance publique le 06/03/2024

Membres du jury

Directeur(s) de thèse :	M. Laurent BLÉRON	Professeur, Université de Lorraine, Epinal, France.
	M. Julien MEYER	Maître de Conférences, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, France.
Président du jury :	M. Thierry CIBLAC	Professeur, École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais, France
Rapporteurs :	Mme. Aurélie DE BOISSIEU	Professeure, Université de Liège, Belgique
	M. François GUENA	Professeur, École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette, France
Examineurs :	M. Thierry CIBLAC	Professeur, École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais, France
	Mme. Myriam CHAPLAIN	Maîtresse de Conférences, Université de Bordeaux, France
Membres invités :	M. Cyril PELAINGRE	Ingénieur-Docteur, Responsable R&D CIRTES, Saint-Dié-des-Vosges, France

École doctorale SIMPPÉ

EA 4370 – Laboratoire d'Étude et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB)

27 Rue Philippe Seguin – 88 000 – Épinal - France

Résumé

L'architecture non-standard en bois explore l'étendue des possibilités techniques et esthétiques pour de nouveaux usages répondant à des exigences fonctionnelles cohérentes avec les enjeux environnementaux, sociétaux et économiques contemporains. Récemment introduite dans le secteur de la construction, mais absente des pratiques de la construction en bois, la fabrication additive, qui regroupe un ensemble de procédés, étend les limites des moyens de fabrication conventionnels par la liberté formelle accrue et la multifonctionnalisation des composants architecturaux qu'elle permet. Le procédé de Stratoconception® présente un fort potentiel d'application pour le développement d'architectures et de composants non-standards en bois, présentant une forte capacité d'adaptation aux moyens techniques et matériels de la construction en bois.

Le procédé de Stratoconception®, en architecture, se limite à la réalisation de maquettes et de prototypes de petites dimensions et ne s'applique pas, jusqu'à présent, à la conception et à la fabrication de composants fonctionnels à usage structurel de petites comme de grandes dimensions. L'utilisation de ce procédé pour la réalisation de prototypes ou d'outillages pour l'industrie implique que la conception du processus de fabrication par Stratoconception® est indépendante de la conception des objets eux-mêmes, destinés à être réalisés par d'autres procédés de fabrication, alors que l'architecture non-standard privilégie un renforcement du lien entre la conception architecturale et les techniques de fabrication.

Ce travail présente les résultats d'expériences de « *conception-fabrication* » par Stratoconception® de composants architecturaux menées, qui forment, avec l'étude bibliographique menée, une base de connaissance, orientée vers des enjeux identifiés, des mécanismes, des problématiques et des limites de l'utilisation de la Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et la construction en bois. Ces expériences ont mis en évidence le manque de flexibilité et d'outils d'évaluation du processus de production de composants architecturaux par Stratoconception® ainsi que l'interdépendance entre la conception et la fabrication. Nous avons également identifié des opportunités d'applications du procédé pour la conception et la production de composants architecturaux non-standards, particulièrement les nœuds d'assemblages en bois de treillis tridimensionnels et les parois.

Afin d'obtenir un processus de conception applicable dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois, nous introduisons une méthode de conception pour la fabrication additive par Stratoconception® intégrant les contraintes et les opportunités du procédé dès l'étape de conception de la géométrie de la pièce en favorisant une évolution itérative de cette conception, orientée par les résultats de moteurs d'évaluation accompagnant le concepteur vers des prises de décision cohérentes avec des critères définis. La méthode proposée, implémentée dans des outils d'aide à la conception, permet la mise en place d'une continuité informationnelle numérique liant une conception paramétrique à une fabrication numérique en orientant le concepteur vers des solutions respectant des critères de faisabilité et de rationalisation de la production dès la phase amont de la conception de la géométrie du composant architectural.

Mots clés : Architecture non-standard en bois ; Stratoconception® ; conception pour la fabrication additive ; conception paramétrique ; continuum informationnel numérique

Abstract

Non-standard timber architecture explores the scope of technical and aesthetic opportunities for new uses that correspond to functional requirements consistent with contemporary environmental, social and economic issues. Recently adopted by the construction industry, but absent from the timber construction practices, additive manufacturing, which brings a range of processes, extends the existing limitations of the subtractive and formatting manufacturing methods in the ability to produce complex shapes and multi-functionalized architectural components. The Stratoconception® process shares the technical and material means of the timber construction industry and presents a great potential to be implemented in the common practices to develop non-standard timber architecture and components.

In architecture, the Stratoconception® process is limited to the production of small-scale models and prototypes and has not yet been applied to the design and the manufacturing of functional components, used for structural purposes, in either small or large dimensions. The use of this process to produce prototypes or tooling for the industry implies that the Stratoconception® manufacturing process design is independent of the design of the objects themselves, which are intended to be produced by other manufacturing processes, whereas non-standard architecture tends to strengthen the link between the architectural design and the manufacturing techniques.

This work presents the results of Stratoconception® “*design to manufacturing*” experiences carried out on architectural components. These experiences, combined with the bibliographical study, constitute a knowledge base, oriented towards the issues, the mechanisms, the problems and the limits identified of the use of Stratoconception® in architecture and timber construction practices. These experiences have highlighted the lack of flexibility and development of evaluation tools of the Stratoconception® production process of architectural components, as well as the interdependence between design and manufacturing. We have also identified the opportunities to apply the process to the design and the production of non-standard architectural components, especially the timber assembly of the gridshell or lattice structures and the walls.

To achieve a design process that can be applied in the timber architecture and construction practices, we introduce a design for additive manufacturing by Stratoconception® method, that integrates the constraints and the opportunities of the process right from the part geometry design stage and fosters the iterative evolution of the design, guided by the results of evaluation engines that support the designer in his decision-making. The proposed method, implemented in design support tools, creates a digital information continuum that connects parametric design to digital manufacturing, guiding the designer towards solutions that meet feasibility and production rationalization criteria right from the early design phase of the architectural component’s geometry.

Keywords : Non-standard timber architecture ; Stratoconception® ; design for additive manufacturing ; parametric design ; digital continuum

Remerciements

Par ces quelques mots, je souhaite remercier simplement les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ces travaux de thèse.

Merci à Laurent Bléron, directeur de cette thèse, pour sa confiance accordée, sa réactivité infallible ainsi que pour la simplicité et la franchise de nos échanges.

Merci à Julien Meyer, codirecteur de cette thèse et directeur scientifique du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, pour son accompagnement quotidien, scientifique comme humain, qui m'a permis de mener à bien ces travaux.

Merci à Gilles Duchanois, dont la rencontre a été déterminante dans mon choix de rejoindre le monde de la recherche et de l'enseignement supérieur, pour sa bienveillance, sa confiance accordée et son aide apportée pour le développement de ce travail de recherche.

Merci à Franck Besançon, responsable scientifique de la chaire partenariale « *Architecture et construction Bois : du patrimoine au numérique* », pour son aide dans le montage de ce projet de recherche ainsi que pour ses conseils toujours avisés.

Merci au Ministère de la Culture et à CIRTES, Charpente Houot et Weisrock Vosges qui ont participé au financement de ces travaux de recherche.

Merci à Tommy Messaoudi, directeur scientifique adjoint du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, pour son accueil à bras ouverts et pour les moments de partage, sportifs et autres, qui ont été précieux durant ces trois années.

Merci à Maxence Lebossé pour le partage de notre expérience de vie de doctorant, de la dernière nuit des Défis du Bois aux fjords d'Oslo en passant par Rabat, le projet Archi-Folies et les chantiers de déconstruction. Merci à Veronika Bolshakova pour son aide apportée, particulièrement les diverses relectures.

Merci à l'ensemble des membres du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, particulièrement Gilles Halin, Marc de Fouquet, Elodie Hochscheid, Pascal Humbert et Maud Chastaing pour nos divers échanges autour de ces travaux de recherche et les moments de convivialité partagés. Au-delà d'un cadre propice au développement de projets de recherche, j'ai eu la sensation, chaque jour, de trouver dans ce laboratoire une seconde famille.

Merci à la direction et aux personnels administratifs de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy pour leur confiance et leur accompagnement. Merci à Paul Besançon, Anwar Nehlawi et tous les étudiants et étudiantes de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy et de l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois pour leur participation au développement de ces recherches.

Merci à Anaïs Messere et Pierre Boucher pour nos échanges maintenant un équilibre.

Pour finir, merci à Fiona.

L'architecture est un art collaboratif. Les architectes, les ingénieurs et les artisans doivent tous travailler ensemble pour créer des bâtiments durables et esthétiquement plaisants.

– Bernini

Sommaire

RESUME	I
ABSTRACT	II
REMERCIEMENTS	IV
INTRODUCTION	1
A. Contexte de recherche.....	1
a. Architecture non-standard et complexité formelle.....	2
b. Fabrication numérique et construction en bois.....	4
c. Fabrication additive et Stratoconception®.....	5
B. Positionnement de la recherche.....	6
a. Objectifs.....	6
b. Méthodologie.....	8
c. Plan de thèse.....	8
PARTIE 1. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	11
Chapitre 1. Attrait de la Stratoconception® pour l'architecture et la construction en bois.....	13
1.1 Opportunités de la Stratoconception® pour l'architecture en bois.....	13
1.2 Regard sur la Stratoconception® dans le contexte de la construction bois.....	27
Chapitre 2. Pratiques de conception pour la Stratoconception® et l'architecture.....	47
2.1 Conception pour la fabrication par Stratoconception®.....	47
2.2 Pratiques numériques pour la conception de composants architecturaux.....	57
Conclusion de la partie 1.....	66
PARTIE 2. PROPOSITION D'UN MODELE THEORIQUE	71
Chapitre 3. Expériences de conception et de fabrication.....	73
3.1 Méthode.....	74
3.2 Investigations.....	81
3.3 Synthèse.....	96
Chapitre 4. Présentation du modèle théorique.....	99
4.1 Présentation de la méthode de conception pour la fabrication additive.....	99
4.2 Organigramme de l'étape de conception de la géométrie de la pièce.....	109
Conclusion de la partie 2.....	115
PARTIE 3. IMPLEMENTATION DE LA METHODE ET DEVELOPPEMENT D'OUTILS D'AIDE A LA CONCEPTION	119
Chapitre 5. Implémentation de la méthode pour la conception de nœuds d'assemblage en bois.....	121
5.1 Conception des nœuds d'assemblage pour leur fabrication par Stratoconception®.....	122
5.2 Mise à l'épreuve de l'outil <i>TAN(s)</i>	136
Chapitre 6. Aide à la conception du tranchage des parois en phase amont du projet.....	141
6.1 Méthodes pour la conception des parois réalisées par Stratoconception®.....	143
6.2 Évaluation des solutions de tranchage de parois.....	155
6.3 Mise à l'épreuve de l'outil <i>TiWa(s)</i>	159

Chapitre 7. Développement d'une continuité informationnelle numérique	167
7.1 Proposition de mise en place d'un continuum informationnel numérique	169
7.2 Mise à l'épreuve du continuum informationnel numérique proposé	178
Conclusion de la partie 3	184
CONCLUSION GENERALE	187
LISTE DES FIGURES.....	195
LISTE DES TABLEAUX.....	205
BIBLIOGRAPHIE	207

Introduction

La recherche développée dans cette thèse se rapporte à l'utilisation du procédé de fabrication additive de Stratoconception® pour la conception et la fabrication numérique de composants non-standards pour l'architecture en bois. Le procédé de fabrication additive de Stratoconception®, breveté par Claude Barlier (Barlier, 1991) et développé par le CIRTES, appartient à la famille normalisée par l'ISO 17296-2 (ISO/ASTM, 2021) des procédés d'assemblages de couches à partir de plaques découpées. Ce procédé repose sur des moyens techniques et matériels courants dans l'industrie que sont l'utilisation de machines outils à commande numérique triaxiales et de matériaux en plaques. Le modèle numérique d'une pièce est décomposé en un ensemble de strates tridimensionnelles, couches élémentaires et complémentaires. Chacune de ces strates est mise en panoplie, c'est-à-dire agencée sur un matériau en plaque, puis fabriquée par des procédés d'usinage avant que ces couches élémentaires usinées se retrouvent assemblées pour reconstituer la pièce finale, originellement modélisée. L'application de ce procédé à l'architecture se limite actuellement à la réalisation de maquettes, de prototypes et de moules pour la construction en béton, et n'est pas encore développée dans le contexte de la fabrication de composants architecturaux à usage structurel en bois.

Ce travail est mené dans une visée exploratoire avec pour objectifs :

1. Constituer une base de connaissances des mécanismes et des problématiques de l'utilisation de la Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et la construction en bois ;
2. Proposer des outils et des méthodes pour faciliter l'implémentation de la Stratoconception® dans les pratiques courantes de l'architecture et la construction en bois.

A. Contexte de recherche

Le 21^e siècle est le témoin privilégié des changements rapides, de plus en plus intenses et persistants de notre climat se traduisant par une hausse globale des températures de l'atmosphère. Il est établi que ces changements sont anthropiques, résultats de l'impact croissant sur l'environnement des activités humaines depuis l'ère préindustrielle¹ (IPCC, 2014). Le rapport du Groupe d'experts

¹ Les révolutions industrielles ont déclenché une machinisation des activités anthropiques de prélèvement et de transformation des ressources consommant une énergie majoritairement produite par la combustion d'hydrocarbures fossiles que sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel qui libèrent dans leur combustion des gaz à effet de serre, principalement du dioxyde de carbone (CO₂).

Intergouvernementaux sur l'Évolution du Climat (GIEC) publié en 2023 souligne l'importance de diminuer de manière conséquente les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à ces activités pour limiter les effets du changement climatique (IPCC, 2023). Le secteur du bâtiment occupe, face à ces enjeux, une place significative par les émissions que la construction, l'exploitation et la fin de vie des bâtiments engendrent. Ainsi, ce secteur représentait « 39% des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) liés à l'énergie et aux procédés en 2018, dont 11% provenaient de la fabrication de matériaux et de produits de construction tels que l'acier, le ciment et le verre »² (Global Alliance for Building and Construction et al., 2019).

Dans ce contexte partagé avec l'utilisation croissante du numérique dans les pratiques de l'architecture, l'ingénierie et la construction, trois opportunités se rejoignent : la conception d'architectures non-standards, l'utilisation du matériau bois en construction et la Stratoconception®.

a. Architecture non-standard et complexité formelle

Les dernières décennies ont vu le développement et l'emploi croissant des outils numériques de représentation dans le secteur de l'architecture, l'ingénierie et la construction. Ces outils apportent de nouvelles potentialités pour la conception de géométries complexes, non-euclidiennes, décrites mathématiquement par des courbes et surfaces NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) et dont la modélisation manuelle était jusqu'alors une tâche difficile (Kolarevic, 2003). Dans le même temps, la fabrication numérique a rendu abordable techniquement et économiquement, par sa grande flexibilité, la production de nouveaux produits non-standards rompant ainsi avec les logiques sérielles standardisées en se tournant vers le concept de production de masse personnalisée (Pine et al., 1993). Ces potentialités font évoluer, orientent et questionnent la pensée architecturale dont le lien avec les techniques de représentation et de construction est étroit comme le souligne William Mitchell lorsqu'il précise que « *les architectes dessinent ce qu'ils peuvent construire et construisent ce qu'ils peuvent dessiner* » (Mitchell, 1995).

L'exploration des opportunités de liberté formelle émergeant de l'utilisation conjointe des outils de conception et de fabrication numériques produit des composants, pavillons et bâtiments partageant une complexité architecturale et structurale et proposant de nouvelles spatialités. Ces explorations hybridant architecture et technologie et s'inscrivant comme des « *alternatives à la logique de répétition* » (Oxman, 2006), se regroupent sous la dénomination d'architectures non-standards (Silvestri, 2009). Si ces architectures peuvent être interprétées, parfois à juste titre, comme une conception dont le but unique est la complexité formelle, esthétique, symbolique et d'une apparente « *gratuité* », recherchée au détriment des exigences fonctionnelles et constructives, elle s'inscrit au contraire dans une visée d'une plus grande cohérence entre formes, fonctions, matériaux et techniques de fabrication.

Ainsi, dans les années 1990, Greg Lynn théorise cette recherche formelle en définissant l'architecture comme un « *système d'organisation dynamique* » où « *la forme est déterminée par l'information* » (Lynn, 1999). Cette définition fait écho à la notion de conception paramétrique (Frazer, 2016) basée sur la pensée algorithmique qui permet la mise en relation d'un ensemble de paramètres indépendants, combinés par des règles opératoires, interagissant de manière non prédéterminée,

² Toutes les traductions présentées dans ce manuscrit sont celles de l'auteur

pour donner comme résultat un ensemble de réponses optimisées vis-à-vis de ces paramètres couplés (Silvestri, 2009). Les formes générées par ces processus de conception sont une réponse des formes souples, continues et fluides à un flux informationnel de données physiques, énergétiques, productives, organisationnelles ou encore programmatiques. Ces formes se composent de géométries courbes et asymétriques, naturellement complexes car « *libres des à priori formels* » (Oxman and Oxman, 2010). Les observations de D'Arcy Thompson dans son ouvrage *On Growth and Form* (Thompson, 1945) explique le rôle de la physique et de la mécanique dans la constitution des formes complexes des organismes vivants et met en évidence le lien existant entre complexité géométrique et efficacité fonctionnelle, retrouvé dans les approches non-standard. L'esthétique et la complexité géométrique ne sont pas conçues comme telles mais deviennent une propriété émergente des formes générées.

L'utilisation d'une logique paramétrique en conception architecturale n'est cependant pas directement associée à une utilisation du numérique et se retrouve dans les processus expérimentaux d'auto-façonnage de formes architecturales privilégiées par des architectes de l'ère pré-numérique tels que Antoni Gaudí, Frei Otto, Félix Candela ou encore Pier Luigi Nervi. La recherche d'une forme optimisée, d'un point de vue structurel pour minimiser la consommation de matière mise en œuvre, se construit alors par la définition de règles de composition déformant un modèle souple en réponse à des sollicitations, paramètres définis par le concepteur. La puissance de calcul des ordinateurs rend désormais davantage accessibles ces approches par le gain de temps qu'elle procure et permet, lorsqu'il est nécessaire, de combiner aisément de multiples critères de performances en traitant un grand ensemble de données.

L'intérêt de l'approche non-standard pour notre travail est double. Premièrement, la conception paramétrique est, par définition, une opportunité pour la conception d'architectures répondant à des exigences fonctionnelles cohérentes avec les enjeux environnementaux, sociétaux et économiques contemporains, particulièrement la diminution de l'énergie consommée par les bâtiments et la minimisation de la consommation de matériaux de construction. L'architecture ne se limite pas à une simple représentation (Chupin and Simonnet, 2006) mais se doit, au contraire, d'exister matériellement en se liant aux technologies, matériaux et contraintes de la construction. L'intégration de ces contraintes devient essentielle dès la morphogénèse du projet pour assurer la transcription physique rationnelle de ces architectures et de leurs composants non-standard et ainsi éviter des efforts, impacts environnementaux et coûts excessifs dans les processus de fabrication des formes complexes si ceux-ci ne sont pas maîtrisés. Le choix des matériaux de construction induit alors des techniques de fabrication spécifiques et oriente l'interprétation constructive des formes complexes dans un champ d'application défini. Formes, fonctions, matériaux et techniques de fabrication s'influencent mutuellement dès les premières étapes du processus de conception (Menges et al., 2016).

Un second intérêt est le lien privilégié entre l'architecture non-standard et le bois, matériau à usage structurel, naturel et renouvelable, s'inscrivant depuis plusieurs décennies comme un matériau à fort potentiel grâce à l'association de la construction en bois et de la fabrication numérique. La prise de conscience environnementale favorise l'utilisation légitime et croissante du bois en construction dans le même temps où les approches non-standard en explorent l'étendue des possibilités techniques et esthétiques pour de nouveaux usages.

b. Fabrication numérique et construction en bois

Le déploiement des outils de fabrication numérique dans le secteur de la construction en bois, concomitant avec une préservation du travail manuel et une utilisation des machines-outils, constitue un support technologique favorisant l'exploration de nouvelles approches pour la transformation du matériau bois.

Le transfert du traitement d'informations aux machines avec le développement des machines-outils à commande numérique et de la robotique permet désormais l'automatisation de processus formalisés complexes (Schindler, 2007). Deux caractéristiques émergent de ce transfert et définissent ces technologies : la grande flexibilité de production, la vitesse de traitement n'étant pas reliée à l'hétérogénéité des pièces d'une série de la dite production, et la gamme étendue des mouvements des machines, dépassant de loin les machines-outils, et facilitant ainsi la réalisation de pièces aux géométries complexes. Si les machines-outils à commande numérique triaxiales peuvent être considérées comme une simple automatisation des machines-outils par la faible étendue des mouvements d'outils, les bras robotiques accentuent l'exploration de nouvelles opportunités, dans la fabrication soustractive de composants comme dans l'assemblage de ces derniers (Eversmann et al, 2017). Avec l'utilisation de ces technologies et outils dits *de l'information*, les pratiques artisanales de l'homme mutent, quittant le rôle de processeur qu'il occupe en travaillant manuellement la matière et prenant le rôle d'un concepteur de processus (Schindler, 2007). Ainsi, la complexité de fabrication est gérée dans la conception du processus et non plus lors du processus en lui-même.

La tendreté du matériau bois, sa capacité associée à être facilement transformé, sa disponibilité et son emploi à usage structurel a, depuis 8000 avant J-C (Gould and Lewontin, 2020; Schindler, 2009), conféré à ce matériau une place privilégiée parmi les matériaux de construction. Le déplacement de la gestion des complexités de fabrication au niveau de la conception du processus participe aujourd'hui à la redécouverte des potentiels de ce matériau et l'employant sous deux formes :

- Une forme peu transformée basée sur le respect de la complexité anatomique et des limites dimensionnelles de l'arbre ;
- Une forme basée sur l'emploi de produits dérivés du bois, notamment sous le format de panneaux reconstitués ou de produits linéaires lamellisés, adaptés à des standards industriels.

La diversité des produits de la forêt pour la construction comme les nouvelles approches développées pour leur traitement nourrissent le développement de nouvelles tectoniques architecturales. Le concept de tectonique, défini par Kenneth Frampton comme le *rapport existant entre une idée conceptuelle et les moyens techniques de sa matérialisation physique* (Frampton, 1995), se voit ainsi naturellement influencé par un matériau, le bois, des outils de conception paramétrique et des moyens de fabrication numérique. Par les articulations de cette relation, le langage architectural tend à s'exprimer à travers des modes constructifs créatifs et rationnels en se construisant en cohérence avec un continuum informationnel numérique liant un processus de conception à un processus de fabrication. Les géométries du bois et de ses matériaux dérivés, cylindriques, lorsqu'il respecte la géométrie de l'arbre, ou orthogonales, lorsqu'il est transformé, rompt par nature avec les géométries complexes des surfaces continues, formes des approches non-standards. Cette relation entre la discontinuité de l'assemblage d'éléments simples et continuité de formes complexes construit une nouvelle tectonique architecturale en bois, intégrant et tirant parti des singularités du matériau et des

moyens de fabrication numériques soustractifs ou formatifs pour la conception de nouveaux systèmes constructifs en bois (Bignon et al., 2021; Buri and Weinand, 2011; Menges et al., 2016).

La relation entre forme et structure ne se suffit cependant pas à elle-même et doit composer avec une superposition de couches supplémentaires pour former une enveloppe complète, pouvant engendrer un fort degré de complexité dans la conception, l'interaction et la réalisation fragmentée des couches structurelles, thermiques ou de revêtement rompant avec le gain de cohérence initialement promis. De même, l'utilisation d'une multitude d'outils numériques isolés et spécifiques à des méthodes de travail segmentées remet en cause le concept de continuum informationnel numérique liant conception et fabrication de manière fluide, continue et dynamique (Picon, 2010).

Malgré ces difficultés, le contexte de la large adoption des technologies de fabrication numérique par les entreprises de la construction en bois engage et favorise un lien avec la conception d'architectures non-standards. Notre réflexion, par cette recherche, renvoie à l'étude de la relation entre conception architecturale et exploration des potentiels associés à de nouvelles conceptions de processus de fabrication par l'étude de l'utilisation de la fabrication additive dans les pratiques de la construction en bois.

Récemment introduite dans le secteur de la construction mais absente des pratiques courantes de la construction en bois, la fabrication additive étend les limites des moyens de fabrication, soustractifs et formatifs, par la liberté formelle accrue et la multifonctionnalisation qu'elle permet en projetant la production d'architectures et de composants architecturaux, « *numériquement intelligents* », dans le sens où ils n'auraient pu être conçus et construits sans outils numériques (Bressani et al., 2019).

c. Fabrication additive et Stratoconception®

Les premières applications d'une fabrication additive dans l'industrie de la construction pour la réalisation de composants architecturaux ou d'architectures complètes reposent sur la mise à l'échelle de procédés initialement conçus pour la réalisation de pièces de petites dimensions. Les motivations de l'adoption de ces technologies dans les pratiques courantes se concentrent principalement sur des gains de productivité et de sécurité des travailleurs, sur une réduction des déchets produits et encore sur une réduction du coût de production de pièces complexes. Ces motivations correspondent également aux principaux défis de l'automatisation dans la construction et de l'adoption de la fabrication numérique. Aujourd'hui, l'utilisation de la fabrication additive est souvent limitée à ces défis fondamentaux, mais elle ne « *remodèle pas la façon dont nous concevons les composants architecturaux* » (Rael and San Fratello, 2011). Selon Labonnote et al, un changement de paradigme architectural explorant les potentiels inhérents à la fabrication additive est nécessaire pour améliorer les approches actuelles de conception (Labonnote et al., 2016).

Des travaux de recherche explorent cependant les opportunités offertes par ces nouvelles technologies. Par exemple, le projet *Smart Slab* porté par les équipes de l'ETH Zurich expérimente les opportunités de complexité formelle et de personnalisation de masse permises par la réalisation de moules par fabrication additive (Meibodi et al., 2018). *Smart Slab* est une dalle associant dans sa conception les propriétés structurelles du béton et la liberté géométrique de la fabrication additive pour créer des composants architecturaux présentant un fort degré d'optimisation et d'ornementation

tout en intégrant dans sa structure évidée des fonctions supplémentaires telles que les réseaux électriques les protections incendies ou l'éclairage.

Le matériau bois est utilisé dans plusieurs procédés de fabrication additive (Buschmann et al., 2021; Krapež Tomec and Kariž, 2022; Kromoser et al., 2022) mais les applications à l'échelle de la construction reposent aujourd'hui principalement sur d'autres matériaux sous forme liquide ou de poudre :

- à base cimentaire (Bos et al., 2016; Buswell et al., 2007; Khoshnevis, 2004; Pegna, 1997),
- à base de terre (Dubor et al., 2018; Veliz Reyes et al., 2018) ;
- à base de sable (Meibodi et al., 2018) ;
- à base de polymères (Rael and San Fratello, 2011) ;
- à base de métal (Gardner et al., 2020).

L'exploration de nouvelles potentialités pour l'architecture non-standard en bois construite par fabrication additive induit donc l'adaptation de nouveaux procédés à l'échelle de la construction. Notre recherche s'intéresse alors particulièrement au procédé de Stratoconception[®], présentant une forte capacité d'adaptation aux moyens techniques et matériels de la construction en bois.

Le partage de moyens techniques, les machines à commande numérique triaxiales et matériels standards, les panneaux en bois, conforte notre intérêt à associer architecture non-standard, construction en bois et Stratoconception[®] pour amener de nouvelles opportunités de conception et de fabrication de composants pour l'architecture en bois répondant à des exigences fonctionnelles cohérentes avec des enjeux contemporains.

B. Positionnement de la recherche

a. Objectifs

Le développement de l'architecture suit un cycle itératif, où les nouvelles technologies sont développées pour surmonter des limites persistantes en établissant de nouveaux paradigmes de conception avec leurs propres limites (Caetano and Leitão, 2020). Dans ce contexte, la Stratoconception[®] est une nouvelle technologie prometteuse pour dépasser les limites actuelles de l'architecture en bois, particulièrement par le gain de liberté formelle et par les opportunités de multifonctionnalisation qu'elle apporte. Néanmoins, l'utilisation de ce procédé se confronte à des problématiques qu'il est nécessaire de comprendre, étudier et traiter, lorsque cela est possible, pour assurer sa faisabilité et faciliter son implémentation dans des pratiques courantes pour ainsi rendre accessible la réalisation de composants architecturaux non-standards sans engendrer des répercussions organisationnelles dans les processus de production de la construction en bois.

Compréhension des implications d'une utilisation en architecture

La Stratoconception[®] en architecture se limite à la réalisation de maquettes et de prototypes (Poirier et al., 2000) et ne s'applique pas, jusqu'à présent, à la conception et à la fabrication de composants architecturaux fonctionnels et, particulièrement, à usage structurel. Il est ainsi nécessaire d'identifier les opportunités, les limites et les défis de l'utilisation de ce procédé pour l'architecture en bois particulièrement au regard des gains de liberté formelle et de la multifonctionnalisation des

composants qu'il apporte. Une recherche expérimentale doit être menée pour enrichir une base de connaissances, à la fois des mécanismes du processus de conception architecturale orientée vers une fabrication par Stratoconception® ainsi que du champ d'application de ses produits.

Compréhension des implications du changement d'échelle du procédé

L'utilisation du procédé par la construction en bois implique un changement d'échelle dimensionnelle ; la Stratoconception® est aujourd'hui majoritairement employée pour la réalisation de pièces de petites et moyennes dimensions pour l'industrie, d'un ordre de grandeur du mètre, là où les besoins en métrologie et les contrôles qualités sont maîtrisés. L'échelle de la construction, qui présente un ordre de grandeur de plusieurs mètres, conduit à un changement d'échelle du degré de précision, des tolérances plus grandes pouvant être acceptées, rompant ainsi avec la précision induite par les opérations de micro-fraisage du procédé. Les capacités dimensionnelles des machines de la construction en bois leur permettent de réaliser des pièces de grandes dimensions ; les machines et leurs capacités dimensionnelles ne sont ainsi pas identifiées comme une problématique de l'adaptation du procédé de Stratoconception® à l'échelle de la construction bien que des adaptations des méthodes et outils soient à prévoir. Une recherche portant sur l'identification des données impactées par ce changement d'échelle ainsi que sur la rationalisation des systèmes constructifs associés à une fabrication par Stratoconception® de composants de grandes dimensions tels que des parois doit être menée pour assurer la faisabilité du changement d'échelle, particulièrement au regard de la consommation et des pertes de matière et sur les coûts de production.

Développement de méthodes de conception

L'utilisation de la Stratoconception® se limite principalement à la fabrication de prototypes ou d'outillages pour l'industrie bien que des exemples de réalisation d'œuvres d'art existent. Ce champ d'application implique que la pièce finale ne sera pas réalisée directement par Stratoconception®. Par conséquent, la conception du processus de fabrication par Stratoconception® est indépendante de la conception des objets eux-mêmes, destinés à être réalisés par d'autres procédés de fabrication. Cependant, les approches non-standards en architecture soulignent le lien étroit existant entre les techniques de fabrication et la conception d'objets à construire, rendant nécessaire l'intégration des opportunités et contraintes de fabrication dès les premières étapes de la conception. Ainsi, des méthodes de conception spécifiques à un usage de la Stratoconception® en architecture, ingénierie et construction doivent être développées pour guider les acteurs du projet vers une conception rationnelle.

Automatisation de tâches non créatives

Le processus de fabrication par Stratoconception® est conçu par une combinaison d'opérations successives nécessitant chacune des interventions manuelles du concepteur, rendues nécessaires par la grande liberté de conception du processus, liée à la grande variété d'objets réalisables. Cette grande dépendance à des choix du concepteur induit un risque de conception non optimale et chronophage, particulièrement dans le cas de typologies de pièces réalisées en série avec fort degré de personnalisation propre à chaque unité. Ainsi, des typologies de composants architecturaux réalisables par Stratoconception® doivent être identifiées et caractérisées pour mettre en place des stratégies d'automatisation des opérations, non créatives, communes à chaque typologie.

Développement d'une continuité informationnelle numérique

Les pratiques numériques associées à la mise en relation d'une conception paramétrique à une fabrication numérique induisent la mise en place d'un continuum informationnel numérique cohérent entre les différentes étapes du processus créé. Cependant, les outils de conception du processus de fabrication par Stratoconception® ne garantissent pas un dialogue aisé avec les outils de conception utilisés en architecture, ingénierie et construction. Le développement d'une continuité informationnelle numérique adaptée à la pluridisciplinarité des acteurs d'un projet et aux données utilisées et échangées au cours de celui-ci est nécessaire pour assurer la faisabilité de l'intégration de cette nouvelle technologie dans les pratiques courantes de l'architecture et la construction en bois.

La recherche développée dans cette thèse répond alors à deux objectifs principaux :

1. Le premier est de constituer une base de connaissances, orientée vers des enjeux identifiés, des mécanismes, des problématiques et des limites de l'utilisation de la Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et la construction en bois.
2. Le second est de proposer des outils et des méthodes pour faciliter l'implémentation de la Stratoconception® dans les pratiques courantes de l'architecture et la construction en bois.

b. Méthodologie

Afin d'appréhender, visualiser et analyser les mécanismes du processus de conception et de fabrication de composants architecturaux par Stratoconception® une phase d'expériences est indispensable. La recherche menée par l'auteur se base alors sur une méthode axée sur la pratique de conception et de fabrication de composants architecturaux. Selon Schon, la pratique permet une action réflexive sur l'action et dans l'action (Schon, 1984). Cette double réflexion crée une conversation entre l'analyse critique et la nature créative de la pratique. Les propositions de solutions de la pratique sont temporaires mais nécessaires pour la caractérisation et la formalisation de problèmes qui participent à la construction de solutions généralisées. Ces expérimentations visent la production d'artefacts, résultats d'activités de conception, de prototypage et de fabrication de preuves de concept et de démonstrateur.

Les résultats de l'analyse de la phase d'expérimentation guident le développement d'outils et la proposition de méthodes de conception pour une fabrication par Stratoconception® qui ont pour objectifs l'accompagnement du concepteur dans ses prises de décision et ainsi l'augmentation de la capacité d'implémentation du procédé dans les pratiques courantes de l'architecture et la construction en bois.

c. Plan de thèse

La recherche développée dans cette thèse est présentée en trois parties décomposées en sept chapitres.

La **première partie** est une étude bibliographique se rapportant à la compréhension de l'attrait de l'utilisation de la fabrication additive et particulièrement de la Stratoconception® comme moyen de production de l'architecture en bois. Les opportunités d'implémentation du procédé dans les pratiques

de la construction en bois sont présentées et les spécificités de la conception architecturale pratiquée dans un environnement paramétrique identifiées.

La **seconde partie** synthétise l'approche expérimentale menée dans nos travaux dans le but d'enrichir la base de connaissances construite dans l'étude bibliographique et présente notre proposition d'un modèle théorique de méthode de conception de composants architecturaux pour la fabrication par Stratoconception®.

La **troisième partie** regroupe les travaux liés à l'implémentation de la méthode proposée, au développement d'outils d'aide à la conception adaptés aux phases amont du projet d'architecture ainsi qu'à l'automatisation des tâches non-créatives pour la conception de composants d'une typologie spécifique. Ces travaux s'articulent autour de deux cas d'application, de petites et grandes dimensions, de typologie et de fonctions différentes : les parois et les nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels. Nous discutons les résultats de l'étude comparative de systèmes constructifs associés à une fabrication de parois par Stratoconception® et nous présentons notre proposition d'automatisation des tâches non-créatives de la conception du processus de fabrication par Stratoconception® de nœuds d'assemblage en bois. Les travaux relatifs à la mise en place d'une continuité informationnelle numérique dans le processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux sont présentés. L'inscription de la méthode proposée dans un continuum informationnel numérique est discutée et des solutions sont proposées.

Enfin, la **conclusion** de ce travail présente les contributions et les limites de notre recherche. Nos contributions, par les résultats apportés, à la connaissance permettent de définir des perspectives de développement pour la conception, la fabrication et la construction par Stratoconception® d'architectures non-standards en bois.

Partie 1. Étude bibliographique

Ce travail de recherche répond à deux objectifs principaux que sont la constitution d'une base de connaissances des mécanismes et des problématiques de l'utilisation de la Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et la construction en bois ainsi que la proposition d'outils et de méthodes facilitant l'utilisation de ce procédé dans des pratiques courantes. Pour répondre à ces objectifs, nous proposons une étude bibliographique se rapportant à la compréhension des principaux enjeux de l'utilisation de la fabrication additive dans le secteur de l'architecture en bois, du lien existant entre le procédé de Stratoconception® et les pratiques de la construction en bois (**chapitre 1**) et des spécificités du processus de conception architecturale paramétrique en comparaison aux pratiques industrielles dans lesquelles s'inscrit actuellement le procédé de Stratoconception® (**chapitre 2**).

Chapitre 1. **Attrait de la Stratoconception® pour l'architecture et la construction en bois**

La fabrication additive, adoptée dans l'industrie manufacturière depuis plusieurs décennies a récemment été introduite dans le secteur de la construction et de l'architecture. Communément considérée comme une technologie de rupture par la levée de limites courantes de fabrication qu'elle procure, la fabrication additive, qui s'est dans un premier temps appliquée au prototypage, se développe aujourd'hui pour la production directe de pièces fonctionnelles, en particulier pour le secteur de l'architecture et la construction.

Ce premier chapitre porte un regard sur l'attrait de l'utilisation du procédé de fabrication additive par couches solides de Stratoconception® pour l'architecture et la construction en bois. Premièrement, nous décrivons les opportunités qu'apporte cette technologie pour l'architecture en bois. Pour cela, nous porterons un regard sur le concept de stratification architecturale et discutons la valeur de la strate en architecture. Nous continuerons en présentant le procédé de Stratoconception® puis en identifiant les opportunités, potentielles et développées, de l'utilisation de la fabrication additive par le domaine de l'architecture et de la construction. Une deuxième partie se concentrera sur la confrontation du procédé de Stratoconception® aux moyens techniques et matériels de la construction en bois, ainsi qu'à l'échelle dimensionnelle requise par la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions. L'étude de la dimension constructive d'architectures construites par strates de bois nous permettra d'identifier des enjeux associés à ce changement d'échelle. Nous montrerons, dans ce premier chapitre, en quoi l'utilisation du procédé de Stratoconception® peut influencer sur la conception et la production d'architectures et de composants architecturaux en bois par les opportunités qu'elle procure tout en soulevant des premiers enjeux liés à cette utilisation.

1.1 Opportunités de la Stratoconception® pour l'architecture en bois

Le procédé de Stratoconception® repose sur la stratification numérique d'une géométrie complexe tridimensionnelle en un ensemble de strates élémentaires et complémentaires. Dans le domaine de l'architecture, le terme « *strate* » s'applique à de nombreux concepts, particulièrement dans les techniques et les systèmes constructifs. Dans cette partie, nous évoquerons cette multiplicité de concepts liés au terme « *strate* » puis porterons un regard sur l'architecture construite par strates en abordant plusieurs exemples construits et en relevant la valeur architecturale de la strate qu'ils mettent en avant. Le concept de Stratoconception® puis les opportunités que ce procédé de fabrication additive offre pour la conception architecturale seront décrits.

1.1.1 L'architecture construite par strates de bois

1.1.1.1 Stratification et architecture

La projection orthographique, c'est-à-dire la génération de plans et de coupes, est l'un des outils essentiel de représentation, de conception et de communication dont disposent les architectes, les ingénieurs et les constructeurs. L'environnement bâti, composé d'objets architecturaux tridimensionnels, a ainsi été historiquement conçu comme une composition d'un ensemble de sections planes caractéristiques, horizontales et verticales, décrivant l'organisation spatiale de ses différentes fonctions.

Cette notion de sectionnement se retrouve, en s'associant à la notion d'empilement, dans les processus de représentation physique de pièces aux géométries complexes pour la photosculpture et la topographie dans la seconde partie du XIX^e siècle (Bourell et al., 2009). Le sectionnement est également présent en architecture dans la conception de systèmes constructifs : plutôt que de construire directement la surface des parois d'un édifice elle-même, des nervures, profils assurant une fonction structurelle, sont répétées de manière sérielle pour servir de support à la matérialisation de cette surface (Iwamoto, 2013). Les nervures servent de support pour les composants de l'enveloppe avec lesquels elles assurent conjointement les différentes fonctions de la paroi en décrivant la surface de cette dernière quelle qu'en soit la complexité géométrique. La strate est importante dans la conception et dans la construction d'un bâtiment car elle contribue à définir l'esthétique générale et l'intégrité structurelle du bâtiment. À cette notion de sectionnement, nous pouvons associer le terme de stratification, les nervures se définissant comme un ensemble de strates espacées les unes des autres. Bien que n'y étant pas spécifique, ce système constructif est particulièrement adapté pour la matérialisation de géométries complexes, à double courbure, dont les nervures se répètent selon une ou plusieurs directions (Figure 1).



Figure 1. Stratification selon deux directions de la géométrie complexe du projet Metropol Parasol de Séville. D'après (Bignon, 2021).

L'utilisation du terme de « stratification » ne se limite pas à ces exemples. (Bignon et al., 2021) utilisent le terme de stratification dense pour décrire l'abri de la tourbière de Bertrichamps, « dont la structure se situe entre une combinaison de colonnes en éventail formant portique et une enveloppe à claire-voie formant coque ». La fréquence des sections nécessaires pour approcher la géométrie de la surface initiale entraîne une intensification visuelle des matériaux. L'architecte s'appuie sur la stratification pour construire une relation entre forme, espace, structure et matériau. La stratification se lit à l'échelle de l'objet architectural construit mais se retrouve également à l'échelle des composants architecturaux. Philibert de l'Orme propose une charpente à bois court composé de plusieurs couches

de planches de bois discontinues à joints alternés, ouvrant la porte au principe de stratification structurelle (De l'Orme, 1979) que l'on retrouve dans la fabrication de produits d'ingénierie du bois tels que le bois lamellé-collé.

Ces différents exemples, non exhaustifs, d'utilisation de la notion de strate dans le vocabulaire architectural, illustrent la multiplicité de définitions et de concepts pouvant s'y rattacher. Pour la suite de nos travaux, nous considérons la strate comme tout « *matériau disposé, ou étalé pour créer une surface* » (ISO/ASTM, 2021). De même, nous adoptons pour l'architecture construite par strates la définition de la fabrication additive comme décrite dans la norme ISO/ASTM 52900:2021 : la fabrication additive (FA) est définie comme « *un procédé d'assemblage de matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèles tridimensionnels, en général couche après couche, à l'inverse des méthodologies de fabrication soustractive et de fabrication mise en forme* » (ISO/ASTM, 2021).

1.1.1.2 Valeurs architecturales de la strate

Nous avons montré en introduction que le développement et l'adoption des outils numériques de modélisation et de fabrication ont motivé l'exploration de nouvelles conceptions par une série d'architectes qui se sont libérés des contraintes des géométries euclidiennes pour proposer des formes résolument complexes, se construisant de manière tridimensionnelle. L'association des machines à commande numérique d'usinage triaxial ou des découpes laser avec les capacités géométriques des outils de modélisation a abouti à la représentation physique de ces formes résolument complexes au moyen d'une série de strates, couches complémentaires et contiguës issues du sectionnement de la forme modélisée. Dans *Terre Meuble*, Cache présente ainsi un tore plissé (Figure 2) dont la géométrie complexe est réalisée par le découpage de strates dans des bruts d'usinage en panneaux multi-ply, par leur assemblage puis par leur usinage sur une machine à commande numérique (Cache, 1996).



Figure 2. *Tore plissé réalisé par l'assemblage de strates découpées puis usinées (Cache, 1996)*

Cette technique de représentation s'est transformée en technique de construction employée pour la réalisation d'éléments de mobiliers, de composants architecturaux, et de microarchitectures éphémères. Dans la plupart des projets architecturaux, des panneaux en bois sont découpés puis empilés, au même titre qu'une strate topographique, pour représenter la géométrie modélisée numériquement. Les strates peuvent être contiguës, chaque strate reposant sur une précédente ou alternées, une strate « vide » séparant deux strates « pleines ». Ainsi Kengo Kuma, dans un projet d'aménagement intérieur, empile des panneaux en bois pour orienter l'espace et la circulation, créant par la forme dessinée un espace où le sol, le plafond et les murs s'associent pour former le mobilier. L'espacement des strates souligne alors la stratification et confère à l'espace une légèreté apparente (Figure 3). Dans le projet *One Main Street* de rénovation de bureau, deCOI Architects tirent parti de

l'esthétique de la complexité formelle permise par l'utilisation des outils de modélisation paramétrique et des contraintes liées au manque de moyens techniques des entreprises de charpente, limités à des machines à commande numérique triaxiales. La géométrie complexe de la charpente est discrétisée en un ensemble de strates espacées d'une unité les unes des autres et dont le profil est usiné en trois dimensions pour suggérer une continuité visuelle conservée malgré les espacements assumés (Figure 3).



Figure 3. Espacement des strates soulignant la technique constructive. Projet d'aménagement intérieur conçu par Kengo Kuma (à gauche) et de rénovation de bureaux conçue par deCOI Architects (à droite). Disponibles à l'adresse : <https://urlz.fr/nAg8> et à l'adresse : <https://urlz.fr/nAge> [Consultées le 13 septembre 2023]

Kengo Kuma explore le potentiel de cette technique de fabrication à l'échelle de la microarchitecture dans le projet *Sazae* de conception d'un sauna, rompant avec l'horizontalité et la verticalité traditionnelles de ces objets architecturaux en proposant une nouvelle qualité spatiale associée au concept d'espace englobant, souvent utilisé pour créer une impression de vie privée, de sécurité et d'intimité de l'espace. Une lumière zénithale se reflète sur les joints stratigraphiques des strates empilées dont le profil est découpé en 2D, c'est-à-dire en utilisant uniquement deux axes de découpe (X et Y), créant un jeu d'ombres et de lumières soulignant la technique constructive utilisée et générant des textures et des motifs naturels donnant une impression de chaleur au bâtiment (Figure 4).

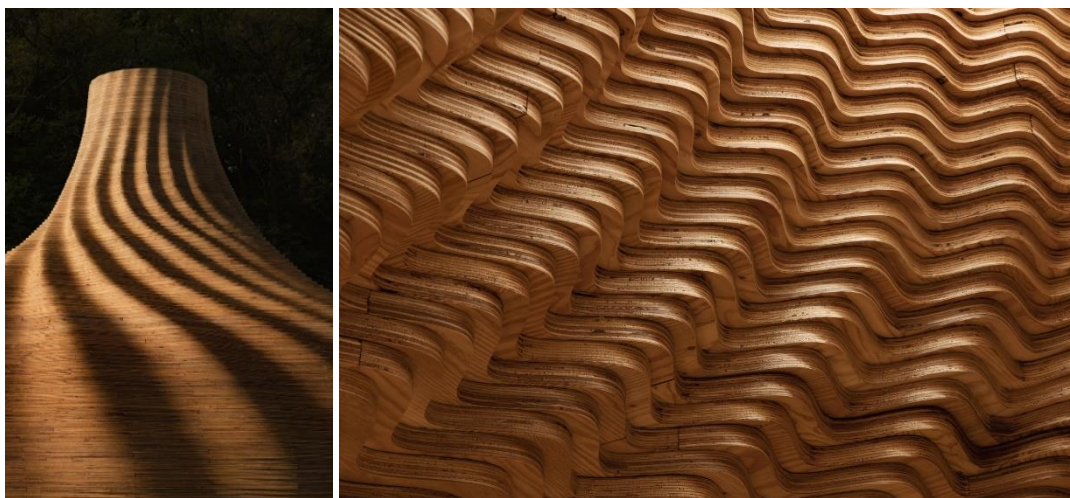


Figure 4. Jeux d'ombres et de lumières générés par la forme du projet *Sazae* à Sana Mane au Japon (à gauche) et par la technique de construction par empilement de strates au profil découpé en 2D (à droite). Disponibles à l'adresse : <https://urlz.fr/nAgb> [Consultée le 13 septembre 2023]

D'un point de vue technique, chaque strate peut se voir attribuer différentes fonctions, telles que le soutien structurel, l'isolation, la résistance aux intempéries ou l'attrait esthétique. L'utilisation des strates comme parois fonctionnelles dans le projet *Sazae* permet l'intégration de dispositifs de ventilation dans des vides usinés des strates et d'assises pour l'aménagement de l'espace, ajoutant d'autres fonctions aux fonctions primaires de la strate que sont le soutien structurel et leur expression esthétique. Nous retrouvons cet usage multifonctionnel de la strate dans le projet *Mafoombey* conçu par l'Université de technologie d'Helsinki qui consiste en un espace acoustique caveaux de forme libre évidé au sein d'un volume cubique composé de cartons ondulés découpés et empilés (Marcos, 2011). La géométrie des strates est découpée de manière à intégrer des équipements électroniques et des assises.

Dans ce dernier projet, l'épaisseur des strates est faible en comparaison aux dimensions du projet et crée ainsi une surface intérieure, visuellement continue malgré la découpe 2D du profil des panneaux. Pour retrouver cette continuité en utilisant des panneaux en bois dont les épaisseurs sont plus importantes que celles des cartons, le projet *Body* de création d'un espace de déambulation conçu par *Eichinger Offices* est réalisé par l'assemblage de strates et par un usinage 5 axes des profils concaves et convexes des strates. La lecture de la technique constructive n'est alors visible que par la texture des lamelles constituant les panneaux et non plus par les joints stratigraphiques des strates. Le degré de discrétisation du modèle numérique lors de sa construction physique impacte directement l'aspect final du projet architectural, de faibles épaisseurs de stratification induisant une continuité visuelle là où de grandes épaisseurs apportent un effet d'escalier contribuant, nous l'avons montré dans le projet *Sazae*, à l'esthétisme global du projet par les jeux de lumières qu'il apporte.



Figure 5. Fine discrétisation du modèle numérique dans sa matérialité physique apportant une continuité visuelle du profil des strates : par utilisation de strates de faible épaisseur dans le projet *Mafoombey* (à gauche) et par utilisation d'un usinage 5 axes dans le projet *Body* (à droite). Disponibles à l'adresse : <https://urlz.fr/nAgj> et à l'adresse : <https://urlz.fr/nAgs> [Consultées le 13 septembre 2023]

Ces différents exemples, non exhaustifs, nous montrent que la strate s'exprime à des fins architecturales. Les lignes créées par les strates orientent et structurent l'espace architectural : les hautes strates verticales donnent une impression de monumentalité, tandis que les longues strates horizontales donnent une impression de stabilité. L'architecture en strates permet de s'affranchir de la nécessité de penser à des éléments distincts tels que les murs, le sol ou le toit, car il s'agit plutôt d'une structure continue qui englobe l'espace. À ce jour, l'architecture construite par strates de bois se limite à des objets architecturaux éphémères, à des revêtements, à des sculptures ou à des décorations, décorrélés les uns des autres. La strate n'est cependant pas utilisée pour réaliser des composants architecturaux fonctionnels, à usage structurel dans des projets habitables.

1.1.2 Le procédé de Stratoconception®

Sans y faire directement référence, l'architecture construite par strates partage des concepts propres à la fabrication additive et particulièrement à la Stratoconception®, procédé breveté de stratification de couches, particulièrement de couches en panneaux de bois, qui se développe dans des pratiques industrielles, dépassant le caractère exploratoire de l'utilisation de la strate en architecture.

1.1.2.1 Positionnement de la Stratoconception® comme procédé de fabrication additive à base de bois

La démocratisation, dans la seconde moitié du XX^e siècle, de l'utilisation des machines-outils à commande numérique et des outils de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) dans les pratiques industrielles a mené à l'émergence du concept de prototypage rapide (PR), répondant aux difficultés de représentation de géométries difficilement réalisables avec des méthodes de fabrication conventionnelles et aux difficultés de production de prototypes, limitant les capacités de développement de produits industriels par les coûts et la latence qu'ils engendrent. Le prototypage rapide regroupe un ensemble de technologies pour produire, à partir d'un modèle numérique, des pièces dans un temps restreint en limitant les interventions humaines (Pham and Gault, 1998). Parmi ces technologies, nous retrouvons les procédés de fabrication additive classés en sept familles (ISO/ASTM, 2021) et définis par l'état de matière constituant les couches et par leur procédé de dépôt (Figure 6).

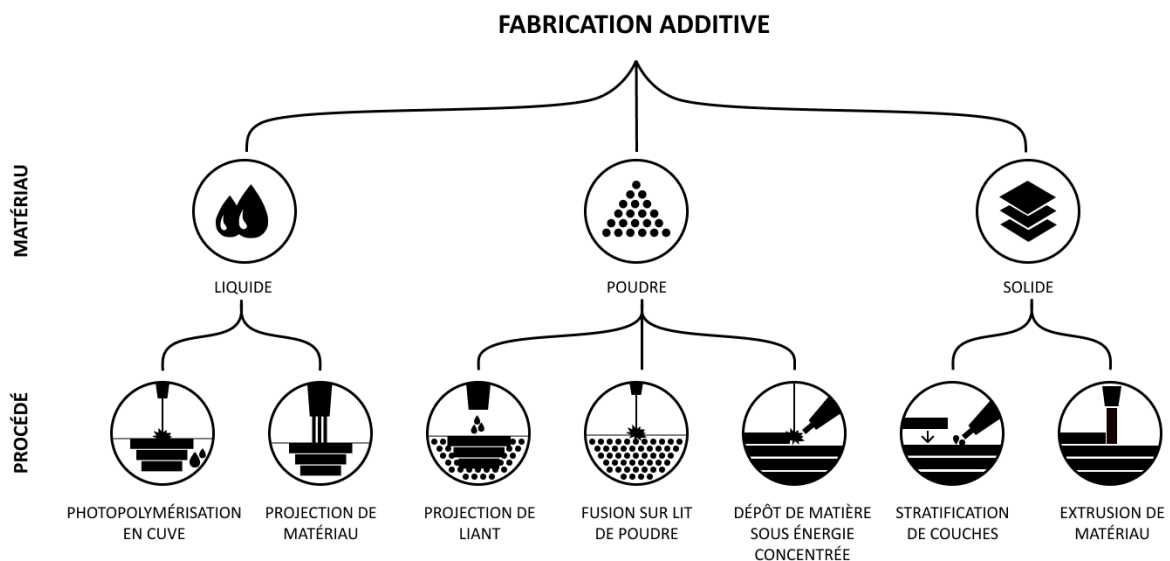


Figure 6. Classification des sept familles de procédés de fabrication additive normalisés par l'ISO/ASTM 52900:2021 (ISO/ASTM, 2021) par l'état physique de leur matériau de base. Illustrations adaptées de (Wiberg, 2021).

S'inscrivant comme une pratique numérique d'aide à la décision, le prototypage rapide se limite à une représentation intermédiaire d'une partie ou de l'entièreté du produit final. Le gain de maturité des procédés, leur intégration progressive dans les pratiques industrielles et l'intérêt croissant pour la réalisation des pièces fonctionnelles orientent, dans les années 1990 et jusqu'à aujourd'hui, des développements vers l'outillage rapide puis vers la fabrication additive directe, sans outillage, de produits finis et fonctionnels.

L'utilisation du matériau bois dans les procédés de fabrication additive pour la réalisation de pièces de petites dimensions, d'un ordre de grandeur s'étendant du décimètre au mètre, est aujourd'hui bien établie dans les procédés *Fused Deposition Modelling (FDM)* et *Fused Filament Fabrication (FFF)* où des particules de bois sont incorporées dans une matrice de polymères thermoplastiques tels que l'acide polylactique (PLA) ou l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) (Krapež Tomec and Kariž, 2022).

Ces procédés ont connu un développement important pour des applications de bureaux mais la réalisation de composants de grandes dimensions à usage structurel reste aujourd'hui un enjeu peu abordé. Nous pouvons néanmoins citer le projet *BioHome3D* (Figure 7), porté conjointement par l'*Advanced Structures and Composites Center (ASCC)* de l'Université de Maine et le laboratoire national d'Oak Ridge, qui consiste en un prototype de 55 m² composé de planchers, de murs et d'un toit fabriqués de manière additive par quatre modules assemblés à partir d'un matériau composé de particules de bois et de bio-résines (Ward, 2022). Nous pouvons également citer la réalisation du projet *Leaf Bridge*, porté par l'Université des Sciences Appliquées de Tampere (TAMK), consistant en un prototype de passerelle piétonne composée de dix parties imprimées à partir d'un matériau composé de particules de bois et de thermoplastiques, puis assemblées par collage pouvant supporter entre 500 et 1000 kg (Peltola, 2018). D'autres travaux visent l'application de la fabrication additive à base de bois dans le milieu de la construction. Kromoser et al proposent un procédé d'extrusion d'un mélange de particules de bois, d'amidon et de lignosulfonate, activé par de l'eau puis pressé à haute température pour créer des parois rigides désignées *3DP Biowalls* (Kromoser et al., 2022). Buschmann et al proposent le procédé *Individual Layer Fabrication (ILF)* consistant à fabriquer individuellement de manière additive des couches minces puis de les assembler par lamination pour former des pièces finales visant un usage en construction (Buschmann et al., 2021).



Figure 7. Fabrication par le procédé FFF du projet *BioHome3d*. La fabrication repose sur l'utilisation d'une solution d'imprimante sur portique d'une capacité dimensionnelle de 30 m x 6 m x 3 m. Disponible à l'adresse : <https://urlz.fr/nAgw> [Consultée le 13 septembre 2023]

L'ensemble de ces travaux repose sur une utilisation du matériau bois sous sa forme de poudre, requiert des travaux complémentaires pour arriver à maturité industrielle et s'éloigne des formes du bois travaillées par les entreprises de la construction en bois que sont le bois massif ou les produits d'ingénierie, matériaux sous forme solide disponibles dans des formats linéaires et surfaciques. Même si de nombreux travaux mettent en avant l'intégration de la fabrication additive dans le secteur de la construction, l'état de préparation de cette dernière reste faible ce qui rend aujourd'hui difficile l'adoption de ces technologies à grande échelle, particulièrement au regard du premier enjeu fondamental qu'est la nature du matériau travaillé (Sepasgozar et al., 2020).

Dans nos travaux, nous nous intéressons alors aux procédés de fabrication additive se basant sur une utilisation du matériau bois dans des formes proches de celles utilisées dans l'industrie de la construction afin d'éviter une rupture fondamentale avec les pratiques existantes liées aux matériaux et à leurs moyens de transformation.

L'utilisation du matériau bois par la fabrication additive sous sa forme de feuille ou de plaque est une solution abordée dans plusieurs procédés brevetés de stratification de couches que sont la *Stratoconception*[®] (Barlier, 1991) et le *Laminated Object Manufacturing (LOM)* (Feygin and Pak, 1999) qui n'ont jusqu'alors pas fait l'objet de travaux de recherche relatifs à la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions à usage structurel (Buschmann et al., 2021). Le procédé de *Stratoconception*[®] appartient à la famille de procédé de fabrication additive par stratification de couches solides (Barlier, 1991). Ce procédé repose sur l'utilisation de matériaux en format de plaque, notamment les panneaux en bois, et sur l'utilisation de centres d'usinage trois axes, pouvant être considérés comme des moyens techniques et matériels standards de l'industrie de la construction en bois. La capacité dimensionnelle des machines à commande numérique et des panneaux en bois, ainsi que les propriétés mécaniques de ces derniers, favorisent l'idée d'utiliser ce procédé à l'échelle de la construction et de l'implémenter dans les pratiques de l'architecture et la construction en bois (Frécharde et al., 2023). L'absence d'investigation de l'utilisation du procédé de *Stratoconception*[®] pour l'architecture et la construction en bois ainsi que ce partage de moyens techniques et matériels communs entre le procédé et ce domaine industriel nous orientent vers l'étude de ce procédé comme support de l'exploration de nouvelles potentialités pour l'architecture non-standard en bois construite par fabrication additive.

1.1.2.2 Principe et domaines d'applications

Le procédé de *Stratoconception*[®], initié par Claude Barlier et développé par CIRTES, consiste à trancher le modèle numérique tridimensionnel d'une pièce en un ensemble de couches élémentaires et complémentaires appelées strates (Barlier, 1991). Chaque strate est mise en panoplie puis fabriquée par micro-fraisage 2,5 axes³ à partir de matériaux en plaques. Les éléments fabriqués sont ensuite assemblés afin de reconstituer la pièce finale (Figure 8). L'étape de micro-fraisage des profils de chaque strate permet d'éliminer l'effet d'escalier dû au processus de stratification de couches et permet ainsi un plus grand respect de la géométrie du modèle numérique lors de sa réalisation physique (Gibson et al., 2010).

Le procédé de *Stratoconception*[®] trouve des applications courantes dans :

- Le prototypage, dans tous les secteurs d'activités,
- L'outillage rapide pour tous les procédés industriels et particulièrement la fonderie, la mise en forme de matériaux composites ou encore le thermoformage ;
- La fabrication directe de pièces pour l'art, le design, l'industrie du meuble ou la publicité.

L'application de ce procédé à l'architecture se limite actuellement à la réalisation de maquettes, de prototypes et de moules pour la construction en béton, et n'est pas encore appliquée dans le contexte de la fabrication de composants architecturaux de grandes dimensions et à usage structurel en bois.

³ Un micro-fraisage 2,5 axes signifie que l'outil se déplace selon trois degrés de liberté mais en ne se déplaçant simultanément que selon deux de ces axes.

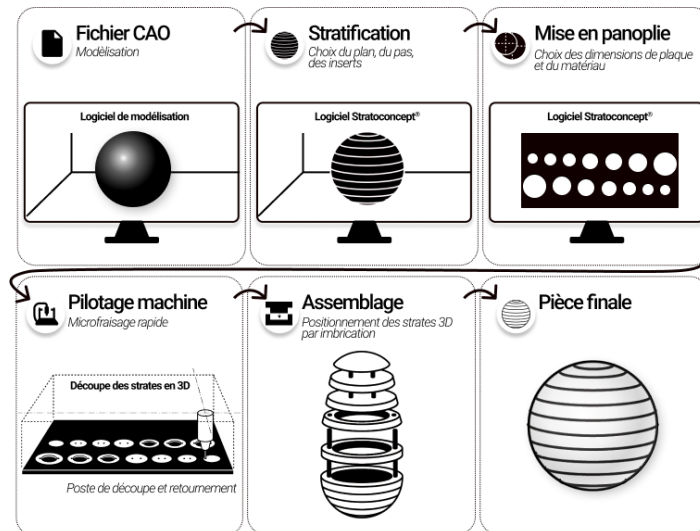


Figure 8. Procédé de Stratoconception®. Logiciels, marques et brevets – Claude Barlier – CIRTES – France – Stratoconception®, Stratoconcept®, Strat’®, Pack&Strat®.

1.1.3 Opportunités pour la réalisation de composants architecturaux

1.1.3.1 Opportunités de conception caractéristiques de la fabrication additive

Le traitement par couche d’un objet impacte directement les capacités de fabrication en étendant les limites des procédés soustractifs et formatifs d’un point de vue formels et favorise l’exploration de nouvelles conceptions. L’échelle de conception n’est plus celle de l’objet lui-même, mais devient celle de ses couches. Gibson et al identifient quatre capacités de complexités qui valorisent l’utilisation de la fabrication additive (Gibson et al., 2010) :

La complexité géométrique

La discrétisation d’un problème tridimensionnel (3D) en une série de problèmes plans (2D) permet la réalisation d’objets aux formes complexes. Anastasiou et al. démontrent la capacité de complexité formelle de la fabrication additive par le *théorème de Fubini* (Anastasiou et al., 2013). Ce théorème décrit l’intégrale d’une fonction mesurable f sur \mathbb{R}^d comme le résultat du calcul itératif des intégrales de dimensions d_1 et d_2 inférieures à d , telles que $d_1 \geq 1$, $d_2 \geq 1$, $d_1 + d_2 = d$ et $\mathbb{R}^d = \mathbb{R}^{d_1} \times \mathbb{R}^{d_2}$:

$$\int_{\mathbb{R}^d} f = \int_{\mathbb{R}^{d_1}} \left(\int_{\mathbb{R}^{d_2}} f(x, y) dy \right) dx = \int_{\mathbb{R}^{d_2}} \left(\int_{\mathbb{R}^{d_1}} f(x, y) dx \right) dy$$

Sur la base de ce théorème, tout objet à n dimensions peut être représenté par une discrétisation par couches de $n-1$ dimensions et, par extension, tout objet tridimensionnel peut être représenté par un ensemble de couches planes complémentaires. La fabrication additive se caractérise alors par une liberté formelle théorique. La liberté formelle théorique se confronte cependant à des limites physiques comme l’épaisseur nominale des matériaux déposés par couche, propre à chaque procédé de fabrication additive et faisant office de pas de discrétisation de la géométrie.

La complexité formelle ne se limite pas aux parois extérieures d’une pièce mais comprend également la création de canaux internes et de formes creuses en un nombre d’opérations limitées et adaptées à des petites séries de pièces personnalisées.

La complexité hiérarchique

La conception de la structure des pièces réalisées par fabrication additive peut être rendue adaptative à l'échelle considérée, qu'elle soit microscopique ou macroscopique. Cette capacité de complexité hiérarchique confère à la fabrication additive l'opportunité de réaliser des matériaux architecturés, des parois semi-creuses remplies de structures alvéolaires. Cette conception adaptative de la structure permet un allègement de la structure, mais également des modifications des propriétés thermiques, mécaniques ou encore acoustiques.

La complexité matériau

Par définition, la fabrication additive permet de traiter de manière différenciée chaque couche indépendamment les unes des autres et permet ainsi d'attribuer à chaque couche un matériau et des propriétés spécifiques. Cette composition multi-matériaux peut être continue, par le dépôt de matériaux à gradient fonctionnel de propriétés (Kawasaki and Watanabe, 1997) ou discontinue par l'empilement de couches mono-matériau.

La complexité fonctionnelle

La liberté formelle interne attribuée aux pièces réalisées par fabrication additive permet l'incorporation de composants fonctionnels et de leurs canaux internes associés. Cette capacité permet une intégration directe des multiples fonctions d'une pièce au sein d'une conception monolithique là où une conception traditionnelle procéderait par l'assemblage de composants fonctionnels fabriqués séparément. Les opérations d'assemblage et le volume des pièces sont diminués et une relation plus étroite entre les fonctions d'une pièce est relevée.

1.1.3.2 Composants architecturaux réalisés par fabrication additive

Le domaine de l'architecture s'est, dès le début des années 1990, intéressé à l'emploi des technologies de fabrication additive comme solutions de prototypage rapide (André et al., 1996). Bien que les propriétés mécaniques des pièces soient inférieures à celles de réalisations par fabrication soustractive ou formative, la fabrication additive s'immisce dans les pratiques de conception architecturale, particulièrement avec le procédé *Fused Deposition Modelling (FDM)*, en apparaissant comme une solution intéressante pour fabriquer des maquettes ou des prototypes dits « *bonnes formes* » (Gibson et al., 2010). Des maquettes physiques sont ainsi rapidement réalisées et révèlent des aspects imperceptibles sur un dessin, participant à l'accélération du processus de conception (Gibson, 2005). Nous nous intéressons ici à l'utilisation de la fabrication additive pour la fabrication directe de composants architecturaux. Nous identifions deux facteurs de motivation de l'intégration de la fabrication additive dans les pratiques de l'architecture et de la construction :

- La fabrication additive est une opportunité pour l'automatisation de la construction et l'utilisation efficace des matériaux pour des projets courants comme le propose Pegna dans ses motivations de la recherche pionnière relative à la mise à l'échelle de la construction de la fabrication additive qu'il a mené (Pegna, 1997). Cette motivation est particulièrement relevée dans les motivations de l'utilisation des procédés d'extrusion de matériaux, généralement à base cimentaire, qui sont supports de la majorité des applications industrielles aujourd'hui développées (Camacho et al., 2018). Cependant, certains de ces enjeux, notamment les enjeux de main d'œuvre, de sécurité et de personnalisation, sont directement liés à l'adoption de

technologies de fabrication numériques par un secteur de la construction qui a connu peu d'évolution dans ses pratiques conventionnelles en un siècle. ;

- La fabrication additive est une opportunité pour la conception de nouveaux composants pour l'architecture, tirant parti des capacités de complexité formelle de cette technologie, que nous avons identifié en partie 1.1.3.1.

La construction en bois a, pour sa part, su adopter la fabrication numérique dans ses pratiques à partir de la fin du XX^e siècle et se confronte d'ores et déjà à ces enjeux d'automatisation de la production de projets courants aux composants standardisés. Notre intérêt se porte alors sur le second facteur de motivation.

Camacho et al soulignent l'opportunité donnée aux architectes de concevoir de nouvelles formes sans affecter la complexité et la productivité pendant la construction (Camacho et al., 2018). Selon Labonnote et al, un changement de paradigme architectural explorant les potentiels inhérents à la fabrication additive est nécessaire pour améliorer les approches actuelles de conception (Labonnote et al., 2016). Labonnote et al complètent en soulignant qu' « *une question importante pour l'architecture en tant que domaine sera de savoir si les architectes sont prêts ou non à utiliser le potentiel complexe et l'énorme degré de liberté de conception offert par la construction additive et s'ils seront capables ou non de « remodeler la façon dont nous pensons les composants architecturaux » (Rael and San Fratello, dans Labonnote et al 2011) »*. L'exploration des capacités de complexité de la fabrication additive diffère selon les technologies, les matériaux et les motivations de l'adoption de ces technologies.

L'utilisation des procédés d'extrusion de matériaux, généralement à base cimentaire, est principalement motivée par l'automatisation de la fabrication et l'optimisation de la consommation de matière dans des projets courants et se concentre en majorité sur la réalisation de parois (Figure 9). La forme de ces parois reste généralement limitée à l'extrusion de géométries conçues en plan ce qui limite alors l'exploration des capacités formelles de la fabrication additive à une conception 2D et non 3D comme elle le permet néanmoins. La fabrication additive permet la suppression des jonctions entre parois, limitant ainsi les ponts thermiques en les remplaçant par des géométries courbes, et favorise, pour les procédés d'extrusion de matériaux, la réduction de la consommation de matière mise en œuvre par la conception de structures alvéolaires dans les parois.



Figure 9. Complexité géométrique des projets réalisés par des procédés d'extrusion de matériaux : le projet The Chicon House réalisé par ICON aux Etats-Unis présente des parois courbes (à gauche) ; le projet GAIA réalisé par WASP en Italie présente des parois dont la structure est alvéolaire (à droite). Disponibles à l'adresse : <https://urlz.fr/nFqc> et à l'adresse : <https://urlz.fr/nFqf> [Consultées le 13 septembre 2023]

D'autres procédés de fabrication favorisent davantage l'exploration de la liberté formelle de la géométrie extérieure des composants architecturaux permise par la fabrication additive. Le dépôt point par point de poudre métallique sous flux d'énergie dirigé a permis la conception et la fabrication par Jooris Laaman Lab et Arup du pont en acier inoxydable *MX3D Smart Bridge* (Figure 10) dont la géométrie résolument complexe résulte de l'utilisation de techniques de conception générative et d'optimisation topologique pour minimiser la matière mise en œuvre (Gardner et al., 2020). Les capacités formelles peuvent s'exprimer à différentes échelles comme le montre l'agence *Emerging Objects* en proposant une conception de tuiles *Seed Stitch* (Figure 10) qui sont un système de revêtement de façade en terre cuite assurant la fonction de pare-pluie et dont chaque tuile est personnalisée par une manipulation du code machine (Rael and San Fratello, 2018).



Figure 10. Liberté formelle expérimentée à différentes échelles : système de revêtement de façade *Seed Stitch* mis en œuvre dans le projet *Cabin of 3D Printed Curiosities* par *Emerging Objects* (à gauche) et *MX3D Smart Bridge* (à droite). Disponibles à l'adresse : <https://urlz.fr/nFqi> et à l'adresse : <https://urlz.fr/nFqq> [Consultées le 13 septembre 2023]

La capacité de multifonctionnalisation des composants, notamment des parois, est abordée dès les premiers travaux de recherche portant sur le développement de procédés d'extrusion de matière cimentière par Khoshnevis qui évoque l'intégration directe des réseaux dans les parois lors de leur fabrication (Khoshnevis, 2004). Cependant, nous observons un manque de références considérant pleinement cette capacité de la fabrication additive, l'ajout d'une fonction résidant généralement dans l'incorporation d'isolant dans les parois alvéolaires de parois. Meibodi et al appliquent cette capacité de multifonctionnalisation dans la réalisation de la *SmartSlab*, dalle nervurée de façon optimisée intégrant des fonctions supplémentaires telles que les réseaux électriques les protections incendie ou l'éclairage dans les parties évidées de la dalle conçue (Meibodi et al., 2018). Hassani et al intègrent une fonction de support d'éclairage à des nœuds d'assemblage dans le projet (*ultra*) *Light Network* (Hassani et al., 2019). L'assemblage dépasse sa fonction structurelle pour faire partie de la scénographie (Figure 11).



Figure 11. Projet (*ultra*) *Light Network* comprenant des nœuds d'assemblage intégrant un support d'éclairage. Disponible à l'adresse : <https://urlz.fr/nFqu> [Consultée le 13 septembre 2023]

Enfin, les travaux de recherche portant sur la conception de pièces multi-matériaux par fabrication additive en construction peuvent aujourd'hui être considérés comme marginaux.

Malgré ces travaux référencés, l'impact des potentiels inhérents à la fabrication additive sur la production architecturale reste un sujet de recherche peu abordé dans la littérature en comparaison aux travaux de recherche portant sur la science des matériaux et au développement de technologies adaptées à l'échelle de la construction (Labonnote et al., 2016).

Ce sujet de recherche reste cependant un intérêt fondamental pour l'utilisation de la fabrication additive et du procédé de Stratoconception® par le secteur de l'architecture et de la construction en bois afin que les architectes puissent s'emparer de ces technologies pour concevoir de nouveaux composants non-standards, multi-échelles, pour l'architecture, en cohérence avec les enjeux contemporains soulignés dans l'introduction du contexte de notre recherche.

Points clés de la partie 1.1 Opportunités de la Stratoconception® pour l'architecture en bois

- La fabrication additive a des capacités dépassant les limites des procédés de fabrication conventionnels :
 - Elle permet l'automatisation de la production de composants non-standards ;
 - Elle offre de nouvelles opportunités pour la conception de composants sans à priori formels ;

 - Le procédé de Stratoconception® a un potentiel d'application dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois mais nécessite des travaux de recherche pour comprendre les implications de son utilisation :
 - Il occupe une place singulière parmi les procédés de fabrication additive en partageant des moyens techniques et matériels communs avec l'industrie de la construction en bois ;
 - Il n'a pas encore d'applications courantes relatives à la fabrication directe de composants fonctionnels à usage structurel pour l'architecture en bois, notamment d'une dimension dépassant plusieurs mètres.

 - L'architecture construite par strates de bois et les composants architecturaux réalisés par fabrication additive soulignent des opportunités et des spécificités de l'utilisation de la Stratoconception® pour l'architecture et la construction en bois :
 - La fabrication additive permet la conception de nouvelles spatialités par la liberté formelle qu'elle apporte ;
 - La fabrication additive permet la conception et la réalisation de composants architecturaux multifonctionnels et multi-échelles avec des dimensions s'étendant entre le décimètre et plusieurs décimètres ;
 - L'architecture construite par strates de bois illustre la valeur architecturale de la strate qu'il est nécessaire de considérer : la fabrication additive n'est pas qu'un moyen de fabrication mais a un impact sur la valeur esthétique du composant réalisé.
-

1.2 Regard sur la Stratoconception® dans le contexte de la construction bois

Le procédé de Stratoconception® repose sur l'utilisation de matériaux en format de plaque, notamment les panneaux en bois, et sur l'utilisation de centres d'usinage trois axes, pouvant être considérés comme des moyens techniques et matériels standards de l'industrie de la construction en bois. Dans cette partie, nous porterons un regard sur l'évolution des technologies de transformation de la construction en bois puis identifierons la ressource en panneaux de bois disponible pour un usage structurel de la Stratoconception®. Nous confronterons enfin le procédé de Stratoconception® à l'échelle dimensionnelle requise par la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions. Les éléments impactés par la notion d'échelle seront identifiés et les approches adoptées pour la réalisation d'architectures construites par strates de bois seront discutées.

1.2.1 Évolution des technologies de transformation de la construction en bois

1.2.1.1 Paramètres du système des processus de production

La construction en bois est, plus qu'aucune autre méthode de construction, le témoin privilégié de l'évolution des technologies de transformation ; Schindler assume que ces technologies se sont développées selon trois vagues : la technologie des outils à main, la technologie des machines-outils, la technologie des outils de l'information. Ces trois vagues « *ne se remplacent pas, mais plutôt se chevauchent, s'amplifient et se complètent* » (Schindler, 2007). Pour décrire les processus de production associés à ces trois vagues, Schindler utilise trois paramètres système, proposés par Wiener : l'énergie, la matière et l'information (Wiener, 1949).

- La technologie des outils à main est « *l'utilisation de l'énergie, des matériaux et du traitement de l'information par un opérateur d'outil à main* » ;
- La technologie des machines-outils est « *l'utilisation de l'énergie et du traitement des matériaux par une machine pour remplacer les opérations humaines physiques répétitives, tandis qu'un opérateur de machine-outil traite l'information* » ;
- La technologie des outils de l'information est « *l'utilisation de l'énergie, des matériaux et du traitement de l'information par une machine pour remplacer les opérations humaines physiques et intellectuelles formalisées* » (Schindler, 2007).

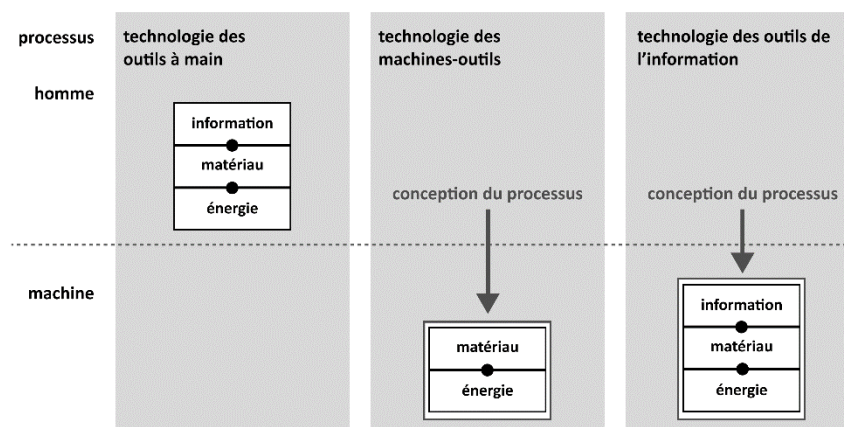


Figure 12. Évolution des technologies de transformation de la construction en bois en fonction des paramètres système suivant : énergie, matériaux et information. Adapté d'après (Schindler, 2007).

Dans la suite de cette partie, nous décrivons l'évolution des technologies en identifiant leurs effets sur la production architecturale. Cette vue globale permettra d'apprécier la place que peut occuper le procédé de Stratoconception® parmi les technologies de transformation adoptées par l'industrie de la construction en bois et d'appréhender son impact sur les différents paramètres systèmes décrivant les processus de production.

1.2.1.2 Travail manuel et non-standardisation

Les premiers développements de la construction en bois, jusqu'aux révolutions industrielles, ont fortement été influencés par la transformation de la ressource en bois par des artisans et leurs outils à main. Cette ressource en bois, disponible localement, était transformée par la force physique de l'homme dont la limite finie induisait un respect de la géométrie de l'arbre, seules les transformations nécessaires lui étant appliquées. Les systèmes constructifs découlant de cette transformation composent avec l'assemblage d'éléments linéaires, proches de la géométrie et des caractéristiques naturelles du tronc ou de la branche (Correa et al., 2019). Ces assemblages sont réalisés individuellement par le travail manuel de l'artisan qui, par ses connaissances, ses compétences et ses préférences, les adaptent aux fonctions structurelles qui leur sont propres (Krieg, 2022). Les éléments assemblés et les éléments assembleurs entretiennent une relation unique, référencée par un étiquetage spécifique (Figure 13), deux éléments se correspondant, leur géométrie étant impactée par leur relation et les faibles variations liées au travail manuel. Les pièces ne sont pas interchangeables.



Figure 13. À gauche : Les marques de charpentier permettent d'identifier les pièces lors du montage, chaque pièce correspondant à une unique seconde (Roland, 2008); À droite : Une liberté formelle est associée au travail manuel, ici dans un travail d'ornementation du sommet des piliers corniers de maisons à pan de bois à Auxerre en France (Burguière-Labrunie, 2003).

Les techniques de transformation du bois s'appuyant sur le travail de la main de l'homme rendaient donc la standardisation de la production impossible en raison des variations qui leur étaient inhérentes. Krieg considère cette non-standardisation de l'ère préindustrielle « *comme une contrainte et comme une vertu* » : si l'automatisation d'une production était impossible, la non-standardisation entraînait une flexibilité de la production permettant une adaptation constante des éléments à des exigences et des contraintes spécifiques, comme une ornementation (Figure 13), sans impacter les temps et l'énergie nécessaire à leur réalisation (Krieg, 2022).

1.2.1.3 De la machine-outil à la standardisation de la production

Les capacités physiques importantes nécessaires et l'aspect chronophage de la transformation du bois par un travail manuel ont motivé la mécanisation de cette tâche bien avant la première révolution industrielle avec le développement des scieries à eau et à vent. Une source d'énergie externe, hydraulique ou éolienne, vient alors remplacer la force physique de l'homme pour mettre en action une machine transformant le matériau bois. L'homme n'exécute plus le travail lui-même mais devient à la fois « *créateur de la machine et du processus mécanique qu'il contrôle et surveille* » (Schindler, 2007). L'information est fixée mécaniquement dans la machine qui automatise les opérations de transformation qui lui sont attribuées en augmentant la qualité du processus de production mais en s'opposant dans le même temps à la flexibilité de production mise en avant dans le travail à la main.

La première et la seconde révolution industrielle impactent l'utilisation des machines-outils par le décuplement de la quantité d'énergie capable de les faire fonctionner. Schindler identifie trois effets de cette transformation de l'utilisation des machines-outils sur la production : l'augmentation des capacités de production, la standardisation des éléments produits et la fabrication de produits sous forme de panneaux (Schindler, 2007). La notion de standardisation résulte de la grande complexité d'intégration de variations dans le processus de transformation du bois en raison de la fixation mécanique de l'information dans les machines : le processus de fabrication est dans l'incapacité de gérer la complexité géométrique de pièces uniques. L'architecture en bois se construit avec des éléments standardisés comportant peu de variations et avec des connexions simples.

1.2.1.4 Vers une automatisation de la non-standardisation

Bien que l'industrie du bois ait été pionnière dans l'association des machines-outils et des machines électriques, elle a adopté tardivement les évolutions technologiques de la troisième révolution industrielle, dite numérique. Alors que l'information était fixée mécaniquement dans les technologies des machines-outils, les informations relatives au traitement du matériau bois sont désormais définies et transmises aux machines-outils numériquement. Les données d'usinage sont définies par des commandes numériques exprimées dans un langage de programmation universel et normalisé, le G-Code (Smid, 2003). Le développement des programmes de fabrication assistée par ordinateur a amené l'automatisation de l'écriture des commandes numériques et attribuée à l'opérateur humain la définition d'informations de plus haut niveau.

L'attribution du traitement de l'information à la machine amène deux opportunités : l'optimisation de la production industrielle par la suppression des gabarits résultant du positionnement automatique, et l'ouverture à une flexibilité formalisée de la production de pièces dont la complexité ne présente plus une limite (Schindler, 2007). Pine introduit le concept de « *personnalisation de masse* » qu'il définit comme « *la production à faible coût de biens et services variés, voire personnalisés* », rompant avec les logiques sérielles de production de masse du Taylorisme et du Fordisme (Pine et al., 1993). La flexibilité associée aux technologies d'outil à main diffère cependant de celle des technologies des outils de l'information qui sont limitées par des attributs spécifiques à l'information ou à la machine, tels que les dimensions de la machine et la géométrie des outils (Schindler, 2007).

La production de composants architecturaux non-standards évoquant une liberté formelle similaire à celle des produits du travail manuel du bois émerge et devient viable économiquement et réalisable

de manière formalisée, codifiée et reproductible comme l'ont montré des projets de recherche menés par l'ICD (Institute of Computational Design) en collaboration avec l'IKTE (Institute of Building Structures and Structural Design) de l'université de Stuttgart, par l'IBOIS de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, ou encore par l'UMR 3495 MAP-CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie), qui explorent les opportunités de développement de nouvelles tectoniques architecturales par l'utilisation de ces technologies.

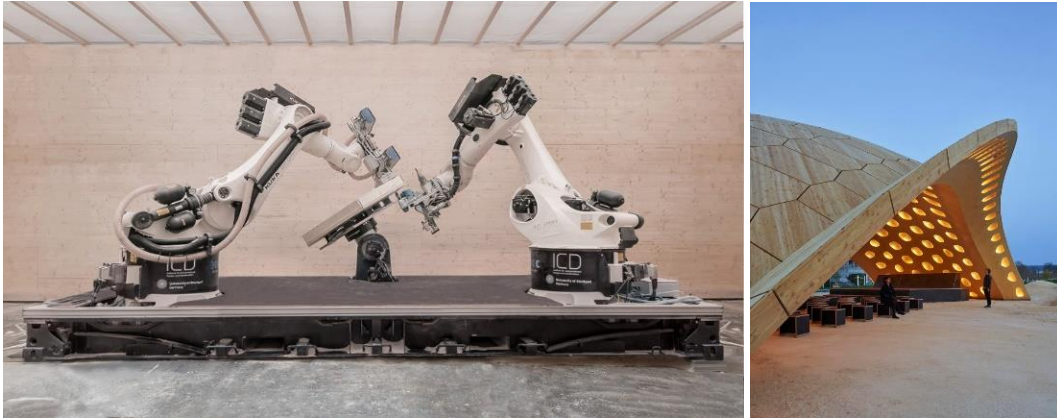


Figure 14. Buga Wood Pavilion réalisé par l'ICD en collaboration avec l'IKTE de l'Université de Stuttgart. Le projet est réalisé avec une plateforme de fabrication robotisée d'assemblage et de fraisage des composants de la coque en bois segmentée matérialisant le pavillon. La flexibilité de production des technologies des outils de l'information permet la création de nouvelles spatialités (Wagner et al., 2020).

L'adoption des technologies des outils de l'information pour la production de composants non-standard peine cependant à avoir un impact durable sur l'industrie de la construction en bois. Si nous observons une généralisation de l'adoption des centres d'usinage à commande numérique dans les entreprises de la construction en bois, la production standardisée d'éléments linéaires ou sous forme de panneaux reste la norme. Selon Wagner et al, « *il ne fait guère de doute que les méthodes d'automatisation numérique qui visent à avoir un large impact sur l'industrie seront finalement jugées en fonction de leur niveau de flexibilité organisationnelle atteint* » en fonction des machines et des flux de travail numériques. Ils identifient deux facteurs de succès pertinents pour une telle mise en œuvre, à savoir la viabilité économique et le discours architectural qui souligne les possibilités d' « *enrichir les qualités spatiales et culturelles de l'environnement bâti* » (Wagner et al., 2020). Ce regard porté sur l'adoption des technologies des outils de l'information souligne la responsabilité des flux de travail numériques et donc, des capacités de production de l'information transmise aux machines pour permettre un changement de paradigme de production sous-jacent au développement de ces technologies.

En considérant la définition des technologies par des paramètres système comme le propose Schindler, le procédé de Stratoconception® comprend une phase de conception du processus de fabrication réalisée par l'opérateur humain ainsi qu'une phase de fabrication réalisée par des machines puis d'assemblage réalisée soit par l'opérateur humain soit par des machines *Strat'Auto*, développées par CIRTES et aboutissement du projet *C-Fast*⁴ (Bpifrance, 2017). Lorsque les opérations d'assemblage sont réalisées par l'opérateur humain, nous retrouvons un schéma similaire à celui des technologies d'outil

⁴ C-Fast : Conception pour la Fabrication Additive par Stratoconception® sous TopSolid®

à main où un matériau, les strates, est traité par un opérateur d'outil à main, recevant une information qu'il traite en utilisant son énergie (Figure 15).

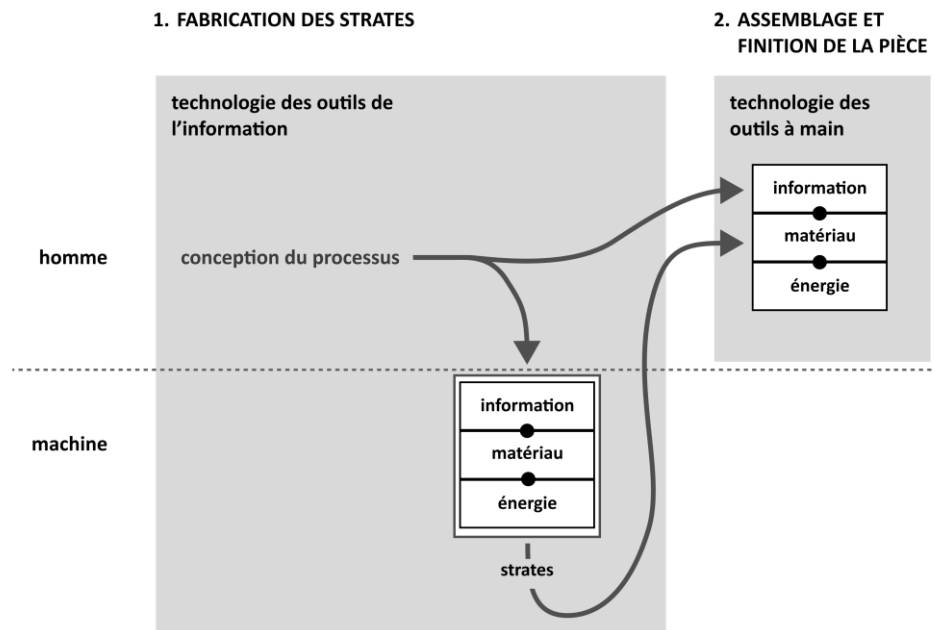


Figure 15. Représentation proposée des technologies de transformation impliquées, en se complétant, dans la réalisation courante de pièces par le procédé de Stratoconception®. Les technologies des outils de l'information permettent la transformation du panneau en strates alors que les technologies des outils à main permettent la transformation des strates en pièce finie.

Le procédé de Stratoconception® permet donc une conception de son processus de fabrication, s'adaptant aux contraintes des matériaux et des capacités de traitement de l'information des machines, et définissant des stratégies de tranchage, la mise en place des éléments d'assemblage, la génération de la mise en panoplie des strates, la génération du parcours d'outil puis la génération des documents d'usinage associés constituant les informations traitées par les machines.

D'après les observations de Wagner, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation du procédé dans les pratiques de la construction en bois implique une flexibilité du processus dépendant particulièrement de la flexibilité du flux de travail de conception et de fabrication. Nous soulignons ainsi la nécessité d'évaluer la capacité du procédé de Stratoconception® et de ses outils à communiquer avec les processus et outils de conception de l'architecture et de la construction en bois. Dans la suite de nos travaux, nous nous intéressons donc à la flexibilité de ce flux de travail de conception et de fabrication de composants architecturaux par Stratoconception® dans un environnement numérique.

1.2.2 Les matériaux favorables à l'utilisation de la Stratoconception® dans la construction en bois

Le procédé de Stratoconception® permet la transformation de matériaux sous forme de panneau, 2D, en strates élémentaires et complémentaires qui, assemblées, reconstituent un objet tridimensionnel conçu numériquement. Nous identifierons à présent les matériaux disponibles pour un usage structural de la Stratoconception® pour construire l'architecture en bois en nous intéressant aux bois d'ingénierie, sous la forme de panneaux reconstitués ou de produits linéaires lamellés, adaptés à des standards industriels. Les contraintes dimensionnelles de ces produits seront explicitées.

1.2.2.1 Caractéristiques fondamentales du matériau bois

Le bois est un matériau fibreux et poreux auquel on attribue deux caractéristiques fondamentales : le bois est un matériau hétérogène et orthotrope.

Hétérogénéité

Les mécanismes de croissance de l'arbre impactent les propriétés du bois par l'hétérogénéité qu'ils apportent. Dans les régions tempérées, la croissance est variable au cours des saisons, s'arrêtant en hiver, formant le bois initial, de printemps, et le bois final, d'été. Une variabilité de la densité, et par conséquent des propriétés mécaniques, est observée entre le bois initial et le bois final au sein d'un même cerne en raison des variations de la section des trachéides et de l'épaisseur de leurs parois cellulaires. Le bois initial est moins dense que le bois final, étant plus poreux pour assurer la fonction de conduction de la sève brute. La largeur des cernes annuels est également sujette à de fortes variations d'une année à l'autre et induit une grande variabilité au sein d'un même individu. Guitard souligne également une variabilité de la densité dans la direction radiale de l'arbre avec une augmentation de la densité de l'écorce vers la moelle (Guitard, 1987). La variabilité de la densité se relève au sein d'un individu, au sein d'une population d'une même essence et entre des individus de plusieurs essences différentes, l'environnement de croissance ayant un fort impact sur cette propriété du bois.

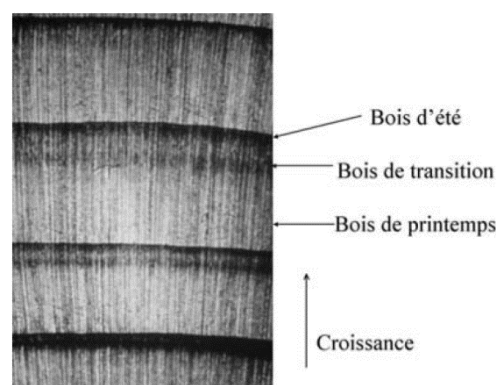


Figure 16. Variabilité de la densité entre le bois initial (de printemps) et le bois final (d'été) (Simon, 2009).

La présence de singularités participe également à l'hétérogénéité du bois, particulièrement la présence de nœuds dont la densité est deux fois plus importante que celle de l'arbre, pour les résineux, et qui influence le comportement mécanique d'un élément, les prémices de la ruine d'un sciage ayant le plus souvent lieu dans des zones où la nodosité est la plus forte (Viguié, 2015).

Orthotropie

Le bois est un matériau orthotrope en raison des plans de symétrie observables dans le repère cylindrique du tronc et de sa structure considérée aux échelles microscopique (1 μm), mésoscopique (1 à 10 mm) et macroscopique (10 cm) (Figure 17) :

- À l'échelle microscopique, la paroi cellulaire du bois est une structure multicouche composée d'une paroi primaire, d'une paroi secondaire, regroupant trois couches S1, S2 et S3, et d'une lamelle mitoyenne assurant l'adhérence des cellules entre elles. La couche S2 est la plus influente sur les propriétés mécaniques de la paroi, car plus épaisse. Elle est composée principalement de microfibrilles cellulosiques parallèles formant un angle avec l'axe de la cellule inférieur à 30° qui oriente longitudinalement, dans l'axe du tronc, les propriétés de la couche S2 et ainsi de la paroi cellulaire ;
- À l'échelle mésoscopique, du tissu cellulaire, la géométrie fusiforme des cellules renforce les propriétés mécaniques dans la direction longitudinale et l'alignement radial des rayons ligneux favorise la direction radiale, du centre biologique de l'arbre à l'écorce en périphérie, sur la direction tangentielle, tangente aux cernes annuels de croissance ;
- À l'échelle macroscopique, la disposition en couche des cernes structurant le bois favorise les directions longitudinales et tangentielles par rapport à la direction radiale.

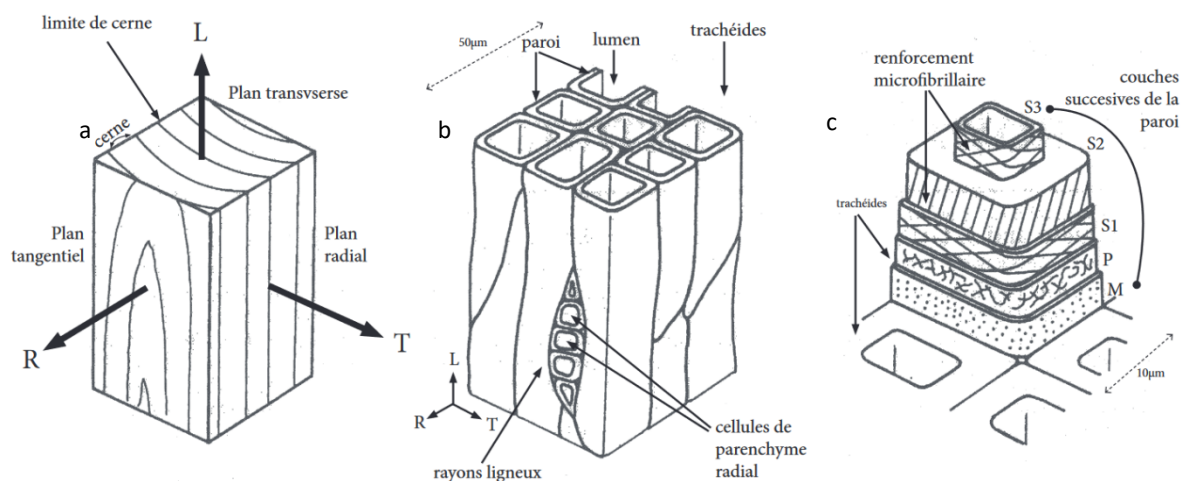


Figure 17. Représentation de l'orientation de la structure du bois aux échelles macroscopique (a), mésoscopique (b) et microscopique (c). Adapté d'après (Norimoto and Gril, 1989).

L'influence de ces trois échelles sur l'orthotropie globale du matériau bois apporte une grande rigidité, et ainsi une grande résistance, à la direction longitudinale devant les directions radiale et tangentielle et explique la grande variabilité des propriétés du matériau en fonction de la direction considéré e : on considère un rapport de l'ordre de 10 entre le module d'élasticité du bois selon ses directions longitudinale et radiale et de 2 selon ses directions radiale et tangentielle.

1.2.2.2 Du bois récolté au bois d'ingénierie

La technologie des machines-outils a été motrice de l'industrialisation de la construction en bois en automatisant les opérations de transformation du matériau bois. La variabilité et l'orthotropie des propriétés naturelles du matériau bois s'agencent alors mal avec la logique de production sérielle

d'éléments devant justifier d'une forte prévisibilité dimensionnelle, physique, mécanique et esthétique. Répondant initialement à des besoins de nouvelles formes et de nouvelles dimensions pour dépasser les limites physiques de l'arbre (Natterer, 2004), les bois d'ingénierie, apportent une réponse à ces problématiques industrielles en proposant des matériaux aux propriétés davantage homogènes, mesurables, prévisibles, fabriquées à partir de la combinaison de composants d'assemblages (adhésif, tourillon densifié, clou...) et de matériaux dérivés du sciage (bois d'œuvre), du déroulage et du tranchage (feuilles) ou de la trituration (fibres).

Ces produits existent sous forme de poutre ou sous forme de panneau que nous définissons comme « un objet de surface plane dont l'épaisseur est significativement faible vis-à-vis des dimensions de ladite surface » (Meyer, 2017). Fleming propose une représentation graphique simplifiée de la chaîne de transformation des bois d'ingénierie (Figure 18).

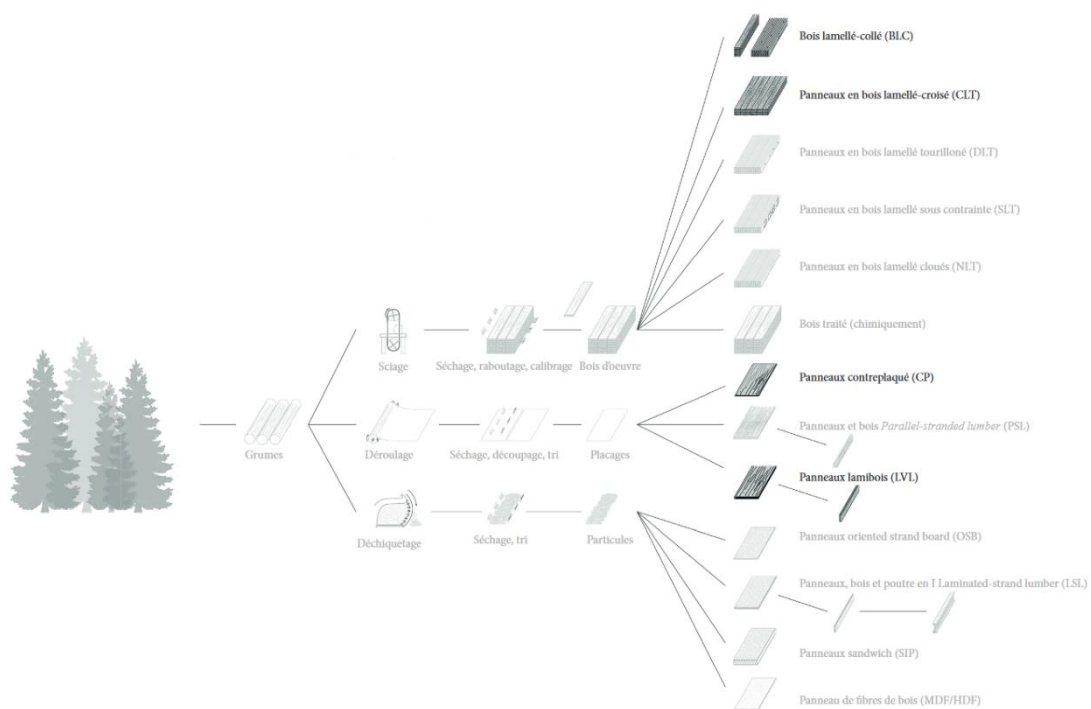


Figure 18. Chaîne de transformation des bois d'ingénierie. D'après (Ramage et al., 2017)

Bien que les bois d'ingénierie sont aujourd'hui courants dans la construction en bois, nous devons spécifier que leur avantage environnemental diffère par rapport à celui du bois récolté : les opérations de séchage du bois humide nécessaire au processus de production consomment une quantité d'énergie importante par rapport au séchage naturel ; la présence d'adhésifs, bien que relativement faible⁵, principalement à base de formaldéhyde dans une majorité des bois d'ingénierie produits industriellement entraîne des émissions de composés organiques volatiles (COV) faisant partie des gaz à effet de serre ; certains bois d'ingénierie sont produits exclusivement dans les pays scandinaves ou dans l'Est de l'Europe, empêchant une récolte et une production locale et induisant ainsi des émissions liées aux transports pour les différentes opérations de livraison de la chaîne liant la récolte du bois en forêt à la distribution dans les entreprises de charpente (Ramage et al., 2017).

⁵ Les adhésifs représentent, en masse sèche, environ 2% des panneaux de CLT, 3% du bois lamellé-collé et 6% des panneaux lamibois et de contreplaqué (données issues de produits déclarés de la base INIES)

1.2.2.3 Les produits sous forme de panneaux

Tous les bois d'ingénierie n'ont pas les mêmes propriétés et les mêmes capacités d'utilisation pour un usage structurel en construction. Nous nous intéressons aux bois d'ingénierie pouvant avoir un usage structurel, existant sous forme de panneau, s'intégrant dans des logiques de production industrielle d'éléments non-standardisés, conservant les propriétés visuelles du bois d'œuvre et ayant un comportement à l'usinage favorable pour une utilisation par le procédé de Stratoconception®. Nous nous concentrons sur trois produits formés par l'adhésion par collage d'éléments de bois d'œuvre ou de feuilles de déroulage : le bois lamellé-croisé (*Cross Laminated Timber, CLT*), le contreplaqué (*Plywood*) et le lamibois (*Laminated Veneer Lumber, LVL*).

Composition des panneaux

Les panneaux de CLT sont composés de plusieurs couches de bois, autrement appelées plis, empilées et collées par pressage entre elles de façon orthogonale, à 90 degrés, par leurs faces les plus larges. Ces couches de bois sont réalisées à partir de débits de sciage, généralement des planches d'une épaisseur variant entre 20 et 40 millimètres. Ce croisement des couches permet une homogénéisation des propriétés physico-mécaniques du matériau dans les directions longitudinales et transversales du panneau tout en conservant une orthotropie liée au nombre impair de plis.

Le lamibois est constitué de fines feuilles, issues du procédé de déroulage, d'une épaisseur de 3 millimètres empilées et collées entre elles par pressage. L'orientation des fibres des différentes feuilles est principalement alignée, bien que certains plis puissent être croisés. L'utilisation de feuilles permet une dispersion des effets des singularités du bois sur les caractéristiques globales du panneau. Cette dispersion est plus importante par rapport aux panneaux de CLT ou au bois lamellé-collé qui se composent de pièces de bois plus massives. La composition du lamibois lui confère des caractéristiques mécaniques supérieures par rapport aux panneaux CLT dans la direction de l'orientation majoritaire des fibres des plis.

Le lamibois, comme tout matériau de construction issu de l'arbre sur pied, n'utilise pas l'entièreté du volume de la grume dans son produit fini. Les opérations de sciage entraînent un fort taux de chutes amenant le bois d'œuvre à n'utiliser que 50% du volume de la grume (Ramage et al., 2017). Le bois lamellé-croisé, utilisant les débits de sciage et les purgeant de leurs défauts ne consomme qu'entre 36 et 38% du volume de la grume. Pour le lamibois et le contreplaqué, cette utilisation est de 40% (Finnish Woodworking Industries Federation, 2019). Les chutes sont valorisées comme combustibles de biomasse ou comme fibres pour la production de panneaux.

Les panneaux de contreplaqué ont une composition similaire à celle des panneaux de lamibois. L'orientation orthogonale, à 90 degrés, des feuilles les unes par rapport aux autres s'oppose cependant à la composition du lamibois dont les fibres des différentes feuilles sont alignées. Cette différence confère aux panneaux de contreplaqué une plus grande stabilité dimensionnelle.

Influence des caractéristiques des panneaux sur les opérations d'usinage

La nature des matériaux de base composant les panneaux de bois impacte leur comportement à l'usinage ; la qualité du fraisage se mesure par l'état de surface des strates qui est fonction des paramètres de coupe (fréquence de rotation et vitesse d'avance de l'outil), et des caractéristiques du

matériau bois, spécifiquement son anisotropie, l'angle de fil et son hétérogénéité. Les panneaux de CLT se composent de couches de planches issues de débits de sciage qui leur confèrent un comportement à l'usinage, au sein de ses couches, similaire à celui du bois d'œuvre dont nous avons montré les caractéristiques d'anisotropie et d'hétérogénéité, particulièrement la présence de nœuds qui sont difficiles à prendre en considération pour l'usinage et qui peuvent engendrer une diminution de la qualité des états de surface. Par leur procédé de fabrication, l'opération de déroulage séparant les cellules du bois au niveau de la lamelle mitoyenne, les panneaux de lamibois et de contreplaqué améliorent la qualité de surface des strates, présentent une plus grande prévisibilité à l'usinage et minimisent ainsi les reprises ultérieures par ponçage pouvant altérer la qualité géométrique de la pièce finie et augmentant les temps de fabrication des strates.

Influence des capacités dimensionnelles des panneaux sur la conception du tranchage en strates

Nous nous intéressons aux dimensions courantes des panneaux identifiés comme favorables à l'utilisation de la Stratoconception® dans la construction en bois : les panneaux de CLT ont une longueur inférieure à 16,5 mètres, une largeur variant entre 2,45 et 3,50 mètres et une épaisseur variant entre 60 et 500 millimètres ; les panneaux en lamibois ont une longueur inférieure à 25 mètres, une largeur variant entre 0,9 et 2,50 mètres et une épaisseur variant entre 27 et 75 millimètres ; les panneaux de contreplaqués ont une longueur de 2,50 ou de 3,10 mètres, une largeur de 1,25 m ou de 1,50 m et une épaisseur variant entre 6 et 30 millimètres.

Les dimensions des panneaux disponibles impactent les résultats des opérations de tranchage du modèle numérique des composants à réaliser par Stratoconception®. Les épaisseurs des panneaux disponibles impactent deux résultats de l'opération de tranchage d'une pièce :

- Le nombre de strates composant une pièce : la hauteur des strates est fonction de l'épaisseur des panneaux utilisés dans le procédé de Stratoconception®, sans y être directement égale. Une épaisseur de panneau importante limite le nombre de strates à réaliser, minimisant ainsi les opérations d'assemblage (Figure 19). Selon l'épaisseur des panneaux et les dimensions de la pièce considérée, il est cependant impossible de réaliser certaines strates en conservant l'épaisseur des panneaux comme hauteur de strates en raison des zones inaccessibles à l'usinage pouvant exister au sein de celles-ci (voir partie 2.1.2.1) : pour une même pièce, plus l'épaisseur des panneaux est importante, plus la présence de ces zones inaccessibles à l'usinage est favorisée.
- Les pertes de matière liées à l'usinage du profil des strates : le choix de la hauteur des strates impacte directement le volume de matière à usiner. Pour une même pièce, plus la hauteur des strates est importante, plus le volume à usiner et la durée de l'usinage le seront (Figure 20).

Les épaisseurs disponibles pour les trois types de panneaux identifiés ont une forte variabilité et ne s'étendent pas dans les mêmes intervalles. Si nous faisons l'exercice de discrétiser une pièce en 50 strates (valeur arbitraire définissant un degré de discrétisation), les panneaux de contreplaqué permettront la réalisation de cette pièce pour une hauteur de 1,50 mètres, les panneaux de lamibois pour une hauteur de 3,75 mètres et les panneaux de CLT pour une hauteur de 25 mètres, en considérant les épaisseurs maximales disponibles pour chacun de ces types de panneaux. Une relation entre épaisseur de panneau, dimensions et géométries de la pièce doit donc être considérée lors du choix des panneaux pour la fabrication d'un composant architectural par Stratoconception®.

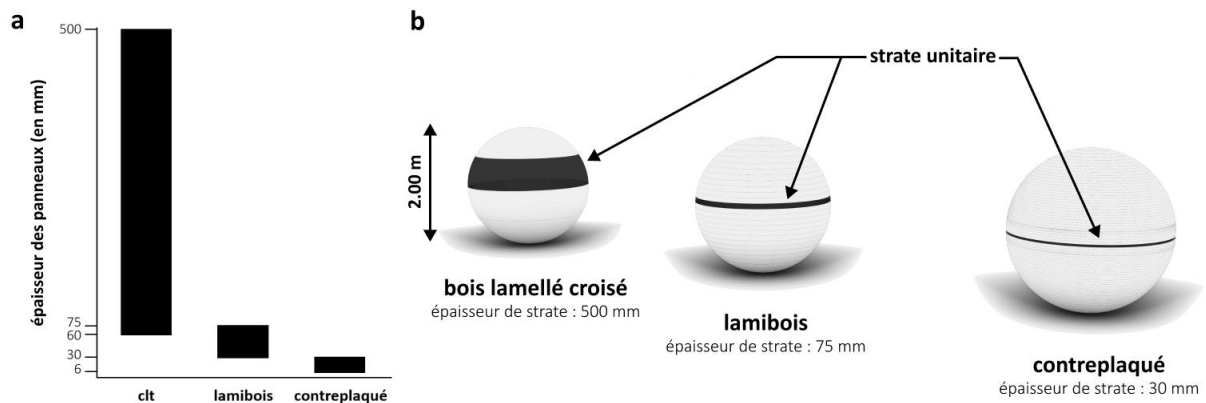


Figure 19. Représentation des épaisseurs disponibles par type de panneaux (a) et tranchage d'une sphère d'un diamètre de 2 mètres selon les épaisseurs maximales disponibles par type de panneaux ; l'épaisseur de panneau est égale à l'épaisseur de la strate (b)

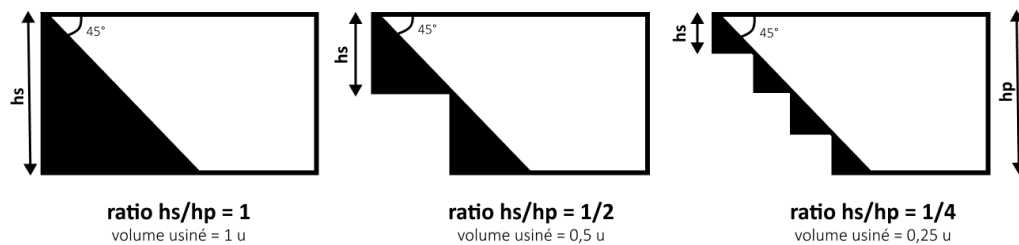


Figure 20. Influence de l'épaisseur des strates (hs) par rapport à la hauteur de la pièce (hp) sur le volume à usiner

Les longueurs et les largeurs des panneaux limitent les dimensions des strates réalisables : la plus petite dimension d'un panneau détermine ainsi la plus grande dimension de la strate pour qu'elle puisse être mise en panoplie. La réalisation de strates dont les dimensions dépassent les limites dimensionnelles des panneaux implique une décomposition de leur géométrie en plusieurs parties, pouvant être mises en panoplie. Nous décrivons cette opération du procédé dans la partie 2.1.2.1. Si les panneaux de CLT et de lamibois ont des capacités dimensionnelles équivalentes au regard de la mise en panoplie, les panneaux de contreplaqué sont davantage limités, en largeur et en longueur.

1.2.2.4 Les produits sous forme de poutres courbes

Le procédé de Stratoconception® est aujourd'hui majoritairement employé pour la réalisation de pièces de petite et moyenne taille pour l'industrie, d'un ordre de grandeur du mètre. Cette échelle de pièces implique la réalisation de strates dont les dimensions sont également d'un ordre de grandeur du mètre. Les panneaux permettent l'utilisation de matériaux aux propriétés et aux formats adaptés pour l'industrie tout en minimisant les pertes matières liées à l'usinage des strates par rapport à leur usinage individuel dans des bruts droits en les mettant en panoplie. Dans nos travaux, nous considérons la Stratoconception® comme un procédé de fabrication additive pouvant permettre la réalisation de composants architecturaux dont au moins une des dimensions est supérieure à plusieurs mètres. Les exemples de réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par fabrication additive se concentrent principalement sur la réalisation de parois dont la géométrie de leur représentation en plan est identique à celle des éléments poutres. Le résultat du tranchage d'une paroi est alors un ensemble de strates dont la géométrie est comparable à celle de poutres à double courbure (Figure 21).

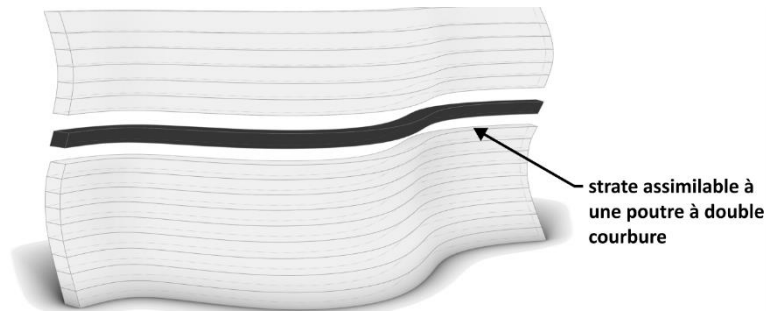


Figure 21. Résultat du tranchage d'une paroi libre formellement. La géométrie des strates obtenues est comparable à la géométrie d'une poutre à double courbure réalisée en bois lamellé-collé.

À partir de ce postulat, nous émettons l'hypothèse que d'autres matériaux que les matériaux sous forme de panneaux peuvent être utilisés pour la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par Stratoconception®, spécifiquement le bois lamellé-collé pour sa capacité à réaliser des poutres, de grandes dimensions à double courbure. Nous nous limitons ici à la définition des capacités du bois lamellé-collé pour réaliser des poutres à double courbure. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour identifier, analyser et caractériser les opportunités et les problématiques liées à cette nouvelle approche proposée pour l'utilisation de la Stratoconception® dans la construction en bois.

Le bois lamellé-collé est fabriqué par l'assemblage par collage de lamelles de bois massif orientées parallèlement à la direction longitudinale des fibres du bois. Les dimensions standards des sections de bois lamellé-collé sont d'une hauteur variant entre 120 et 600 millimètres et d'une épaisseur variant entre 80 et 240 millimètres. Les hauteurs peuvent atteindre jusqu'à 2 mètres pour des cas spécifiques. La longueur des poutres peut s'étendre jusqu'à 50 mètres de longueur mais nécessite alors la mise en place de convois exceptionnels pour la livraison sur chantier, occasionnant des coûts supplémentaires.

La réalisation d'une poutre à double courbure en bois lamellé-collé se fait par une opération de cintrage, définissant la courbure en plan de la poutre, puis par une opération d'usinage, réalisant la géométrie gauche du profil de cette poutre. La courbure réalisée par cintrage est déterminée dans les limites de flexion élastique du bois. Elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur des lamelles : plus l'épaisseur des lamelles est importante, plus il est difficile d'appliquer un petit rayon de courbure à la poutre réalisée. Ainsi, si le rapport entre le rayon de courbure, noté r_{in} , et l'épaisseur des lamelles, notée t , est trop faible, la résistance à la flexion de la poutre sera impactée par des contraintes de flexion résiduelles. La relation entre le rayon de courbure admissible et l'épaisseur des lamelles composants le bois lamellé-collé assurant une absence de contrainte résiduelle est définie par l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1, 2004) telle que :

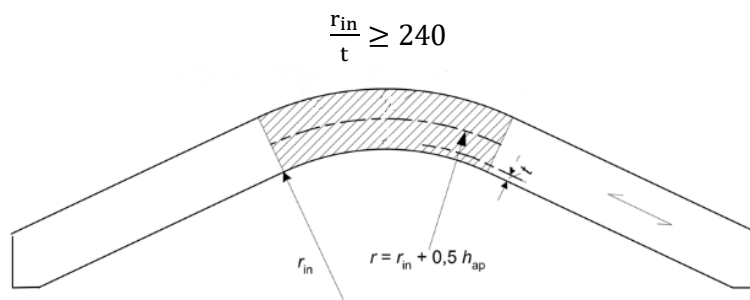


Figure 22. Représentation des paramètres intervenant dans la définition du rayon de courbure minimal du bois lamellé-collé. D'après (EN 1995-1-1, 2004)

1.2.3 Fabrication additive de composants de grandes dimensions

L'utilisation actuelle du procédé de Stratoconception® repose sur le traitement de matériaux sous forme de panneaux par des centres d'usinage trois axes. Les capacités dimensionnelles de ces moyens matériels (panneaux) et techniques (machines) sont finies, en largeur, en longueur et en épaisseur. Nous avons précédemment explicité les dimensions courantes des panneaux en bois favorisant l'usage de la Stratoconception® par la construction en bois (voir partie 1.2.2.3). Les centres d'usinage utilisés dans l'industrie de la construction en bois peuvent atteindre des dimensions de plusieurs dizaines de mètres de longueurs et des largeurs équivalentes à celles des panneaux en bois qu'ils peuvent traiter (Figure 23).

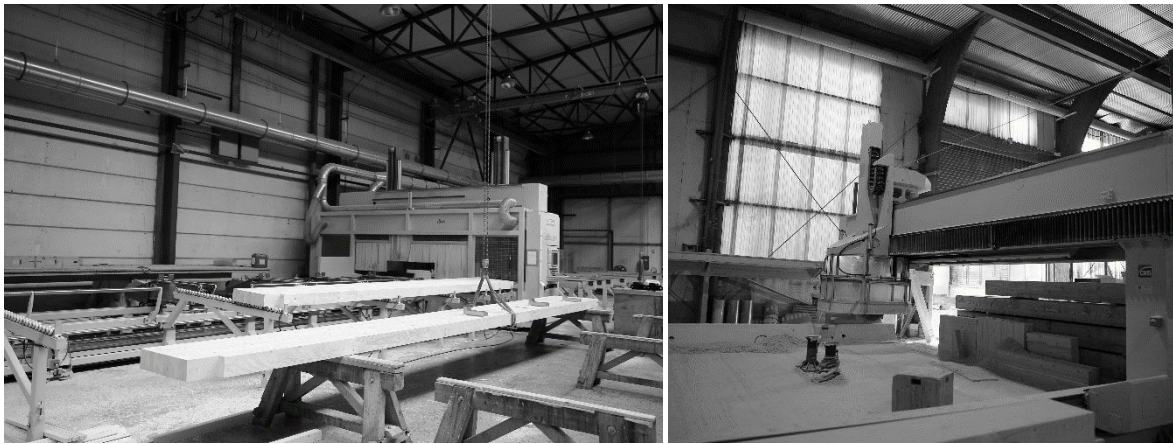


Figure 23. Exemples de centres d'usinage de l'industrie de la construction en bois d'une capacité dimensionnelle de plusieurs mètres de large et plusieurs dizaines de mètres de long, utilisés pour la taille de charpente (à gauche) et pour la réalisation de poutres en bois lamellé-collé à double courbure (à droite). Photographies de l'auteur.

1.2.3.1 Définition des dimensions des composants architecturaux

Le regard porté au préalable sur la réalisation de composants architecturaux par fabrication additive nous permet de définir trois échelles de composants :

- Les composants dont la plus grande dimension est inférieure à un mètre, par exemple des assemblages. Nous définissons ces composants comme des composants de petites dimensions ;
- Les composants dont une des dimensions est supérieure à plusieurs mètres et les autres dimensions sont inférieures à un mètre, par exemple des poutres, des poteaux ou des escaliers. Nous définissons ces composants comme des composants de dimensions intermédiaires ;
- Les composants dont deux dimensions sont supérieures à plusieurs mètres, pouvant atteindre l'ordre de grandeur du décamètre, par exemple des parois. Nous définissons ces composants comme des composants de grandes dimensions.

Les composants de petites dimensions et de dimensions intermédiaires se composent de strates dont la taille est inférieure aux limites des panneaux en bois et des centres d'usinage trois axes. Dans cette partie, nous nous intéressons aux composants de grandes dimensions dont les dimensions des strates se confrontent aux limites finies des moyens techniques et matériels de production du procédé de Stratoconception®. Pour cela, nous considérons que les dimensions des machines utilisées dans la

construction en bois sont supérieures aux dimensions des panneaux en bois utilisés : nous admettons donc que les limites dimensionnelles des pièces réalisables sont égales aux limites dimensionnelles des panneaux en bois.

1.2.3.2 Influence des opérations de tranchage sur le processus de fabrication de composants de grandes dimensions

Nous avons précédemment exprimé que les dimensions des panneaux favorisant l'utilisation de la Stratoconception® par la construction en bois impactent les résultats des opérations de tranchage du procédé (voir partie 1.2.2.3):

- L'épaisseur des panneaux impacte le nombre de strates : des panneaux de forte épaisseur limitent le nombre de strates par rapport à des panneaux de plus faible épaisseur ;
- L'épaisseur des panneaux impacte les pertes de matière liées à l'usinage du profil de strates : pour une même pièce, plus l'épaisseur des panneaux sera faible, plus le volume usiné et les temps d'usinage le seront également ;
- La longueur et la largeur des panneaux limitent les dimensions de pièces réalisables et impliquent la mise en place d'une décomposition des strates lorsque ces dernières sont de grandes dimensions.

L'étude des exemples identifiés d'architectures construites par strates (voir partie 1.1.1.2) nous montre que les choix effectués à l'étape de décomposition des strates influent sur l'ensemble du processus de fabrication de composants de grandes dimensions par Stratoconception®.

Le projet *Sazae*, conçu par Kengo Kuma, repose sur l'utilisation de panneaux de contreplaqué d'une longueur de 1,60 m, d'une largeur de 0,80 m et d'une épaisseur de 28 mm pour la réalisation de sa structure. La décomposition de la structure de la microarchitecture se fait par une grille aux cellules carrées dont les dimensions se basent sur la dimension minimale des panneaux disponibles, soit 80 centimètres. Cette forte décomposition des strates implique la réalisation d'un grand nombre de pièces de petites dimensions, légères et donc manportables, demandant peu de moyens techniques complémentaires à l'homme pour leur manutention. Les pièces sont assemblées sur site par assemblage mécanique par vissage à l'emplacement défini par les pré-trous réalisés durant l'étape d'usinage (Figure 24).

Le projet *Body*, conçu par Eichinger Offices repose sur l'utilisation de panneaux de CLT d'une longueur de 13,00 mètres, d'une largeur de 3,00 mètres et d'une épaisseur de 120 mm. Les strates générées numériquement sont décomposées en pièces mises en panoplie. La dimension des panneaux de CLT permet une décomposition des strates plus faible que celle effectuée dans le projet *Sazae* et engendre la réalisation de pièces de plus grande dimension. Une fois usinées, les pièces sont recollées pour former des éléments préfabriqués pouvant atteindre une épaisseur d'environ un mètre. L'assemblage des éléments préfabriqués de grandes dimensions sur site a nécessité l'installation de moyens de levage spécialement conçu à cet effet. L'assemblage des éléments préfabriqués se fait par positionnement sur des poutres métalliques (Figure 24).

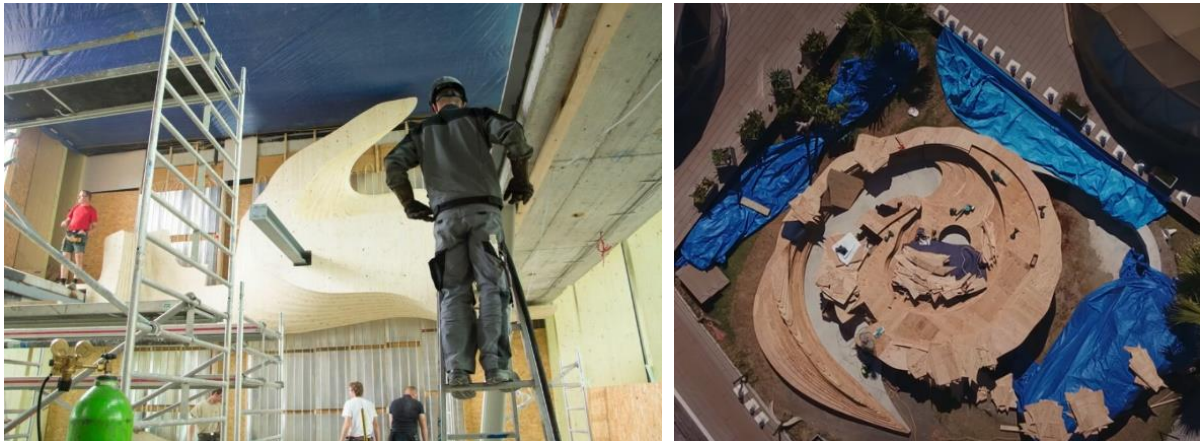


Figure 24. Assemblage d'un faible nombre de pièces de grandes dimensions dans le projet *Body*, de *Eichinger Offices* (à gauche) et d'un grand nombre de pièces de petites dimensions dans le projet *Sazae* (à droite). Disponibles aux l'adresses : <https://urlz.fr/nFqF> et : <https://urlz.fr/nAgb> [Consultées le 13 septembre 2023]

Dans ces projets, deux approches constructives semblent se dégager des choix de décomposition effectués : une décomposition des strates en petites pièces manportables se rapproche d'une forme d'artisanat par l'opération d'assemblage des pièces sur site par des opérateurs humains alors qu'une décomposition des strates en grands éléments, non manportables, dirige la construction vers une forte préfabrication et nécessite la mise en place de moyenstechniques industriels pour les opérations d'assemblage.

Nous identifions les opérations impactées par ces choix de décomposition :

- La dimension des pièces, nous l'avons spécifié, impacte le nombre d'opérations d'assemblage à réaliser : plus la décomposition sera importante, plus le nombre de pièces à assembler et les temps d'assemblage seront élevés ;
- La dimension des pièces impacte les moyens employés lors de leur manutention : une décomposition importante peut ainsi éviter l'utilisation de moyens de manutention plus conséquents dépassant les limites physiques de l'homme. Au contraire, une faible décomposition permet le traitement d'un plus petit nombre de pièces et favorise une préfabrication industrielle ;
- La dimension des pièces impacte le choix des modes d'assemblage utilisés. Le procédé de *Stratoconception*[®] permet l'utilisation de multiples techniques d'assemblage, principalement par collage, par brasage et par assemblage mécanique par vissage (Delebecque, 2007). L'assemblage mécanique est celui privilégié par les exemples présentés d'architectures construites par strates de bois, faisant partie des pratiques de la construction en bois et ne demandant par un changement d'échelle de ses moyens techniques comme ce serait le cas avec un assemblage des strates par collage.

Ces observations nous font admettre que l'opération de décomposition des strates de grandes dimensions a une forte influence sur les opérations aval du procédé de *Stratoconception*[®], particulièrement lorsque nous traitons des pièces de grandes dimensions, à l'échelle de la construction en bois. Nous établissons que le choix des matériaux et des stratégies de décomposition sont donc multicritères, impliquent différentes approches constructives et appellent ainsi à une évaluation de leur performance en phase amont des projets pour pouvoir rationaliser leur construction.

1.2.3.3 Décomposition, mise en panoplie et rendement matière

Les opérations de tranchage, et particulièrement de décomposition, impactent directement la mise en panoplie des pièces à réaliser sur les panneaux et, par extension, la consommation de matière associée à la réalisation d'un composant. La Figure 25 définit l'utilisation de la matière dans la mise en panoplie des pièces sur des matériaux sous forme de panneau dans la phase de fabrication du procédé de Stratoconception®. Nous définissons la consommation de matière (V_{total}) comme la somme du volume des pièces ($V_{pièce}$), du volume usiné pour réaliser la géométrie des pièces ($V_{usiné}$), des volumes inter-pièces non-réutilisables dépendant de la mise en panoplie, également appelé *nesting* ($V_{nesting}$), et du volume des chutes réutilisables (V_{chute}) :

$$V_{total} = V_{pièce} + V_{usiné} + V_{nesting} + V_{chute}$$

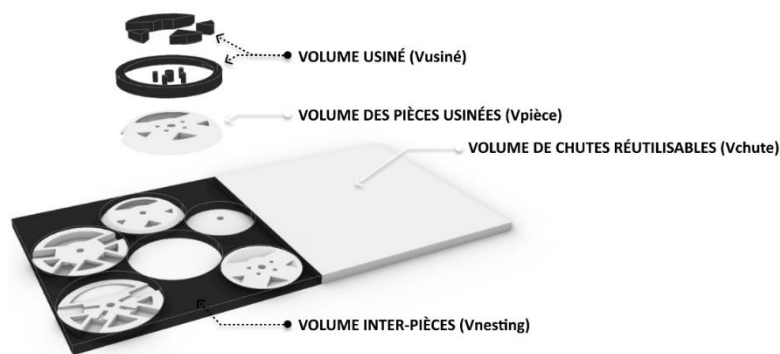


Figure 25. Définition de l'utilisation de la matière dans la mise en panoplie des pièces sur des matériaux sous forme de panneau dans la phase de fabrication du procédé de Stratoconception®

De même, nous définissons le rendement matière comme le rapport entre le volume des pièces et le volume total, auquel nous retirons le volume des chutes réutilisables :

$$\eta = \frac{V_{pièce}}{V_{pièce} + V_{usiné} + V_{nesting}}$$

La mise en équation de la consommation de matière est donc directement impactée par la qualité de la mise en panoplie. La qualité de la mise en panoplie dépend de l'algorithme de nesting utilisé, de la géométrie et des dimensions des pièces et des dimensions du panneau utilisé. Les choix de tranchage et de décomposition impactent la dimension et la géométrie des pièces et donc la consommation de matière. Théoriquement, plus une pièce est discrétisée, plus il sera facile de les agencer et les volumes inter-pièces seront ainsi réduits. Enfin, la qualité de la mise en panoplie dépend du respect, ou non, de l'orthotropie du matériau bois pour la réalisation de strates, une orientation identique des strates sur les panneaux diminuant les capacités d'optimisation du rendement matière.

Pour appréhender l'ordre de grandeur des pertes matières engendrée à l'échelle de la construction, nous rapportons le rendement du projet *Sazae*, comprenant la mise en panoplie des strates au profil plan décomposées en petites pièces, est d'environ 70% alors que le rendement du projet *Body*, comprenant la mise en panoplie de strates au profil courbe usiné décomposées en pièces de plus grandes dimensions que celles du projet *Sazae*, est de l'ordre de 54%. La différence de géométries et l'usinage du profil des strates du projet *Body* ne permettent pas une comparaison directe des approches mais nous informent sur des ordres de grandeurs.

1.2.3.4 Composants de grandes dimensions et précision de la stratification

L'échelle de la construction, qui présente un ordre de grandeur de plusieurs mètres, conduit à un changement d'échelle du degré de précision, des tolérances plus grandes pouvant être acceptées, rompant ainsi avec la précision induite par les opérations de micro-fraisage du procédé de Stratoconception®. Les outils utilisés en micro-fraisage pour des pièces de petites dimensions ont un diamètre inférieur à 10 mm avec des pas de stratification de l'ordre de 0,5 mm. La conservation de ces paramètres dimensionnels pour la réalisation de pièces de grandes dimensions entraînerait une augmentation considérable du temps d'usinage bien que minimisant l'erreur associée à la stratification : le rapport de l'épaisseur des strates et de leur pas de stratification augmente de manière conséquente par rapport à la réalisation de pièces de petites dimensions.

De plus, nous avons précédemment souligné qu'une relation existe entre l'épaisseur des panneaux utilisés, les dimensions et les géométries de la pièce à réaliser. Les épaisseurs de tranchage et les degrés de précision influent directement sur le volume de matière usiné pour la réalisation des pièces et influent ainsi sur les temps d'usinage associés.

Points clés de la partie 1.2 Regard sur la Stratoconception® dans le contexte de la construction bois

- L'intégration du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois implique une flexibilité du processus et particulièrement des flux de travail de conception et de fabrication :
 - Le procédé de Stratoconception® se positionne dans ce flux de travail de conception et de fabrication au niveau de la conception du processus de fabrication d'une pièce conçue en dehors et en amont du procédé ;
 - Le traitement de l'information par des machines intervient uniquement pour la fabrication des pièces et ne comprend pas, dans les pratiques courantes, les opérations d'assemblage et de finition des strates réalisées par l'opérateur humain ;
 - L'appartenance de la Stratoconception® aux technologies des outils de l'information lui permet d'automatiser la production de composants non-standards de manière formalisée, codifiée et reproductible.
- La construction en bois possède des moyens techniques et matériels permettant la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par Stratoconception® :
 - Les panneaux en bois de CLT, de lamibois et de contreplaqué sont identifiés comme des matériaux favorables à l'utilisation de la Stratoconception® dans la construction en bois et favorisent la réalisation de composants architecturaux de grande dimension à usage structurel ;
 - Nous émettons l'hypothèse que l'utilisation de poutres à doubles courbures en bois lamellé-collé peut être une approche novatrice pour le procédé de Stratoconception® afin de réaliser directement, sans décomposition, des strates élancées de grandes dimensions, notamment pour la réalisation de parois ;
 - Les entreprises de la construction en bois sont équipées de centres d'usinage 3 axes de grandes dimensions, supérieures aux dimensions des panneaux en bois ;
- Les choix effectués par l'opérateur humain pour la réalisation de composants de grandes dimensions par le procédé de Stratoconception® impactent la qualité du projet :
 - Les choix de décomposition des strates constituant des composants de grandes dimensions sont multicritères, impactant des données liées à la fabrication, à l'assemblage et aux consommations de matériaux. La viabilité économique d'un projet est le résultat d'une combinaison de ces critères ;
 - L'échelle de la construction conduit à un changement d'échelle du degré de précision, des tolérances plus grandes pouvant être acceptées par rapport à la précision induite par les opérations de micro-fraisage couramment utilisée dans le procédé de Stratoconception® ;
 - Pour assurer la viabilité économique de la réalisation de composants architecturaux, particulièrement de grandes dimensions, nous soulignons le besoin d'évaluation des choix effectués par l'opérateur humain dans la conception du processus de fabrication par Stratoconception®.

Chapitre 2. Pratiques de conception pour la Stratoconception® et l'architecture

Notre étude de l'état de l'art des pratiques numériques développées dans la construction en bois est réalisée dans le Chapitre 1. Attrait de la Stratoconception® pour l'architecture et la construction en bois, nous a menés à considérer que l'intégration du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois implique une flexibilité du processus et particulièrement des flux de travail de conception et de fabrication. À ce jour, les applications du procédé de Stratoconception® se concentrent principalement autour de la fabrication de prototypes ou d'outillages pour l'industrie. Le domaine de l'architecture se différencie des pratiques du monde industriel par la nature des objets à construire ainsi que par la multiplicité et la pluridisciplinarité des acteurs et des pratiques numériques que la conception et la réalisation de ces objets impliquent.

Ce second chapitre développe les pratiques numériques actuelles de conception du processus de fabrication par Stratoconception®, adaptées aux pratiques industrielles, ainsi que les pratiques de la conception architecturale, particulièrement dans le cadre de conception de composants architecturaux non-standards. Premièrement, nous nous intéresserons aux règles de conception pour la fabrication par Stratoconception® et aux chaînes numériques actuelles mises en place autour de l'utilisation du procédé. Une deuxième partie se concentrera sur les spécificités de la conception architecturale par rapport aux pratiques du monde industriel et portera un regard sur la conception de composants architecturaux non-standards en développant particulièrement les notions de conception paramétrique et de continuité informationnelle numérique. La description de ces pratiques nous permettra de porter un premier regard sur la capacité de flexibilité des flux de travail de conception numérique et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux.

2.1 Conception pour la fabrication par Stratoconception®

Le procédé de Stratoconception® se constitue d'une phase de conception de son processus de fabrication, une phase de fabrication puis une phase d'assemblage et de finition. Dans cette partie, nous définirons le concept de conception pour la fabrication additive et positionnerons le procédé de Stratoconception® dans ce concept. Nous décrirons les règles de conception associées au procédé de Stratoconception® puis discuterons l'opération de prise de décisions par l'opérateur humain dans la phase de conception du processus de fabrication. Nous évoquerons enfin les chaînes numériques de conception et de fabrication mises en place autour du procédé de Stratoconception®.

2.1.1 Design for Additive Manufacturing

Le concept de *Design for Additive Manufacturing (DfAM)*, traduit par « *conception pour la fabrication additive* », est dérivé du concept de *Design for Manufacturing (DfM)* qui désigne la conception d'un produit où la fabrication, l'assemblage, les vérifications, les coûts et l'ensemble du cycle de vie sont intégrés et optimisés sans compromettre la fonctionnalité et l'apparence du modèle. Le concept de *DfAM* développe ainsi des méthodes et des outils favorisant la proposition de conceptions performantes en vue d'une fabrication additive.

Contrairement à la plupart des procédés de fabrication traditionnels, les procédés de fabrication additive ont relativement peu de contraintes de fabrication ce qui ouvre la possibilité d'une conception davantage axée sur l'optimisation créant des produits à forte valeur ajoutée. Wiberg propose un examen et une classification des méthodes de *DfAM* (Wiberg et al., 2019). Il observe que la plupart des recherches se limitent à une partie du processus de conception et que peu d'exemples en proposent un traitement complet. Il décompose le processus *DfAM* global en trois étapes chronologiques (Figure 26) où des objectifs spécifiques sont formulés à chaque étape :

- La conception du système : cette étape se concentre sur la vue d'ensemble de la pièce en évaluant la pertinence du choix de la fabrication additive comme méthode de fabrication. Les limites de la pièce, l'assemblage à d'autres composants et les exigences fonctionnelles de la pièce sont traités ;
- La conception de la géométrie de la pièce : le modèle géométrique de la pièce est défini et peut être optimisé par optimisation topologique en réponse à différentes contraintes. La conception de la géométrie de la pièce est analysée et vérifiée.
- La conception du processus : la pièce est préparée pour la fabrication en définissant le tranchage et en optimisant les variables du processus. La génération de structures de support, du parcours d'outil et le post-traitement sont intégrés à cette étape.



Figure 26. Étapes chronologiques du processus de Design for Additive Manufacturing explorées dans les travaux de recherche selon Wiberg. Adapté d'après (Wiberg et al., 2019)

Simpson indique que l'articulation des flux de travail et des outils logiciels de conception est difficile (Simpson, 2017). Wiberg relève que des itérations des différentes étapes du processus de conception sont nécessaires pour pleinement comprendre l'influence des choix effectués sur le résultat final de la pièce et ainsi proposer la meilleure conception pour cette dernière (Wiberg et al., 2019).

Il est également noté que la multiplicité des procédés de fabrication additive engendre une multiplicité des méthodes proposées, s'adaptant aux spécificités de chacun. Les méthodes de *DfAM* s'affilient aujourd'hui à un procédé particulier et ne convergent pas vers l'établissement d'un modèle global

acceptant des adaptations ponctuelles aux différents procédés. Ces méthodes sont aujourd'hui limitées dans leur application par le manque de logiciels suffisamment matures intégrant les étapes de conception et de simulation de la fabrication pour un procédé de fabrication additive particulier.

Le procédé de Stratoconception® se positionne à l'étape de conception de son processus de fabrication, supportée par le développement de solutions logicielles dédiées permettant la définition des stratégies de tranchage, la mise en place des éléments d'assemblage, la génération de la mise en panoplie, du parcours d'outil puis la génération des documents d'usinage associés. Le procédé intervient donc à la suite de la conception des pièces qu'il traite. Ce positionnement est associé à l'utilisation de la Stratoconception® pour la fabrication de prototypes ou d'outillages, impliquant que la pièce finale ne sera pas réalisée directement par Stratoconception®. Par conséquent, la conception du processus de fabrication par Stratoconception® est indépendante de la conception de ses objets eux-mêmes, destinés à être réalisés par d'autres procédés de fabrication, au contraire de la réalisation directe de composants architecturaux que nous étudions dans nos travaux.

2.1.2 Conception du processus de fabrication par Stratoconception®

Pour appréhender la conception du processus de fabrication par Stratoconception®, nous explicitons les critères de fabrication inhérents au procédé ainsi que les stratégies de transformation de la géométrie d'une pièce qui lui sont associées pour préparer cette dernière pour sa fabrication.

2.1.2.1 Critères de fabrication et géométrie pour l'usinage

La préparation de la géométrie pour la fabrication par Stratoconception® implique une modification de la géométrie de la pièce à fabriquer, la transformant en un ensemble de strates élémentaires et complémentaires, en un ensemble de polygones fermés décrivant un parcours d'outil puis, pour finir, en points décrits par leurs coordonnées géométriques traitées par des machines à commande numérique. Les opérations et les choix associés à cette transformation répondent à des critères de fabrication afin d'assurer la faisabilité de la réalisation de la pièce.

Dépouilles et contre-dépouilles

Les opérations de fabrication par micro-fraisage 2,5 axes induisent la présence d'une direction d'usinage unique et définissent des critères d'accessibilité qui leur sont associés. Les opérations de micro-fraisage se font selon la direction normale au plan de tranchage et caractérisent les surfaces composant une pièce : ces surfaces peuvent être accessibles à l'outil, c'est-à-dire en dépouille, ou inaccessibles à l'outil, c'est-à-dire en contre dépouille.

La présence de surfaces en dépouille et en contre dépouille au sein d'un même élément à fabriquer est résolue par une opération de retournement permettant la réalisation, en deux phases d'usinage, de l'élément complet. Ce mode d'usinage est désigné comme le mode recto-verso par opposition au mode recto par lequel tous les éléments sont usinés d'un seul côté, sans opération de retournement. Les surfaces inaccessibles selon la direction d'usinage, même par retournement, sont appelées zones inaccessibles. La Figure 27 identifie les zones accessibles et inaccessibles à l'outil pour l'usinage par micro-fraisage 2,5 axes de strates.

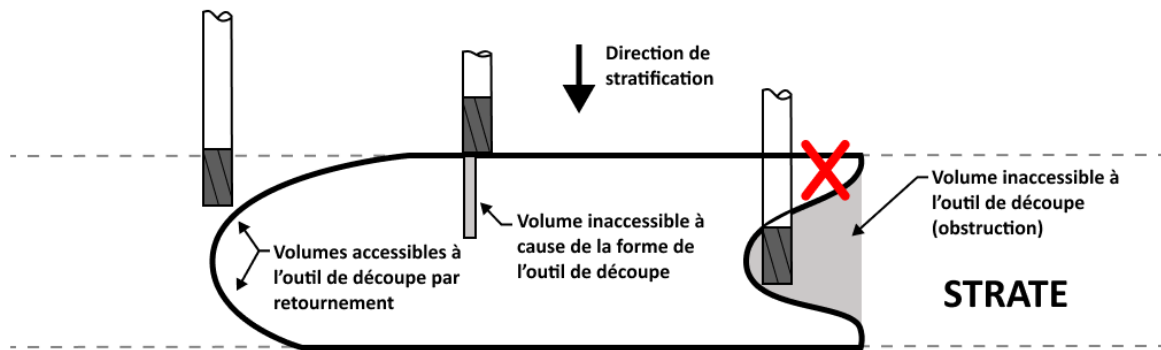


Figure 27. Zones accessibles et inaccessibles à l'outil en raison de la taille de l'outil et en raison de la présence, même après retournement, de surfaces en contre-dépouille. Adapté d'après (Lauvaux, 2005).

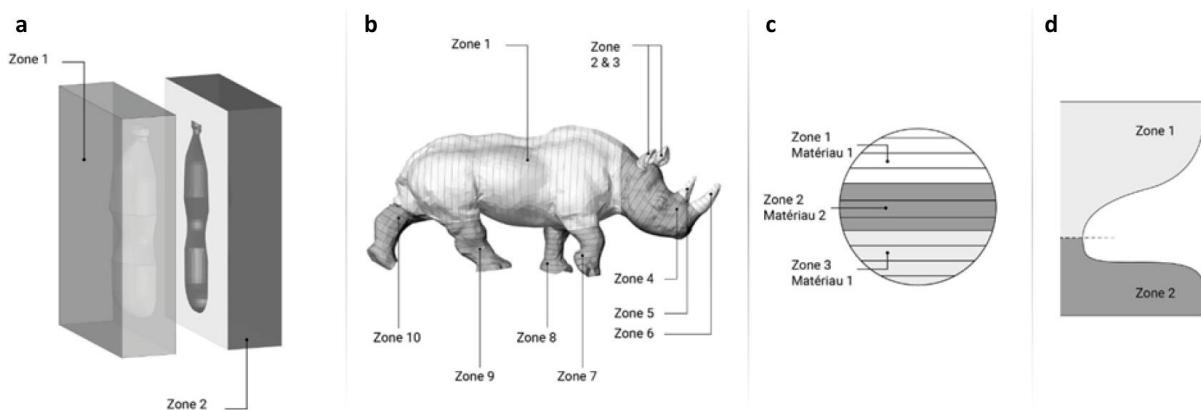


Figure 28. Séparation en zones de la géométrie d'une pièce pour réaliser des géométries internes inaccessibles (a), pour réaliser un tranchage multi-axes (b), pour utiliser différents matériaux (c) et pour faciliter l'accessibilité d'une zone à l'usinage (d)

Stratégies de tranchage

La capacité d'accessibilité de l'outil à la géométrie de l'élément à fabriquer conditionne les stratégies de tranchage qui ont pour objectif la disparition de toutes les zones inaccessibles, non-réalisables. Le traitement de ces zones se fait par une pré-décomposition, dans le cas de pièces comportant des géométries internes non-accessibles, dans le cas de pièces favorisant un tranchage multi-axes, dans le cas d'épaisseurs de tranchage ou de matériaux différents et dans le cas de l'ajout de plans de tranchage spécifique facilitant la fabrication en maximisant l'accessibilité d'une zone et en favorisant la présence de zones dont les surfaces sont toutes en dépouille (Figure 28).

Ces différentes opérations sont complémentaires et pour la plupart optionnelles, seul le choix d'une direction de tranchage étant indispensable. Les choix des stratégies de tranchage sont, dans la majorité des cas, motivés par l'amélioration de la fabrication et visent ainsi la diminution, voir la mise à zéro, du volume de zones en contre-dépouille dans le but d'éviter une fabrication en deux phases d'usinage, et une facilitation des opérations d'assemblage (Lauvaux, 2005). L'ajout de plans de tranchage spécifique permet également le traitement des flipots. Les flipots sont définis comme « une partie de strate de très faible épaisseur dont l'extrémité tend vers une quantité de matière nulle » qui induit un volume important de perte de matière à l'usinage et qui « peut s'abimer lors de l'usinage, du montage ou de sollicitations mécaniques pendant l'utilisation de la pièce » (Delebecque, 2007).

L'opération de tranchage, reposant sur l'utilisation de plans parallèles, fait intervenir deux paramètres que sont la direction de tranchage, motivée par les conditions d'accessibilité, et la hauteur des strates qui correspond, au maximum, à l'épaisseur des plaques et qui peut y être inférieure dans le cas où des plans spécifiques sont définis pour assurer l'accessibilité de la strate à l'usinage. Lauvaux souligne que *« les directions de tranchage correspondent, dans l'écrasante majorité des cas, aux axes du repère ; cette constatation s'explique par la façon de créer les modèles, qu'ils soient originaires d'une numérisation ou d'une conception manuelle »*. Il ajoute que *« s'il est fréquent de pouvoir employer cette technique avec des pièces mécaniques, il est très rare qu'une pièce artistique le permette »* (Lauvaux, 2005). Cette affirmation résulte du fait que les pièces artistiques peuvent se voir conférer une liberté formelle tridimensionnelle impliquant une absence de formes géométriques élémentaires et ne privilégiant, par leur conception, aucune direction de tranchage spécifique. Houtmann propose d'autres alternatives au tranchage avec l'intégration de plans non-parallèles, de plans brisés et de surfaces gauches qui apportent des améliorations relatives au traitement des volumes inaccessibles, à la facilité et au temps d'assemblage ou encore au traitement des flipots mais qui participent à l'augmentation de la longueur des parcours d'outil et donc des temps de fabrication ainsi qu'à une augmentation des pertes matières associées aux opérations de surfacage (Houtmann, 2007).

Le choix de l'épaisseur des strates influe pour sa part sur les temps d'usinage, les contre-dépouilles générées et le nombre d'opérations d'assemblage (Lauvaux, 2005). Une grande épaisseur de strate implique une augmentation du volume usiné, augmente, dans le même temps, les temps d'usinage mais réduit le nombre de pièces et ainsi le nombre d'opérations d'assemblage. Le choix est alors un compromis entre ces différents critères.

Limites dimensionnelles et décomposition des strates

La relation entre la dimension de la pièce à fabriquer et les dimensions des moyens techniques (machines) et matériels (panneaux) utilisés influe sur les stratégies adoptées lors de la préparation de la géométrie de la pièce pour sa réalisation. Pour la production de pièces dont les dimensions sont supérieures à celles des courses machines ou des formats de panneaux utilisés, une étape de décomposition des strates est nécessaire. Une tranche comporte alors plusieurs parties, c'est-à-dire plusieurs pièces dont la faisabilité est alors assurée, leurs dimensions étant inférieures à celles des moyens techniques et matériels.

Nous avons précédemment montré que pour la réalisation de composants architecturaux d'un ordre de grandeur du décimètre, cette phase devient indispensable en raison des dimensions des panneaux en bois, dont le format répond généralement aux contraintes des gabarits routiers avec une largeur maximale de 3,50 m (voir la partie 1.2.2.3). Deux méthodes de décomposition existent avec une décomposition par des plans uniques ou une décomposition par grille. Dans le cas de géométries de strates engendrant de fortes pertes matières lors de leur mise en panoplie, une décomposition peut permettre une réduction de ces pertes. Les paramètres définissant les plans uniques ou les dimensions de la grille de décomposition sont laissées libres à l'opérateur humain.

Stratification adaptative et parcours d'outil

La stratification consiste en une discrétisation des strates, dont la représentation passe d'une définition tridimensionnelle à un ensemble de polygones fermés définissant ses contours et ainsi la géométrie finale des éléments à fabriquer pour l'usinage. La précision de la stratification impacte la précision de la géométrie de la pièce finale et les temps d'usinage associés à sa fabrication. La distance

séparant chaque contour détermine la précision de la stratification alors que le nombre de contours induit une augmentation de la longueur du parcours d'outil et donc du temps d'usinage.

Le calcul de la stratification est adaptatif à la géométrie de l'élément à fabriquer, une grande précision étant apportée uniquement aux endroits la nécessitant (Delebecque et al., 2000). Ainsi, la densité de la stratification s'adapte à la pente du profil de l'élément. La stratification adaptative permet un gain de temps d'usinage pour une précision identique par rapport à une stratification par passes de hauteur constante. Nous avons précédemment souligné l'influence de la dimension et de la géométrie des pièces à réaliser sur les choix des paramètres de stratification (voir partie 1.2.3.4) Nous ajoutons que les choix des paramètres de stratification sont laissés à l'appréciation du concepteur.

La définition de la géométrie à usiner correspond à la définition du parcours d'outil généré à partir du résultat de la stratification. Le parcours correspond aux contours auxquels est appliqué un décalage correspondant au rayon de l'outil. Lauvaux relève les erreurs d'usinage liées à l'outil (Lauvaux, 2005). Il distingue deux cas où une partie d'élément est inaccessible (Figure 29) :

- Une partie d'élément est inaccessible lorsqu'il est défini par un angle concave, alors qu'un angle convexe sera pour sa part toujours accessible. Cette erreur a pour effet d'augmenter les angles concaves en créant un volume d'erreur ;
- Une partie d'élément est inaccessible lorsqu'il s'agit de vides dont les dimensions sont inférieures au diamètre de l'outil.

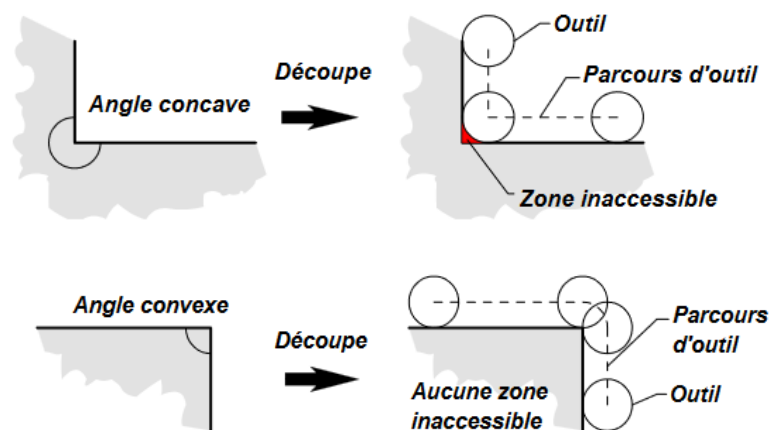


Figure 29. Identification des zones inaccessibles des contours d'usinage : les formes concaves engendrent des zones localement inaccessible à l'outil (en haut) contrairement aux formes convexes (en bas). D'après (Lauvaux, 2005)

La transformation du modèle tridimensionnel d'une pièce en un parcours d'outil constitué d'un ensemble de polygones suit donc des étapes répondant directement aux contraintes de fabrication inhérentes au procédé de Stratoconception®. Ces contraintes sont des règles de conception pouvant être obligatoires, pour assurer la faisabilité même de la pièce (traitement des zones inaccessibles, décomposition dans les limites dimensionnelles des panneaux en bois...), ou optionnelles lorsqu'il s'agit d'optimiser le processus de fabrication (adaptation des paramètres de stratification, décomposition pour minimiser les pertes matières...).

2.1.2.2 Traitement de l'information par le concepteur

Deux solutions logicielles supportent la conception du processus de fabrication par Stratoconception® : le logiciel de FAO *Stratoconcept*® et l'add-in *TopSolid'Strato*, possédant les mêmes fonctionnalités que *Stratoconcept*® tout en s'intégrant au logiciel de CFAO *TopSolid*, fortement utilisé dans le domaine de l'ingénierie mécanique.

Dans ces deux solutions, les choix de conception du tranchage sont définis manuellement par l'utilisateur qui peut s'appuyer, par exemple, sur des outils d'analyse de la géométrie de la pièce pour afficher les surfaces en dépouilles, en contre-dépouilles ou les zones inaccessibles. La pertinence des choix des stratégies de tranchage utilisées et de leur paramétrisation a alors une forte dépendance avec l'expertise du concepteur et peut engendrer des conceptions non-optimales en raison de la multiplicité des combinaisons possibles, particulièrement dans le cas de pièces aux géométries complexes pour lesquelles ces stratégies peuvent devenir difficiles à appréhender contrairement à des pièces mécaniques comportant des symétries et des formes géométriques simples (plans, extrusions...). Lauvaux relève ainsi qu'il est rare que les pièces de formes libres « *se composent de formes simples ou qu'il existe une décomposition évidente pour faciliter leur réalisation* » (Lauvaux, 2005). Cette observation explique le manque d'automatisation et, au contraire, la forte intervention du concepteur, dans les choix de tranchage, les formes libres et la multiplicité des approches complexifiant un traitement automatisé des pièces et demandant une flexibilité dans la conception du processus de fabrication, basée sur le traitement de l'information par l'opérateur humain. Nous émettons cependant l'hypothèse que dans le cas du développement de pièces dont la typologie est caractérisée, le traitement de l'information associé à ces stratégies pourrait être transmis aux machines pour automatiser et accélérer les temps d'études liés à la conception de la géométrie des pièces pour l'usinage quelle qu'en soit la complexité géométrique.

L'ensemble des phases constituant la conception du processus de fabrication par Stratoconception® reposent donc sur un flux séquentiel d'opérations dépendant d'interventions manuelles du concepteur et possédant peu de retours d'information direct en dehors des critères de faisabilité ce qui complexifie l'objectivation d'une optimisation de cette conception. Nous soulignons cependant que la solution logicielle basée sur l'add-in *TopSolid'Strato* permet pour sa part une mise à jour des données aval suite à une modification de paramètres par le concepteur.

2.1.3 Chaines numériques associées au procédé de Stratoconception®

Nous avons énoncé que les outils développés pour supporter une fabrication par Stratoconception® se concentrent sur une des parties du processus de conception défini par Wiberg qui est la conception du processus de fabrication (Wiberg et al., 2019). Le transfert du traitement d'informations aux machines avec le développement des machines-outils à commande numérique et de la robotique permet désormais l'automatisation des processus de fabrication (Schindler, 2007) et permet la mise en place d'un *continuum numérique* assurant un dialogue entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication, formant une chaîne numérique assurant la transition de la forme géométrique « *abstraite* » vers une réalité constructive en y intégrant des données représentatives de cette réalité (Picon, 2018). Au terme de *continuum numérique* nous préférons la spécification *continuum informationnel numérique*, précisant l'importance du flux informationnel et de l'échange de données entre les étapes de modélisation et de fabrication et spécifiant ainsi le terme de continuité. Ce concept

s'associe au concept d'interopérabilité, c'est-à-dire à la capacité des matériels, des logiciels et des protocoles différents à fonctionner ensemble et à partager des informations.

Nous décrivons ici les chaînes numériques associées à l'utilisation actuelle des deux solutions logicielles supportant le procédé de Stratoconception® pour en évaluer, en partie 2.2.2.3, la capacité d'interopérabilité avec des solutions logicielles adaptées aux pratiques de l'architecture, l'ingénierie et la construction et ainsi avec les autres parties du processus de conception défini par Wiberg (Wiberg et al., 2019).

2.1.3.1 Stratoconcept®

Le logiciel de FAO *Stratoconcept*® repose sur l'importation puis le traitement du modèle tridimensionnel d'une pièce dans un format de fichier STL, défini comme un maillage triangulaire. Le choix de ce format lors du développement des premiers outils de FAO dédiés à la fabrication additive repose sur sa simplicité d'utilisation, sa facilité de création et son universalité (Lauvaux, 2005). La transformation de la géométrie de la pièce, de son modèle numérique tridimensionnel en un maillage triangulaire crée une rupture de la chaîne numérique (Figure 30) et empêche toute utilisation d'informations associées au processus de fabrication au sein du processus de conception de la pièce. Dans un sens opposé, cette rupture implique une linéarité de la chaîne numérique avec un traitement complet de la conception du processus de fabrication à chaque modification de la conception de la géométrie de la pièce. Nous soulignons qu'il existe une seconde rupture de la chaîne numérique, intervenant avec l'écriture du G-Code, qui n'engendre pas de répercussions sur la flexibilité du flux du travail entre conception et fabrication.



Figure 30. Identification des ruptures de la chaîne numérique associée au logiciel de FAO Stratoconcept®

2.1.3.2 TopSolid'Strato

L'add-in *TopSolid'Strato* est un résultat du projet *C-Fast* porté par CIRTES et Missler Software visant la création d'une chaîne numérique unifiée, continue et réversible de la conception à la fabrication additive par Stratoconception® (Bpifrance, 2017). La conception de la géométrie de la pièce et la conception du processus de fabrication par Stratoconception® sont alors réalisées au sein d'une même solution logiciel, supprimant les échanges de données par des opérations d'export et d'import de fichiers. La modification de la géométrie de la pièce traitée entraîne une mise à jour automatisée des opérations constituant la conception du processus de fabrication, sans mise à jour des paramètres définis précédemment par le concepteur, dans la limite de modifications minimales. En cas de modifications importantes, des dimensions globales ou des géométries de la pièce, les règles établies pour les opérations constituant la conception du processus de fabrication par Stratoconception® ne peuvent plus s'appliquer et doivent être redéfinies. Cette limite de l'automatisation des mises à jours des opérations constituant la conception du processus de fabrication provient de l'absence de liaisons entre les règles de conception de la géométrie de la pièce et les règles de conception du processus de fabrication, seule la géométrie de la pièce étant considérée et non la manière dont elle a été conçue.

TopSolid est un logiciel fortement utilisé dans le domaine de l'ingénierie mécanique mais qui est absent des logiciels utilisés dans le domaine de l'architecture. L'utilisation d'un logiciel adapté à la conception architecturale induit alors l'import du modèle numérique de la pièce à réaliser dans un format de fichier STEP. Nous retrouvons alors, dans le cadre de la conception de composants architecturaux, les mêmes problématiques de rupture de la chaîne numérique évoquées avec l'utilisation du logiciel *Stratoconcept*[®].

Points clés de la partie 2.1 Conception pour la fabrication par Stratoconception®

- La définition des étapes constituant le processus de conception pour la fabrication additive positionne la Stratoconception® à l'étape de conception du processus de fabrication :
 - Ce positionnement fait intervenir le procédé à la suite de la conception des composants qu'il traite ;
 - Les flux de travail actuels de conception pour la fabrication additive montrent que des itérations des différentes étapes du processus de conception sont nécessaires pour pleinement comprendre l'influence des choix effectués sur le résultat final et pour proposer la meilleure conception pour cette dernière. La conception des pièces demande une analyse et une vérification avant que le processus de fabrication ne soit conçu.
- La conception du processus de fabrication par Stratoconception® se base sur une grande flexibilité de prise de décision dans les opérations qui lui sont associées, se basant sur le traitement de l'information par l'opérateur humain :
 - L'expertise de l'opérateur humain influence fortement la qualité des choix effectués et, par extension, le résultat de la conception du processus de fabrication ;
 - La grande liberté formelle des pièces réalisables par Stratoconception® complexifie l'automatisation de la conception du processus de fabrication ;
 - Le manque de retour d'information, en dehors des critères de faisabilité, rend difficile l'objectivation d'une optimisation de la conception du processus de fabrication.
- Le procédé de Stratoconception® repose sur deux solutions logicielles autour desquelles ont été développées des chaînes numériques de conception et de fabrication :
 - Dans le contexte de la conception d'un composant architectural, la transmission d'informations entre la phase de conception de la géométrie de la pièce et la phase de conception du processus de fabrication se fait par l'export et l'import de fichiers au format STL ou STEP ce qui rend impossible l'utilisation des données associées à la fabrication au sein de la phase de conception de la géométrie de la pièce ;
 - L'articulation des flux de travail, que nous admettons comme itératifs, et des outils logiciels est aujourd'hui difficile pour la réalisation de composants architecturaux par Stratoconception® en raison de la rupture de la chaîne numérique entre la conception de la géométrie de la pièce et la conception du processus de fabrication.

2.2 Pratiques numériques pour la conception de composants architecturaux

La conception du processus de fabrication par Stratoconception® intervient après la conception des pièces à fabriquer elles-mêmes. Nous avons précédemment souligné et admis le caractère itératif des flux de travail de conception pour la fabrication additive, particulièrement pour le procédé de Stratoconception®, qui construit une relation entre conception de la géométrie de la pièce et conception du processus de fabrication. Nous nous intéresserons alors aux pratiques de conception de composants architecturaux pour appréhender leur relation avec la conception du processus de fabrication par Stratoconception®. Pour cela, nous identifierons les spécificités de la conception architecturale par rapport aux pratiques du monde industriel, identifierons les facteurs d'adoption des innovations dans le but de les appréhender dans notre contexte et porterons un regard sur les pratiques de conception de composants architecturaux en développant particulièrement les notions de conception paramétrique et de continuité informationnelle numérique.

2.2.1 Spécificités du secteur de la construction et adoption de l'innovation

Pour appréhender la relation entre la conception d'une pièce pour l'architecture et la conception du processus de fabrication par Stratoconception® nous explicitons les spécificités associées à la conception d'un objet pour l'architecture en comparaison à la conception d'un objet pour l'industrie, ce qui constitue l'usage courant du procédé de Stratoconception® et de ses outils numériques.

2.2.1.1 Conception des objets pour l'industrie et pour l'architecture

Les approches et les technologies de conception et de fabrication d'objets pour l'industrie aérospatiale, automobile, plus largement pour l'industrie manufacturière, et pour l'architecture sont souvent opposées dans la littérature scientifique en soulignant des pratiques plus matures pour les domaines fortement industrialisés en comparaison au domaine de la construction qui apparaît comme étant en retard. La comparaison de ces adoptions se fait cependant en dehors des caractéristiques spécifiques du domaine de la construction qui participent pourtant à la compréhension de la « *résistance à l'innovation* » des pratiques de l'architecture et de la construction (Mohd Ishak and Newton, 2016). Wagner souligne ainsi que « *les principes fondamentaux des deux industries, mais aussi les facteurs culturels, sociaux et politiques sont d'une nature totalement différente* » (Wagner et al., 2020).

Raynaud identifie trois traits distinctifs opposant les objets conçus pour l'industrie et pour l'architecture (Raynaud, 2001) :

- *Les objets industriels sont produits en série alors que les bâtiments sont des objets uniques. Ce trait distinctif impacte directement la notion d'optimisation de la conception, se rapportant généralement à l'optimisation de la matière consommée, le coût d'ingénierie associé à l'opération d'optimisation devenant supérieur au gain apporté dans le cas de la réalisation d'objets uniques pour l'architecture se composant généralement d'éléments standards. Les approches de conception pour un objet unique et pour un objet dont la destination est une fabrication en série ne peuvent donc être équivalentes ;*

- *Les objets industriels sont identifiés par leur marque alors que les bâtiments sont identifiés par leur localisation.* La conception et la fabrication d'un produit industriel sont généralement gérées par une même entreprise. Ainsi, le produit est désigné par une marque et la responsabilité associée à une défaillance est endossée par cette entreprise. Dans le cas d'un projet d'architecture, les responsabilités ne sont pas aussi évidentes et doivent « être étudiées au cas par cas et seront en général redistribuées selon les domaines respectifs d'expertise des concepteurs, des constructeurs et des fournisseurs » (Raynaud, 2001) ;
- *Les objets industriels sont des meubles, les édifices sont des immeubles :* les projets d'architecture sont des productions situées, expliquant le caractère unique de leur production et influençant les méthodes utilisées dans la conception.

Le second point abordé par Raynaud souligne une caractéristique forte du domaine de la construction qui est la fragmentation des acteurs et de leurs activités spécifiques qui complexifie l'acte de construire. Harty affirme ainsi que « *la complexité du contexte des travaux de construction tient à la collaboration inter-organisationnelle, à une approche basée sur les projets et à la répartition du pouvoir entre ces organisations* » (Harty, 2005). Cette approche basée sur les projets crée une nécessité de maintien de la flexibilité de la gestion des entreprises, des structures organisationnelles et des modes de production dans un but de compétitivité (Wagner et al., 2020).

Nous soulignons également la notion de compétence associée au domaine de l'architecture, l'ingénierie et la construction, particulièrement au regard de nos travaux sur l'utilisation de la fabrication additive, impliquant la conception de modèles tridimensionnels d'objets possédant une grande liberté formelle. Nous portons notre regard sur deux points particuliers : les modes de représentation qui participent au travail de conception et les théories utilisées en ingénierie. La conception architecturale est encore fortement influencée par l'utilisation de moyens de représentation 2D ou de moyens de représentation 3D permettant la création de vues projetées dont la compréhension est adoptée et maîtrisée par l'ensemble des acteurs de la construction (Babič and Rebolj, 2016). La représentation 2D est particulièrement adaptée pour la représentation des éléments standardisés de la construction, facilement représentables en plan, étant généralement assimilables à des surfaces extrudées dans une troisième dimension. Nous faisons ainsi l'hypothèse que, bien que la modélisation 3D soit aujourd'hui adoptée dans le domaine de l'architecture, la conception de composants tridimensionnels ne fait pas partie des pratiques courantes et peut présenter des complexités à la fois dans l'étape de modélisation et dans le processus cognitif de conception.

L'ajout d'une troisième dimension aux objets conçus a également des répercussions dans les études de simulations menées par l'ingénieur. Ainsi, la théorie des poutres et la théorie des coques utilisées dans le domaine du génie civil ne sont pas adaptées pour l'étude de solides tridimensionnels, dépassant les limites des hypothèses définies pour ces théories, et appellent à des compétences plus avancées se rapprochant de celles développées pour la conception d'objets pour l'industrie.

2.2.1.2 Facteurs d'adoption de l'innovation

Nous avons précédemment souligné la « *résistance à l'innovation* » des pratiques de l'architecture et de la construction. L'utilisation du procédé de Stratoconception® dans le domaine de l'architecture et de la construction en bois nous mène à expliciter les caractéristiques fondamentales de la théorie de la diffusion des innovations relatives au taux d'adoption d'une innovation, permettant d'appréhender

les enjeux de l'intégration de ce procédé de fabrication additive dans les pratiques courantes de notre contexte.

L'innovation est définie, selon les normes ISO, comme « *un processus ou un produit nouveau ou amélioré qui se différencie de manière significative des précédents produits ou processus qui étaient jusque-là disponibles aux utilisateurs* » (ISO, 2019). L'intégration du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de fabrication de l'architecture et de la construction en bois répond à cette définition et correspond à quatre des cinq formes d'innovations proposées par Schumpeter en s'inscrivant à la fois comme une innovation liée à l'introduction d'une nouvelle méthode de production, à la réalisation d'une nouvelle organisation de production, à la fabrication d'un bien nouveau et à l'ouverture de nouveaux débouchés (Schumpeter, 1999).

La théorie de la diffusion de l'innovation fait référence à « *l'acceptation, l'acquisition et le déploiement au cours du temps de certains produits, idées ou pratiques par des individus, groupes d'individus ou autres unités d'adoption, dans un système social donné avec un système de valeurs et une culture donnés* » (Hochscheid, 2021). Rogers identifie cinq attributs d'une innovation participant à son taux d'adoption qu'il définit comme la « *vitesse relative à laquelle une innovation est adoptée par les membres d'un système social* » (Kaminski, 2011; Rogers, 2003) :

- L'avantage relatif qui correspond à la mesure des gains apportés par l'innovation en comparaison aux pratiques actuelles ;
- La compatibilité qui correspond à la mesure de la cohérence subjective de l'innovation avec les valeurs socioculturelles, les idées antérieures et/ou les besoins perçus ;
- La complexité qui correspond au degré de difficulté subjectif d'utilisation ou de compréhension d'une innovation, sa simplicité ;
- La possibilité d'essai qui correspond à la mesure de la capacité d'expérimentation d'une innovation sur un échantillon de petite dimension ;
- L'observabilité qui correspond à la mesure du degré de visibilité des résultats d'une innovation pour les adoptants potentiels.

L'étude de l'intégration du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois dans laquelle s'inscrivent nos travaux, doit ainsi considérer ces attributs et leur influence sur le taux d'adoption potentiel de cette innovation.

2.2.2 Pratiques numériques pour la conception

La conception des objets pour l'architecture et pour l'industrie diffère dans leurs approches et dans leurs outils. Nous portons un regard sur les pratiques numériques convoquées pour la conception architecturale puis portons un regard sur la notion de conception paramétrique pour sa capacité de flexibilité. Nous évoquons enfin la notion de continuum informationnel numérique et d'interopérabilité des logiciels de conception et de fabrication.

2.2.2.1 Environnements numériques et conception paramétrique pour l'architecture

Les dernières décennies ont vu le développement et l'emploi croissant des outils numériques de dessin assisté par ordinateur (DAO) et de conception assistée par ordinateur (CAO) dans le secteur de l'architecture, l'ingénierie et la construction. Aish propose une représentation de l'évolution des pratiques numériques de CAO considérée du point de vue des flux de données liant la génération des données à une réalité matérielle (Aish and Bredella, 2017). Il distingue alors quatre phases (Figure 31) :

- La représentation par dessin 2D (phase 1) dans laquelle l'architecte crée directement des dessins qui sont utilisés dans un processus de construction ;
- La modélisation BIM, *Building Information Model/Modeling/Management* (phase 2) dans laquelle l'architecte crée une maquette numérique BIM (*Building Information Model*) à partir de laquelle des dessins 2D peuvent être extraits pour être utilisés dans un processus de construction ;
- La conception computationnelle comme générateur BIM (phase 3) dans laquelle l'architecte crée des algorithmes pour générer automatiquement une maquette numérique BIM à partir de laquelle des dessins 2D peuvent être extraits pour être utilisés dans un processus de construction ;
- La conception computationnelle comme générateur directe de bâtiment (phase 4) dans laquelle l'architecte crée des algorithmes pour modéliser automatiquement un bâtiment et qui peuvent alors servir de support à la génération directe des commandes pilotant une fabrication numérique.

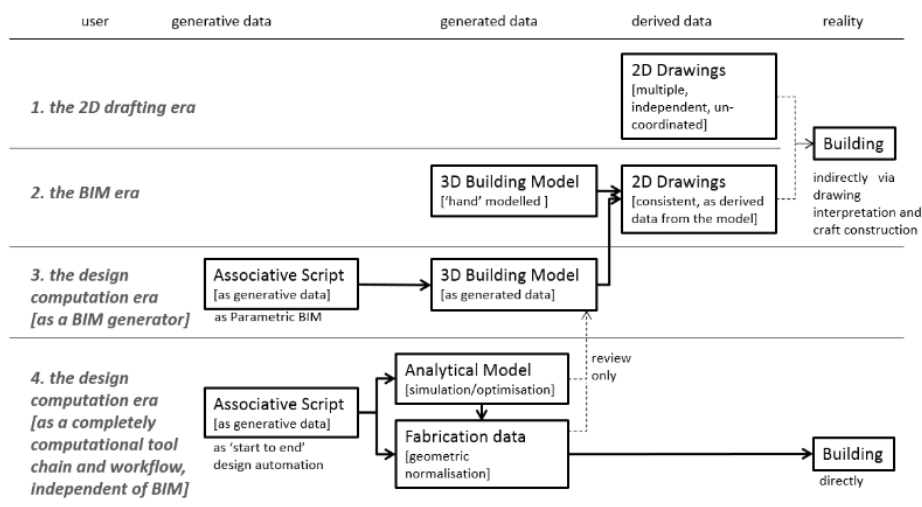


Figure 31. Quatre phases de l'évolution de la conception assistée par ordinateur proposée par Aish. D'après (Aish and Bredella, 2017).

Aish souligne que pour les phases 1 à 3, la connexion finale à la construction dépend toujours de l'utilisation et de la manipulation manuelle de données issues des dessins 2D alors que dans la phase 4, la mise en place d'un flux de travail numérique complet établissant une relation entre la conception et la fabrication est possible.

La représentation proposée par Aish implique deux environnements de conception se suffisant à eux-mêmes (phases 2 et 4) ou se combinant (phase 3) :

- La technologie BIM, qui est définie comme l' « utilisation d'une représentation numérique partagée d'un actif bâti pour faciliter les processus de conception, de construction et d'exploitation de manière à constituer une base fiable permettant les prises de décision » (ISO, 2018) ;
- La modélisation paramétrique, qui désigne la mise en relation d'un ensemble de données, pouvant être géométriques, numériques ou autres, dans un système de dépendances pour générer un modèle dont les paramètres, définis comme des variables indépendantes, permettent sa modification (Aish and Woodbury, 2005; Woodbury, 2010).

Stals souligne la différence liée à l'intégration des données dans ces deux environnements (Stals et al, 2018) ; le BIM intègre des données par « ajout de couches d'informations supplémentaires à un modèle géométrique en confinant les données à des éléments statiques complémentaires » ; la modélisation paramétrique « intègre directement les données dans un processus de morphogénèse et peut donc être appelée comme conception computationnelle ».

La modélisation paramétrique, par définition, permet une grande flexibilité dans le processus de conception architecturale d'objets uniques (voir partie 2.2.1.1), l'exploration d'un grand nombre de variantes d'un même objet à concevoir devenant accessible par la modification des paramètres définissant le modèle et par l'automatisation des opérations associées à ces paramètres générant l'objet à concevoir. Woodbury caractérise le processus de conception paramétrique comme reposant sur trois principes (Woodbury, 2010):

- Des règles et leurs relations logiques sont développées et définies par le concepteur lors de la création d'un modèle 3D ;
- Le modèle peut être modifié par le concepteur à toute étape du processus de conception ;
- Des alternatives peuvent être générées en parallèle à toute étape du processus de conception.

Dans les pratiques de l'architecture de l'ingénierie et de la construction, la conception paramétrique englobe la génération, l'interprétation technique, la rationalisation et la fabrication de composants architecturaux ou d'architectures complètes. Les phases du processus de conception évoquées peuvent être traitées ensemble dans un environnement paramétrique complet ou de façon unitaire. La rationalisation comprend l'évaluation et l'optimisation de l'interprétation technique de la forme selon des critères techniques, économiques, environnementaux ou encore subjectifs.

La conception paramétrique se prête alors particulièrement à l'articulation de flux de travail itératifs ce que nous avons postulé comme nécessaire dans le cadre d'une conception et d'une fabrication de composants architecturaux uniques par Stratoconception® (voir partie 2.1).

2.2.2.2 Intérêt de la conception paramétrique dans la phase amont de projets non-standards

Au cours du processus de conception d'un composant pour l'architecture, la description partielle du composant, les exigences et les objectifs de sa conception évoluent d'une définition abstraite vers des critères mesurables (Van Langen and Brazier, 2006). Turin et al. soulignent que pour la conception architecturale traditionnelle, « l'évaluation des exigences de conception repose sur la perspicacité du concepteur et se concentre sur une gamme limitée de performances telles que des performances fonctionnelles et esthétiques », n'intégrant des critères mesurables que dans des phases relativement avancées du processus de conception (Turrin et al., 2011). Une telle approche limite la performance de la solution finale du processus de conception en raison de l'impact des choix effectués dans les phases amont du processus : les changements résultant de l'analyse de critères mesurables interviennent dans une phase avancée du processus de conception et nécessitent une modification de l'ensemble des étapes du processus, impactant le temps consacré à la conception et, par extension, les données économiques du projet.

La conception d'architectures et des composants architecturaux non-standards ne peut s'opérer dans le cadre de ce processus traditionnel en raison de leur forte complexité mais nécessite une approche particulière en ingénierie, adaptée aux contraintes des moyens de fabrication pour assurer sa réalisation à des coûts maîtrisables. L'architecture non-standard se fonde alors en rupture avec le processus hiérarchique, séquentiel du projet, « forme-structure-matériau » (Raspall, 2015) en devenant une série d'évolutions itératives simultanées. L'intégration des contraintes de réalisation et des comportements physiques devient essentielle dès la génération de la forme pour assurer la transcription physique de ces architectures et de leurs composants non-standards. L'approche holistique demandée par cette intégration impacte la collaboration entre architectes, ingénieurs et constructeurs dès les premières phases de la conception, la rendant intuitivement plus étroite (Menges et al., 2016; Schmal, 2004). Une approche interdisciplinaire s'impose, donnant lieu à un processus de conception intégrée, alliant conception géométrique et matérialisation physique (Lienhard et al., 2013).

Turin et al. soulignent alors l'intérêt de l'utilisation de la conception paramétrique pour améliorer le « processus de conception traditionnel en convertissant une définition abstraite en critères mesurables couvrant différentes disciplines dans la phase amont du projet en introduisant des informations provenant d'évaluations numériques et de simulations de performances associées à des formes évolutives de solutions architectures » (Turrin et al., 2011). Le processus de conception paramétrique « ne vise pas à identifier des solutions purement optimales ; il vise plutôt à soutenir une exploration de conception plus large dans laquelle le concepteur peut intervenir pour aborder le processus de recherche et extraire des connaissances des solutions générées » (Turrin et al., 2011).

La capacité de la conception paramétrique à explorer un grand nombre de variantes pour la conception d'un même objet est directement liée à l'automatisation des opérations du processus dont les résultats se mettent à jour automatiquement par modification des paramètres qui les définissent. Cette automatisation permet un gain de temps du processus de conception paramétrique par rapport au processus de conception traditionnel ; ce gain de temps est accentué lorsque des outils déjà développés sont utilisés, diminuant le temps associé à l'écriture des algorithmes sur lesquels se reposent la conception paramétrique (Figure 32).

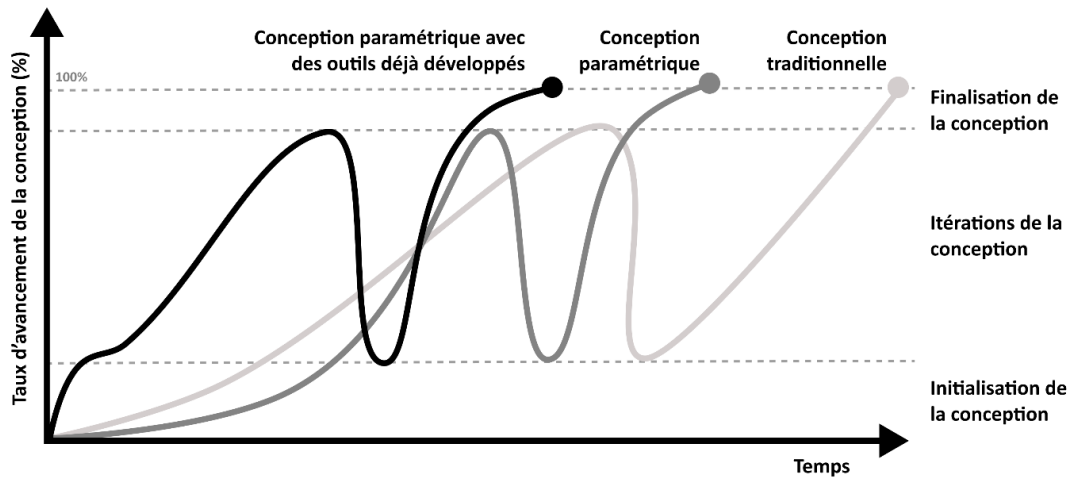


Figure 32. Représentation schématique de la durée de la phase de conception d'un projet traditionnel, d'un projet paramétrique et d'un projet paramétrique utilisant des outils ayant déjà été développés au sein desquels une modification est apportée. Adapté d'après (Wojslaw, 2022)

2.2.2.3 Continuum informationnel numérique

L'étude bibliographique a souligné le lien étroit existant entre les phases de conception et de fabrication dans un environnement numérique. Cette relation étroite renvoie au concept de continuum informationnel numérique que nous avons défini comme assurant un dialogue entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication, formant une chaîne numérique assurant la transition de la *géométrie « abstraite »* vers une réalité constructive. Ce dialogue repose sur un flux informationnel et sur l'échange de données. Bien que la notion de continuité suppose une capacité à ne pas être interrompu, Menges et al. affirment qu'à ce jour, la traduction des données entre conception architecturale, conception d'ingénierie et fabrication reste lente et fastidieuse, faisant intervenir différents logiciels, formats de fichiers et méthodes de travail (Menges et al., 2016). Nous avons également identifié cet aspect dans la transmission des informations de la conception d'un composant architectural vers la conception du processus de fabrication par Stratoconception® qui nécessite une étape d'export dans un format d'échange spécifique (voir partie 2.1.3). Ce processus d'export et d'import de données peut entraîner des tâches supplémentaires, être source d'erreurs et ne s'adapte pas à des changements en conception, rompant avec cette notion de continuité numérique. Ainsi, chaque modification de la conception implique une modification de l'ensemble des étapes aval qui lui est dépendant, particulièrement l'étape de conception du processus de fabrication.

La capacité de plusieurs systèmes ou composants à fonctionner ensemble en échangeant des informations et en utilisant les informations qui ont été échangées définit le concept d'interopérabilité. Eastman et al. identifient quatre manières d'échanger des données (Sacks et al., 2018) :

- Un échange par des liens directs au sein d'outils propriétaires spécifiques permettant des connexions directes et le traitement des éléments natifs du logiciel. Nous retrouvons ce lien direct dans la chaîne numérique de fabrication par Stratoconception® développée autour de l'utilisation de l'*add-in TopSolid'Strato*. L'échange par liens directs n'existe cependant que Un échange par des formats de fichiers propriétaires, cryptés, traitant principalement de la géométrie. L'utilisation d'un format d'échange implique des opérations d'export et d'import

rompant le lien avec le modèle initial et soulevant des problématiques liés à cette rupture précédemment identifiées ;

- Un échange par des formats de fichiers propriétaires, cryptés, traitant principalement de la géométrie. L'utilisation d'un format d'échange implique des opérations d'export et d'import rompant le lien avec le modèle initial et soulevant des problématiques liés à cette rupture précédemment identifiées ;
- Un échange par des formats de modèles de données de produits publiques, étant similaire à l'échange par des formats de fichiers propriétaires avec, pour différence, l'absence de cryptage du fichier. On retrouve ici les formats de fichiers STEP et STL impliqués dans les chaînes numériques de fabrication par Stratoconception® associées à des logiciels de CAO différents du logiciel *TopSolid* ;
- Un échange par des formats basés sur XML, qui est adapté à l'échange d'une faible quantité d'informations.

Des recherches sont menées aujourd'hui autour du développement d'une interopérabilité basée sur la mise en place de liens directs entre différentes solutions logicielles, en dehors des écosystèmes propriétaires fermés qui ne permettent pas une interopérabilité entre la diversité des outils et des pratiques de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ismail et al. proposent ainsi le développement d'un flux informationnel direct associant deux solutions logicielles (Ismail and Marin, 2022a, 2022b) : *Rhinoceros 3D*, logiciel adapté à la conception architecturale permettant la modélisation de surfaces *NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)* favorisant la génération de composants architecturaux aux formes libres ainsi qu'une conception paramétrique avec sa plateforme de programmation visuelle *Grasshopper*, et *TopSolid*, logiciel courant dans l'industrie adapté à la modélisation de solides et la fabrication assistée par ordinateur. Ismail et al. proposent deux développements *open-source*, *Rhino.Inside* et *Speckle* :

- Le projet de développement *Rhino.Inside* permet au logiciel *Rhinoceros 3D* et sa plateforme de programmation visuelle *Grasshopper* de s'exécuter au sein d'un logiciel hôte. Ainsi, le projet de développement du plug-in *Rhino.Inside.TopSolid*, offre un « échange sans fichiers et des flux de données directs en temps réel, pour offrir une communication directe entre différents outils logiciels directement via leur Application Programming Interface (API) » (Ismail and Marin, 2022a) ;
- Le projet de développement *Speckle.TopSolid* s'inscrit dans le développement du projet de *Common Data Environment (CDE)*, *Speckle*, basé sur la communication des logiciels du secteur de la construction à l'aide de connecteurs agissant comme clients pour établir une connexion avec un serveur (Poinet et al., 2020). Le connecteur *Speckle.TopSolid* permet ainsi un échange direct de données entre l'environnement CFAO *TopSolid*, la plateforme *Speckle* et, par extension, l'ensemble des logiciels de conception disposant d'un connecteur, dont *Rhinoceros 3D* et sa plateforme de programmation visuelle *Grasshopper* (Ismail and Marin, 2022b).

Nous émettons l'hypothèse que le développement d'un flux informationnel direct associant les logiciels adaptés à la conception d'architectures et de composants architecturaux de formes libres (*Rhinoceros 3D*) et les logiciels de fabrication assistée par ordinateur (*TopSolid*) peut permettre l'amélioration de l'interopérabilité entre la conception des composants architecturaux et la conception du processus de fabrication par Stratoconception®, en adaptant la chaîne numérique associée à l'*add-in TopSolid'Strato* et en permettant ainsi le développement d'un lien entre conception et fabrication.

Points clés de la partie 2.2 Pratiques numériques pour la conception de composants architecturaux

- Les approches et outils de conception de l'industrie, domaine d'application actuel de la Stratoconception[®], ne peuvent être copiés tels quels dans le domaine de la construction :
 - Les bâtiments sont des objets uniques et ne peuvent être conçus de la même manière que des objets destinés à être produits en série ;
 - Le secteur de la construction est très fragmenté et demande une flexibilité de la gestion des entreprises, des structures organisationnelles et des modes de production pour conserver une compétitivité ;
 - Les compétences des acteurs de la construction diffèrent de celles des acteurs de l'industrie, particulièrement les compétences associées à la conception d'objets aux géométries tridimensionnelles complexes ;
 - L'adoption des innovations dans le secteur de la construction doit considérer cinq attributs dont la complexité d'utilisation de l'innovation.
- La conception paramétrique permet une grande flexibilité de conception :
 - La conception paramétrique est particulièrement adaptée à l'intégration des contraintes de réalisation et des comportements physiques en phase amont des projets, ce qui est identifié comme essentiel pour le succès de la conception de composants architecturaux non-standards ;
 - La conception paramétrique concerne les architectes, les ingénieurs et les constructeurs en englobant la génération, l'interprétation technique, la rationalisation et la fabrication de composants architecturaux ;
 - La conception paramétrique permet l'exploration d'un grand nombre de variantes d'un même objet à concevoir par l'automatisation des opérations non-créatives du processus de conception accélérant ainsi le processus de conception et d'accompagnant les concepteurs vers des solutions adaptées à leurs exigences ;
 - La conception paramétrique est adaptée à l'articulation de flux de travail itératifs, postulés comme nécessaires dans le cadre d'une conception et d'une fabrication de composants architecturaux par Stratoconception[®].
- L'étroite relation liant conception et fabrication implique le développement d'une continuité informationnelle numérique :
 - Les chaînes numériques associées à l'utilisation de la Stratoconception[®] reposent soit sur un échange par des liens directs au sein d'outils propriétaires spécifiques, non adaptés aux pratiques de la construction, soit sur un échange de formats de fichiers rendant les échanges lents et fastidieux et rompant le lien avec le modèle initial de conception ;
 - Des projets se développent autour de la mise en place de liens directs entre différentes solutions logiciels en dehors des écosystèmes propriétaires fermés, particulièrement *Speckle*, *TopSolid* et *Rhino.Inside.TopSolid* favorisant un lien entre les logiciels de conception architecturale et de fabrication par Stratoconception[®] au sein de *TopSolid*.

Conclusion de la partie 1

Le procédé de Stratoconception® apparaît comme une opportunité intéressante pour la conception et la réalisation de composants architecturaux non-standards, multi-échelle, en raison des moyens techniques et matériels qu'il partage avec les pratiques de la construction en bois et du dépassement des capacités de fabrication traditionnelle qu'il permet, favorisant la conception de composants pour l'architecture en bois répondant à des exigences fonctionnelles cohérentes avec des enjeux contemporains. La littérature portant sur le procédé de Stratoconception®, sur la conception pour la fabrication additive, sur les pratiques de la construction en bois et de la conception architecturale de composants non-standards fait cependant émerger, tout en permettant d'appréhender, certains problèmes d'utilisation du procédé dans un contexte auquel il n'a pas encore été confronté.

Le manque de connaissances de l'impact de l'utilisation du procédé de Stratoconception® sur la production architecturale.

Nous soulignons le manque de travaux de recherche traitant l'impact des potentiels inhérents à la fabrication additive sur la production architecturale, particulièrement pour l'utilisation de la Stratoconception®, qui reste néanmoins un sujet de recherche fondamentale pour que les architectes, les ingénieurs et les constructeurs puissent s'emparer de cette technologie.

Le besoin de développement d'approches et de flux de travail spécifiques pour l'architecture et la construction en bois.

Les applications actuelles du procédé de Stratoconception® se concentrent principalement sur la réalisation de prototypes et d'outillages pour l'industrie dont les pratiques comportent des différences fondamentales avec celles de la construction impliquant l'impossibilité d'appliquer directement les approches de conception utilisées dans ce contexte. La conception et la réalisation de composants architecturaux en bois, fonctionnels, à usage structurel appellent au développement d'approches de conception et de flux de travail spécifiques.

Le besoin de développement d'un continuum informationnel numérique adapté à l'architecture et la construction en bois.

Le procédé de Stratoconception® repose aujourd'hui sur l'utilisation d'outils de conception de pièces non adaptés à la conception architecturale ce qui implique un échange de formats de fichiers entre les étapes de conception de la géométrie de la pièce et de conception du processus de fabrication rendant les échanges lents et fastidieux et rompant le lien avec le modèle initial de conception, là où nous avons identifié un besoin de flux de travail itératif et de flexibilité des processus de conception et des moyens de production pour la réalisation d'architectures et de composants non-standards. Le développement d'un continuum informationnel numérique adapté au contexte de l'architecture et de la construction en bois est nécessaire pour assurer ces aspects identifiés.

Le procédé de Stratoconception® comprend une forte intervention de l'opérateur humain dans la conception du processus de fabrication et dans les étapes d'assemblage et de finition des pièces. Le développement d'une continuité informationnelle numérique s'articule autour de cette relation avec l'opérateur humain. Nous faisons l'hypothèse que l'automatisation des tâches non-crétives pour la conception de composants d'une typologie spécifique apporterait un gain de flexibilité et de temps au sein de ce continuum en minimisant les interventions de l'opérateur humain.

Le besoin d'intégration des contraintes et de l'évaluation de fabrication dans les phases amont du projet d'architecture.

La littérature des technologies de transformation du bois et de la conception pour la fabrication additive nous amènent à positionner le procédé de Stratoconception® dans l'étape de conception du processus de fabrication, à la suite de la conception des pièces qu'il traite. La conception des pièces se fait donc en dehors des contraintes de fabrication par Stratoconception® dans le contexte industriel, ces pièces étant généralement destinées à être des prototypes ou des outillages : la fabrication des pièces se fera par d'autres procédés de fabrication. Nous avons cependant identifié la nécessité d'intégrer en phase amont des projets d'architectures non-standard les contraintes de réalisation et les comportements physiques pour évaluer la qualité de la conception et en assurer ainsi le succès en maîtrisant les coûts du projet. De même, nous avons identifié le caractère multicritère des choix de conception du processus de fabrication par Stratoconception® qui dépassent la simple considération actuelle de la faisabilité pour convoquer des aspects techniques, économiques, environnementaux et subjectifs avec, par exemple, la considération de l'impact de la valeur esthétique de la strate sur le projet architectural.

Nous identifions la conception paramétrique comme une pratique permettant de garantir une grande flexibilité du processus de conception en favorisant l'exploration d'un grand nombre de variantes d'un même objet à concevoir par l'automatisation des opérations non-créatives, accélérant ainsi le processus de conception et accompagnant les concepteurs vers des solutions adaptées à leurs exigences dès la phase amont.

Le développement d'approches de conception et de fabrication spécifiques pour la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions

Le procédé de Stratoconception®, dans ses approches de conception et ses moyens techniques actuels, est particulièrement adapté pour la réalisation de pièces d'une dimension que nous considérons comme petite au regard des dimensions de la construction. Nous avons souligné que la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par Stratoconception® ne s'opère pas par simple homothétie mais implique le développement de nouvelles approches pour la conception du processus de fabrication, pour la fabrication et pour l'assemblage, la notion d'échelle impactant un certain nombre de paramètres du processus de conception et de fabrication. Nous avons particulièrement identifié l'opération de décomposition des strates comme une opération à fort impact sur le résultat final du traitement de composants de grandes dimensions. De plus, nous avons postulons que l'utilisation de nouveaux matériaux de base comme le bois lamellé-collé pourrait être une alternative intéressante pour la réalisation directe de strates de grandes dimensions. Cette hypothèse nous amène à considérer différentes approches constructives pour la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions qui nécessitent des moyens d'évaluation adaptés, non développés à ce jour.

La littérature souligne un manque de connaissances liées au processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux multi-échelles en bois. Nos travaux présenteront une approche expérimentale basée sur des expériences de conception et de fabrication de composants architecturaux de petites et de grandes dimensions, de typologie et de fonctions différentes. Cette approche expérimentale aura pour objectif l'enrichissement de la base de connaissances associée au processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux multi-

échelles en bois ainsi que la confirmation, ou la réfutation, d'hypothèses formulées dans notre étude de la littérature. La base de connaissances construite par notre étude de la littérature et les expériences réalisées fonderont la proposition d'un modèle théorique de méthode de conception et de fabrication par Stratoconception® adapté au contexte de la conception architecturale. La proposition de ce modèle nous permettra de représenter les données échangées et utilisées impactant la continuité informationnelle numérique du processus de conception et de fabrication, de mettre en avant les tâches non-créatives pouvant être automatisées dans le processus de conception de pièces étudiées et de déterminer les outils d'aide à la conception pouvant être développés pour une utilisation dans les phases amont du projet d'architectures.

Partie 2. Proposition d'un modèle théorique

L'absence d'utilisation du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois induit une absence de l'intégration des contraintes de fabrication de la Stratoconception® dans le processus de conception d'architectures et de composants architecturaux là où l'étude bibliographique présentée souligne l'importance de cette intégration, dès la phase amont, pour assurer la pertinence de la conception d'architectures non-standards. Dans cette partie, nous présentons les résultats de la recherche expérimentale menée dans le but d'appréhender les implications de l'utilisation de la Stratoconception® dans le processus de conception architecturale ainsi que d'enrichir la base de connaissances des données utilisées et échangées dans le processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux en bois (**chapitre 3**). L'étude bibliographique présentée et l'analyse des résultats de cette recherche expérimentale participent à la proposition d'un modèle théorique de méthode de conception de composants architecturaux pour la fabrication par Stratoconception® (**chapitre 4**).

Chapitre 3. Expériences de conception et de fabrication

Le manque de connaissances liées au processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux multi-échelles en bois nous conduit à mener des expériences de « *conception-fabrication* » par Stratoconception® de composants architecturaux afin d'en saisir tous les enjeux. Ce travail englobe une série d'expériences complémentaires visant :

- L'inventaire des différentes tâches et leurs implications dans le processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux ;
- La collecte et la mise à jour des données « *utilisées et échangées* » dans le processus de conception et de fabrication de composants architecturaux de petites et de grandes dimensions par Stratoconception® ;
- L'identification des problématiques associées à la conception et la fonctionnalisation de composants architecturaux réalisés par Stratoconception® ;
- L'identification des problématiques associées à la mise en place d'un continuum informationnel numérique adapté au contexte de la conception architecturale.

Ces travaux forment, avec l'étude bibliographique, une base de connaissances de l'utilisation du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois et de ses implications. Cette base de connaissances sera un support à la proposition d'un modèle théorique de méthode de conception de composants architecturaux pour la fabrication par Stratoconception® (Figure 33). Ce troisième chapitre présente la méthode de recherche expérimentale adoptée ainsi que les résultats obtenus.

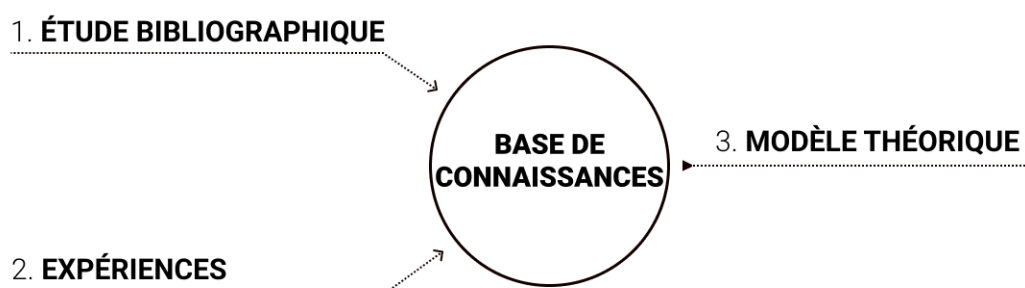


Figure 33. Construction d'une base de connaissances de l'utilisation de la Stratoconception® dans le secteur de l'architecture et de la construction en bois permettant la proposition d'un modèle théorique de conception de composants architecturaux par Stratoconception®

3.1 Méthode

La méthode choisie pour construire une base de connaissances autour de notre objet d'investigation, l'utilisation de la Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois, s'appuie sur la notion de recherche par la conception qui se définit comme une réflexivité sur l'action et dans l'action (Schon, 1984) autour d'expériences de « *conception-fabrication* » par Stratoconception® de composants architecturaux. Dans cette partie, nous décrivons la notion de recherche par la pratique de conception et de fabrication et expliciterons notre approche expérimentale mise en place.

3.1.1 Recherche par la conception

La recherche est traditionnellement définie comme un processus d'enquête formel, systématique et rigoureux orienté vers de nouvelles connaissances ou compréhensions explicites et originales dans les limites d'un domaine défini (Durling and Niedderer, 2007).

Frayling définit la recherche par la conception comme la description étape par étape d'une expérience pratique et la contextualisation de ses résultats au sein d'un rapport (Frayling, 1993). Verbeke s'intéresse à la recherche par la conception dans le domaine de l'architecture en explicitant qu' « *en termes de recherche par la conception, l'acte de concevoir est le processus clé pour développer la compréhension et la connaissance* » (Verbeke, 2021). Il s'appuie alors sur la charte de recherche approuvée par l'Association Européenne pour l'Enseignement et l'Architecture (AEEA) pour proposer une définition de la recherche par la conception architecturale : « *En architecture, la conception est la caractéristique essentielle. Tout type d'investigation dans laquelle la conception est le constituant substantiel du processus de recherche est appelé recherche par la conception. Dans la recherche par la conception, le processus de conception architecturale constitue la voie par laquelle de nouvelles idées, connaissances, pratiques ou produits voient le jour. Il génère une enquête critique par le biais du travail de conception. Par conséquent, les résultats de la recherche sont obtenus par l'expérience de la pratique et sont cohérents avec celle-ci* ». La recherche en conception architecturale combine un élément de conception avec d'autres activités et méthodes de recherche, fonctionnant ensemble de manière interactive (Fraser, 2013). Il ne s'agit pas de faire des recherches sur la conception mais bien d'utiliser la conception pour la découverte de nouvelles connaissances par le biais d'une investigation systématique au cours de la production d'un travail (Svilans, 2020).

Megahed identifie trois caractéristiques de la recherche par la conception en architecture auxquelles nous devons être attentifs (Megahed, 2017) :

- La saturation en connaissances architecturales tacites : les connaissances révélées dans les résultats de la conception sont expérientielles et tacites et ainsi inséparables de la perception, du jugement ou de la compétence qu'elle informe (Archer, 2011). Les connaissances tacites et les résultats des expériences cumulatives du processus de conception doivent clairement être identifiés et explicités.
- Le caractère itératif du processus de conception : l'expérience devient une forme de recherche réactive, dont les résultats suggèrent la prochaine étape du travail de recherche en permettant au chercheur de concevoir la prochaine expérience en posant des questions de recherche plus

spécifiques (Lucas, 2016). Cette méthode permet de définir et d'interroger les questions de recherche.

- L'influence de la position réflexive du chercheur : une relation bidirectionnelle entre le chercheur et l'objet d'investigation est établie dans laquelle ni l'un ni l'autre ne peuvent être assignés comme causes ou comme effets. Ainsi, le chercheur est un observateur participant indissociable de la recherche (Lucas, 2016). Il est alors du devoir des chercheurs d'exposer clairement le point de vue à partir duquel ils opèrent (Archer, 2011).

3.1.2 Méthode de l'approche expérimentale mise en place

3.1.2.1 Présentation de l'approche expérimentale

L'approche expérimentale de nos travaux se construit autour de deux constats, soulignés par l'étude de la littérature que nous avons proposée :

- Les informations guidant les prises de décisions du processus de conception architecturale ont un effet sur le résultat final ;
- Les procédés de fabrication, par leurs contraintes, affectent directement le processus de conception architecturale.

Nous avons ainsi identifié cette influence mutuelle de la conception et de la fabrication de composants architecturaux en soulignant la nécessité d'intégrer les comportements physiques et les contraintes de réalisation dès les phases amont du projet d'architecture afin d'évaluer la qualité de la conception et maîtriser les coûts de réalisation. Afin d'appréhender cette intégration, nous avons précédemment mis en évidence les contraintes de fabrication du procédé de Stratoconception® essentielles pour assurer la faisabilité d'une pièce (voir 2.1.2.1).

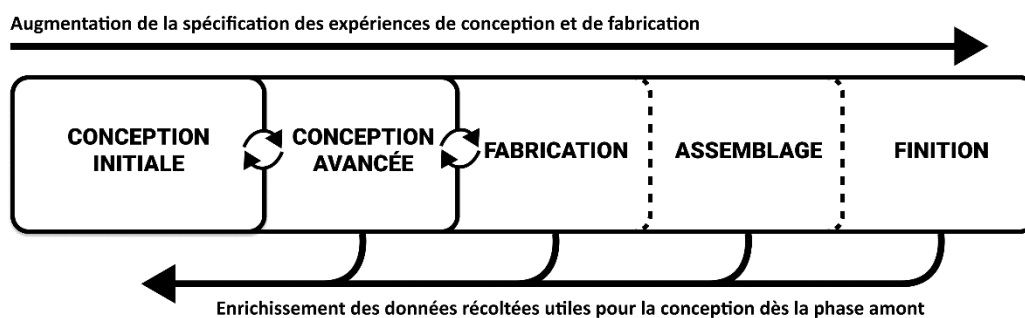


Figure 34. Méthode adoptée de récolte des données utiles pour le processus de conception de composants architecturaux fabriqués par Stratoconception®

Dans le but de compléter cette connaissance, nous proposons la mise en place d'expériences s'intéressant aux différentes phases du processus complet de conception et de fabrication de composants architecturaux à différentes échelles. Ces différentes phases comprennent la conception initiale d'un composant architectural (géométrie extérieure), sa conception avancée (géométrie extérieure et intérieure, intégration de fonctions et détails d'assemblage) et sa réalisation (fabrication, assemblage, finition). La mise en œuvre d'expériences s'attachant à ces différentes phases permet, par l'augmentation du niveau de définition du composant architectural conçu puis fabriqué, une précision et une spécification des problématiques rencontrées et ainsi un enrichissement progressif des données

récoltées utiles pour le processus de conception de composants architecturaux, dès la phase amont (Figure 34). Ces données se rapportent à l'inventaire des différentes tâches constituant le processus de conception et de fabrication de composants architecturaux par Stratoconception®, à la collecte et la mise à jour des données « *utilisées et échangées* » dans ce processus et à l'identification des problématiques rencontrées associées à la conception et à la mise en place d'une continuité informationnelle numérique. Chaque expérience nous permet de poser des questions relatives à notre sujet en établissant un problème et en donnant une description d'état de sa solution (Simon and Le Moigne, 1991).

Les expériences mises en place s'intègrent dans un contexte à la fois pédagogique et de recherche et traitent le processus complet de conception et de fabrication de composants architecturaux, multi-échelles, par Stratoconception®. Ces composants architecturaux sont deux cas d'application, développés simultanément et émergeant d'une première expérience, pédagogique, dont l'un des objectifs était l'identification des opportunités de l'utilisation de la Stratoconception® pour la conception d'architectures en bois. Nous décrivons le contexte précis de l'expérience pédagogique et des deux cas d'application dans lequel nous avons mené notre travail avant de décrire les investigations associées à ces expériences en partie 3.2.

3.1.2.2 *Expérience pédagogique*

La première expérience est menée dans le cadre d'une activité pédagogique s'inscrivant dans un séminaire d'enseignement destiné à des étudiants architectes de première année de cycle master de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. Elle comprend six séances d'atelier, réparties sur quatre mois, représentant un volume horaire de 17 heures et a pour objectif :

- L'identification, par le développement d'une conception par des étudiants architectes, des opportunités de l'utilisation de la Stratoconception® pour la conception d'architectures et de composants architecturaux en bois. Nous identifions, à travers cette expérience, plusieurs cas d'application prometteurs pour le procédé de Stratoconception® comme la production de parois non-standards, de fenêtres, d'escaliers, d'outillage de cintrage et de pièces techniques tels que des assemblages. Nous citons également les applications liées à la restauration du patrimoine architectural ou encore l'ornementation. Dans la suite de ces travaux, nous nous intéresserons particulièrement à deux cas d'application : les parois non-standards, multifonctionnelles, en bois (voir partie 3.1.2.4) et les assemblages en bois de treillis tridimensionnels (voir partie 3.1.2.3).
- La constatation des problématiques rencontrées et l'inventaire des données utilisées et requises par les étudiants architectes dans leur conception, en phase amont du projet. Ces éléments sont décrits dans la partie 3.2.

En début d'expérience, le procédé de Stratoconception® est inconnu des étudiants architectes et une présentation leur permet d'appréhender la définition du procédé de fabrication et les opportunités de conception caractéristiques de la fabrication additive (voir 1.1.3.1).

Le contexte architectural est un programme fonctionnel d'un stand démonstrateur ou d'une résidence d'artiste, laissé au choix des étudiants, d'une surface au sol de 30 à 40 m² et d'une hauteur de 3,50 m. La structure peut s'implanter dans un environnement intérieur comme extérieur et doit ainsi répondre

à des fonctions telles que la structure, la thermique, la ventilation, la lumière ou encore l'étanchéité. Les séances de travail s'organisent de la manière suivante :

- Dans un premier temps, les étudiants définissent les formes des composants du projet, laissées libres et n'intégrant pas les contraintes de fabrication par Stratoconception®.
- Dans un second temps, les étudiants proposent une interprétation constructive de la forme libre, précédemment modélisée numériquement dans un environnement de conception qui leur est laissé libre, en utilisant le procédé de Stratoconception®. Cette interprétation se limite à la notion de tranchage et de décomposition des concepts de microarchitectures (Figure 35) en parties pré-fabricables.

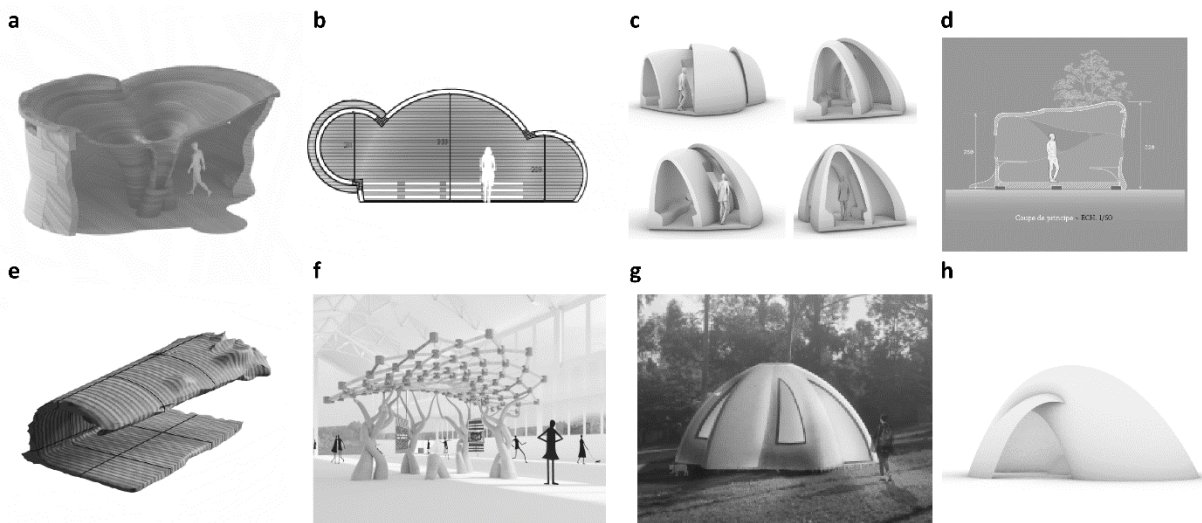


Figure 35. Résultat pédagogique de l'expérience : concepts de microarchitectures réalisables par Stratoconception® proposés par des étudiants architectes de cycle master

Dans cette expérience, nous adoptons une posture d'observateur participant, à découvert, maintenant une extériorité avec l'activité de conception qui sollicite les étudiants et trois enseignants. Ce statut permet notamment de collecter les données utilisées et requises par les étudiants architectes dans la phase amont de la conception et de relever les questionnements intervenant dans ce processus.

3.1.2.3 Cas d'application n°1 : le nœud d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels

Pour le premier cas d'application, nous nous intéressons particulièrement aux résilles rigides définies par Charest et al. comme des structures « constituées d'éléments relativement courts, fabriqués hors site et assemblés les uns aux autres sur site pour former une grille discontinue » par opposition aux résilles élastiques, qu'ils définissent comme des structures « caractérisées par une grille plane composée de lamelles continues non courbées, qui est ensuite déformée dans la forme souhaitée » (Charest et al., 2019). Ce système constructif permet la réalisation de projets de formes libres en utilisant des bois courts, ou de faibles sections, et en minimisant la quantité de matériaux nécessaire pour couvrir des espaces de grandes portées (D'Amico, 2015).

Hwang propose un état de l'art des assemblages développés et utilisés pour la réalisation de structures spatiales (Hwang, 2010) qui révèle que l'assemblage des éléments constituant les résilles rigides se fait généralement par des assemblages métalliques. Des travaux de recherche s'intéressent cependant au

développement d'alternatives à base de bois. Röver propose des nœuds d'assemblage en contreplaqué de hêtre, fabriqués par usinage, qui lient en plan des éléments constituant les fermes d'une charpente (Röver, 2020). Ces assemblages sont mis en œuvre dans le projet d'atelier du *Campus de la construction en bois de Diemerstein* (Figure 36). D'autres approches privilégient l'utilisation des fourches, naissances des embranchements de l'arbre sur pied, en tenant compte des formes irrégulières du bois (Enns, 2010; Hawasly et al., 2023; Vestartas, 2021a; Von Buelow et al., 2018).



Figure 36. Nœuds d'assemblage proposés par Röver (Röver, 2020) : des tiges filetées collées permettent la transmission des efforts des barres aux nœuds d'assemblage. La protection incendie est gérée par l'application d'une peinture intumescente sur les nœuds d'assemblage. Disponible à l'adresse : <https://www.baunetz-campus.de/news/diemersteiner-holzbaucampus-werkstattgebäude-feiert-richtfest-8111483#&gid=1&pid=22> [Consultée le 13 septembre 2023].

L'utilisation du procédé de Stratoconception® permet le développement de nœuds d'assemblage en bois, libres formellement, de résilles rigides tridimensionnelles, dont la fonction dépasse le simple rôle structurel en intégrant une qualité architecturale ainsi que d'autres fonctions comme l'éclairage, la sécurité incendie (sprinklers) ou encore les supports des complexes de l'enveloppe. Une grande complexité géométrique et technique peut être associée au nœud d'assemblage favorisant ainsi l'utilisation d'éléments simples dans le reste de la structure à réaliser.

Les nœuds d'assemblage en bois de résilles tridimensionnelles réalisés par Stratoconception® sont identifiés comme un cas d'application intéressant pour notre approche expérimentale visant l'étude du processus complet de conception et de fabrication de composants architecturaux. En effet, les petites dimensions des nœuds d'assemblage les rendent réalisables avec des moyens techniques et matériels simples et accessibles dans le cadre de notre recherche. Ces dimensions coïncident avec celles des pièces couramment réalisées par le procédé de Stratoconception® ; nous observerons l'utilisation du procédé dans le contexte de l'architecture et de la construction en bois sans être influencés par l'impact de la notion d'échelle du composant sur le procédé en lui-même.

3.1.2.4 Cas d'application n°2 : la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois

L'architecture non-standard en bois produit des parois, libres des a priori formels en se détachant « des paradigmes de l'orthogonalité et du parallélisme » (Gámez Bohórquez, 2017). La conception de parois habitables implique l'intégration des fonctions structurelles, thermiques, acoustiques, d'étanchéité, de ventilation ainsi que l'intégration des différents réseaux (eau, électrique, etc.). Ces fonctions sont assurées par différents composants, systèmes et matériaux qui sont souvent assemblés à l'aide de

jonctions dont le traitement devient complexe lorsque la géométrie de la paroi est à simple ou à double courbure. Nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de la Stratoconception® favorise l'intégration de l'ensemble de ces fonctions dans un seul composant par les capacités inhérentes de la fabrication additive, en renforçant la relation enveloppe-structure et en minimisant le nombre de jonctions complexes à traiter.

La notion de paroi est identifiée comme un cas d'application intéressant pour l'étude de la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par Stratoconception® pour lesquels nous avons souligné l'importance du développement de nouvelles approches pour la conception du processus de fabrication, la notion d'échelle impactant un certain nombre de paramètres du processus de conception et de fabrication.

3.1.2.5 Contexte des expériences

Les deux cas d'application identifiés et sélectionnés sont supports de la mise en place d'expériences de « *conception – fabrication* » de composants architecturaux multi-échelles en bois réalisés par Stratoconception®. Nous décrivons le contexte précis dans lequel ces expériences sont réalisées.

Processus de production

Le processus de production de composants architecturaux mis en place dans ces expériences comprend une phase de conception paramétrique, une phase de conception du processus de fabrication et une phase de fabrication numérique par Stratoconception®. Chacune de ces phases est décomposée en un ensemble d'étapes permettant, par l'augmentation du niveau de définition du composant architectural conçu puis fabriqué, une précision et une spécification des problématiques rencontrées. Ces étapes et les problématiques qui leur sont associées sont décrites dans la partie 3.2. Pour le cas d'application de la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois, la phase de fabrication à l'échelle 1/1 n'est pas traitée, par un manque de moyen matériel.

Contexte architectural et technique

Un premier contexte se rapporte au cas d'application de la paroi non-standard ; le processus de production s'appuie sur l'un des concepts proposé par les étudiants, le projet *Cocon* qui présente des parois dont les surfaces intérieures et extérieures sont à double courbure (projet c de la Figure 35). Les géométries externes et internes des parois à réaliser par Stratoconception® sont redéfinies en intégrant les fonctions structurelles, thermiques, acoustiques, de ventilation, d'éclairage, d'intégration des systèmes électriques et d'ameublement intérieur.

Un second contexte se rapporte au cas d'application du nœud d'assemblage en bois de treillis tridimensionnel ; nous considérons, dans un premier temps, l'un des concepts proposé par les étudiants, le projet *Mélèze nous tranquille* (projet f de la Figure 35) qui se compose d'une résille dont la géométrie est une paraboloides hyperbolique mais dont la géométrie des nœuds d'assemblage n'était pas définie. Pour aborder le processus de production, nous simplifions la structure étudiée en ne considérant qu'un unique nœud d'assemblage dont le nombre de barres et leur orientation sont variables. Les géométries externes et internes sont définies de manière à permettre l'intégration des fonctions structurelles, d'éclairage, de sécurité incendie et de support de vêture. Les nœuds

d'assemblage sont allégés par évidement. Un second concept sera proposé, se différenciant par la complexité géométrique qui lui est associée.

Contexte instrumental

L'environnement numérique de conception architecturale et d'ingénierie est l'environnement de programmation visuelle *Grasshopper* rattaché au modèleur 3D *Rhinoceros3D* en raison de son intérêt identifié pour la modélisation et la conception de projets non-standards (Cichocka et al., 2017; Gallas, 2013; Meyer, 2017) tout comme pour le couplage éventuel avec d'autres logiciels. L'environnement numérique de conception du processus de fabrication à disposition est constitué du logiciel de FAO *Stratoconcept*[®] et de l'add-in *TopSolid'Strato*, intégré au logiciel de CFAO *TopSolid*.

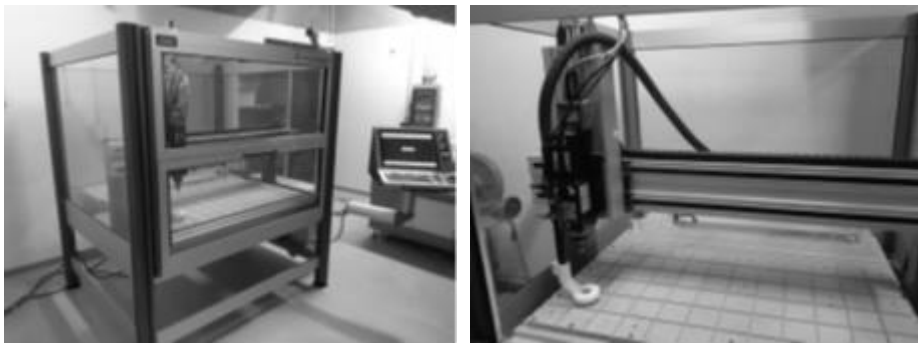


Figure 37. CNC ISEL FLATCOM40 utilisée pour la fabrication des pièces des expériences (photographies de l'auteur)

La fabrication des pièces des expériences est réalisée à l'aide d'une machine-outil à commande numérique triaxiale ISEL FLATCOM 40, à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, d'une capacité dimensionnelle de 1200 millimètres par 800 millimètres (Figure 37).

Contexte matériaux

Dans le cadre de cette expérience nous avons disposé d'un lot de panneaux de lamibois KERTO[®] LVL Q-Panel en épicéa, à plis croisés, d'une épaisseur de 21 millimètres ainsi que d'un lot de panneaux de contreplaqué filmés en bouleau, d'une épaisseur de 16 millimètres. La ressource disponible, particulièrement l'épaisseur des panneaux, a directement orienté les choix effectués dans la conception du processus de fabrication. Les panneaux en bois utilisés sont découpés afin de s'adapter à la capacité dimensionnelle de la machine-outil à commande numérique triaxiale utilisée.

3.2 Investigations

Notre approche expérimentale s'appuie sur une expérience pédagogique visant l'investigation de l'appréhension de l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception d'architectures en bois puis sur le processus de production, décrit précédemment, de composants architecturaux multi-échelles en bois en traitant deux cas d'applications : la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois et le nœud d'assemblage en bois de résilles tridimensionnelles. Dans cette partie, nous donnerons une description des étapes constituant notre approche expérimentale en détaillant précisément les problématiques rencontrées.

3.2.1 Appréhender la Stratoconception® pour la conception architecturale en bois

L'expérience pédagogique mise en place constitue la base de notre approche expérimentale. Elle est menée en tenant compte des connaissances apportées et des outils mis à disposition des étudiants :

- Les étudiants ne disposent que des connaissances liées à la définition du procédé de fabrication et aux opportunités de conception caractéristiques de la fabrication additive ;
- Les étudiants n'ont pas accès aux outils de conception du processus de fabrication par Stratoconception® (*Stratoconcept*® et *TopSolid'Strato*).

La démarche de conception expérimentée par les étudiants n'est pas linéaire ni prévisible. Cette démarche se construit par des choix, émis par les étudiants, qui seront admis ou remis en cause dans la progression de la conception de l'idée initiale à l'objet final. Le résultat de la démarche de conception est ainsi fortement dépendant des intentions et des compétences propres au concepteur.

3.2.1.1 Activité de création et de recherche d'idées initiales

L'activité de création et de recherche d'idées initiales pour la conception de microarchitectures en bois a fait émerger plusieurs prérequis au lancement et au développement de la conception architecturale d'un projet réalisé par Stratoconception® :

- La notion de stratification architecturale perturbe la compréhension du procédé de Stratoconception® : nous observons une confusion des concepts entre stratification architecturale et Stratoconception® qui amène les concepteurs à orienter, dans un premier temps, leur conception dans une direction ne tenant pas compte des caractéristiques et opportunités inhérentes au procédé de fabrication additive. Une clarification des deux concepts a été nécessaire pour développer le processus de conception vers la création d'une forme architecturale puis vers son interprétation constructive par l'utilisation du procédé de Stratoconception®.
- L'absence de références d'architectures construites, réalisées par Stratoconception®, freine le processus créatif : l'étude, par les concepteurs, de références construites favorise le développement de la conception en s'appuyant sur les solutions et les problèmes qu'elle s'en font émerger. L'absence de références construites ne permet pas aux concepteurs de valider ou d'invalider un choix émis lors de la conception et ne lui permet pas d'appréhender le champ des possibles lié à l'utilisation du procédé de Stratoconception®, les applications étant inconnues et abstraites. Nous identifions qu'une aide à la conception est nécessaire,

s'appuyant, d'une part, sur le développement de références construites et, d'autre part, sur l'accompagnement du concepteur dans la validation de ses choix et, par extension, dans le développement du projet pour faire progresser l'idée initiale vers l'objet final. La définition du procédé de Stratoconception® doit s'accompagner d'exemples réalisés appliqués à l'architecture pour être parfaitement intelligible par les concepteurs.

- Le manque de compétences des étudiants liées à la modélisation de projets non-standards, physique et numérique, provoque chez eux une incapacité à représenter une idée initiale et freine ainsi le processus créatif. Les étudiants participant à l'expérience n'ont en effet jamais travaillé, avant cette expérience, sur des projets non-standards et n'ont pas été formés à des logiciels de modélisation adaptés à ce type de projets. Cette observation concorde avec les propos de Mitchell lorsqu'il affirme que « *les architectes dessinent ce qu'ils peuvent construire et construisent ce qu'ils peuvent dessiner* » (Mitchell, 1995). Des compétences spécifiques de modélisation sont requises pour aborder la conception d'architectures et de composants non-standards, réalisables par Stratoconception®.

3.2.1.2 Processus de conception

Le processus de conception est laissé libre aux étudiants mais doit mener à une production correspondant au cahier des charges final, répondant au contexte et aux phases définies en partie 3.1.2.2. Nous observons que ce processus n'est pas clairement défini par les étudiants qui ne priorisent pas les tâches abordées. Nous observons un questionnement relatif à l'ordonnancement des tâches qui perturbent, voire bloquent, le développement de la conception, particulièrement l'interprétation constructive d'une forme abstraite par application du procédé de Stratoconception®, qui s'opère sans méthode. Par exemple, est-ce que les réseaux (électriques, de ventilation, etc.) d'une paroi doivent être conçus avant les opérations de tranchage, risquant la présence de géométries non-accessibles à l'usinage, ou est-ce que l'intégration des fonctions se fait une fois que les stratégies de tranchage sont définies? En d'autres termes, est-ce que le développement de la conception architecturale s'adapte à la conception du processus de fabrication ou est-ce la conception du processus de fabrication qui s'adapte à la conception architecturale développée ?

Une difficulté identifiée est le caractère multi-objectif de la conception, ne se limitant pas au critère de faisabilité, mais faisant intervenir des critères architecturaux (expression visuelle de la strate) et fonctionnels (structure, thermique, acoustique, intégration des systèmes de réseaux, etc.). Ainsi, les paramètres associés aux opérations de tranchage (définition des surfaces de décomposition et des directions de tranchage) impactent plusieurs critères interagissant ensemble dans la prise de décision du concepteur. Nous observons une incapacité des concepteurs à appréhender ces paramètres, n'ayant aucun retour d'information direct sur leur prise de décision : la conception des géométries des microarchitectures complètes ou des composants architecturaux n'est pas directement associée à des outils d'évaluation des multiples critères considérés.

L'absence d'outils ne favorise pas l'exploration des intentions du concepteur. Par exemple, le concepteur peut postuler que le tranchage d'une géométrie par des plans gauches pourrait favoriser une certaine expressivité architecturale de la strate mais impacte des données du projet en impliquant des opérations de surfacage qui entraînent des temps d'usinage important et une augmentation des coûts associés ; l'absence d'outils d'aide à la conception ne permet pas au concepteur de quantifier les impacts d'une intention architecturale sur les données du projet, ne permettant pas une prise de

décision informée. De même, la compréhension des variations des paramètres sur les critères évalués nécessite un nombre important d'itérations.

3.2.2 Morphogénèse des composants architecturaux

À la suite de cette première expérience, menée dans un cadre pédagogique, nous proposons deux expériences de « *conception – fabrication* » de composants architecturaux multi-échelles en bois en traitant deux cas d'applications émergeant de la première expérience : la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois et le nœud d'assemblage en bois de résilles tridimensionnelles. Le processus de production mis en place débute par une phase de conception paramétrique se constituant d'une étape de conception initiale de l'enveloppe extérieure du composant, d'une étape de tranchage de la forme modélisée puis d'une étape de conception avancée des géométries internes du composant (intégration des fonctions, allègement, assemblage). La phase de conception paramétrique est menée sans tenir compte de l'ordonnancement des opérations de la conception du processus de fabrication par Stratoconception®, en convoquant ces opérations lorsqu'elles apparaissent comme nécessaires dans le développement du projet architectural.

Cas d'application des nœuds d'assemblages en bois de résilles tridimensionnelles

Pour le cas d'application du nœud d'assemblage, deux approches de conception initiale sont abordées. Une première approche propose un nœud d'assemblage appartenant à une résille établie à partir d'une surface parabolöide hyperbolique, issue d'une proposition de concept par les étudiants lors de l'expérience pédagogique. La géométrie du nœud est définie par le concepteur de manière à assurer un tranchage selon plusieurs axes ; nous proposons ainsi une sphère déformée comme géométrie du nœud, constituée de deux parties s'assemblant par boulonnage avec les barres qu'il lie. Cette géométrie simple favorise la présence de surfaces en dépouille et, ainsi, un questionnement sur les orientations de tranchage, sans considérer une solution unique dès la conception initiale. Elle permet également une investigation particulièrement concentrée sur la géométrie interne du composant, par l'intégration de fonctions (luminaire), en limitant les complexités de sa géométrie externe, aisément réalisable. La volumétrie d'une sphère déformée est générée numériquement puis divisée en deux parties par la surface de référence de la résille (Figure 38). La hauteur des parties composant le nœud d'assemblage ainsi que l'orientation de l'axe du boulon d'assemblage sont corrigées manuellement après l'opération de tranchage afin d'améliorer la qualité de la fabrication en limitant la présence de flipots et le nombre de pièces de petite taille à traiter (voir partie 3.2.3).

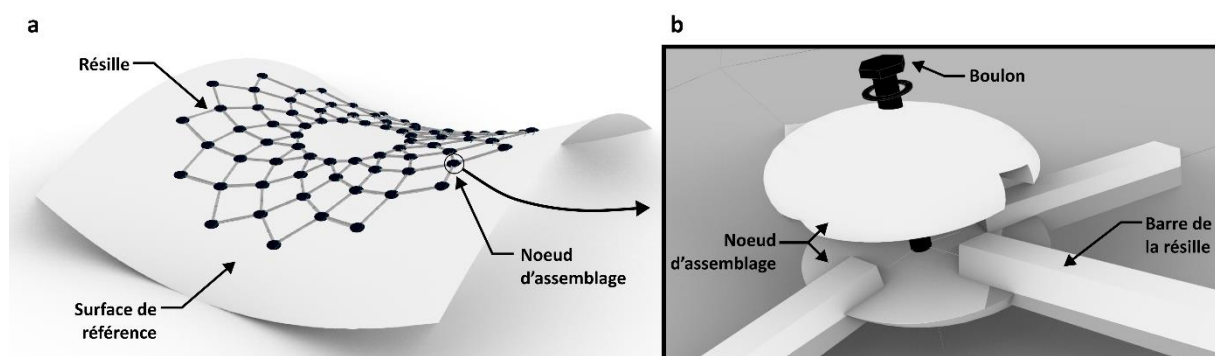


Figure 38. Génération de la résille (a) et définition de la géométrie du nœud constitué de deux parties assemblées par un boulon (b)

Une seconde approche nous conduit à considérer une approche de conception de la géométrie du nœud d'assemblage par optimisation topologique. Cette méthode est généralement mise en avant dans les approches de conception pour la fabrication additive (Wiberg et al., 2019) et vise la minimisation de la matière mise en œuvre dans le produit final. Bendsøe et Kikuchi définissent que « *l'optimisation de forme, dans sa définition la plus générale, doit consister à déterminer pour chaque point de l'espace la présence ou non de matériau à ce point* » (Bendsøe and Kikuchi, 1988). La matière est ainsi disposée, par différentes méthodes d'optimisation (Jihong et al., 2021), de manière à satisfaire un objectif défini, principalement structurel, sous l'action d'un champ de contraintes, par exemple de fabrication, dans un domaine de conception (Sigmund and Maute, 2013). Les structures optimisées topologiquement sont généralement caractérisées par leur complexité géométrique rendant leur manipulation directe en conception difficile. Un travail de lissage et de paramétrisation apparaît comme souhaitable (Liu and Ma, 2016). Deux questions associées à l'utilisation d'une approche par optimisation topologique pour la conception de composants architecturaux en bois réalisés par Stratoconception® sont soulevées :

- Une question de critères de dimensionnement globaux et locaux. L'optimisation topologique induit la simulation mécanique de solides tridimensionnels. Cependant, nous ne pouvons pas appliquer les critères de dimensionnement normatifs appliqués dans le domaine du génie civil qui se basent sur la théorie des poutres et la théorie des coques, les limites des hypothèses de ces théories étant dépassées. De plus, les critères de dimensionnement couramment utilisés pour des matériaux homogènes isotropes, tels que les critères de *Von Mises* ou de *Tresca*, ne peuvent s'appliquer pour le matériau bois en raison de son orthotropie, son hétérogénéité et sa lamellisation lorsque nous considérons des bois d'ingénierie. Nous identifions un manque d'études et de références définissant des critères de dimensionnement pour un calcul volumique d'une pièce en bois, fabriquée par couches dont les propriétés sont anisotropes et dont l'angle de fil du bois peut être orienté dans des directions différentes en fonction des couches considérées.
- Une question relative à la notion d'optimisation de la matière. L'optimisation topologique vise la minimisation de la matière consommée et mise en œuvre. Le procédé de Stratoconception® implique des pertes matières associées à la mise en panoplie des strates constituant une pièce. Alors que d'autres procédés de fabrication additive tels que les procédés d'extrusion de matière, ne consomment que la matière déposée et constituant la pièce finale, le procédé de Stratoconception® génère des pertes matières associées à l'opération de mise en panoplie des strates constituant la pièce finale. Ainsi, l'évidement d'une strate ne peut pas être considéré comme un gain de matière mais comme un allègement de la pièce finale. La minimisation de la matière consommée correspond donc, pour le procédé de Stratoconception®, à la capacité des géométries des strates d'une pièce à s'agencer dans l'espace le plus réduit possible sur un panneau. Une approche par optimisation topologique permettra un allègement de la pièce finale mais ne garantit pas une minimisation de la consommation de matière.

Ces deux questions soulevées nous guident vers l'abandon du développement, dans cette expérience, d'une approche par optimisation topologique pour la conception de la géométrie du nœud d'assemblage. Nous nous inspirons cependant des résultats observés des optimisations topologiques de nœuds d'assemblage réalisés dans d'autres matériaux par fabrication additive, davantage accessibles par calcul par leur prévisibilité, ainsi que des structures naturelles telles que les structures

osseuses dont la présence de tissus est optimisée en se répartissant selon des lignes de contraintes principales (Figure 39). Ces observations construisent la proposition d'une conception bio-inspirée, dont le dessin devient accessible par l'architecte (Figure 40), étant régi par des règles simples en se basant sur la définition de courbes de référence rejoignant les barres (Figure 41). Les structures optimisées topologiquement sont considérées comme des inspirations pour le concepteur qui conserve la maîtrise du dessin du composant architectural conçu. Cette approche, favorisant une expression architecturale accrue du composant technique traité, permet une investigation portant sur le tranchage d'un nœud d'assemblage dont la géométrie est délibérément complexe et impossible à traiter, à priori, par un tranchage sans décomposition.

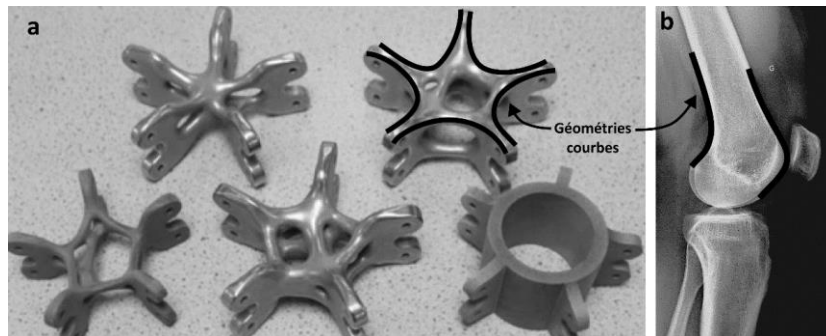


Figure 39. Observation des géométries de nœuds d'assemblage métalliques conçus par optimisation topologique (a), d'après (Li et al., 2021), et des géométries des structures osseuses (b) (radiographie du genou gauche de l'auteur, réalisé par le laboratoire IMALO le 08 décembre 2022)

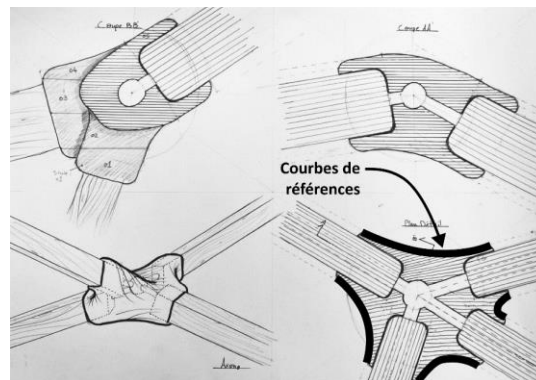


Figure 40. Esquisses à la main de nœuds d'assemblage réalisées par Anwar Nehlawi, architecte, en s'appuyant sur les géométries courbes observées dans les structures naturelles et dans les structures conçues par optimisation topologique.

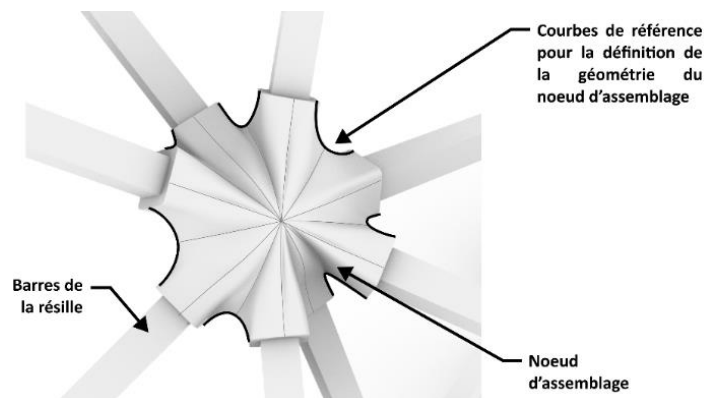


Figure 41. Modélisation du nœud d'assemblage bio-inspiré à partir de courbes de référence

Cas d'application de la paroi non-standard, multifonctionnelle en bois

Pour le cas d'application de la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois, nous définissons l'enveloppe initiale de chacune des trois coques constituant le projet *Cocon* comme une composition de plusieurs surfaces ; la surface intérieure et la surface extérieure sont définies séparément, ne répondant pas aux mêmes fonctions et sont jointes par des surfaces complémentaires. La surface intérieure intègre la fonction d'agencement par la création d'une assise que nous choisissons de définir dans la géométrie de l'enveloppe initiale. Les surfaces intérieures et extérieures sont générées à partir de courbes planaires de référence primaires et secondaires (Figure 42).

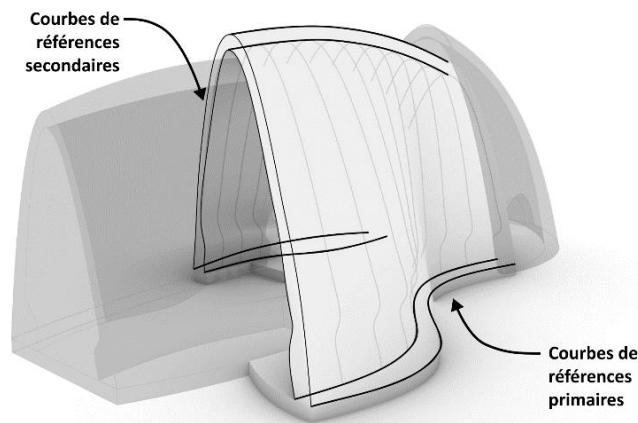


Figure 42. Modélisation de l'enveloppe initiale du projet *Cocon* à partir de courbes de référence primaires et secondaires

Plusieurs corrections manuelles sont apportées durant le processus de production sur la géométrie de l'enveloppe initiale. Les courbes de référence secondaires sont adaptées de manière à satisfaire les conditions d'accessibilité de l'outil pour la réalisation de la surface de l'assise et de manière à intégrer visuellement les différentes fonctions de la paroi. Le choix du matériau de base pour la réalisation des strates peut également impliquer une correction manuelle de la conception initiale. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que le choix de réaliser directement des strates de grandes dimensions en bois lamellé-collé peut amener le concepteur à adapter les courbes de référence primaires de manière à ce que leur courbure, en plan, puisse être réalisée par cintrage, sans usinage, en satisfaisant les rayons de courbures admissibles du bois lamellé-collé (voir partie 1.2.2.4).

3.2.3 Tranchage

Le tranchage par plans parallèles est défini par une direction de tranchage et par une épaisseur. Une étape de séparation du composant en zones et de décomposition des strates en parties peuvent être ajoutées. Ces trois opérations composent les stratégies de tranchage possibles associées au traitement d'un composant pour sa fabrication par Stratoconception® (Figure 43).

Le développement de la conception initiale des cas d'application traités met en évidence, par les questions soulevées, un lien fort entre la définition de la géométrie de l'enveloppe extérieure du composant et l'opération de tranchage, pour en assurer la faisabilité. Dans cette expérience, nous positionnons l'opération de tranchage entre les étapes de conception initiale de l'enveloppe extérieure et entre l'étape de conception avancée des géométries internes du composant, qui seront définies en tenant compte des choix de tranchage.

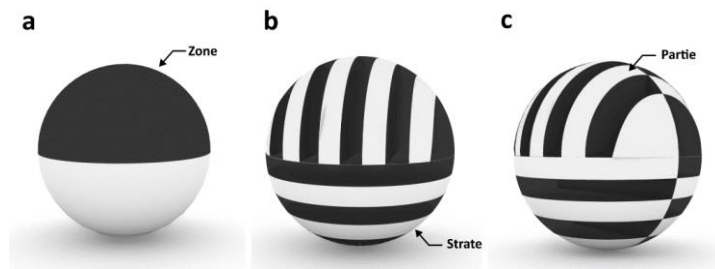


Figure 43. Opérations successives de séparation de la pièce en zones (a), de tranchage des zones en strates (b) et de décomposition des strates en parties (c)

Avant de développer cette étape du processus de production pour les cas d'application traités, nous évaluons la flexibilité associée à l'opération de tranchage et à la modification du modèle initial de la pièce traitée. Pour cela, nous réalisons des opérations de tranchage, pour deux cas d'usage que nous définissons à partir du résultat l'étude bibliographique :

- Un premier cas d'usage correspondant à l'export de la géométrie d'une pièce, modélisée dans le logiciel *Rhinoceros3D*, dans un format STL, à l'import de cette géométrie puis à son tranchage dans le logiciel *Stratoconcept*[®] ;
- Un second cas d'usage correspondant au tranchage du modèle d'une pièce, où la modélisation et l'opération de tranchage sont réalisées dans le même environnement paramétrique, *Grasshopper*.

Les échanges par des formats de modèles de données impliquent que, pour chaque modification du modèle initial, une opération d'export et d'import des géométries à traiter est requise pour concevoir les stratégies de tranchage ce qui peut impliquer des temps de traitement relativement importants lorsque le nombre de variations de la conception augmente. Le second cas d'usage permet la définition de règles de conception pour la modélisation du composant architectural sur lesquelles sont établies les règles de conception des opérations de tranchage, dépassant ainsi les limites actuelles des mises à jour de ces opérations dans la chaîne numérique actuelle (voir partie 2.1.3.2). L'association de la modélisation paramétrique d'un composant architectural avec les opérations constituant la conception du processus de fabrication par *Stratoconcept*[®] n'est pas possible en utilisant le logiciel *Stratoconcept*[®] et non optimale avec l'add-in *TopSolid'Strato*, non adapté à une conception architecturale. Nous choisissons de développer les stratégies de tranchage pour chacun des cas d'application dans un environnement paramétrique en raison des résultats de l'expérience d'interopérabilité menée ainsi que pour évaluer l'hypothèse que nous avons émise, postulant que la conception paramétrique est adaptée à l'articulation de flux de travail itératifs du processus de production de composants architecturaux par *Stratoconcept*[®]. Cette solution nous apparaît comme moins contraignante et chronophage dans le processus de conception architecturale tout évitant la rupture du lien avec le modèle initial notamment.

Pour le cas d'application du nœud d'assemblage, dont l'enveloppe externe est une sphère déformée, nous étudions deux options de tranchage réalisables, sans séparation en zones ou décomposition en parties (Figure 44) :

- Un tranchage vertical (tranchage a). Ce tranchage permet une orientation verticale du spot lumineux intégré mais induit la présence de flipots et de strates de petite taille qui augmentent le risque d'erreurs à l'usinage, leur ablocage étant difficile.

- Un tranchage dont la direction est normale à la surface découpant la sphère déformée en deux parties (tranchage b). Ce tranchage résout les problèmes de pièces de petite taille tout en proposant une surface de référence plane à partir de laquelle il sera plus aisé d'assembler les strates réalisées. Ce choix de tranchage implique cependant une modification de l'orientation du spot lumineux pour assurer la faisabilité de son intégration ce qui impacte directement l'éclairage de l'espace.

La direction de tranchage a un effet sur l'expression architecturale de la strate du composant, sur ses fonctions et sur la qualité et la facilité des opérations d'usinage et d'assemblage.

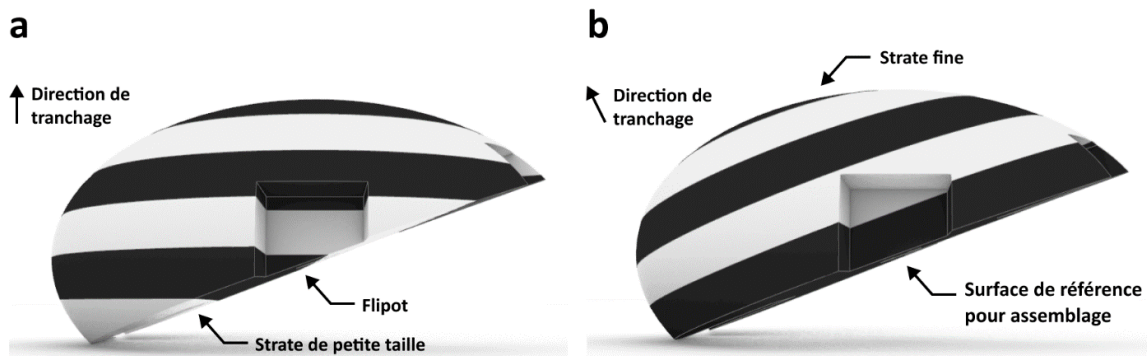


Figure 44. Deux approches de tranchage proposées pour le cas d'application du nœud d'assemblage dont la forme est une sphère déformée : tranchage vertical de la partie haute du nœud d'assemblage (a) et tranchage selon la normale à la surface de référence de la résille (b).

Le second paramètre à fixer par le concepteur est l'épaisseur des couches. Dans notre expérience, nous disposons de panneaux issus d'un stock dont l'épaisseur est fixe et unique. La première et la dernière strate composant le nœud d'assemblage ont une hauteur inférieure à l'épaisseur du panneau, impliquant des opérations de surfaçage qui impactent les temps de fabrication. Nous proposons alors une modification des dimensions du modèle initial du nœud d'assemblage pour que les hauteurs de ses parties correspondent à un multiple de l'épaisseur des panneaux pour limiter les opérations de surfaçage. Un processus inverse aurait pu être mis en place si nous disposions d'une gamme de panneaux d'épaisseurs différentes; les épaisseurs de panneaux auraient été modifiées pour correspondre aux dimensions du modèle initial du nœud d'assemblage.

Nous identifions que nous manquons cependant d'outils pour analyser, à cette étape de la conception, si l'augmentation des dimensions du composant a un impact positif sur les données du projet, notamment sur les données économiques associées à la consommation de matière, aux temps de fabrication, de montage et de finition. Les opérations de stratification et de mise en panoplie sont nécessaires pour obtenir des informations utiles au concepteur et impliquent de traiter le processus de conception du procédé de fabrication dans sa quasi-totalité, en utilisant les logiciels *Stratoconcept*[®] ou le plug-in *TopSolid'Strato*, pour chaque essai. Ce traitement quasi-total du processus de conception du procédé de fabrication implique le traitement d'opérations dont le niveau de définition est plus avancé que la modélisation initiale comme la définition des assemblages par exemple.

Nous retrouvons cette problématique pour le cas d'application de la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois. La réalisation de composants de grandes dimensions implique une décomposition des strates pour laquelle nous manquons d'outils d'analyse pouvant informer le

concepteur à une phase amont de la conception. Ainsi, le concepteur ne peut pas quantifier et évaluer les implications de ses choix sur les temps d'usinage, d'assemblage et sur la consommation de matière tout en manquant de moyens d'appréhender l'importance de ces données les unes par rapport aux autres. De même, aucun outil ne permet au concepteur d'évaluer la valeur architecturale du composant réalisé en fonction de différentes solutions de tranchage. Dans notre cas d'application, la décomposition des strates se fait selon un critère arbitraire, de longueur maximale des strates qui doit respecter deux critères : être inférieure aux dimensions du panneau et être inférieure à une longueur respectant des restrictions de poids, les hommes ne pouvant pas porter des charges supérieures à 55 kilogrammes, contre 25 kilogrammes pour les femmes comme indiqué dans les articles R.4541-1 et R4541-9 du Code du travail.

Pour le cas d'application du nœud d'assemblage bio-inspiré, nous intégrons une étape de séparation en zones, le tranchage direct de la géométrie n'étant pas possible en raison de la présence de zones inaccessibles. Pour ce faire, nous avons généré des plans de séparation, à partir des courbes de références définissant le modèle initial de l'enveloppe extérieure du nœud d'assemblage (Figure 45). Les zones sont tranchées dans la direction de l'axe de la barre qui leur est associée. Cette approche montre que des règles de conception des opérations de séparation en zones et de tranchage peuvent être ainsi définies pour des typologies de composants spécifiques en se basant sur les géométries caractéristiques de leur modèle initial. Des modifications manuelles de la modélisation paramétrique initiale de l'enveloppe extérieure du nœud d'assemblage permet d'assurer l'accessibilité de toutes les zones à l'usinage.

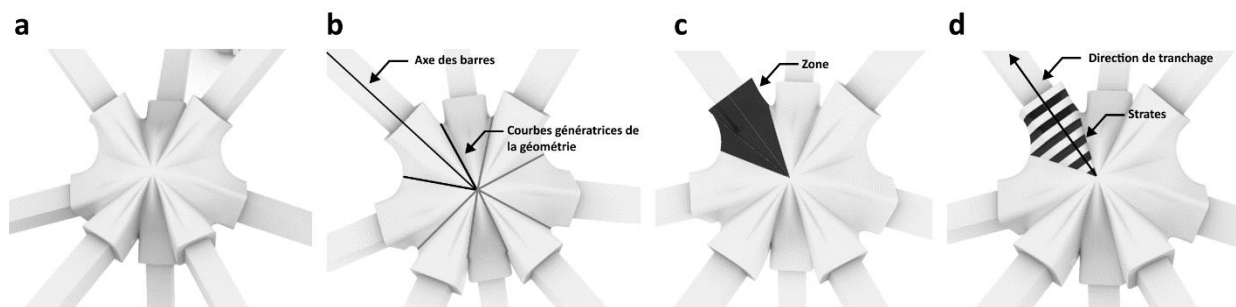


Figure 45. Stratégies de tranchage développées pour le traitement du nœud d'assemblage bio-inspiré : modèle initial de la pièce (a), récupération des axes des barres pour définir la direction de tranchage et des courbes génératrices de la géométrie du modèle initial pour définir les plans de séparation du modèle en zones de tranchage (b), séparation du modèle initial en zones de tranchage (c), tranchage des zones (d)

3.2.4 Conception avancée

Les étapes de conception initiale et de tranchage du composant architectural définissent les géométries extérieures du composant et établissent les contraintes de fabrication associées aux stratégies de tranchage choisies. Pour suivre, nous proposons de traiter la conception avancée du composant architectural qui produit son modèle final en répondant à trois prérequis à sa matérialisation :

- La définition des géométries internes du composant permettant l'intégration de fonctions ;
- L'assemblage des zones, des strates et des parties décomposées du composant ;
- La définition des épaisseurs de parois et des stratégies d'allègement du composant.

3.2.4.1 Fonctionnalisation

L'opération de fonctionnalisation des composants s'attache à définir la géométrie des évidements nécessaires à l'intégration des fonctions définies par un cahier des charges. Pour le cas d'application du nœud d'assemblage dont la géométrie est une sphère déformée, nous intégrons une fonction d'éclairage, matérialisée par l'intégration d'un spot lumineux.

Pour le cas d'application de la paroi non-standard nous isolons une partie caractéristique de la paroi (Figure 46) à laquelle nous intégrons des pièces d'appui au sol, un système de ventilation, un dispositif d'éclairage et des matériaux assurant la fonction d'isolation thermique et acoustique.

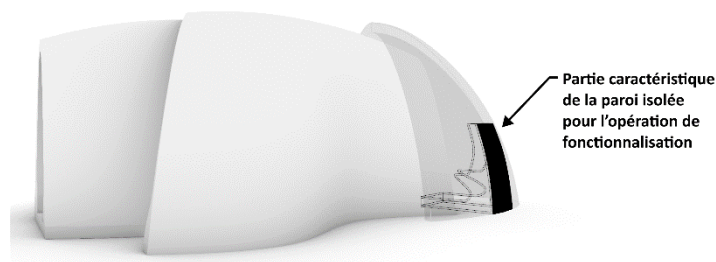


Figure 46. Partie caractéristique de la paroi, issue de la modélisation de l'enveloppe initiale du projet Cocon et isolée pour l'opération de fonctionnalisation

La définition de la géométrie des évidements nécessaires à l'intégration de ces fonctions se fait manuellement dans le logiciel *Rhinoceros3D* et son plug-in *Grasshopper* ; chaque fonction ajoutée est considérée comme une singularité géométrique à traiter. Le traitement de ces singularités se fait en trois étapes (Figure 47) : les pièces associées aux fonctions sont modélisées, une surépaisseur est introduite pour assurer le rôle de « jeu » dans l'assemblage des pièces intégrées avec la structure fabriquée par *Stratoconception*® puis le volume de l'évidement nécessaire à l'intégration des pièces est généré par une différence booléenne entre la géométrie des strates et la géométrie des espaces requis. Le choix du positionnement des pièces est adapté en fonction du tranchage déterminé précédemment. Ainsi, la bouche de ventilation est placée de manière à s'intégrer à la jonction entre deux strates, créant un appui pour sa mise en œuvre et assurant la faisabilité de l'usinage de l'évidement associé. Une analyse visuelle réalisée par le concepteur permet de vérifier la faisabilité des géométries au regard des stratégies de tranchage définies précédemment.

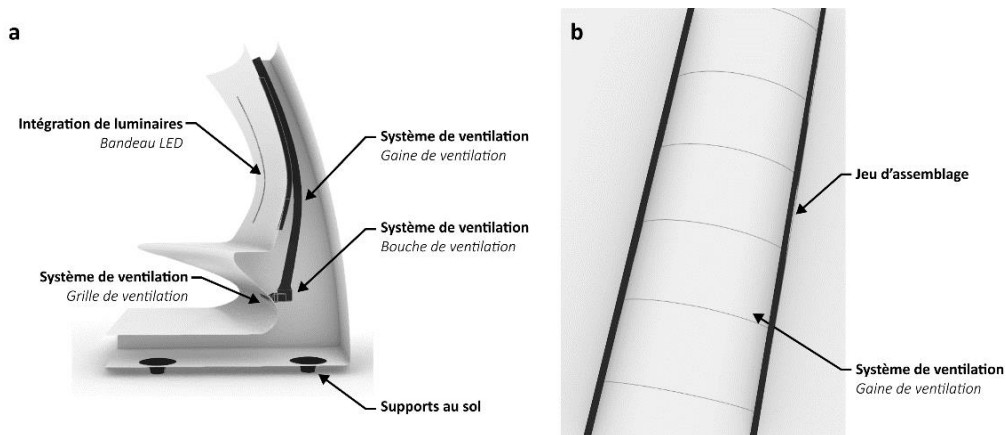


Figure 47. Modélisation des systèmes fonctionnels intégrés dans la paroi (a) et intégration d'un jeu pour faciliter l'assemblage des pièces intégrées avec la structure fabriquée par *Stratoconception*® (b)

Dans le cas d'application de la paroi, l'intégration de l'isolation thermique et acoustique fait émerger deux boucles de rétroactions dans le processus de conception :

- L'épaisseur de la paroi doit être dimensionnée, dans le modèle initial, de manière à garantir l'intégration d'une épaisseur suffisante de matériaux isolants pour satisfaire des critères de performances thermiques et acoustiques fixés ;
- L'intégration de l'isolation se fait dans les espaces évidés créés lors de l'étape d'allègement de la géométrie. L'allègement permet la minimisation de la matière assurant une fonction structurelle. Les volumes évidés participent à l'allègement de la pièce ou permettent l'intégration de matériaux plus légers, intégrant une nouvelle fonction, tels qu'ici l'isolation thermique et acoustique.

Nous approchons l'isolation de parois aux géométries complexes en l'établissant de trois manières différentes :

- Une isolation par des matériaux disponibles en format de panneaux qui favorisent la réalisation des pièces composant l'isolation, strates par strates, par usinage 3D ;
- Une isolation par des matériaux pulvérisables qui favorisent, par leur taille, une adaptabilité à des géométries complexes ;
- Une isolation par des matériaux se développant au sein de la paroi, tels que les mycocomposites, pour lesquels des travaux de recherche restent à mener, notamment à travers le projet *Mycobat* (Bhardwaj et al., 2020; LUE, 2023).

Nous choisissons une isolation par panneaux de liège, que nous identifions comme ayant un comportement favorable à l'usinage.

3.2.4.2 Assemblage

L'opération d'assemblage comprend l'assemblage des zones pré-décomposées, l'assemblage des strates appartenant à ces zones et l'assemblage des parties décomposées des strates. Nous choisissons de traiter l'opération d'assemblage, avant l'opération d'allègement, de manière à définir les volumes à préserver dans les différentes strates. Pour les cas d'application des nœuds d'assemblage, les strates sont positionnées par des tourillons en bois et assemblées par collage, ce qui est une pratique courante du procédé de *Stratoconception*[®]. Pour le cas d'application de la paroi, l'assemblage n'a pas été traité. L'assemblage des strates est traité par les outils développés dans le logiciel *Stratoconcept*[®].

L'assemblage des zones du nœud d'assemblage bio-inspiré a été traité dans l'environnement paramétrique *Grasshopper* en se basant sur le modèle initial des zones créées. L'assemblage est traité d'un point de vue structurel, d'un point de vue du respect de la valeur architecturale, d'un point de vue plastique et d'un point de vue de la fabrication et du montage. Plusieurs solutions sont proposées et sont confrontées à ces différents points par l'analyse de modèles physiques réalisés par prototypage rapide (Figure 48), en l'absence d'outils numériques existant adaptés et répondant à l'ensemble des critères identifiés. Une simulation de la cinématique de montage est cependant réalisée par l'écriture d'un algorithme spécifique à chaque proposition dans l'environnement paramétrique *Grasshopper*. Les géométries de l'assemblage sont générées en intégrant un « jeu » pour faciliter l'emboîtement des éléments lors du montage et anticiper les variations dimensionnelles inhérentes au matériau bois.

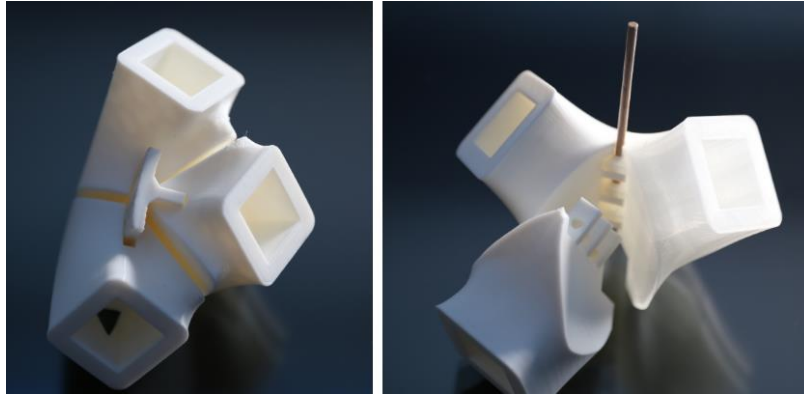


Figure 48. Exemples de modèles physiques réalisés par prototypage rapide dans le cadre de la conception de l'assemblage des zones du nœud d'assemblage bio-inspiré (Procédé utilisé : dépôt de fil fondu)

Après analyse de plusieurs propositions, nous avons choisi un système d'assemblage par clé qui répondait favorablement à l'ensemble des critères observés (Figure 49). La géométrie de la clé est générée à partir de l'axe des barres liées au nœud d'assemblage considéré. L'ablocage de la clé avec les zones se fait par des tourillons insérés après les étapes d'usinage et d'assemblage des strates dans une zone. Pour renforcer les propriétés mécaniques de l'assemblage, les zones sont assemblées entre-elles par collage.

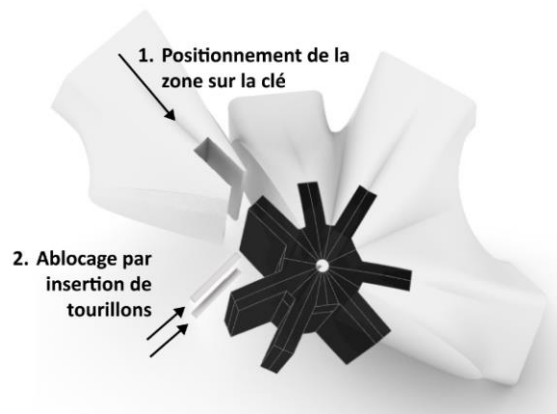


Figure 49. Principe d'assemblage des zones constituant le nœud d'assemblage bio-inspiré choisi. Une clé permet le positionnement des zones entre-elles ; des tourillons permettent la liaison des zones à la clé ; l'assemblage des zones entre-elles est renforcé par collage.

3.2.4.3 Allègement

La dernière opération de la définition du modèle final du composant architectural est son allègement. L'allègement se fait par évidement d'un ou plusieurs volumes dans le composant. Nous avons déjà précisé qu'un allègement ne peut pas être associé à une minimisation de la consommation de matière, les volumes évidés correspondant à des chutes de l'opération d'usinage des strates. Par définition, l'allègement induit une augmentation des parcours d'outils et, par extension, des durées de fabrication des strates et des coûts associés. Nous soulignons donc que l'allègement d'un composant doit présenter un intérêt justifiant le surcoût associé à l'allongement des temps de fabrication ; nous mettons également en avant l'absence d'outils permettant de quantifier les coûts directement associés à cette opération.

Les outils existant associés au procédé de Stratoconception® limitent la conception de l'allègement à un évidement par décalage de l'enveloppe extérieure du composant à traiter. Une première étape de cette opération est la définition de l'épaisseur minimale des parois du composant à conserver, de manière à ce qu'il assure une fonction structurelle ou thermique. Nous nous confrontons cependant à l'absence d'outils de simulation structurelle répondant à ce problème et à l'absence de données matériaux relatives aux propriétés mécaniques de l'assemblage de strates réalisées dans des panneaux de contreplaqué, de lamibois ou de CLT, dans notre contexte d'étude.

Dans le développement des cas d'applications, réalisé dans l'environnement paramétrique *Grasshopper*, nous postulons que la création de nervures dans les géométries internes du composant augmente les performances mécaniques. Nous proposons alors deux approches pour la conception de l'allègement en tenant compte des stratégies de tranchage et des géométries du composant à préserver, celles-ci s'associant à des fonctions :

- Pour le cas d'application du nœud d'assemblage dont la forme est une sphère déformée : l'allègement est traité à l'échelle de la géométrie du composant. Des nervures sont créées dans l'axe des barres liées par le nœud d'assemblage. Nous procédons à des évidements dits « *naïfs* », car proposés sans retour d'information sur leur qualité. La conception de l'évidement produit des géométries internes au profil tridimensionnel. Pour ce cas d'application, le volume évidé pour l'allègement du composant représente 11% du volume total usiné (Fréchard et al., 2023).
- Pour le cas d'application de la paroi : l'allègement est traité à l'échelle de la géométrie de chaque strate. Une structure en treillis plan, extrudée selon la direction du tranchage, est réalisée de manière à intégrer les matériaux d'isolation et lier structurellement les deux parois du composant. Nous observons que cette approche engendre d'importantes pertes de matières associées à l'évidement des structures treillis. Nous proposons une conception combinant des strates composées de deux parois liées par une structure treillis et de strates composées uniquement des deux parois (Figure 50). Cette conception réduit de 43 % la consommation de matière totale pour le cas d'un prototype de paroi (Figure 50).

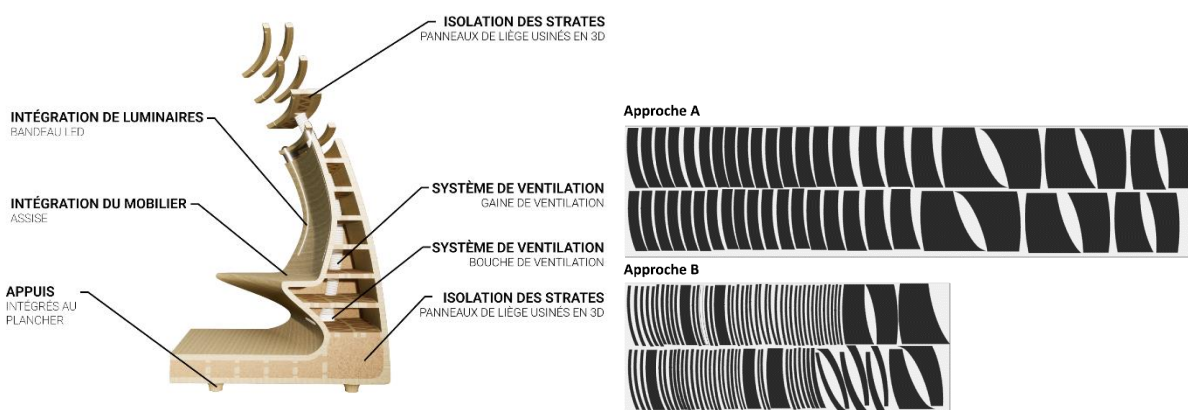


Figure 50. À gauche : Conception avancée proposée pour le cas d'application de la paroi ; À droite : Comparaison des mises en panoplie des strates composant le prototype de paroi non-standard multifonctionnelle en bois selon les deux approches proposées : une approche comprenant uniquement des strates composées d'une structure treillis (Approche A) et une approche comprenant des strates composées de strates composées d'une structure treillis et de strates composées des parois du composant (Approche B)

3.2.5 Fabrication

Après la phase de conception paramétrique menant le développement d'une conception initiale vers une modélisation d'un niveau de détail « *as built* » des composants des cas d'application identifiés, nous traitons la fabrication par Stratoconception® des nœuds d'assemblage en bois de résilles tridimensionnels conçus. Pour le cas des nœuds d'assemblage bio-inspirés, nous fabriquons des nœuds liant uniquement trois barres pour minimiser l'utilisation de matière pour ces expériences. La conception des nœuds à trois barres est identique à celle présentée précédemment. Pour le cas d'application de la paroi non-standard, multifonctionnelle, en bois, la phase de fabrication à l'échelle 1/1 n'est pas traitée, par un manque de moyen matériel.

3.2.5.1 Conception du processus de fabrication

La conception du processus de fabrication est réalisée avec l'aide du logiciel Stratoconcept®. Le choix de ce logiciel, plutôt que le plug-in *TopSolid'Strato*, est motivé par l'accessibilité à un post-processeur adapté à la machine-outil à commande numérique triaxiale *ISEL FLATCOM 40* dont nous disposons pour ces expériences.

Le processus de conception paramétrique a traité certaines étapes de la conception du processus de fabrication par Stratoconception®. Cependant, les étapes doivent toutes être traitées dans le logiciel *Stratoconcept*® : les opérations de tranchage doivent être une nouvelle fois réalisées, en faisant correspondre manuellement les données associées aux stratégies développées dans la phase de conception du composant à celles établies dans la phase de conception du processus de fabrication. L'importation des géométries vers le logiciel *Stratoconcept*® se fait par export d'un fichier dans un format STL. Les géométries exportées, dans un unique fichier, sont les deux parties composant le nœud d'assemblage dont la forme est une sphère déformée et les zones séparées des nœuds d'assemblage bio-inspirés (Figure 51). Ainsi, nous conservons les stratégies de séparation en zones des composants réalisés dans la phase de conception de la pièce. Cette étape d'échange de données implique une rupture de la continuité de la chaîne numérique et occasionne une répétition d'opérations déjà réalisées dans le cadre de la conception de composants architecturaux, certaines opérations étant considérées au niveau de la conception même de la pièce.

La conception du processus de fabrication produit la mise en panoplie des strates sur les panneaux en bois et la génération des parcours d'usinage qui seront transférés, dans un format d'échange NCP, au logiciel *isel-RemoteWin* pilotant notre machine-outil à commande numérique (Figure 51).

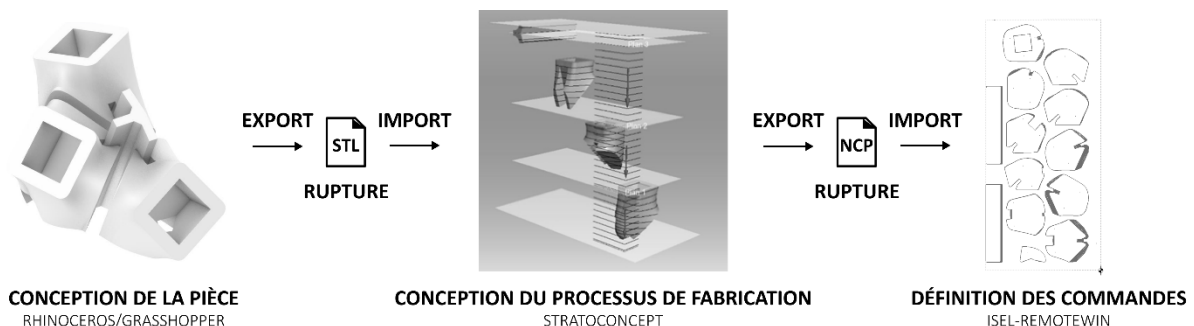


Figure 51. Opérations de transfert de données liant la conception de la pièce et la définition des commandes d'usinage

3.2.5.2 Réalisation des strates

La réalisation des strates comprend les étapes d'usinage, d'assemblage et de finition. L'opération d'usinage a souligné un problème d'ablocage des strates de petites dimensions lors de leur traitement. L'ablocage est réalisé par ruban adhésif, positionné en dessous de chaque strate à usiner. Cependant, les efforts de coupes sont supérieures à l'ablocage des petites pièces et provoquent leur soulèvement. Des interventions manuelles sont nécessaires pour assurer localement le maintien des pièces sur la plaque. Ces interventions manuelles sont liées aux moyens techniques mis à disposition et sont à considérer dans le cadre du caractère expérimental de notre travail. Elles ont affecté les temps de production mais n'ont pas impacté la qualité du composant produit. Le gestion de l'ablocage des pièces de petites dimensions est cependant identifié comme un problème à relativiser pour la réalisation de composants architecturaux par Stratoconception® à l'aide des machines des entreprises de la construction en bois qui traitent des pièces de grandes dimensions dont l'ablocage est plus aisé.

Nous avons relevé, dans ces expériences, la consommation de matière associée à la mise en panoplie (Figure 52) et les temps des opérations de fabrication, d'assemblage et de finition par ponçage associés à la production d'un nœud d'assemblage bio-inspirés (Tableau 1). L'assemblage par collage est effectué à l'aide de serre-joints et nécessite plusieurs montages successifs, impactant les temps associés à cette opération. Des surfaces de références, planes, ont pu être utilisées comme surface de référence et ont facilité l'assemblage. L'assemblage des zones du nœud d'assemblage bio-inspiré à la clé par des tourillons a demandé une intervention manuelle de l'opérateur sur la géométrie des strates usinées et assemblées, les perçages réalisés n'étant pas accessibles à l'usinage. De même, une intervention manuelle est requise pour ajuster les jeux d'assemblage, l'épaisseur définie de la conception de l'assemblage étant insuffisante. Ces interventions impactent particulièrement les temps de fabrication : 45 minutes sont consacrées à l'assemblage des strates de chaque zone alors que le reste du temps est consacré aux interventions manuelles. Ce temps important est donc largement lié au caractère expérimental de notre travail et nous faisons l'hypothèse qu'il pourra être réduit de manière très conséquente.

Tableau 1. Données de consommation de matière et de temps de fabrication associés à la réalisation du nœud d'assemblage bio-inspiré

Dimensions du panneau (mm)	Consommation de matière				H	Temps de fabrication			
	V _{pièce} (cm ³)	V _{usiné} (cm ³)	V _{nesting} (cm ³)	V _{total} (cm ³)		Usinage (min)	Assemblage (min)	Finition (min)	Total (min)
1200 X 600X 21	3 345	2 856	8 262	14 464	0,23	480	480	10	970

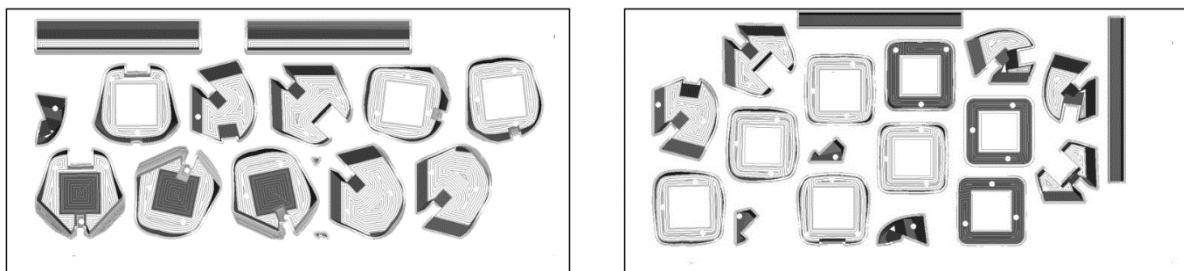


Figure 52. Mise en panoplie de la production du nœud d'assemblage bio-inspiré à trois branches réalisée dans le logiciel Stratoconcept®. L'espacement entre les strates est défini de manière à répondre aux contraintes d'ablocage.

3.3 Synthèse

La série d'expériences menées a permis de compléter la connaissance de l'utilisation du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois et de collecter les informations nécessaires à la mise en place d'un flux de travail spécifique et adapté au contexte étudié. Nous avons montré la possibilité de réaliser des composants architecturaux par Stratoconception® (Figure 53). Nous avons identifié les problèmes émergeant des différentes tâches du processus de conception de composants architecturaux et de leurs interactions avec la conception de leur processus de fabrication. Enfin, les problèmes relevant de la continuité informationnelle numérique entre les différentes tâches du processus de production et leurs outils numériques ont été identifiés.

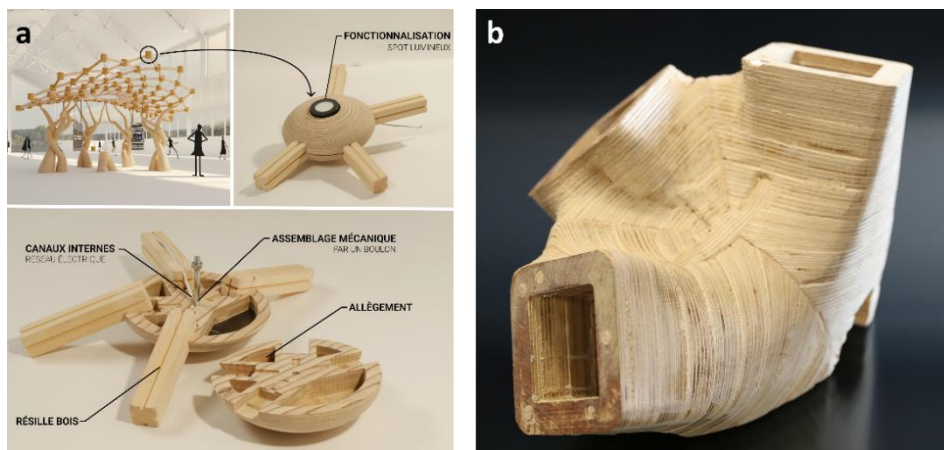


Figure 53. Prototypes de nœuds d'assemblage produits dans le cadre des expériences menées : nœud d'assemblage intégrant plusieurs fonctions (a) et nœud d'assemblage bio-inspiré (b)

La conception de composants architecturaux a montré que la conception d'une pièce et la conception de son processus de fabrication ne s'exécutent pas dans deux phases séquentielles consécutives mais qu'elles sont interdépendantes : la conception du processus de fabrication nécessite des données associées à la conception du composant architectural (sa volumétrie) alors que la conception du composant architectural requiert des données associées à la conception du processus de fabrication. Ces données se rapportent aux opérations de tranchage (séparation en zones, tranchage, décomposition), d'assemblage et de mise en panoplie. Un modèle des données utilisées pour la conception d'un composant architectural fabriqué par Stratoconception® est constitué sur la base de l'étude bibliographique et de la série d'expériences menées. Ce modèle comprend :

- Les données de la volumétrie du composant traité : forme globale, courbes et surfaces de référence, forme des fonctions intégrées...
- Les données de tranchage : plan de séparation, direction et épaisseur de tranchage, plans de décomposition...
- Les données des matériaux : dimensions des produits, caractéristiques physiques et mécaniques, données économiques et environnementales...
- Les données des assemblages : mode de liaison, degrés de liberté, jeu d'assemblage, capacité à être démontable...
- Les données de fabrication : capacités d'usinage, coût de fabrication...
- Les données de montage et de finition : cinématique de montage, manutention, coût de montage, caractéristiques des produits de finition...

Des dépendances existent entre certaines de ces données dans le procédé de Stratoconception® comme l'épaisseur des produits (donnée des matériaux) qui impacte les données de tranchage (épaisseur de tranchage). Ce modèle de données et les expériences menées ont permis d'identifier d'autres dépendances, pour des cas d'applications spécifiques, notamment entre les données de la volumétrie du composant traité et les données de tranchage. Ainsi, les courbes et surfaces de référence définissant la volumétrie d'un composant peuvent générer, dans leur mise en relation avec des règles de conception, des données de tranchage comme les plans de séparation. La modélisation 3D du composant (initial, avancé puis final) établit ainsi une relation directe avec les données associées au procédé de Stratoconception® : ce lien direct favorise l'automatisation de la génération de données propres au procédé, associées à des tâches non-créatives qui, jusqu'à présent, sont traitées manuellement par le concepteur.

La proposition d'un processus de production dans les expériences de « *conception - fabrication* » s'est construite autour d'un processus séquentiel, intégrant les tâches associées au procédé de Stratoconception® de manière à ce qu'elles se positionnent lorsqu'elles étaient observées comme nécessaires dans l'expérience pédagogique préalablement mise en place. Cette approche séquentielle a fait émerger la notion d'interdépendance des différentes étapes liées à la conception et à la fabrication des composants architecturaux. Cette interdépendance implique des itérations du processus de conception architecturale pour appréhender les implications des choix du concepteur. Le caractère itératif du processus n'est cependant pas adapté aux différents outils utilisés qui impliquent de nombreux échanges de fichiers, nous confrontant à l'absence d'une continuité informationnelle numérique, ralentissant le processus de conception et le rendant ainsi fastidieux. Le développement d'un modèle de processus favorisant une grande flexibilité est nécessaire pour permettre l'exploration du processus de conception de composants architecturaux.

Ce processus a également souligné le manque de moyens de quantification des données du projet et d'outils d'aide à la décision pouvant accompagner le concepteur dans ses choix en l'informant sur leurs implications. Nous identifions une nécessité d'intégrer, dans ce modèle de processus, des moteurs d'évaluation qui peuvent se rapporter au comportement mécanique des composants, aux performances thermiques attendues, à l'impact visuel de la strate, aux cinématiques de montage, aux consommations de matière ou encore aux coûts du projet. Le développement de ces moteurs d'évaluation favorisera la proposition de conceptions rationalisées pour leur fabrication, en développant le concept de conception pour la fabrication additive pour l'utilisation du procédé de Stratoconception® dans le contexte de l'architecture et de la construction en bois.

La suite de nos travaux se concentrera sur la proposition d'un modèle théorique de méthode de conception de composants architecturaux pour la fabrication par Stratoconception® construit à partir de la base de connaissances produite par l'étude bibliographique et la série d'expériences menées, reposant particulièrement sur les modèles de données et de processus établis.

Chapitre 4. Présentation du modèle théorique

L'étude bibliographique et les expériences décrites dans le chapitre 3 constituent un processus d'exploration de l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception et la réalisation de composants architecturaux, multi-échelles. Ce processus d'exploration nous a permis de relever des problèmes rencontrés et de soulever des questions relatives aux solutions que nous avons proposées qui participent à la découverte de nouvelles connaissances cohérentes avec les expériences de « *conception-fabrication* » menées. Ainsi, les expériences ne constituent pas une solution finale mais sont considérées comme des solutions provisoires qui participent à la formalisation d'un modèle théorique. Nous proposons ainsi une méthode de conception pour la fabrication additive par Stratoconception® de composants architecturaux basée sur ces précédents résultats.

Ce quatrième chapitre décrit la méthode générale de conception pour la fabrication additive par Stratoconception® proposée, adaptée aux pratiques de l'architecture en bois, intitulée *TADAM(s)*, qui est l'acronyme de « *Timber Architectural Design for Additive Manufacturing by Stratoconception®* », puis présente particulièrement l'organigramme de l'étape associée à la conception de la géométrie des composants architecturaux.

4.1 Présentation de la méthode de conception pour la fabrication additive

À partir de l'étude bibliographique, des résultats des expériences menées et des modèles de données et de processus formalisés, nous proposons une méthode de conception pour la fabrication additive reposant sur les trois étapes chronologiques du processus *DfAM* global catégorisées par Wiberg et al. (2019). Ces étapes sont la conception du système, la conception de la géométrie de la pièce et la conception du processus de fabrication.

Dans cette partie, nous présenterons chacune des étapes constituant la méthode proposée. Chaque étape est décomposée en une série de tâches qui s'opèrent de manière linéaire et séquentielle pour les étapes de conception du système et de conception du processus de fabrication, mais qui se développent dans une boucle itérative à l'étape de la conception de la géométrie de la pièce (Figure 54). Cette boucle itérative favorise une optimisation de la conception, tout au long de son développement, par la mise en place d'opérations d'évaluation de la conception. Notre travail se rapporte particulièrement à cette étape de conception de la géométrie de la pièce pour laquelle nous détaillerons son organigramme de manière à appréhender son caractère dynamique en explicitant les dépendances existant entre les différentes tâches et de manière à faciliter son implémentation (voir partie 0).

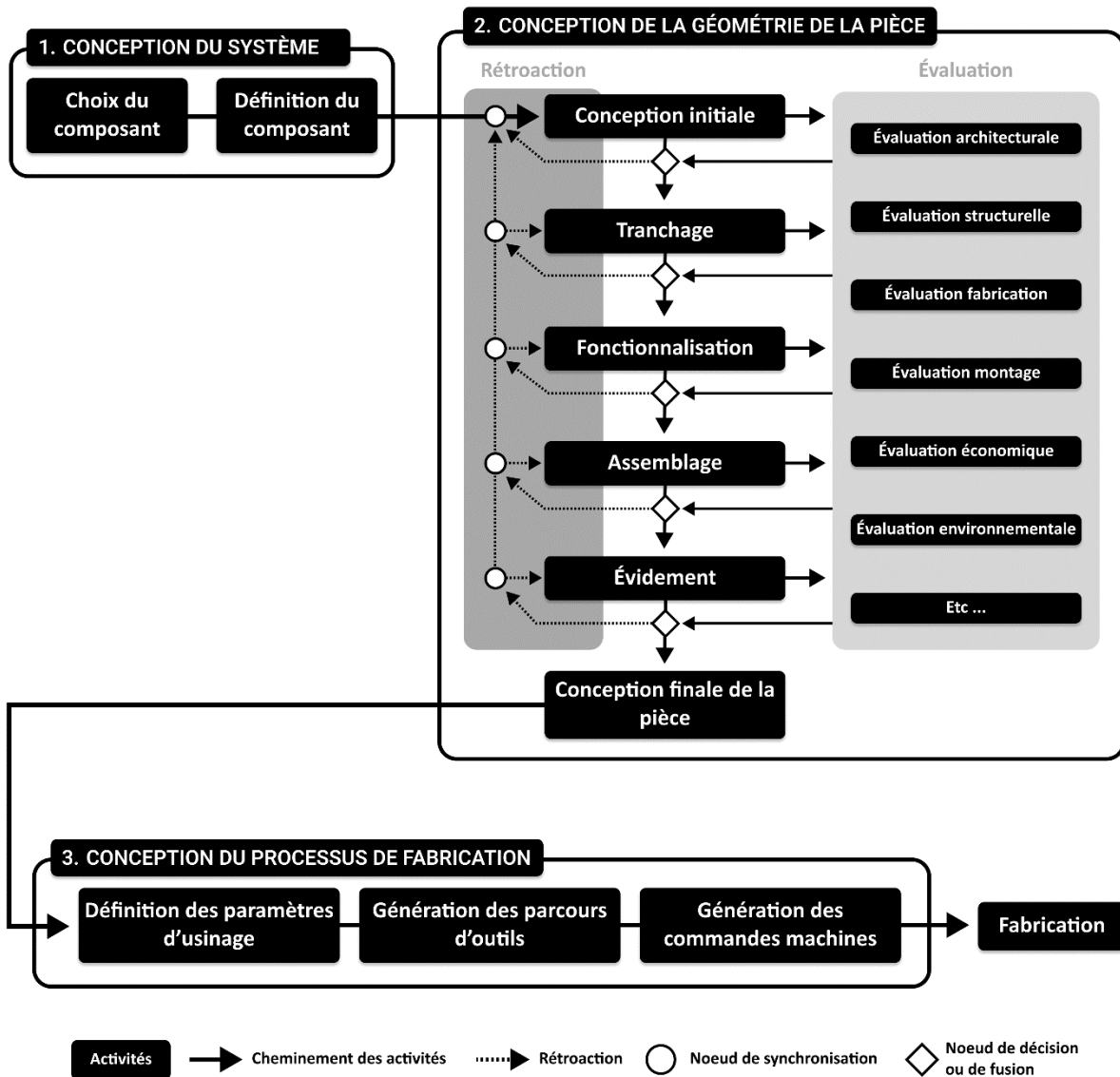


Figure 54. Méthode TADAM(s) représentant les trois étapes du processus de conception pour la fabrication additive par Stratoconception® de composants architecturaux et les différentes tâches constitutives de ces étapes.

4.1.1 Conception du système

L'étape de conception du système consiste à identifier les composants d'un projet qui peuvent être conçus et fabriqués par le procédé de Stratoconception® et à définir les limites géométriques et fonctionnelles du composant architectural à concevoir.

4.1.1.1 Choix de la fabrication par Stratoconception® pour la conception de composants architecturaux

La première tâche de la méthode est la validation du choix de l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la réalisation d'un composant d'un projet architectural. Klahn et al. identifient quatre catégories au sein desquelles nous pouvons classer des composants (Klahn et al., 2015) :

- La fabrication additive crée des opportunités pour la conception de composants ;

- La fabrication additive crée des opportunités pour la conception de composants mais des études approfondies sont nécessaires pour évaluer les enjeux associés à son utilisation ;
- La fabrication additive ne permet pas, actuellement et dans un avenir proche, la réalisation de composants en raison des coûts importants associés, de contraintes techniques ou d'autres critères non maîtrisés ;
- La fabrication additive ne présente pas d'intérêt pour la conception de composants.

La première opération à traiter consiste donc à identifier si l'utilisation de la Stratoconception® présente un intérêt pour la conception et la réalisation de composants architecturaux. L'étude bibliographique et les expériences menées nous ont permis d'identifier deux contextes motivant l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception et la réalisation de composants architecturaux :

- La conception est initiée et développée en s'appuyant sur les capacités caractéristiques du procédé de fabrication telles que l'accès à une complexité formelle ou à la multifonctionnalisation des composants : le choix de l'utilisation de la Stratoconception® est motivé avant le début de la conception du projet en raison de ses différents potentiels ;
- L'utilisation de la Stratoconception® répond à un problème technique rencontré dans la conception du projet et favorise la conception d'une solution rendue possible par les potentiels inhérents au procédé.

Dans les deux cas identifiés, le choix de l'utilisation de la Stratoconception® repose sur les connaissances du concepteur qui se constituent de connaissances théoriques des opportunités et des contraintes du procédé, des matériaux et des machines disponibles, ainsi que de connaissances associées au retour d'expérience d'exemples réalisés. Le développement de références a ainsi été identifié dans nos expériences comme un élément important pour rendre les potentiels d'utilisation du procédé dans le domaine de l'architecture et de la construction en bois intelligibles pour le concepteur. Par la compréhension de ces références, le concepteur peut identifier quels types de composants architecturaux peuvent être fabriqués par Stratoconception®, développer une connaissance des opportunités formelles et fonctionnelles du procédé et appréhender des problèmes rencontrés ainsi que leurs solutions proposées. Cette connaissance développée est considérée comme un paramètre agissant sur l'ensemble du processus de conception de composants architecturaux pour la fabrication additive par Stratoconception®.

La seconde opération consiste à évaluer, par le concepteur, quelle catégorie se rapporte au composant à concevoir de manière à identifier les enjeux associés à la conception du composant architectural et appréhender ainsi l'ampleur des études qui seront à mener :

- Le composant peut être facilement réalisable par le procédé de fabrication et ne nécessite pas d'importantes études, par exemple une pièce sans géométries internes dont les surfaces sont accessibles en dépouille et en contre-dépouille. Le processus de conception pour la fabrication par Stratoconception® correspond alors au processus actuel où le modèle tridimensionnel d'un composant conçu est exporté vers les logiciels de conception du processus de fabrication ;
- La réalisation du composant par Stratoconception® requiert une phase d'étude importante afin de maîtriser les données architecturales, structurelles, économiques, environnementales

ou encore de fabrication et valider, ou non, la viabilité de l'utilisation du procédé de fabrication additive pour la conception et la réalisation de composants architecturaux. Le processus de conception pour la fabrication par Stratoconception® se rapporte alors à la méthode que nous proposons.

4.1.1.2 Définition du composant architectural à réaliser par Stratoconception®

La tâche suivante consiste à définir le cahier des charges de la conception du composant en établissant ses spécifications qui englobent :

- Les limites géométriques du composant : l'espace disponible pour la conception du composant est défini en considérant ses contraintes environnantes. Ces contraintes correspondent aux autres composants du système ou aux zones devant être préservées sans matière pour des raisons fonctionnelles ou esthétiques.
- Les liaisons avec l'environnement : les composants du projet liés au composant conçu sont identifiés ; leur matérialité, leur géométrie et leurs dimensions sont caractérisées.
- Les fonctions à intégrer : l'ensemble des fonctions devant être intégrées dans le composant est explicitée ; leur matérialité, leur géométrie, leurs dimensions et leur géoréférencement, lorsqu'il est imposé, sont caractérisés dans le cas de pièces à intégrer ; leur critère de performance est défini dans le cas de fonctions structurelles, thermiques ou acoustiques. Le géoréférencement du lien entre des fonctions du composant conçu et des fonctions d'autres composants est défini.
- Les conditions de fabrication : les moyens techniques et matériels disponibles pour la réalisation du composant à concevoir sont caractérisés ; les capacités dimensionnelles des centres d'usinages, le nombre de degré de liberté des outils, les dimensions et le type des panneaux sont définis.

Par l'établissement de ce cahier des charges, la conception de la géométrie de la pièce peut être menée en exprimant la créativité du concepteur dans les limites des contraintes définies.

4.1.2 Conception de la géométrie de la pièce

L'étape de conception de la géométrie de la pièce consiste à définir le modèle géométrique du composant architectural final pour sa fabrication à partir du cahier des charges établi dans l'étape de conception du système. La conception du composant architectural s'intègre dans un processus itératif, intégrant des moteurs d'évaluation aidant le concepteur à proposer une solution acceptable (Wetzel, 2009) et rationalisée pour sa réalisation. La conception de la géométrie de la pièce intègre des tâches de la conception conventionnelle du processus de fabrication par Stratoconception® telles que le tranchage et l'assemblage qui impactent directement la conception du composant architectural. Cinq étapes permettent la définition de la géométrie de la solution retenue par le concepteur : la conception initiale, le tranchage, la fonctionnalisation, l'assemblage et l'évidement.

4.1.2.1 Conception initiale

La conception initiale se rapporte à la modélisation volumique de l'enveloppe extérieure du composant architectural. Cette enveloppe est un volume fermé composé d'un ensemble de surface. À ce stade de la conception, une grande liberté créative est laissée au concepteur pour la définition de

la volumétrie générale du composant, dans les limites établies par le cahier des charges qui correspondent aux contraintes environnantes et aux liaisons avec l'environnement.

Deux approches sont identifiées pour la conception initiale : soit le concepteur modélise directement une forme qu'il travaille, soit le concepteur crée le processus de génération d'une forme dont il maîtrise les règles de conception et les paramètres associés. Dans la deuxième approche, « *la forme est déterminée par l'information* » (Lynn, 1999) et la recherche de forme devient un processus d'optimisation de celle-ci vis-à-vis de critères identifiés tels que la minimisation de la matière mise en œuvre.

La conception initiale s'opère par des ajustements successifs de la forme, résultant des intentions architecturales du concepteur et des rétroactions émergeant des autres tâches constitutives de l'étape de conception de la géométrie de la pièce qui permettent d'assurer la faisabilité du composant et de rationaliser la fabrication et de répondre aux exigences de fonctionnalisation. En raison du caractère itératif de la conception de la géométrie de la pièce, nous soulignons l'intérêt d'utiliser une modélisation paramétrique de la forme afin d'apporter une grande flexibilité dans le processus en favorisant l'exploration d'un grand nombre de variantes (voir partie 2.2.2.2).

4.1.2.2 Tranchage

La recherche d'une solution de tranchage du modèle tridimensionnel du composant architectural repose sur les trois opérations de tranchage successives et complémentaires définissant le procédé de Stratoconception® : la séparation du modèle en zones, le tranchage des zones en strates et la décomposition des strates en parties.

Le choix de séparer le modèle en zones peut résulter d'une contrainte de fabrication (zones inaccessibles, tranchage multiaxe), d'une contrainte physique (capacités dimensionnelles des moyens de transport, charges admissibles qui peuvent être manutentionnées par l'homme ou par les machines), ou de la recherche d'une expression architecturale spécifique (séparation en zones permettant des tranchages différenciés contribuant à la qualité visuelle du projet). Les critères de séparation en zone peuvent s'appliquer de manière individuelle et spécifique en fonction du composant à traiter. Par exemple, un composant de grandes dimensions devra être séparé en zones afin de satisfaire des contraintes physiques qui n'auront aucun impact sur la conception d'un composant de petites dimensions.

Le tranchage est défini par une direction et une épaisseur de tranchage. Ces deux paramètres permettent la génération des plans de tranchage des zones du composant traité par combinaison avec d'autres paramètres tels que le mode d'usinage (recto ou recto-verso), le type de distribution des plans de tranchage (par le bas, par le milieu, par le haut ou de manière uniforme) et l'épaisseur de maintien dans le cas d'un mode d'usinage recto-verso. L'épaisseur de tranchage est directement liée aux limites dimensionnelles des panneaux disponibles. Le choix d'une direction de tranchage est motivée par un critère de faisabilité, par une intention architecturale, lorsque la strate est visible, par des critères de performances structurels, thermiques, acoustiques et de rendement matière ou encore par la recherche d'une simplicité de fabrication et de montage. Ces critères sont interdépendants et peuvent avoir des objectifs contradictoires : l'optimisation du rendement matière peut ainsi mener à des solutions de tranchage ne respectant pas les intentions architecturales du concepteur.

La décomposition des strates en parties : le choix de décomposer les strates en parties a été identifié comme ayant un fort impact sur le résultat final des composants architecturaux de grandes dimensions. Les choix de décomposition résultent soit d'une contrainte physique liée aux capacités dimensionnelles des centres d'usinage ou des panneaux à disposition, soit d'une réponse à des critères économiques ou environnementaux, dépendant du rendement matière ainsi que des temps et coûts de fabrication, de montage et de finition. La définition des critères de performance économiques et environnementaux ne répond cependant pas à une norme ou à des références, inexistantes, et doit être appréhendé par la comparaison d'un ensemble de variantes de solutions. Les différentes données dont dépendent les données économiques et environnementales de la décomposition sont interdépendantes et ont une évolution non homogène : par exemple, plus la décomposition sera importante et produira des parties de petites dimensions, plus le rendement matière sera optimisé mais plus le nombre d'opérations et les coûts d'assemblage seront importants. Une évaluation des solutions de décompositions par la comparaison de nombreuses variantes permettra d'appréhender les paramètres de cette opération et de proposer une solution de tranchage répondant à ces critères de performances identifiés.

La recherche d'une solution de tranchage est dirigée par deux approches : soit le concepteur impose une solution répondant à ses intentions architecturales et techniques soit le concepteur agit sans idées préconçues de la solution et s'appuie sur des solutions prédéfinies définies par des règles de conception adaptées à la typologie du composant traité et dont la variation des paramètres favorise une rationalisation de la fabrication par la maîtrise de la consommation de matière, des temps et des coûts de réalisation. En effet, nous avons précédemment souligné que la définition de règles de conception du tranchage est possible pour des typologies et des échelles caractérisées de composants architecturaux (voir partie 3.2.3). Les chapitres 5 et 6 proposeront des règles de conception adaptées à la recherche d'une solution de tranchage pour deux typologies de composants : les nœuds d'assemblage en bois et les parois.

Les expériences menées ont souligné l'importance de l'opération de tranchage d'un composant architectural dans son processus de production par le fort impact qu'elle exerce sur les données du projet. La recherche d'une solution de tranchage rationalisant la production du composant architectural traité s'avère complexe par la multiplicité des choix qu'elle implique. Nous faisons cependant l'hypothèse que la connexion d'outils d'évaluation à cette tâche de la conception de la géométrie de la pièce permettra au concepteur d'appréhender le rôle et l'impact des différents paramètres des stratégies de tranchage et de se diriger vers une solution acceptable.

4.1.2.3 Fonctionnalisation

La multifonctionnalisation des composants architecturaux réalisés par Stratoconception® implique l'intégration des géométries des fonctions définies par le cahier des charges dans le modèle tridimensionnel du composant. Ainsi, tous les évidements nécessaires à l'intégration des fonctions supplémentaires du composant doivent être modélisés de manière à assurer leur réalisation à l'usinage. Ces fonctions peuvent comprendre, en fonction des composants traités, l'intégration de pièces techniques (luminaires, sprinklers, pièces d'assemblage spécifiques, capteurs, pièces de domotique, etc.) et de réseaux (électriques, d'eau), les fonctions structurelles (épaisseurs minimales des parois du composant), thermiques et acoustiques (épaisseur minimale) ou encore l'intégration de mobilier ou d'ornementation.

Ces fonctions sont très variées et ne peuvent pas être traitées de la même manière. L'intégration de mobilier ou d'ornementation intervient dès la conception initiale, particulièrement dans le cas de parois car participant directement à la géométrie de l'enveloppe extérieure du composant. Les fonctions structurelles, thermiques et acoustiques sont traitées à la fois dans la conception initiale, des volumes de matières minimum devant être assurés pour répondre à des critères de performance, mais également dans la tâche d'évidement où les vides créés peuvent être destinés à accueillir des matières isolantes. La fonctionnalisation se rapporte ici à la modélisation des pièces techniques à intégrer et à l'enlèvement de la matière associée à leur intégration, comprenant un volume de « jeu » d'assemblage. Le tracé de l'implantation de réseaux dans la géométrie interne du composant doit se faire en fonction du tranchage établi précédemment afin d'assurer leur faisabilité. Ainsi, la traversée d'un réseau dans une strate, ou partie de strate, doit s'opérer selon l'axe de tranchage. De même, les changements d'orientation doivent s'opérer à l'intersection de deux strates pour que la géométrie des évidements soit accessible à l'usinage.

4.1.2.4 Assemblage

L'opération d'assemblage définit à la fois l'assemblage du composant au système, l'assemblage des zones, des strates et des parties de strates entre-elles. Cette multiplicité des assemblages pouvant s'appliquer dans un composant réalisé par Stratoconception® ne permet pas de dégager une solution unique et admet au contraire un grand nombre de technologies. Le choix des technologies d'assemblage est établi en tenant compte de plusieurs critères :

- La contribution de l'assemblage au comportement mécanique global du composant : la nature de l'assemblage définit un nombre de degrés de libertés bloqués qui doit permettre la transmission des efforts et des moments dans l'ensemble des parties du composant ainsi qu'entre le composant et le système dans lequel il s'intègre.
- L'ajout, ou non, de matière défini par les trois types de transmission des efforts associés aux grandes familles d'assemblages bois (Bléron, 2000) : la transmission des efforts peut être directe, par simple contact sans ajout de matière (assemblages bois-bois), par juxtaposition (assemblages mécaniques) ou par transmission indirecte (assemblages collés ou métallo-collés).
- Les capacités des outils et les temps de fabrication : la réalisation d'un assemblage sans ajout de matière induit des opérations d'usinage associées à la réalisation de ses géométries, impactant directement les temps de fabrication et les coûts associés. De plus, les capacités des outils, leur rayon particulièrement, ne permettent pas la réalisation de certains assemblages ou demandent leur adaptation.
- Les dimensions du composant : certaines technologies d'assemblage sont adaptées à des dimensions de pièces à assembler : certains assemblages comme l'emboîtement trouvent leur validité structurelle pour des composants de grandes dimensions dont le poids propre permet de contrer le potentiel risque de soulèvement. Au contraire, d'autres assemblages seront particulièrement adaptés à des composants de petites dimensions, en raison du caractère manuel de la tâche.
- La cinématique de montage et de démontage : les assemblages doivent satisfaire les contraintes de cinématique de montage et intègrent un « jeu » éliminant les contraintes dues aux variations dimensionnelles du matériau bois liées aux variations d'humidité dans le

composant. S'il est établi dans le cahier des charges, le caractère démontable du composant doit être pris en compte dans le choix des technologies d'assemblage.

- Les performances techniques du composant : le respect de la continuité de l'enveloppe extérieure du composant pour des raisons d'étanchéité, de thermique ou d'esthétique, peut participer au choix des technologies d'assemblage.

Le choix des assemblages mis en œuvre dans le composant permet de définir les volumes de matière nécessaires pour leur réalisation. Ainsi, tous les volumes fonctionnels du composant sont établis et l'opération d'évidement, à des fins d'allègement ou d'intégration d'une fonction thermique ou acoustique, peut être réalisée.

4.1.2.5 Évidement

L'évidement est la dernière tâche du processus de conception du composant architectural. Elle a pour objectif l'allègement des masses ne répondant pas à une fonction dans le composant. Un prérequis à cette tâche est la définition de l'épaisseur minimale de parois du composant à préserver de manière à assurer la résistance mécanique du composant, à usage structurel.

Cette tâche est optionnelle dans le processus. En effet, l'allègement de composants de petites dimensions n'est pas toujours nécessaire, ces pièces ne présentant pas de problèmes de manutention ou de charges sur la structure globale du projet alors que leur allègement impliquerait des temps de fabrication plus long par l'ajout d'opérations d'usinage. Au contraire, cet évidement devient nécessaire pour des composants de grandes dimensions dont le poids deviendrait très important au regard des limites de manutention ou dont l'intégration de fonctions thermiques ou acoustiques implique le remplissage des vides créés par des matières isolantes.

La recherche d'un évidement optimisé pour l'allègement ou pour l'intégration de fonctions nécessitant un remplissage des vides créés s'opère par évaluation de critères de performances attendus (critère de poids ou temps d'usinage). De manière à faciliter les opérations d'usinage en minimisant les volumes à usiner, pour le cas de l'utilisation d'un centre d'usinage triaxial, les évidements sont réalisés, lorsque cela est possible, de manière à ne nécessiter que des usinages 2D, par contournage, dans les strates. Ainsi l'évidement est traité à la fois à l'échelle du composant, pour une approche globale et à l'échelle de la strate ou de la partie de strate, dans le cas d'une décomposition, pour une approche favorisant une optimisation des temps d'usinage. L'évidement est réalisé à partir des solutions préétablies, définies par des règles de conception dont les paramètres sont modifiables par le concepteur de manière à lui permettre de rationaliser sa conception pour la fabrication.

Cette tâche de l'étape de conception de la géométrie de la pièce produit la géométrie finale du composant architectural à réaliser par Stratoconception®. Le modèle tridimensionnel associé à cette conception finalisée est transmis à l'opérateur en charge de la fabrication et de la conception de son processus.

4.1.2.6 Évaluation et optimisation

Un apport important de la méthode par rapport à la conception du processus de fabrication actuel par Stratoconception® est l'ajout de « *moteurs d'évaluation* » permettant au concepteur d'obtenir un retour d'information sur les implications de ses choix de conception, à chaque tâche de l'étape de

conception de la géométrie de la pièce. Cet apport répond à la demande d'analyse et de vérification de la conception des pièces de manière à rationaliser la fabrication et assurer la viabilité des composants architecturaux au regard de critères identifiés par le concepteur. Les moteurs d'évaluation génèrent un rapport d'évaluation qui se base sur les données résultats produites par l'évaluation. Ce rapport d'évaluation permet au concepteur d'appréhender la modification des paramètres de la conception de la géométrie de la pièce, aux différentes tâches traitées. Il peut également être le support de la mise en place d'une boucle itérative d'optimisation de la conception pour la fabrication des composants architecturaux, en associant les données résultats des évaluations aux paramètres de conception dont ils dépendent.

Les moteurs d'évaluation se rapportent à la faisabilité et à la facilitation de la fabrication et du montage, à la caractérisation de performances techniques, structurelles ou environnementales, à la dimension architecturale du composant conçu ou encore à la dimension économique du projet. D'autres moteurs d'évaluations peuvent être introduits tels que des moteurs d'évaluation thermiques ou acoustiques dans le cas de composants architecturaux répondant à ces fonctions, telles que les parois. Ces données associées à la fabrication dépendent de paramètres identiques, sont ainsi interdépendantes mais peuvent avoir des comportements différents. Par exemple, la maximisation des propriétés structurelles d'un composant architectural dans une direction implique une orientation de l'ensemble des strates du panneau dans la même direction, de manière à respecter le sens du fil du bois, bloquant des rotations lors de leur mise en panoplie ce qui impacte directement la consommation de matière qui se retrouve non optimisée. L'utilisation de ces moteurs d'évaluation pour la conception du tranchage du composant traité est essentiel, cette tâche ayant été identifiée comme l'une de plus impactantes sur les données finales de la conception, particulièrement dans le cas de composant de grandes dimensions. Pour une même conception, plusieurs solutions sont possibles et doivent être comparées de manière à ce que le concepteur puisse faire le choix d'une solution acceptable au regard de ses exigences fixées. En effet, les données évaluées peuvent avoir des objectifs contradictoires ; par exemple, l'augmentation des performances acoustiques d'une paroi induit une augmentation de la masse de cette dernière, s'opposant à une recherche d'allègement pour réduire les dimensions des fondations requises. Une objectivation de la conception est nécessaire et est appréhendée par le concepteur en tenant compte du retour d'information apporté par les moteurs d'évaluation qui lui permettant de comprendre l'influence des paramètres de la conception du composant architectural sur chaque donnée du projet. Le moteur d'évaluation économique implique l'intégration, dans l'étape de la conception de la géométrie de la pièce, de l'opération de stratification de la pièce de manière à quantifier les temps d'usinage associés à la fabrication du composant traité. De même, l'opération de mise en panoplie des strates est intégrée à ce moteur d'évaluation de manière à quantifier les consommations de matières associées aux choix de conception.

Les moteurs d'évaluation et leurs résultats sont adaptés et cohérents avec le niveau d'avancement de l'étape de conception de la géométrie de la pièce. L'évaluation des premières tâches de la conception de la géométrie pièce ont ainsi pour objectif la caractérisation d'ordres de grandeurs des données évaluées alors que l'évaluation de la conception finale de la pièce caractérisera les données de la pièce à produire. Ces différents niveaux permettent l'utilisation de ces moteurs d'évaluation dès la phase amont d'un projet de conception d'un composant architectural par Stratoconception® où tous les paramètres de la conception ne sont pas encore définis et toutes les tâches ne peuvent pas être développées.

4.1.3 Conception du processus de fabrication

La conception du processus de fabrication par Stratoconception® aboutit à la génération des commandes machines qui piloteront les centres d'usinage pour la réalisation du composant architectural traité. La méthode proposée intègre une grande partie des tâches constituant la conception du processus de fabrication par Stratoconception® actuel au niveau de la conception de la géométrie de la pièce. Le procédé de Stratoconception® diffère d'autres procédés de fabrication additive pour lesquels l'ensemble des opérations de conception du processus de fabrication peuvent être indépendants de la conception de la géométrie de la pièce. La nature du procédé de Stratoconception® et le contexte de la production de composants architecturaux impliquent le développement d'un cadre de travail favorisant une conception intégrée convoquant les opérations nécessaires du procédé de fabrication.

La conception du processus de fabrication est ainsi constitué des étapes de stratification finale, de mise en panoplie finale et de génération des parcours d'outil et de génération des commandes machines.

Un développement des méthodes et des outils actuels est nécessaire de manière à s'adapter aux centres d'usinage des entreprises de la construction en bois ainsi que pour considérer davantage les caractéristiques du matériau bois pour l'usinage, particulièrement son anisotropie qui ne participent pas, à ce jour, à la définition des conditions de coupe.

Le processus de conception du processus de fabrication est suivi par la fabrication des strates, leur assemblage et leur post-traitement. L'étape d'assemblage des strates est guidé par des rapports de montage produits dans l'étape de conception du processus de fabrication.

4.2 Organigramme de l'étape de conception de la géométrie de la pièce

La première partie de ce chapitre nous a permis de décrire chacune des étapes constituant la méthode générale proposée de conception pour la fabrication additive par Stratoconception®, adaptée aux pratiques de l'architecture en bois. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux relations et aux dépendances existant entre les différentes opérations constitutives de la méthode proposée. Nous décrirons particulièrement l'articulation de ces opérations pour l'étape de conception de la géométrie de la pièce en soulignant les relations existant avec les étapes de conception du système et de conception du processus de fabrication. Le diagramme d'activité établi de cette étape sera présenté puis les données définies par le concepteur, utilisées par le système et échangées seront discutées.

4.2.1 Diagramme d'activité de l'étape de conception de la géométrie de la pièce

Nous choisissons de représenter la méthode *TADAM(s)* par un diagramme d'activité. Les diagrammes d'activités permettent de mettre en évidence les traitements, les rendant particulièrement adaptés à la modélisation d'un cheminement de flux de contrôle et de flux de données (Audibert, 2014). Nous explicitons ainsi les relations établies entre les principales opérations constituant le processus de conception de la géométrie des composants architecturaux ainsi que les données utilisées et échangées dans ce processus (Figure 55 et Figure 56). La représentation par diagramme d'activité nous permettra ainsi d'appréhender et d'évaluer la continuité informationnelle numérique de la méthode implémentée en soulignant les relations primordiales à traiter dans le processus de manière à proposer des solutions assurant cette continuité (voir Chapitre 7).

Le diagramme d'activité décrit les données échangées entre les étapes de conception du système et de conception de la géométrie de la pièce, entre les différentes tâches et leurs opérations du processus de conception de la géométrie de la pièce, ainsi qu'entre les étapes de conception de la géométrie de la pièce et de conception du processus de fabrication. Pour chaque opération le concepteur définit les données nécessaires à son traitement, permettant ainsi une génération progressive de la géométrie finale du composant architectural traité, par augmentation du niveau de détail, débutant par la définition des géométries de l'enveloppe extérieure du composant et se concluant par la définition des géométries des assemblages et des évidements possibles. Cette évolution progressive n'est pas linéaire et permet au contraire un processus itératif où le concepteur peut apporter des modifications associées à un changement d'idées ou à des résultats d'évaluation non concluants. Le concepteur peut, pour chaque opération, avoir un retour d'information l'accompagnant dans ses prises de décision et dans les modifications qu'il apporte aux données nécessaires au traitement du processus par l'utilisation de moteurs d'évaluation, adaptés à l'état d'avancement du processus. L'évaluation d'une donnée (structurelle, thermique, de fabrication...) peut intervenir à plusieurs états d'avancement de la conception en convoquant des données et en produisant des résultats de plus en plus précis. Les résultats des évaluations sont présentés au concepteur sous la forme d'un rapport d'évaluation qui l'oriente dans sa rétroaction sur les données d'entrée du traitement du processus.

La définition des données nécessaires au traitement de tâches sont, soit fixées par le concepteur, soit définies par des règles de conception dont les paramètres sont établis par le concepteur. L'introduction du choix d'utilisation de règles de conception préétablies soutient la mise en place d'une automatisation des tâches non-créatives du processus en minimisant les interventions manuelles du concepteur.

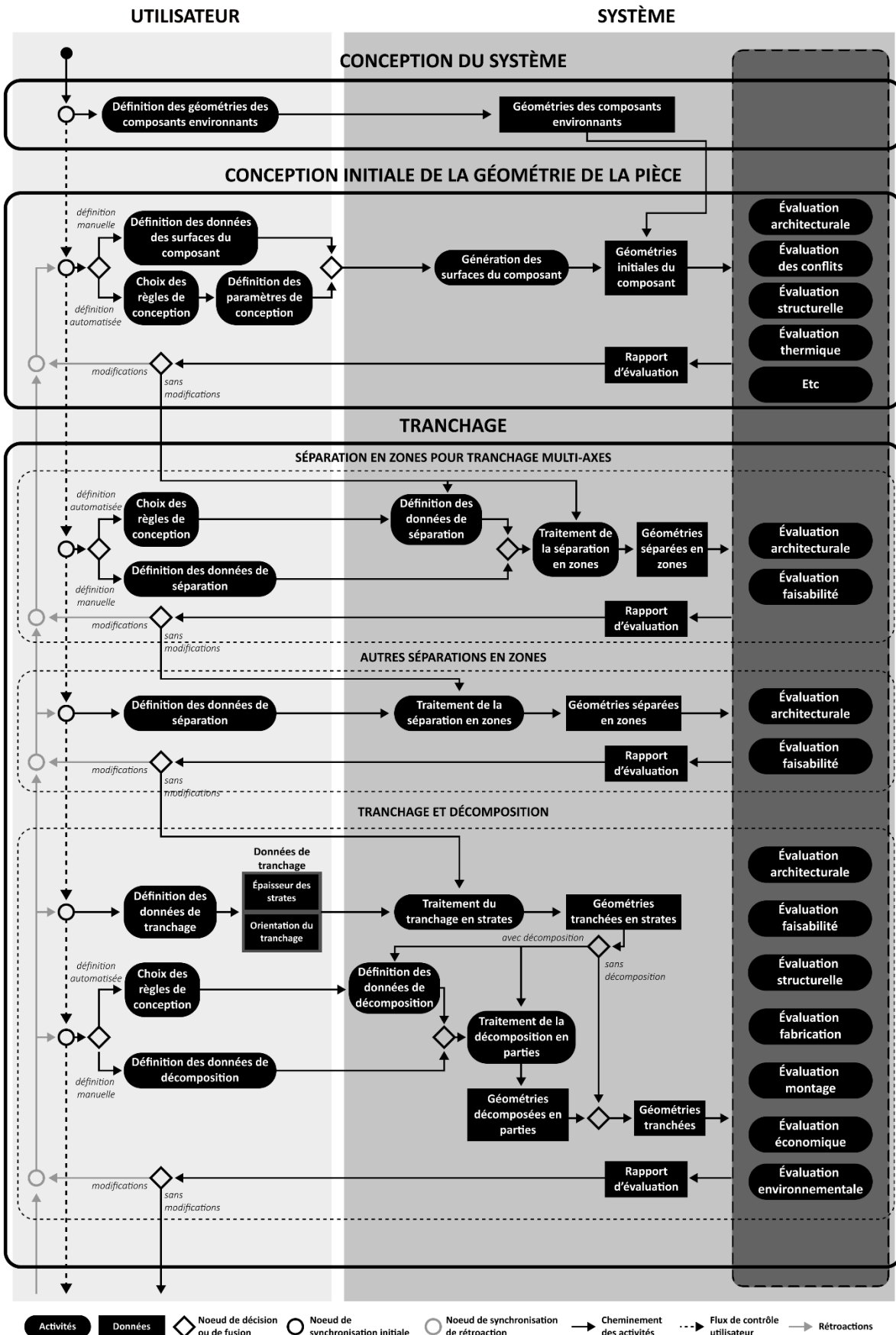


Figure 55. Diagramme d'activité des tâches de conception initiale et de tranchage de l'étape de conception de la géométrie de la pièce (pour la suite du diagramme d'activité voir Figure 56)

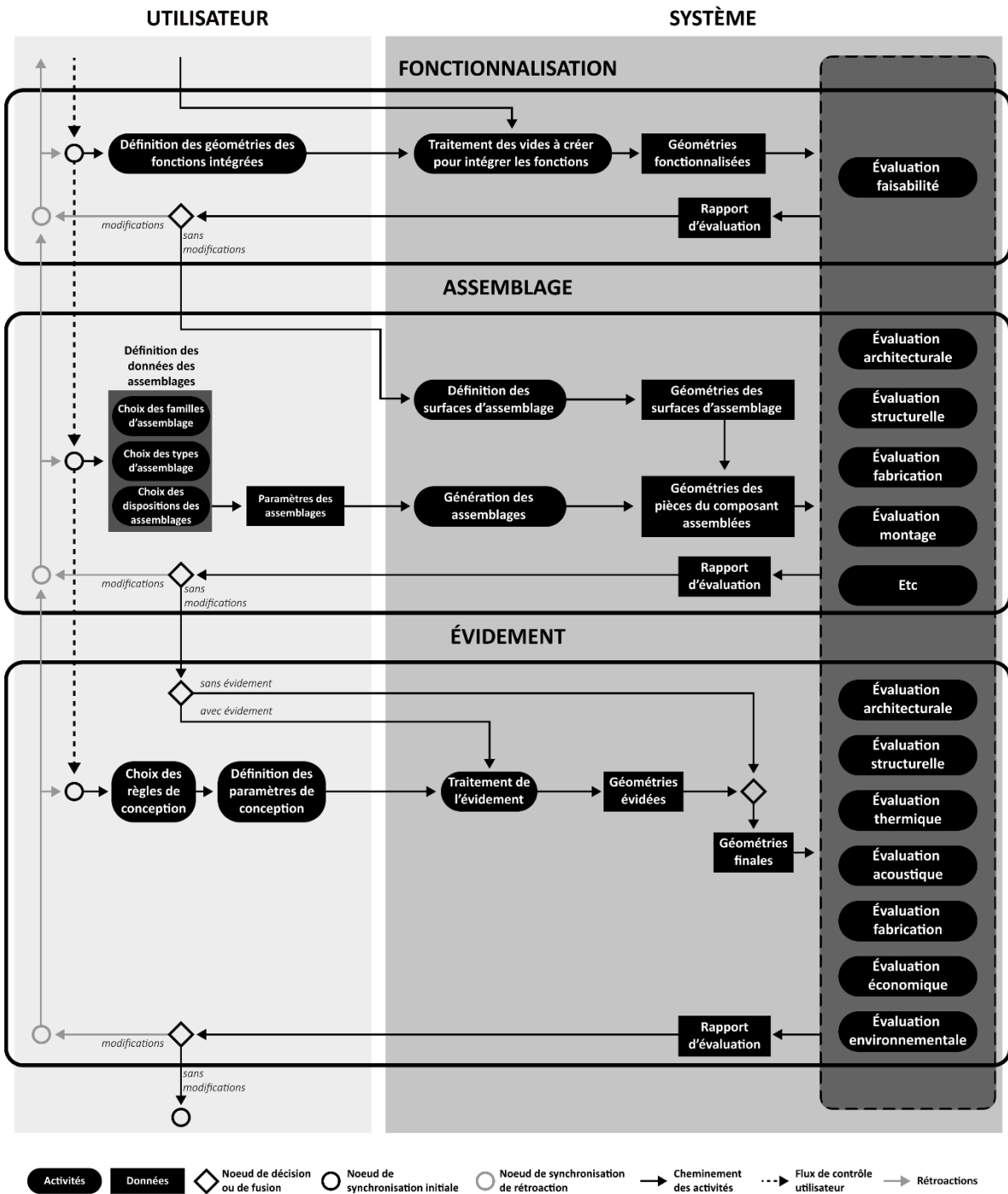


Figure 56. Diagramme d'activité des tâches de fonctionnalisation, d'assemblage et d'évidement de l'étape de conception de la géométrie de la pièce (pour le début du diagramme d'activité voir Figure 55)

Bien que le diagramme d'activité établi présente le fonctionnement de la méthode TADAM(s) de manière détaillée, une augmentation de la précision de la description est nécessaire pour identifier les particularités de l'utilisation de la méthode pour des cas d'applications identifiés, pouvant être très variés et demandant ainsi une spécification des activités et des données utilisées et échangées. Les chapitres 5 et 6 nous permettront de détailler ce diagramme d'activité, ou une partie de ce diagramme d'activité, pour deux cas d'applications présentant de fortes différences, traitant différentes échelles de composants et ne requérant pas l'exécution des mêmes opérations de la méthode TADAM(s).

4.2.2 Données utilisées et échangées

La représentation de la méthode *TADAM(s)* par un diagramme d'activité explicite les différents échanges de données et les liens de dépendances qui les lient. Dans cette partie, nous détaillons les types de données utilisées en nous concentrant sur l'étape de conception de la géométrie de la pièce. Nous identifions les données accessibles au concepteur, nous spécifions le rôle des règles de conception pour l'automatisation des tâches non-crétives et nous soulignons l'enrichissement des données du modèle 3D du composant architectural tout au long du processus de conception de sa géométrie.

4.2.2.1 Conception initiale et données échangées avec l'étape de conception du système

Le traitement par le concepteur de l'étape de conception du système produit des données numériques et non-numériques qu'il convoque à différentes tâches de l'étape de conception de la géométrie du composant :

- Des données sous forme de modèles numériques 3D des composants du projet qui environnent le composant traité par *Stratoconception*[®]. Cette modélisation permet de définir précisément les géométries des liaisons du composant au système dans lequel il s'inscrit tout en caractérisant l'espace disponible pour sa conception.
- Des données non-numériques qui agissent sur les processus cognitifs du concepteur et sont transcrits comme des paramètres de la conception de la géométrie du composant traité. Ces données sont toutes celles définissant le cahier des charges de la conception du composant (voir partie 4.1.1.2) qui ne sont pas des géométries modélisées. Elles comprennent, de manière non-exhaustive, la matérialité des composants environnants, la description précise des fonctions à intégrer ou encore les moyens techniques et les matériels disponibles qui influent sur les choix de la conception : par exemple, pour la production de nœuds d'assemblage, la matérialité des membrures constituant un treillis impacte le choix des jeux d'assemblage que le concepteur doit spécifier pour traiter la liaison des nœuds d'assemblage au système. De même, la connaissance des fonctions à intégrer et de leur géoréférencement dans le système oriente les choix d'orientation du tranchage, avant même de traiter la géométrie de ces mêmes fonctions.

4.2.2.2 Données définies par le concepteur et données calculées par la machine

Dans l'étape de conception de la géométrie de la pièce, le concepteur peut agir sur la conception par la modification des données nécessaires au traitement des opérations en définissant lui-même ces données ou en choisissant des règles de conception prédéfinies qui automatisent la génération de ces données ; le concepteur agit alors sur la modification des paramètres associés à ces règles de conception.

La définition directe, par le concepteur, des données nécessaires au traitement des opérations du processus favorise une adaptation à un large éventail de typologies et de géométries de composants. Les données sont cependant statiques et indépendantes des règles de conception de la géométrie du composant traité. Ainsi, les données géométriques correspondant à des plans de tranchage, de décomposition, ou aux géométries des évidements à réaliser, ne sont pas dépendantes des règles

définissant la géométrie de la pièce traitée mais uniquement de la géométrie elle-même. Ce caractère statique induit, en cas de modifications importantes de la géométrie de la pièce, une incapacité à appliquer les données définies par le concepteur, pour la version précédente de la géométrie, et limite l'automatisation des mises à jour des opérations aval. Cette limite est donc associée à l'attribution au concepteur du traitement des données de la géométrie de la pièce. Ainsi, la flexibilité de la méthode et sa capacité à favoriser un grand nombre de variations de la conception de la géométrie de la pièce est réduite.

Malgré cette limite, ce mode de définition des données par le concepteur est conservé dans la méthode proposée pour le traitement de typologies de composants spécifiques, pour lesquels des règles de conception ne sont pas établies, ou pour traiter des opérations possédant une forte singularité, comme l'opération de séparation en zones et comme l'opération de fonctionnalisation.

À l'exception de l'opération de fonctionnalisation, identifiée comme très spécifique, le concepteur a cependant l'opportunité de choisir des règles de conception qui automatisent la génération des données géométriques nécessaires au traitement de la conception de la géométrie de la pièce. Le concepteur choisit donc une règle parmi plusieurs prédéfinies et modifie les paramètres qui lui sont associés ; il n'agit plus directement en générant des données mais en modifiant les paramètres de règles générant ces données. Ce mode de définition des données permet l'établissement d'une dépendance avec les règles de conception de la géométrie de la pièce favorisant l'automatisation des mises à jour des opérations constitutives du processus. Le traitement des données de la géométrie de la pièce est ici attribué à la machine et non plus au concepteur. Les tâches non-créatives sont alors automatisées et contrôlées par des paramètres modifiables par le concepteur, favorisant une flexibilité de la méthode.

4.2.2.3 Enrichissement des données du modèle 3D du composant architectural

L'étape de conception de la géométrie de la pièce est basée sur l'enrichissement du modèle 3D du composant architectural traité dont le niveau de détail progresse au fur et à mesure de l'avancement du traitement de la conception. Les composantes géométriques de la pièce, détaillées à chaque état d'avancement, constituent les données géométriques du modèle 3D. Ainsi, les données géométriques ne sont pas remplacées mais sont au contraire conservées pour pouvoir être utilisées à différentes opérations de la méthode : les points, les courbes et les surfaces de l'enveloppe initiale sont ainsi accessibles aux règles de conception quel que soit l'avancement du processus de conception. L'utilisation d'un modèle 3D « maître », construit de manière paramétrique et enrichi à chaque état d'avancement, permet la mise en place de dépendances avec les règles de conception générant les données nécessaires au traitement des opérations ainsi qu'avec les règles définissant ces traitements eux-mêmes.

4.2.2.4 Données pour les évaluations

L'exécution d'évaluations implique la définition, par le concepteur, de nouvelles données qui ne sont pas utilisées dans la conception de la géométrie de la pièce. Ces données sont spécifiques au type d'évaluation et au niveau d'avancement de la conception auquel l'évaluation est convoquée. Les données traitées par les moteurs d'évaluation sont ainsi basées sur les données des géométries du modèle, à l'état d'avancement considéré, sur des données utilisées dans le processus de conception,

et sur des données complémentaires introduites. Ces données introduites comprennent, par exemple, les caractéristiques mécaniques, thermiques ou acoustiques des matériaux, les coûts des matériaux ou des opérations de fabrication et de montage ou encore les paramètres de fabrication (stratification, vitesses d'avance, etc.). Certaines évaluations ne requièrent cependant pas d'interventions du concepteur comme les évaluations de conflit, évaluant les intersections entre les géométries de la pièce et les géométries des composants environnants, ou les évaluations de faisabilité, ne considérant que la géométrie de la pièce traitée et les règles de conception du procédé de Stratoconception®.

4.2.2.5 Données échangées avec l'étape de conception du processus de fabrication

L'étape de conception de la géométrie de la pièce permet la définition des géométries des strates, ou parties des strates décomposées, telles qu'elles seront réalisées. Les données transmises à l'étape de conception du processus de fabrication sont donc les géométries finales de la pièce, qui seront traitées pour leur fabrication dans l'étape suivante en définissant les paramètres d'usinage, en calculant les mises en panoplie et les parcours d'outils, puis en générant les codes machines.

Conclusion de la partie 2

La littérature a souligné un manque de connaissances liées au processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux multi-échelles en bois. Une recherche expérimentale a été menée en se basant sur une méthode de conception par la pratique. Elle a permis de confirmer certaines hypothèses émises par notre étude bibliographique et de faire émerger d'autres problèmes d'utilisation du procédé dans notre contexte.

Le procédé de Stratoconception® offre de nouvelles opportunités de conception pour des composants architecturaux non-standards en bois.

Nous avons montré les capacités du procédé de Stratoconception® à produire des composants non-standards en bois de petites dimensions et à se mettre au service de la conception de composants de différentes échelles et de différentes fonctions. Nous avons validé la possibilité de réaliser une conception architecturale d'un composant et de le fabriquer par Stratoconception®. Nous avons identifié deux cas d'application prometteurs que sont les nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels et les parois multifonctionnelles. D'autres opportunités d'applications sont relevées comme la production de fenêtres et d'escaliers à double courbure, d'outillages de cintrage ou d'autres pièces techniques d'assemblage.

Un lien de dépendance existe entre la conception de la géométrie des composants architecturaux et la conception du processus de fabrication.

Nous avons confirmé la nécessité d'intégrer les contraintes de la fabrication dès les phases amont de la conception des géométries des composants architecturaux traités. Les expériences menées ont souligné que les géométries des composants architecturaux, à usage structurel, sont conçues en tenant compte des dépendances existant entre les formes, la structure, les matériaux et le procédé de fabrication. Ces expériences font également émerger l'intérêt d'intégrer certaines opérations de la conception du processus de fabrication par Stratoconception® au niveau de la conception de la géométrie de la pièce, particulièrement les opérations de tranchage et d'assemblage qui l'impactent fortement.

Le processus actuel de conception de composants à produire par Stratoconception® ne permet pas le développement de solutions rationalisées et adaptées à des exigences définies par le concepteur.

Deux problèmes ont émergé du processus de conception et de fabrication de composants architecturaux par Stratoconception® : le manque de données d'évaluation de la conception du processus de fabrication dans les solutions logicielles existantes et la rupture de la continuité informationnelle numérique entre la conception de la géométrie de la pièce, pour des composants architecturaux, et la conception du processus de fabrication. Nous nous sommes confrontés au manque de retours d'informations directs sur les implications des choix du concepteur et d'outils d'aide à la conception, particulièrement pour l'étape de décomposition, indispensable pour le traitement des composants de grandes dimensions tels que les parois. Ce manque d'outils ne permet pas des prises de décisions informées et ne favorise pas l'établissement d'une solution finale optimisée vis-à-vis de critères définis par le concepteur.

Nous avons confirmé le besoin de flux de travail itératif et de flexibilité des processus de conception pour la réalisation des composants non-standards par Stratoconception®. La rupture de la chaîne numérique actuelle ne favorise cependant pas cette flexibilité de conception et rend la génération de variantes d'une conception, pourtant essentielles pour des études de rationalisation, contraignante et chronophage en raison des nombreux échanges de fichiers que cette rupture implique. Ce résultat est appréhendé en tenant compte du degré de difficulté subjectif d'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception de composants architecturaux, qui constitue l'un des attributs d'une innovation participant à son taux d'adoption dans les pratiques courantes de l'architecture et de la construction en bois.

En se basant sur les résultats de la recherche expérimentale menée, un modèle théorique de méthode de conception pour la fabrication additive, de composants architecturaux, par Stratoconception® a été proposé. Il met en avant la nécessité de développer une continuité informationnelle numérique entre les différentes étapes du processus de conception et de fabrication de composants architecturaux par Stratoconception®.

Les solutions logicielles existantes ont un intérêt à être liées à des environnements de conception paramétrique adaptés à la conception architecturale.

Les solutions logicielles du procédé de Stratoconception® sont particulièrement adaptées pour la conception du processus de fabrication. Les environnements de conception paramétrique pour l'architecture sont, pour leur part, adaptés pour la modélisation des géométries de composants non-standards ainsi que pour l'automatisation des tâches non-créatives d'un processus. La conception de composants architecturaux réalisée pendant les expériences a présenté des possibilités de développement de règles de conception permettant l'automatisation d'un grand nombre de tâches associées au traitement d'une géométrie pour sa fabrication par Stratoconception®, favorisant ainsi la multiplication des études dans un temps restreint. Ces règles de conception, associées aux différentes tâches du processus, dépendent des règles de conception de la géométrie initiale du composant traité, favorisant une automatisation des mises à jour des opérations en cas de modifications de certains paramètres de la conception. Nous identifions ainsi un grand intérêt pour l'utilisation de la conception paramétrique pour la conception et l'étude des composants architecturaux produits par Stratoconception®, en intégrant les opérations de tranchage et d'assemblage du procédé. La continuité informationnelle numérique doit alors se développer entre plusieurs solutions logicielles et ne peut pas être considérée par l'utilisation d'un seul outil.

De manière à évaluer l'aptitude du modèle théorique proposé à répondre aux problèmes identifiés, nos travaux présenteront l'implémentation de la méthode de conception pour la fabrication de composants architecturaux par Stratoconception® dans le cadre d'une conception de nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels. Nous porterons une attention particulière au traitement du tranchage de composants de grandes dimensions, les parois, en proposant un outil d'aide à la conception adapté. Nous proposerons enfin des solutions de mise en place d'une continuité informationnelle numérique supportant la méthode *TADAM(s)*.

Partie 3. Implémentation de la méthode et développement d'outils d'aide à la conception

L'étude bibliographique présentée et l'analyse des résultats de la recherche expérimentale nous ont mené à proposer un modèle théorique de méthode de conception pour la fabrication additive par Stratoconception[®], nommée *TADAM(s)*, adaptée au contexte de la production de composants architecturaux. Dans cette partie, nous implémentons la méthode proposée dans l'outil de conception de nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels *TAN(s)*, « *Timber Assembly Node made by Stratoconception[®]* » (**chapitre 5**). Pour le cas d'application des parois non-standards, nous présentons l'outil *TiWa(s)*, « *Timber Wall made by Stratoconception[®]* » d'aide à la conception du tranchage de composants de grandes dimensions permettant l'évaluation et la comparaison de plusieurs approches constructives principalement au regard d'un critère économique (**chapitre 6**). Enfin, nous proposerons le développement d'une continuité informationnelle numérique adaptée à la méthode proposée et répondant à des scénarios de collaboration autour d'un projet architectural réalisé par Stratoconception[®] (**chapitre 7**). Pour valider notre proposition, la méthode implémentée, les outils développés et la continuité informationnelle numérique établie sont mis à l'épreuve à travers des cas d'applications.

Chapitre 5. Implémentation de la méthode pour la conception de nœuds d'assemblage en bois

Les nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels, particulièrement des résilles rigides, ont été identifiés comme un cas d'application intéressant pour l'utilisation de la Stratoconception® dans le cadre de la production de composants architecturaux. Le développement de l'outil *TAN(s)* répond à l'implémentation de l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)* pour la conception de nœuds d'assemblage dont la géométrie est orientée par l'axe de chacune des barres du treillis qu'ils lient. L'outil *TAN(s)* est ainsi adapté aux typologies de composants répondant aux critères établis pour ce cas d'application. En effet, les règles de conception des différentes tâches de la conception de la géométrie de la pièce sont directement dépendantes des règles de la conception initiale de l'enveloppe extérieure des nœuds d'assemblage conçus : l'outil trouve sa validité dans cette typologie de composant et dans celles assimilables.

Le choix de l'environnement numérique d'implémentation de la méthode *TADAM(s)* se porte vers un environnement de conception paramétrique qui peut garantir la flexibilité nécessaire au processus de conception d'un projet d'architecture, qui peut communiquer avec l'ensemble des logiciels du secteur de la construction et qui permet l'intégration des opérations du procédé de Stratoconception® nécessaires à la conception de la géométrie de la pièce. De plus, ce choix est motivé par la capacité des environnements de conception paramétrique à :

- Laisser le concepteur définir des règles et des relations logiques automatisant des tâches non-créatives lors de la création d'un modèle 3D ;
- Convertir des définitions abstraites en des critères mesurables à toutes les phases d'avancement du projet et dès sa phase amont ;
- Permettre l'exploration d'un grand nombre de variantes d'un même objet à concevoir et de favoriser l'articulation de flux de travail itératifs ;
- Accélérer le processus de conception en accompagnant le concepteur vers des solutions adaptées à des exigences établies.

L'environnement de programmation visuelle *Grasshopper*, associé au logiciel de modélisation *Rhinoceros 3D*, est retenu pour l'implémentation de l'outil *TAN(s)*, présentant plusieurs avantages pour l'adoption du procédé de Stratoconception® dans les pratiques courantes de l'architecture et de la construction en bois. La programmation visuelle, également appelée programmation graphique, est un langage de programmation basé sur l'assemblage de composants graphiques, « *encapsulant du*

code, c'est-à-dire des fonctions et des sous-programmes » (de Boissieu, 2013). Ce langage de programmation est accessible pour un public d'architectes et d'ingénieurs, non-spécialiste de l'informatique, par son caractère ludique et le faible niveau de connaissances en programmation nécessaire à son utilisation, simplifiant la conception d'un algorithme. *Grasshopper* favorise également le développement d'une continuité informationnelle numérique ainsi que l'étude avancée de la conception paramétrique développée par la mise en place de liens directs avec d'autres logiciels ou par l'intégration de « *plug-in* ». Enfin, un argument supplémentaire est son prix, relativement faible en comparaison à d'autres logiciels couramment utilisés dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois.

La conception paramétrique par programmation visuelle s'opère par le développement de liens entre les données d'entrée et de sortie de composants graphiques, générant un graphe représentant l'algorithme créé. La mise à jour des données, lors de la modification d'une donnée d'entrée, se fait par propagation ; « *les données sont résolues et propagées de proche en proche en suivant la topologie du graphe* » (de Boissieu, 2013), induisant un séquençage des opérations traitées par les composants graphiques. De manière à respecter ce séquençement des opérations, le développement de l'outil *TAN(s)* est décomposé en plusieurs groupements de composants graphiques, natifs à *Grasshopper* ou développés dans le langage de programmation *C#*, associés à chacune des tâches de l'étape de la conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)*. Le développement de composants graphiques dans un langage de programmation *C#* est nécessaire pour traiter le développement de boucles itératives ainsi que pour dépasser les limites des composants graphiques existants.

Dans ce chapitre, nous présenterons le développement de l'outil *TAN(s)* puis procéderons à une mise à l'épreuve de cet outil à travers un cas d'application concret. Ce cas d'application est un prototype d'une structure constituée d'un treillis tridimensionnel dont les nœuds d'assemblage présentent une forte diversité, dans leur nombre de barres et dans leur mode d'assemblage au système.

5.1 Conception des nœuds d'assemblage pour leur fabrication par Stratoconception®

L'étude expérimentale menée nous a permis de proposer des solutions temporaires au traitement de l'ensemble du processus de conception et de fabrication de nœuds d'assemblage en bois réalisés par Stratoconception®. Ces solutions ont fait émerger la possibilité d'introduire des règles pour la conception des nœuds d'assemblage. Ces règles minimisent les interventions du concepteur pour le traitement de tâches non-créatives et lui permettent ainsi de se concentrer sur des tâches à forte valeur ajoutée, particulièrement la modélisation de l'enveloppe extérieure du composant ou l'intégration de fonctionnalités.

Dans cette partie, nous présentons le développement de l'outil *TAN(s)* qui correspond à l'implémentation de l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)* pour le cas d'application des nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels réalisés par Stratoconception®. Le diagramme d'activité de la méthode *TADAM(s)* est adapté et précisé au cas d'application considéré (Figure 57). Nous définissons les champs d'application auxquels peut répondre l'outil *TAN(s)*. Des règles de conception relatives aux différentes tâches de la méthode sont proposées et décrites afin d'automatiser les tâches non-créatives du processus de conception.

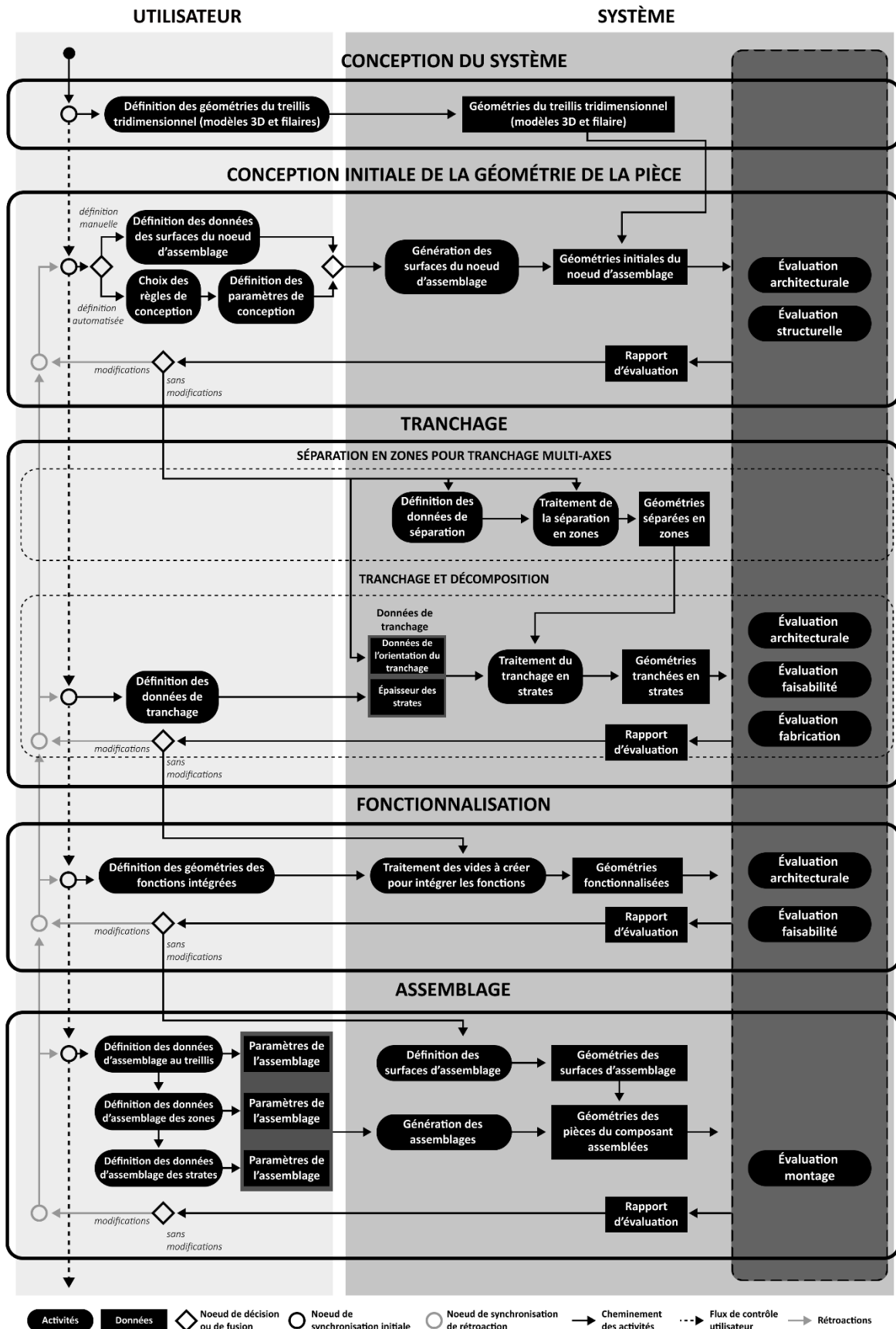


Figure 57. Diagramme d'activité des tâches de la méthode TADAM(s) implémentée dans l'outil TAN(s) pour la conception de nœuds d'assemblages en bois de treillis tridimensionnels

5.1.1 Champs d'application de l'outil TAN(s)

Les treillis tridimensionnels sont des structures réticulées formées par un ensemble de barres assemblées à leurs extrémités, les unes aux autres. Ainsi, pour chaque nœud, un ensemble de barres se rejoignent en un point et constituent les composants environnants. Ces barres sont définies géométriquement par leur enveloppe extérieure, correspondant à un modèle 3D, par leur fibre neutre, correspondant à une courbe, et sont associées à un point de rencontre (Figure 58). L'outil TAN(s) permet la conception de la géométrie de nœuds d'assemblage des barres de treillis tridimensionnels en tenant compte de leur fabrication par Stratoconception®. Les premières données d'entrée de l'outil sont ainsi les données géométriques, précédemment énoncées, des barres liées par le nœud d'assemblage traité.

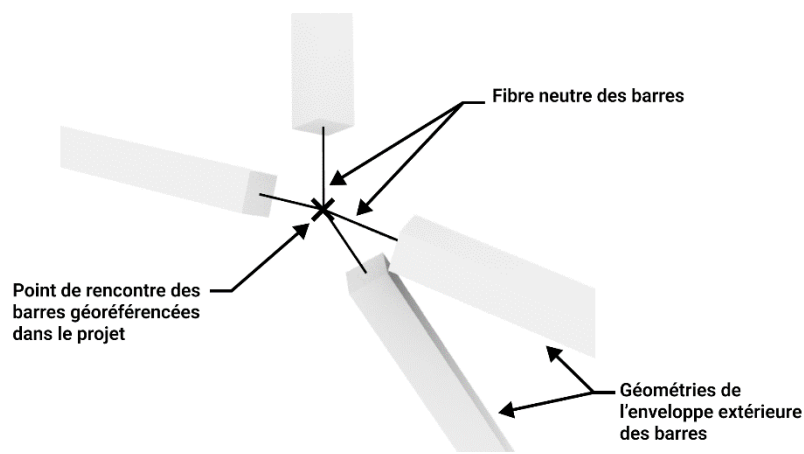


Figure 58. Description géométrique des barres assemblées à un point de rencontre par un nœud d'assemblage

La recherche expérimentale menée nous a permis de catégoriser deux typologies de forme de nœuds d'assemblage : une typologie de nœuds d'assemblage dont les géométries sont orientées par la direction des barres et une typologie de nœuds d'assemblage dont les géométries ne tiennent pas compte de la direction de ces barres (Figure 59). Bien que l'outil TAN(s) puisse s'appliquer à ces deux typologies de forme de nœuds d'assemblage, il est particulièrement adapté aux nœuds d'assemblage dont les géométries sont orientées par la direction des barres, d'autres méthodes étant plus avantageuses pour simplifier le traitement des nœuds d'assemblage dont la forme est assimilable à une sphère déformée.

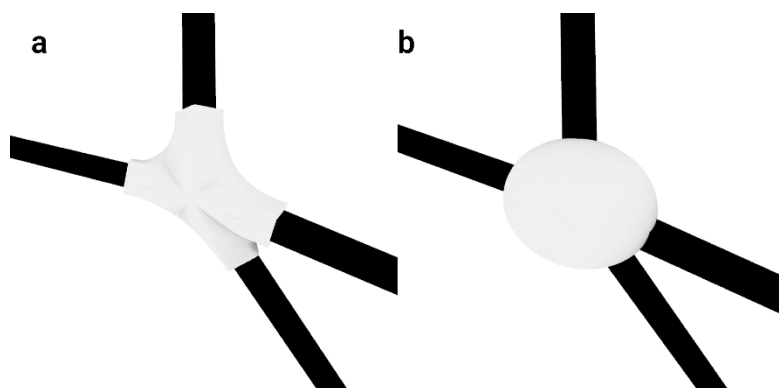


Figure 59. Typologies de forme des nœuds d'assemblage : a. nœud d'assemblage dont les géométries sont orientées dans la direction de la fibre neutre des barres qu'il lie ; b. nœud d'assemblage dont les géométries ne sont pas orientées, et représentent une sphère déformée

L'outil *TAN(s)* autorise le concepteur à intégrer des fonctions à la géométrie du nœud d'assemblage. Ces fonctions agissent sur la définition de la géométrie de l'enveloppe extérieure du nœud d'assemblage, comme une fonction de support de vêture par exemple. Elles sont également des fonctions intégrées à la géométrie interne du nœud d'assemblage, comme les réseaux associés à des luminaires ou à des sprinklers.

L'outil *TAN(s)* comprend les tâches de la méthode *TADAM(s)* de conception initiale de la géométrie de la pièce, de tranchage, de fonctionnalisation et d'assemblage. Il ne traite cependant pas, actuellement, la tâche d'évidement. Dans la suite de cette partie, nous développons chacune des tâches en identifiant les données accessibles au concepteur et en décrivant les règles de conception implémentées dans l'outil, accompagnant ce dernier dans la modification de la géométrie initiale abstraite du nœud d'assemblage vers sa réalité constructive.

5.1.2 Modélisation des géométries initiales du nœud d'assemblage

Nous avons défini la conception initiale de la géométrie de la pièce comme l'opération de modélisation volumique de l'enveloppe extérieure du composant architectural. Une grande liberté est accordée au concepteur à cette tâche de la méthode afin qu'il puisse y exprimer sa créativité, tant sur la forme du nœud d'assemblage que sur les fonctions qu'il pourra intégrer. Nous considérons que le concepteur travaille par « *ajustements successifs d'une forme définie par son enveloppe avant d'arriver à une ou plusieurs solutions acceptables* » (Meyer, 2017; Wetzel, 2009). Bien que les expériences menées nous ont révélé que la connaissance du procédé de fabrication développée par un concepteur lui permet d'orienter une recherche de forme vers des solutions validant des critères de faisabilité, nous admettons également que le concepteur peut développer la recherche d'une forme sans être influencé par le procédé de Stratoconception®. Dans ce second cas, les rapports d'évaluation des tâches relatives à l'application des contraintes du procédé de Stratoconception® guideront le concepteur vers la modification de la géométrie initiale proposée de manière à ce qu'elle assure la faisabilité de la fabrication du nœud d'assemblage traité.

Cette modification par rétroaction est favorisée par le choix d'une définition paramétrique des géométries initiales du nœud d'assemblage. La conception paramétrique permet au concepteur d'agir directement sur les paramètres contrôlant la forme qu'il travaille de manière à satisfaire des critères de faisabilité ou d'optimisation de critères sélectionnés (minimisation des coûts, de la matière consommée, des performances structurelles, etc). La définition d'une géométrie par des paramètres modifiables favorise également l'utilisation de moteurs d'optimisation, tels que les solveurs évolutionnaires *Galapagos* ou *Octopus* de l'environnement *Grasshopper*, qui automatisent la recherche de solutions optimisées pour un ou plusieurs critères établis par le concepteur. Ce dernier pourra alors choisir parmi une série de solutions répondant à ces critères. Ainsi, le concepteur ne maîtrise pas directement la forme qu'il crée mais maîtrise et définit le processus de génération de cette forme.

Deux approches sont proposées au concepteur pour opérer le travail de modélisation paramétrique de la forme du nœud d'assemblage : le concepteur définit une forme libre qu'il modifiera par les retours d'informations produits par les autres tâches de la méthode *TADAM(s)*, particulièrement la tâche du tranchage du nœud d'assemblage ; le concepteur choisit des algorithmes de génération de formes de nœuds d'assemblage préétablis dont il pourra modifier les paramètres.

Quelle que soit l'approche choisie par le concepteur, la forme du nœud d'assemblage tient compte de la forme des barres qu'il lie en créant les vides nécessaires à leur emboîtement.

La modélisation paramétrique du nœud d'assemblage produit un modèle 3D du composant traité ainsi que des entités géométriques ayant participé à la génération de ce modèle, tels que des points, des plans, des courbes ou des surfaces de référence (voir partie 3.2.2).

5.1.3 Séparation en zones et tranchage multiaxes

Nous avons souligné que l'outil *TAN(s)* permet le traitement de la typologie des nœuds d'assemblage dont les géométries sont orientées par la direction des barres qu'ils lient. Cette typologie induit la nécessité de séparer la géométrie initiale des nœuds d'assemblage en zones de manière à permettre une opération de tranchage multiaxes facilitant la fabrication par Stratoconception® du composant architectural.

5.1.3.1 Séparation en zones

Nous identifions deux méthodes pour la séparation en zones des nœuds d'assemblage par des plans de tranchage. Nous développons le composant « *Decompose_node* » pour séparer automatiquement les nœuds d'assemblage en zones selon les deux méthodes identifiées. Les données d'entrée varient selon la méthode utilisée : pour la seconde méthode, seul le modèle 3D du nœud d'assemblage traité est nécessaire ; ainsi, les courbes de référence ayant participé à la modélisation du nœud d'assemblage ne sont pas requises. Nous décrivons ces deux méthodes. Les données géométriques des barres assemblées comprennent les courbes décrivant la fibre de neutre des barres, les géométries de l'enveloppe extérieure des barres et le point de rencontre des barres.

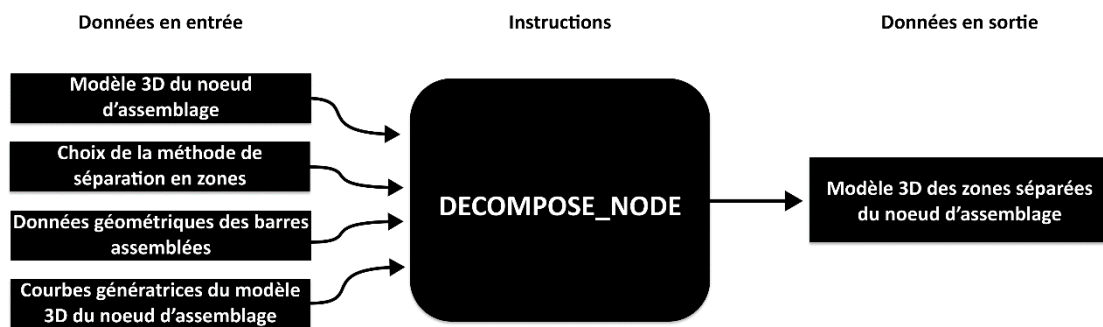


Figure 60. Composant « *Decompose_node* » permettant la séparation automatique du nœud d'assemblage traité en zones pour un tranchage multiaxes

Une première méthode est celle que nous avons développée lors de notre recherche expérimentale (voir partie 3.2.3). La modélisation paramétrique du nœud d'assemblage est générée par le concepteur en se basant sur la création de courbes planes de référence dont dépend la génération du modèle 3D du composant. Ces courbes peuvent être les supports de la création de plans de séparation en zones (voir Figure 46, p.86). Les données nécessaires à cette méthode de séparation sont importées de la tâche de conception de la géométrie initiale du composant et sont constituées du modèle 3D du nœud d'assemblage et des courbes planes de référence, définissant ce modèle, utiles à l'opération.

Une seconde méthode admet que le concepteur a généré le modèle 3D du nœud d'assemblage traité sans se baser sur des courbes de référence. Nous ne disposons donc que de cette donnée géométrique pour établir des règles de conception de la séparation en zones. Cette méthode se base alors sur l'analyse des fibres neutres des barres qui sont des données géométriques communes, et donc accessibles, à toutes les conceptions possibles de nœuds d'assemblage.

De manière à isoler chaque zone du nœud d'assemblage axée dans la direction de la barre qu'elle reçoit, nous introduisons la notion de plans bissecteurs. Les plans bissecteurs de deux plans α et β sécants sont définis comme les plans dont l'ensemble des points M sont équidistants aux deux plans. Ainsi, les plans sécants (α): $a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$ et (β): $a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$ ont pour plans bissecteurs les deux plans d'équation :

$$\frac{a_1x + b_1y + c_1z + d_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}} = \pm \frac{a_2x + b_2y + c_2z + d_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}$$

Pour chaque barre associée à un nœud d'assemblage, nous définissons ainsi trois plans caractéristiques (Figure 61) :

- Un plan, α , défini par la barre associée à l'embranchement du nœud à séparer ;
- Deux plans, β_1 et β_2 , définis par les barres voisines à la barre associée à l'embranchement.

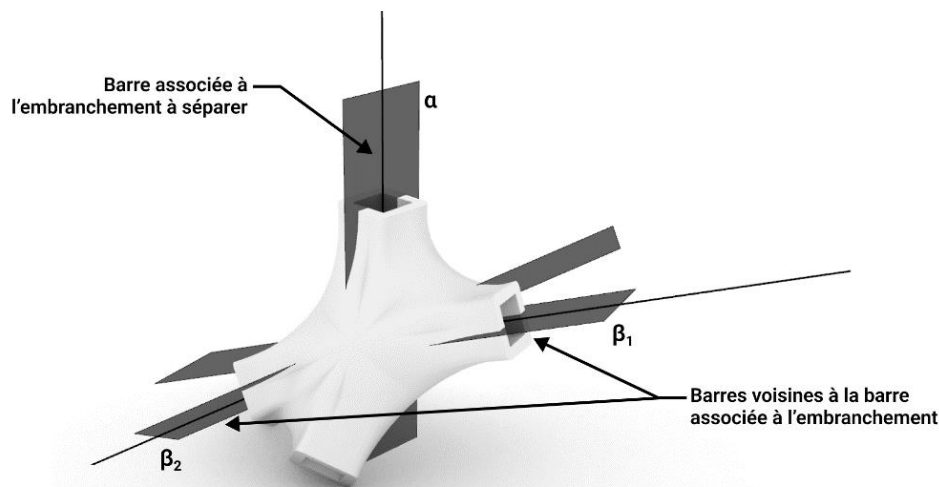


Figure 61. Définition des plans caractéristiques de la séparation d'un embranchement d'un nœud d'assemblage. Les plans α , β_1 et β_2 sont sécants au point d'intersection des fibres neutres des barres

Nous déterminons les plans bissecteurs des plans α et β_1 et des plans α et β_2 puis identifions les plans bissecteurs nécessaires à la séparation de la zone considérée (Figure 62). De cette manière, nous séparons le nœud d'assemblage traité en un ensemble d'embranchements en ajoutant un « jeu » nécessaire à l'assemblage des zones entre-elles. Le composant « *Decompose_node* » permet ainsi une automatisation de l'étape de séparation en zones du procédé de Stratoconception® pour une typologie spécifique de composants en établissant des règles de conception ne nécessitant pas d'interventions du concepteur en dehors du choix de la méthode à utiliser.

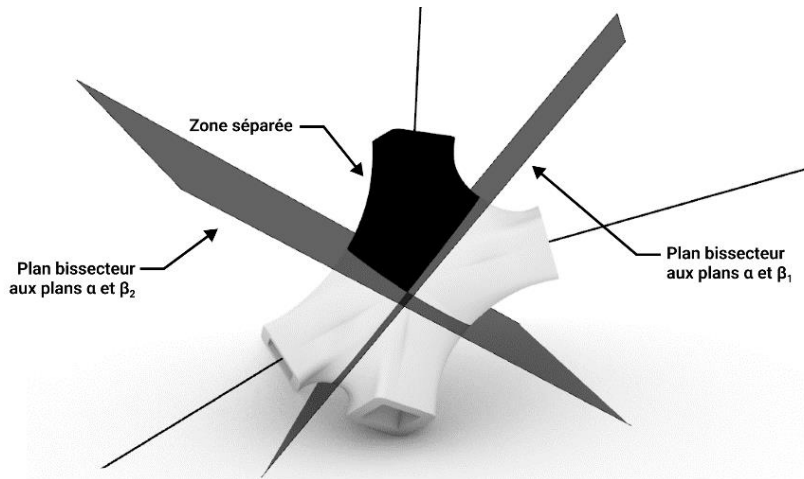


Figure 62. Séparation d'une zone du nœud d'assemblage en utilisant les plans bissecteurs des plans α et β_1 , et des plans α et β_2

5.1.3.2 Tranchage et évaluation de la faisabilité

L'opération de tranchage se limite, pour le concepteur, au choix des directions de tranchage des zones du nœud d'assemblage traité ainsi qu'au choix des dimensions des panneaux utilisés (largeur, longueur et épaisseur).

Trois directions sont possibles pour réaliser le tranchage d'une zone séparée. Elles correspondent aux axes définissant le repère local de la barre associée à la zone considérée. Ces trois directions assurent l'accessibilité de l'outil aux surfaces de contact du nœud d'assemblage et des barres qu'il lie, dont la faisabilité serait rendue difficile, voire impossible, avec d'autres directions de tranchage. Une fois que l'opération de tranchage est traitée, une analyse des surfaces permet de valider, ou non, la faisabilité de la fabrication des strates.

L'analyse des surfaces consiste à définir les zones des surfaces de la zone séparée qui sont en dépouille et en contre-dépouille. Les surfaces *NURBS* constituant la géométrie considérée sont divisées en une grille de points pour lesquels les normales à la surface sont calculées. Une nouvelle liste de points est générée à partir des coordonnées paramétriques (u,v) des points de la grille générée telle que :

$$f(u, v) = \vec{n} \cdot \vec{s}$$

Le vecteur \vec{n} est le vecteur normal à la surface au point de coordonnée (u,v) et \vec{s} est le vecteur définissant l'axe de tranchage. La surface d'analyse des normales est générée par interpolation des points créés. L'intersection de la surface d'analyse avec la plan xy permet la définition des zones en dépouilles ou en contre dépouilles (Figure 63) :

- Les zones de la surface d'analyse des normales qui se situent au-dessus du plan xy correspondent aux zones en dépouilles, le résultat du produit scalaire $\vec{n} \cdot \vec{s}$ étant positif ;
- Les zones de la surface d'analyse des normales qui se situent en dessous du plan xy correspondent aux zones en contre-dépouilles, le résultat du produit scalaire $\vec{n} \cdot \vec{s}$ étant négatifs.

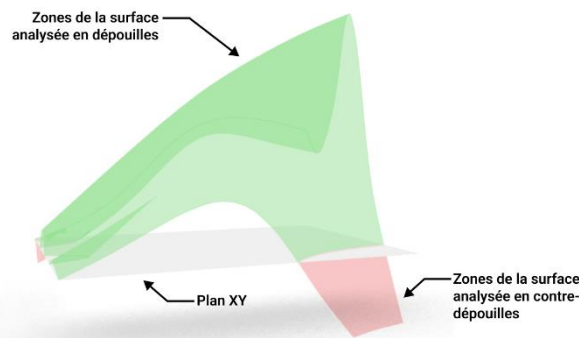


Figure 63. Exemple de représentation d'une surface d'analyse des normales, générant les zones des surfaces analysées en dépouilles ou en contre-dépouilles

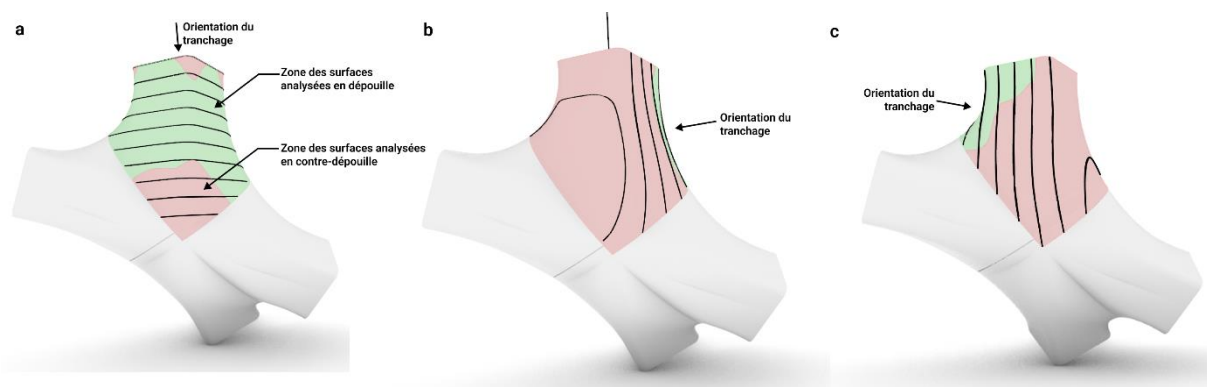


Figure 64. Résultats de l'évaluation de la faisabilité de la fabrication des strates : visualisation des zones en dépouilles et en contre-dépouilles selon les trois directions de tranchage possibles (a, b et c)

Les résultats de cette analyse sont une prévisualisation des dépouilles et des contre-dépouilles de la zone séparée (Figure 64) ainsi que les résultats du produit scalaire $\vec{n} \cdot \vec{s}$. Sur la hauteur des strates, seule une zone en dépouille et une zone en contre-dépouille peuvent exister pour assurer la faisabilité de la fabrication de la strate. Dans le cas où cette condition ne serait pas respectée, les strates sont définies comme non-valides et le concepteur doit intervenir pour satisfaire ce critère de faisabilité. Suite à un résultat d'évaluation défavorable, plusieurs actions sont alors possibles pour le concepteur :

- Le concepteur agit sur la définition des plans de tranchage en définissant des plans spécifiques favorisant l'accessibilité de l'outil à l'entièreté des surfaces à traiter ;
- Le concepteur agit sur la géométrie initiale de la pièce en modifiant les paramètres de sa modélisation de manière à satisfaire les critères de faisabilité.

Bien que les analyses des zones inaccessibles, des zones en dépouilles et des zones en contre-dépouilles existent dans les outils actuels du logiciel *Stratoconcept*[®] et de l'add-in *TopSolid'Strato*, nous intégrons cette analyse dans le logiciel de modélisation paramétrique pour favoriser un lien direct entre la géométrie d'un composant architectural et l'évaluation de la faisabilité de sa fabrication. L'établissement de ce lien direct permet ainsi une modification, manuelle ou automatisée, par rétroaction, des paramètres de la modélisation de la géométrie initiale du composant architectural traité. Les modifications de ces paramètres mettent à jour automatiquement l'évaluation de la faisabilité de la fabrication et accélèrent ainsi les temps de conception. Le lien direct établi supprime

ainsi les temps d'exports, d'imports et de définition des paramètres requis par l'utilisation du logiciel *Stratoconcept*[®] et de l'add-in *TopSolid'Strato*, à l'étape de conception de la géométrie du composant architectural.

L'accès aux résultats du produit scalaire $\vec{n} \cdot \vec{s}$ favorise en effet l'utilisation de moteurs d'optimisation, tels que des solveurs évolutionnaires, qui peuvent accompagner le concepteur dans une recherche de minimisation des zones en contre-dépouilles de la géométrie initiale du nœud d'assemblage afin de limiter les opérations de retournement des panneaux requises pour des modes d'usinage recto-verso.

5.1.3.3 Évaluations complémentaires

L'évaluation de la faisabilité de la fabrication permet l'identification, par le concepteur, de plusieurs solutions de tranchage du nœud d'assemblage validant les critères de fabrication du procédé de *Stratoconception*[®]. Le concepteur est accompagné dans le choix d'une solution de tranchage parmi l'ensemble des solutions possibles par l'évaluation de plusieurs critères complémentaires. La comparaison des résultats de l'évaluation de ces critères complémentaires, de nature différente, favorisera le choix d'une solution de tranchage répondant aux exigences du concepteur. Nous mettons en place deux moteurs d'évaluation des solutions de tranchage : un moteur d'évaluation architecturale et un moteur d'évaluation des données de la fabrication.

L'évaluation architecturale est intégrée à l'outil *TAN(s)* de manière à appréhender l'expression visuelle de la strate sur le composant architectural à réaliser. Nous avons en effet souligné la nécessité de tenir compte de l'expressivité architecturale de la strate lorsque cette dernière est visible (voir partie 1.1.1.2). L'évaluation architecturale s'opère par visualisation du modèle numérique du nœud d'assemblage séparé en zones et tranché (Figure 65).

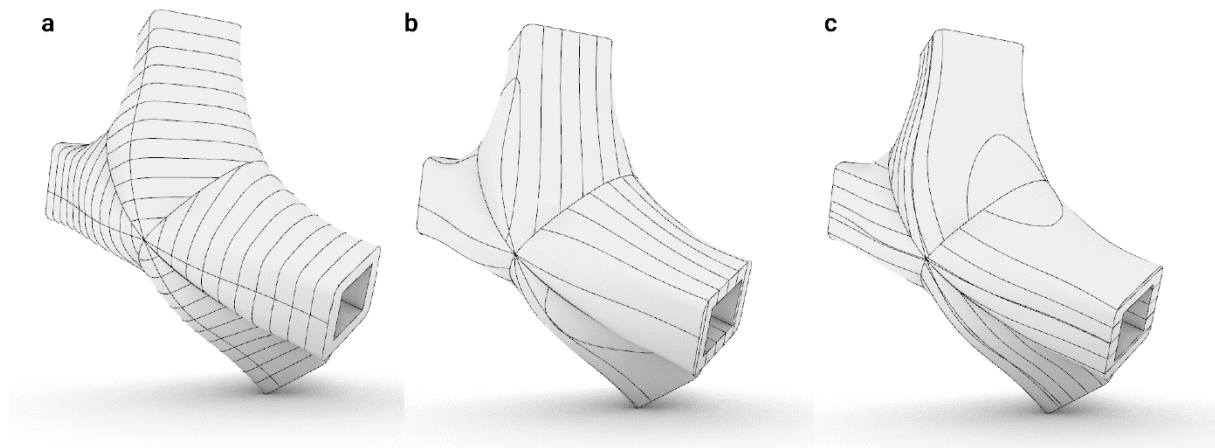


Figure 65. Évaluation architecturale de la séparation en zones et du tranchage d'un nœud d'assemblage pour les trois directions de tranchage possibles

L'évaluation des données de la fabrication est réalisée en utilisant le composant « *Eval_fab* », que nous présenterons dans la partie 6.2.1. Ce composant permet le calcul des données associées à la consommation de matière, aux temps de fabrication et aux temps de montage et de finition, à partir de la modélisation 3D des géométries des pièces à fabriquer. Par ces évaluations, les données de tranchage peuvent être modifiées par le concepteur de manière à répondre à ses intentions

architecturales, par la valeur architecturale de la strate exprimée, tout en favorisant une rationalisation de la fabrication. Si l'orientation du tranchage est définie par le concepteur de manière à répondre à des critères visuels, la rationalisation de la fabrication se limite à l'optimisation de l'épaisseur des panneaux utilisés. L'épaisseur des panneaux agit sur le nombre de strates à assembler, qui diminuent lorsque l'épaisseur des strates augmente, ainsi que sur les temps d'usinage, les volumes à usiner augmentant lorsque l'épaisseur des strates augmente également. Ainsi, l'évolution de ces données est opposée lorsque l'épaisseur des panneaux évolue et une objectivation de la rationalisation de la fabrication par le concepteur est requise de manière à déterminer l'épaisseur de panneaux à choisir.

5.1.4 Fonctionnalisation

5.1.4.1 Intégration de pièces fonctionnelles

La fonctionnalisation des nœuds d'assemblage comprend l'intégration de pièces fonctionnelles, agissant sur la définition de la géométrie de l'enveloppe extérieure du nœud d'assemblage, ainsi que l'intégration de réseaux associés à certaines de ces fonctions. Nous avons précédemment souligné que l'opération de fonctionnalisation se rapporte à la modélisation des pièces techniques et à l'enlèvement de la matière associée à leur intégration comprenant un volume de « *jeu* » d'assemblage. Cette opération requiert ainsi une intervention manuelle du concepteur sur la géométrie initiale du nœud d'assemblage. Cette opération est spécifique à chaque cas traité, dépendant à la fois de la géométrie initiale du nœud d'assemblage traité, de la pièce à intégrer et de son positionnement, et ne favorise ainsi pas son automatisation.

Le positionnement et l'orientation des pièces techniques intégrées doivent être évalués de manière à assurer la faisabilité de la fabrication des vides qui leur sont associés. Le concepteur s'appuie alors sur l'algorithme présenté dans la partie 5.1.3.2 pour valider ses choix. Le positionnement des fonctions s'adapte alors aux stratégies de tranchage définies par le concepteur.

5.1.4.2 Automatisation de la génération de réseaux intégrés

Nous assumons que le concepteur définit manuellement l'emplacement des pièces techniques ajoutant une fonction au nœud d'assemblage ainsi que les volumes à évier pour assurer leur intégration. Une tâche chronophage relative à l'intégration de fonctions est l'implantation des réseaux dans la géométrie interne du composant. Dans le but d'automatiser cette tâche non-créative, nous développons le composant « *Automated_network* » qui permet l'automatisation de la création du tracé de réseaux, définis par leurs points de départ et d'arrivée, au sein de la géométrie interne du nœud d'assemblage traité en se basant sur la théorie des graphes.

Pour se faire, nous définissons des règles de conception des réseaux dans la géométrie interne d'un nœud d'assemblage réalisé par Stratoconception® :

- La connexion des réseaux entre les barres et les nœuds d'assemblage s'effectue au niveau de leur emboîtement. Le point de départ du réseau dans le nœud d'assemblage correspond au centre d'inertie de la surface de contact entre le nœud d'assemblage et la section de la poutre emboîtée à laquelle le réseau est connecté.
- Le tracé du réseau traité respecte les critères de faisabilité de la fabrication des strates. Le tracé s'opère donc soit dans l'orientation du tranchage de la zone dans laquelle il se situe, soit

dans les plans de tranchage de cette même zone. Afin d'atteindre le point d'arrivée, un tracé sur le profil de la strate associée à ce point doit être réalisé. Pour cela, nous appliquons le plan α de la zone associée au point d'arrivée. Ce plan a été précédemment introduit dans la partie 5.1.3. L'intersection du plan α , appliqué au point d'arrivée, avec la géométrie de la zone séparée du nœud d'assemblage génère les tracés de s réseaux possibles sur le profil de la zone.

Ces différentes règles de tracé permettent la génération d'un graphe représentant le réseau des tracés possibles pour relier deux points. Ce graphe se compose de sommets, comprenant les points de départ et d'arrivée du réseau, et d'arêtes, représentant les tracés possibles du réseau dans le nœud d'assemblage. En nous appuyant sur la théorie des graphes, nous utilisons l'algorithme de Dijkstra pour calculer le chemin le plus court reliant deux points du graphe traité (Figure 66).

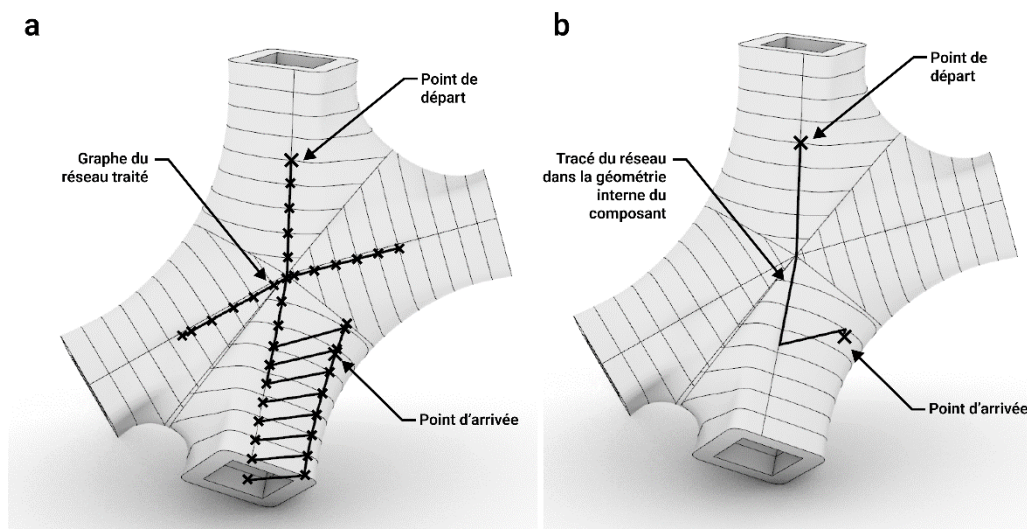


Figure 66. Automatisation du tracé d'un réseau entre un point de départ et un point d'arrivée. Un graphe des chemins possibles est généré (a) puis le chemin le plus court reliant le point de départ et le point d'arrivée est calculé par l'algorithme de Dijkstra (b)

Cette méthode proposée permet l'automatisation de la génération des tracés des réseaux dans un nœud d'assemblage réalisé par Stratoconception®. Ce tracé se limite à une représentation filaire et ne considère pas, actuellement, les contraintes techniques spécifiques des différents réseaux pouvant être intégrés dans des composants architecturaux (réseaux électriques, fluides, de ventilation, etc). Ainsi, par exemple, la présence d'angle droit n'est pas à privilégier et devra être adaptée lors de l'opération de matérialisation des réseaux. Des travaux restent à mener pour appréhender l'interprétation constructive de l'intégration de ces réseaux dans des composants architecturaux réalisés par Stratoconception® ; les contraintes techniques et les protocoles de mise en œuvre sont à étudier (précâblage, etc.) pour faire émerger de nouvelles problématiques que nous pourrions traiter afin d'améliorer le composant « *Automated_network* » et le rendre pleinement fonctionnel.

5.1.5 Assemblage

L'opération d'assemblage comprend l'assemblage du composant au système, l'assemblage des zones entre-elles et l'assemblage des strates entre-elles. Nous considérons les nœuds d'assemblage comme

des composants architecturaux de petites dimensions. Ainsi, nous privilégions un assemblage par collage des éléments impliquant une transmission indirecte des efforts. Les strates et les zones du composant architectural sont positionnées à l'aide de pièces complémentaires en bois tels que des tourillons ou des clés d'assemblage puis collées. Nous admettons que d'autres solutions d'assemblage sont envisageables et pourront compléter cette première proposition que nous considérons comme une solution temporaire dans la recherche de plusieurs solutions finales. De manière à respecter les critères de faisabilité de la fabrication, les géométries des assemblages réalisés considèrent notamment la géométrie des outils utilisés. L'évaluation des cinématiques de montage est intégrée à l'outil *TAN(s)* de manière à appréhender les conflits pouvant intervenir à cette étape.

5.1.5.1 Assemblage au système

L'assemblage au système traite la liaison des barres par le nœud d'assemblage considéré. La recherche expérimentale menée nous a permis d'étudier la cinématique de montage d'un treillis tridimensionnel composé de nœuds d'assemblage réalisés par Stratoconception®. Cette étude a fait émerger deux catégories de nœuds d'assemblage, se différenciant par leur traitement de leur liaison aux barres :

- Le nœud d'assemblage est constitué d'une seule pièce. Les barres sont positionnées dans les emplacements créés dans la géométrie initiale du nœud d'assemblage, ce qui définit leur orientation dans l'espace.
- Le nœud d'assemblage est constitué de deux pièces s'assemblant par boulonnage avec les barres qu'elles lient. Ces nœuds d'assemblage permettent l'assemblage de plusieurs barres dont l'orientation est définie par des nœuds d'assemblage réalisés en une seule pièce. La géométrie du nœud d'assemblage est alors séparée en deux pièces par une surface de découpe générée à partir des fibres neutres des barres (Figure 67).

Ainsi, une structure réticulée constituée de nœuds d'assemblage en bois réalisés par Stratoconception® se compose par une combinaison de ces deux catégories de nœuds d'assemblage. Le choix du nœud d'assemblage est à réaliser par le concepteur qui s'appuie sur une analyse de la cinématique de montage de la structure qu'il conçoit.

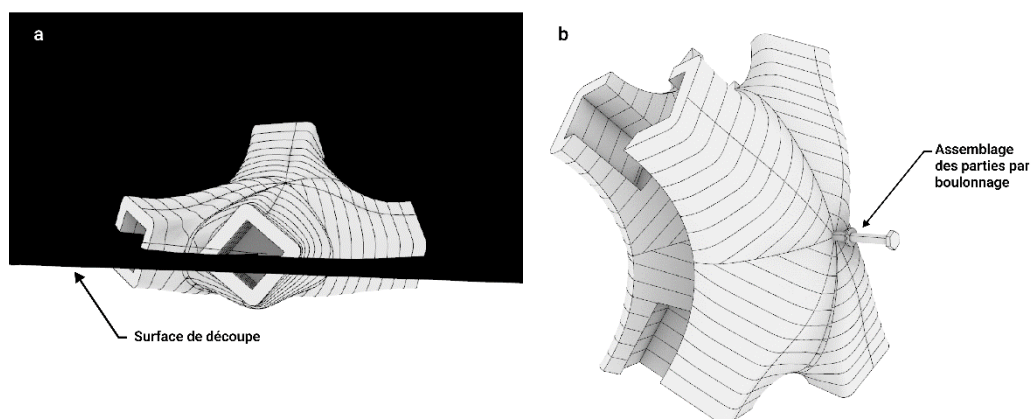


Figure 67. Séparation du nœud d'assemblage en deux pièces (a) ; les deux pièces s'assemblent par boulonnage aux barres en exerçant une pression sur ces dernières (b)

L'assemblage au système comprend également le traitement des surfaces de contact entre les barres et le nœud d'assemblage. Un « jeu » a été intégré lors de la création de la géométrie initiale du nœud

d'assemblage de manière à éliminer les contraintes dues aux variations dimensionnelles du matériau bois liées aux variations d'humidité dans le composant.

Les surfaces de contact peuvent être modifiées en intégrant un matériau rugueux ou en travaillant la géométrie de la surface pour augmenter les efforts de friction, améliorant ainsi la transmission des efforts et des moments entre les barres et le nœud d'assemblage en apportant des ancrages mécaniques supplémentaires. Cette opération n'est, à ce jour, pas intégrée dans l'outil *TAN(s)* car elle nécessite des travaux de recherche complémentaires afin d'étudier l'influence du traitement de la surface de contact sur le comportement mécanique du nœud d'assemblage. Ces travaux complémentaires permettront d'identifier des solutions qui seront implémentées dans l'outil.

5.1.5.2 Assemblage des zones et des strates

L'opération d'assemblage des zones du nœud d'assemblage se base sur le choix, par le concepteur, de solutions préétablies. Le concepteur peut également proposer un algorithme qu'il implémentera pour générer de nouvelles solutions.

La solution préétablie proposée dans l'outil *TAN(s)* se base sur l'une des solutions proposées lors de la recherche expérimentale précédemment menée (voir partie 3.2.4.2). Les zones sont positionnées à l'aide d'une pièce complémentaire puis sont assemblées par collage. La pièce complémentaire est une clé d'assemblage dont les géométries tiennent compte des zones inaccessibles des contours d'usinage, définis dans la partie 2.1.2.1. La géométrie de la clé est générée à partir de l'axe des barres liées au nœud d'assemblage traité. Le profil de la clé est généré puis extrudé en s'adaptant à la géométrie extérieure du nœud d'assemblage (Figure 68). Le concepteur peut modifier les dimensions de la clé. L'ablocage de la clé d'assemblage avec les zones s'opère par l'insertion de tourillons. Cette opération est effectuée manuellement par l'opérateur assemblant les strates et les zones constituant le nœud d'assemblage et ne sont pas traitées dans l'outil *TAN(s)*. La solution préétablie s'adapte particulièrement à l'utilisation d'une presse pour collage sous vide, facilitant la réalisation par Stratoconception® de composants architecturaux de petites dimensions.

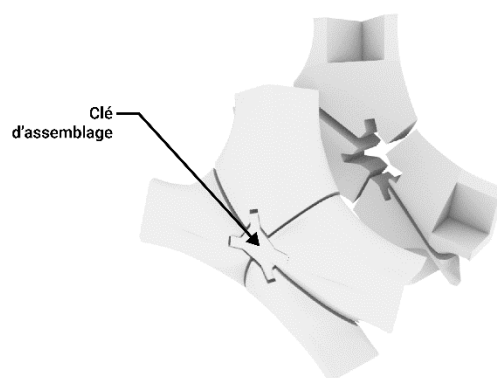


Figure 68. Génération des géométries de la clé d'assemblage des zones du nœud d'assemblage constitué de deux pièces s'assemblant par boulonnage avec les barres qu'elles lient

D'autres solutions d'assemblage des zones pourront être implémentées de manière à améliorer cette solution que nous considérons comme temporaire. En effet, des travaux complémentaires nous permettront d'améliorer le comportement mécanique de l'assemblage et d'optimiser les temps et les coûts de production.

La dernière opération d'assemblage traite l'assemblage des strates entre-elles pour chaque zone du nœud d'assemblage. L'outil *TAN(s)* se limite actuellement à un assemblage des strates par collage. Delebecque propose une méthode de localisation automatique d'entités par squelettisation qui pourra être intégrée à l'outil de manière à automatiser le placement des tourillons positionnant les strates pour leur assemblage par collage (Delebecque, 2007).

5.1.5.3 Évaluation des cinématiques de montage

Nous avons souligné la nécessité pour le concepteur d'évaluer les cinématiques de montage du nœud d'assemblage ainsi que de la structure constituées par ces composants architecturaux. Cette opération permet une analyse de la conformité des solutions assurant la faisabilité de la construction du composant architectural, et de sa structure associée.

L'outil *TAN(s)* ne traite pas la cinématique de montage de la structure conçue, étant spécifique à chaque projet. Cette évaluation demande une intervention manuelle du concepteur pour étudier la cinématique de montage du treillis tridimensionnel et identifier ainsi les catégories de nœud d'assemblage à mettre en œuvre en fonction de leur positionnement dans la structure (voir partie 5.1.5.1). L'outil *TAN(s)* intègre cependant une simulation du montage des nœuds d'assemblage. Cette simulation permet notamment de valider la conception de l'assemblage des zones entre-elles. Cette évaluation s'opère donc par visualisation du phasage des opérations d'assemblage des strates, puis des zones du nœud d'assemblage. Cette visualisation favorise la prévention des conflits pouvant intervenir entre plusieurs pièces à assembler.

5.2 Mise à l'épreuve de l'outil TAN(s)

Pour valider notre travail relatif à l'implémentation de la méthode *TADAM(s)* dans l'outil *TAN(s)* pour la conception de nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels, nous menons une expérimentation à travers un cas concret. Cette expérimentation a pour objectif d'évaluer la flexibilité de l'outil développé, permise par les automatisations du processus mises en place, pour traiter rapidement la conception de la géométrie d'un ensemble des nœuds d'assemblage d'un projet, tous différents mais correspondant à une même typologie. L'expérimentation se concentre donc sur la modélisation des géométries finales de nœuds d'assemblage ainsi que sur l'évaluation des données de la fabrication et des cinématiques de montage.

Pour réaliser cette expérimentation, nous nous appuyons sur la conception d'un prototype constitué d'un treillis tridimensionnel dont les barres sont assemblées par des nœuds d'assemblage en bois réalisés par Stratoconception® (Figure 69). Cette structure est délibérément rendue complexe avec pour objectif le développement, par cette expérimentation, de la conception de la géométrie de nœuds d'assemblage dont le nombre et l'orientation des barres qu'ils lient varient fortement. Ainsi, la structure se constitue de nœuds liant entre trois et huit barres. La géométrie initiale des nœuds d'assemblage est générée à partir d'un algorithme préétabli dont le concepteur a modifié les paramètres d'entrée.

Dans cette partie, nous explicitons les règles de conception choisies pour la conception des géométries des nœuds d'assemblage constituant ce prototype et soulignons la capacité de l'outil *TAN(s)* à favoriser une personnalisation de masse de la conception et de la production de composants non-standards, réalisés par le procédé de Stratoconception®. La production de ce prototype est partiellement réalisée et se poursuit actuellement.



Figure 69. Image de synthèse du projet de prototype d'étude conçu par Anwar Nehlawi, architecte

5.2.1 Processus de conception de la géométrie des nœuds d'assemblage

La conception initiale des nœuds d'assemblage en bois de la structure réticulée a été traitée par le concepteur en utilisant l'algorithme « *YANG : Yet Another Node Generator* », développé et partagé par Laurent Delrieu⁶. Cet algorithme permet la génération de l'enveloppe extérieure de nœuds d'assemblage à partir de courbes de référence qu'il définit. Ces courbes de référence comprennent notamment des courbes considérées comme les coutures des surfaces définissant les embranchements du nœud d'assemblage traité. Nous avons ainsi privilégié l'utilisation de ces courbes de référence pour définir les plans de séparation en zones des nœuds d'assemblage étant, par leur définition, adaptées à cette opération (Figure 70). Le tranchage des zones en strates s'opère selon la direction des fibres neutres des barres liées au nœud d'assemblage, de manière à respecter une expression architecturale choisie. L'opération d'assemblage par la suite traitée en séparant les nœuds d'assemblage en deux pièces (voir partie 5.2.2) lorsque cela est nécessaire et en générant automatiquement la géométrie de la clé d'assemblage, positionnant les zones entre-elles, pour chaque nœud.

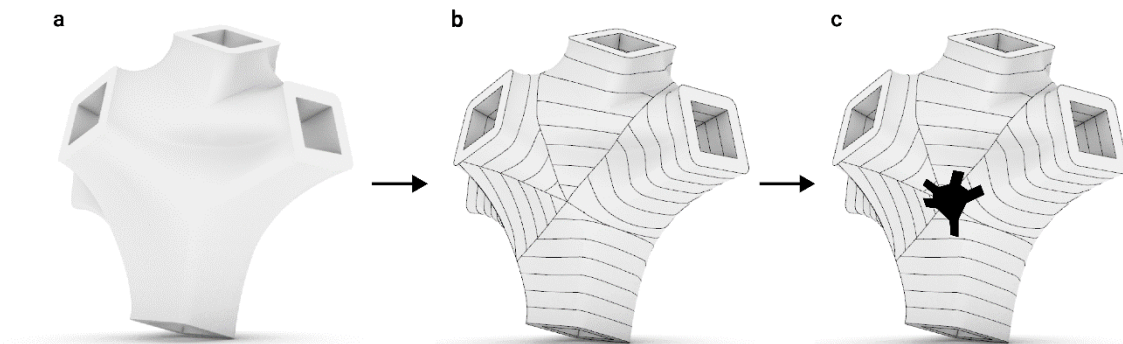


Figure 70. Exemple de traitement d'un nœud d'assemblage du prototype : a. Génération des géométries initiales de l'enveloppe extérieure du composant ; b. Séparation en zones et tranchage multiaxes ; c. Assemblage des zones par un positionnement par une clé d'assemblage

Les règles de conception implémentées dans l'outil *TAN(s)* pour le traitement des opérations de séparation en zones, de tranchage et d'assemblage ont permis une automatisation complète de la génération des géométries finales des nœuds d'assemblage. Pour développer la conception d'un nœud d'assemblage, le concepteur doit :

- Définir de la géométrie de l'enveloppe extérieure des nœuds d'assemblage ;
- Choisir de l'orientation du tranchage ;
- Choisir de l'épaisseur de panneaux à utiliser pour la fabrication des nœuds d'assemblage ;
- Identifier les nœuds d'assemblage qui doivent être séparés en deux parties pour satisfaire les critères de montage du treillis tridimensionnel et permettre leur assemblage au système (voir partie 5.1.5.1).

Nous discutons l'évaluation de l'outil *TAN(s)*, reposant sur le processus de conception de la géométrie des nœuds d'assemblage décrit, dans la partie 5.2.3.

⁶ Algorithme disponible à l'adresse suivante : <https://urlz.fr/o84x>

5.2.2 Évaluation du montage

Le processus de conception des nœuds d'assemblage de la structure réticulée du prototype implique l'identification des nœuds d'assemblage qui doivent être séparés en deux parties pour satisfaire les critères de montage du treillis tridimensionnel et permettre leur assemblage au système (voir partie 5.1.5.1). Pour ce faire, une évaluation de la cinématique de montage de la structure est réalisée par le concepteur (Figure 71). Comme nous l'avons précédemment précisé, cette évaluation n'est pas intégrée à l'outil *TAN(s)*, car étant trop spécifique au projet traité. Elle est cependant essentielle pour catégoriser les nœuds composant la structure et accompagner le concepteur dans le développement du projet.

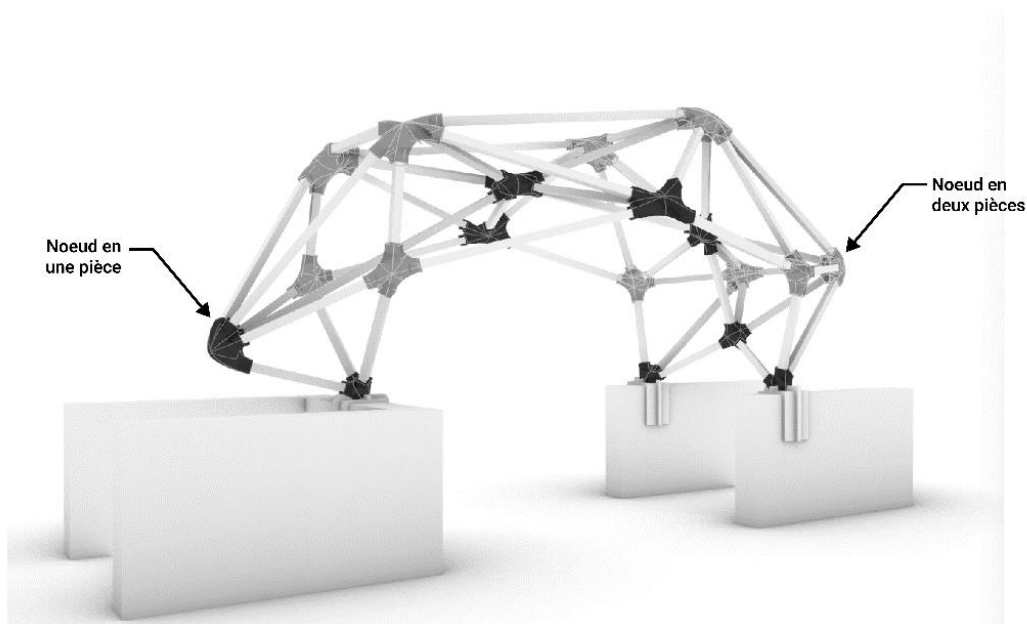


Figure 71. Identification des nœuds à réaliser en une ou en deux pièces par l'analyse de la cinématique de montage de la structure réticulée du prototype

Enfin, l'outil *TAN(s)* a permis au concepteur de simuler le montage de chaque nœud d'assemblage dans le but d'identifier les risques de collision associés à cette opération. La faisabilité de la production des composants architecturaux est ainsi validée.

5.2.3 Synthèse de la mise à l'épreuve de l'outil *TAN(s)*

L'automatisation des tâches et la dépendance aux géométries initiales du modèle 3D favorisent le traitement de composants architecturaux d'une même typologie, personnalisés en masse. L'utilisation de l'outil *TAN(s)* a ainsi montré que l'augmentation de la complexité géométrique d'un nœud d'assemblage ne demande pas de traitements supplémentaires en comparaison à un nœud d'assemblage aux géométries plus simples. Dans cette expérimentation, nous avons pu développer, de manière identique, la conception de dix-huit nœuds d'assemblage dont le nombre et l'orientation des barres étaient à chaque fois différents sans nécessité d'interventions manuelles du concepteur pour traiter des singularités. De même, le lien de dépendance entre toutes les étapes de la méthode *TADAM(s)* implémentée permet une mise à jour de l'ensemble des données générées lors d'une modification des paramètres accessibles au concepteur. Le concepteur a ainsi pu se concentrer

principalement sur la recherche de solutions répondant à ses exigences formelles et répondant aux critères de faisabilité associés au procédé de Stratoconception[®], par la génération d'un nombre important de variantes. Par cette expérimentation, nous soulignons ainsi la flexibilité apportée par la méthode *TADAM(s)*, et par son implémentation dans l'outil *TAN(s)*, au processus de conception de composants architecturaux pour leur fabrication par Stratoconception[®].

L'outil *TAN(s)* se limite cependant à la conception de composants architecturaux de petites dimensions, par l'absence de développement d'outils d'aide à la décomposition des strates qui est une opération requise et à fort impact sur la pertinence de la conception dans le cadre de composants architecturaux de grandes dimensions. Des travaux complémentaires sont alors nécessaires pour traiter cette opération que nous avons identifiée comme essentielle pour la rationalisation de la conception de composants de grandes dimensions. Le chapitre 6 se concentrera ainsi sur le développement de l'outil *TiWa(s)*, permettant l'évaluation de différentes stratégies de tranchage, intégrant l'étape de décomposition des strates, dès la phase amont du projet où seule la forme de l'enveloppe extérieure de la paroi est définie

Chapitre 6. Aide à la conception du tranchage des parois en phase amont du projet

La recherche expérimentale menée a souligné que la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par Stratoconception® implique le traitement des trois opérations définissant les stratégies de tranchage du procédé qui sont la séparation du modèle en zones, le tranchage des zones en strates et la décomposition des strates en parties. La combinaison de ces opérations pour l'établissement de stratégies de tranchage ne permet pas, par la seule intuition du concepteur, d'approcher une solution rationalisée selon des critères économiques, environnementaux, de temps de fabrication ou de consommation de matière. Nous avons identifié un manque d'outils d'analyse pouvant informer le concepteur dès la phase amont du projet sur les implications de la variation des paramètres impactant ces stratégies de tranchage. Nous avons ainsi souligné un manque de moyens de quantification des données du projet pouvant accompagner le concepteur dans ses choix en l'informant sur leurs implications et pouvant favoriser une rationalisation de la conception du tranchage, particulièrement au regard de critères économiques et environnementaux dépendant de données telles que les temps d'usinage, les temps d'assemblage et la consommation de matière qu'il est ainsi nécessaire de quantifier et maîtriser. De plus, nous avons montré l'intérêt de développer des règles de conception des différentes tâches de l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)* en se basant sur les règles de conception initiale de l'enveloppe extérieure de la typologie de composants architecturaux traitée de manière à automatiser les tâches non-créatives du processus de conception et favoriser l'étude de nombreuses variantes.

Pour la réalisation de parois par Stratoconception®, nous proposons le développement d'un outil d'aide à la conception, nommé *TiWa(s)*, permettant l'évaluation économique de différentes stratégies de tranchage dès la phase amont du projet où seule la forme de l'enveloppe extérieure de la paroi est définie (Figure 72). Cet outil permet la comparaison de différentes approches constructives reposant sur l'utilisation des matériaux identifiés comme favorables à l'utilisation du procédé de Stratoconception® dans les pratiques de la construction en bois (voir partie 1.2.2), en intégrant notamment une fabrication des strates par des poutres en bois lamellé-collé (Figure 73). L'intégration dans l'outil d'une évaluation basée sur un critère environnemental n'est pas initiée en raison de l'absence de données caractérisant l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) de chacune des opérations du processus de fabrication de parois par Stratoconception®. L'environnement de programmation visuelle *Grasshopper*, associé au logiciel de modélisation *Rhinoceros 3D*, est retenu pour l'implémentation de l'outil *TiWa(s)* pour des raisons similaires à celles présentées pour l'implémentation de l'outil *TAN(s)*.

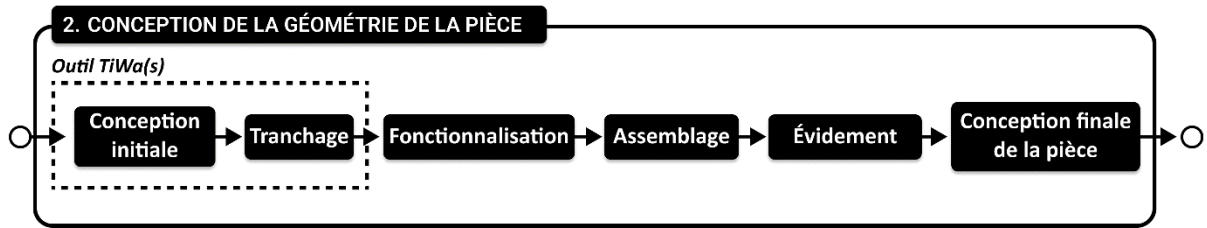


Figure 72. Positionnement de l'outil TiWa(s) dans l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode TADAM(s).

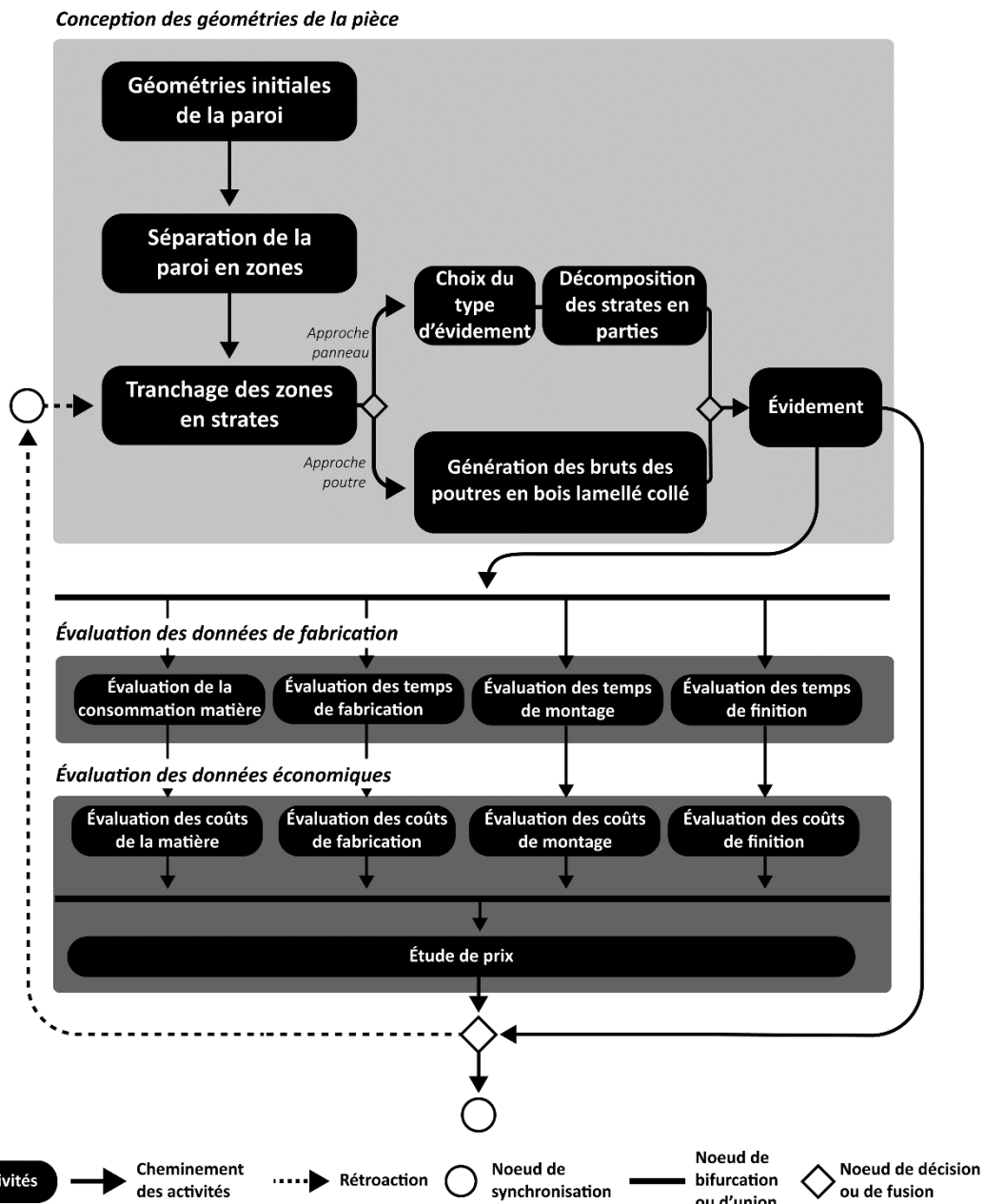


Figure 73. Diagramme d'activité de l'outil TiWa(s) se constituant de la définition des stratégies de tranchage, intégrant un choix du type d'évidement, et de moteurs d'évaluation des données de fabrication et des données économiques. Les stratégies de tranchage comprennent la séparation de la paroi en zones, le tranchage des zones et la préparation des strates pour la fabrication par décomposition des strates ou par génération des géométries des poutres en bois lamellé-collé.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes méthodes proposées pour la réalisation de parois par Stratoconception[®], se basant sur les matériaux favorables à l'utilisation du procédé de fabrication additive dans les pratiques de la construction en bois. Par la suite, nous décrirons le développement de l'outil *TiWa(s)*, visant l'évaluation économique de la conception du tranchage des parois réalisées par Stratoconception[®] qui permet au concepteur d'obtenir des ordres de grandeurs valides dès la phase amont du projet. Enfin, nous procéderons à une mise à l'épreuve de l'outil à travers un cas d'application concret.

6.1 Méthodes pour la conception des parois réalisées par Stratoconception[®]

L'étude bibliographique a relevé que la construction en bois possède des moyens matériels permettant la réalisation de composants architecturaux de grandes dimensions par Stratoconception[®]. En effet, les panneaux en bois de CLT, de lamibois et de contreplaqué sont identifiés comme des matériaux favorables à l'utilisation de la Stratoconception[®] pour la production de composants architecturaux de grandes dimensions à usage structurel tandis que nous émettons l'hypothèse que les poutres à double courbure en bois lamellé-collé peuvent être une approche novatrice pour la réalisation, sans décomposition, des strates de grandes dimensions constituant des parois.

Dans cette partie, nous présenterons les différentes méthodes identifiées pour le tranchage, et particulièrement la décomposition, des strates de grandes dimensions, constitutives des parois réalisées par Stratoconception[®]. Des règles de conception du tranchage sont proposées et explicitées de manière à automatiser cette tâche afin de favoriser une accélération du processus de conception et, par extension, de favoriser la multiplication des études associées à chacune des méthodes identifiées. L'évidement des parois sera également abordé et une méthode sera proposée de manière à réduire les pertes de matières (voir partie 3.2.4.3).

6.1.1 Méthodes pour le tranchage des strates de grandes dimensions

Les exemples d'architectures construites par strates présentées dans l'étude bibliographique (voir partie 1.1.1) révèlent qu'il est possible, par ce système constructif, de s'affranchir de la nécessité de penser à des éléments distinctifs tels que les murs, le sol ou le toit, en proposant plutôt des structures continues, englobant l'espace, que nous désignons par la notion de paroi. La paroi est ainsi considérée comme un assemblage de surfaces englobant un espace habité.

6.1.1.1 Séparation du modèle de la paroi en zones

Les opérations de tranchage de parois de grandes dimensions se composent d'une séparation du modèle de la paroi en zones, du tranchage des zones en strates et de la décomposition des strates en parties. La séparation de la paroi en zones, à l'échelle d'une paroi, est principalement motivée par une contrainte physique, impliquant une préfabrication de la paroi, ou par une recherche d'expression architecturale spécifique, visant des tranchages différents en fonction des zones considérées. Une grande liberté est laissée au concepteur à cette étape en raison de son caractère optionnel ainsi que pour permettre au concepteur de proposer manuellement une séparation répondant à ces enjeux architecturaux et de préfabrication selon ses exigences.

Un moteur d'évaluation permet cependant au concepteur d'avoir un retour d'information sur ses choix. Le composant « *Control_prefab* » est ainsi développé pour informer le concepteur sur la faisabilité de la préfabrication qu'il propose par rapport aux capacités dimensionnelles des moyens de transport et des charges pouvant être manutentionnées par des machines (Figure 74). L'algorithme établi traite chaque zone indépendamment les unes des autres et ne permet donc pas des études de minimisation du nombre de moyens de transport nécessaires en procédant à des imbrications des éléments préfabriqués. La boîte englobante du modèle 3D de la zone est évaluée et comparée aux limites dimensionnelles des catégories de convoi exceptionnel enregistrées dans une base de données. De même, l'ordre de grandeur de la masse de la zone est évalué à partir des données matériaux définies par le concepteur et comparé aux capacités de levage de moyens de manutention issus d'une base de données. Les données matériaux regroupent les masses volumiques du bois utilisé en structure et de l'isolation mise en œuvre ainsi que la répartition en volume de ces matériaux dans la composition de la paroi. Une prévisualisation par coloration des zones permet d'identifier celles qui ne répondent pas aux critères de transport et de manutention et celles qui nécessitent des moyens de transport ou des moyens de manutention spécifiques et coûteux.

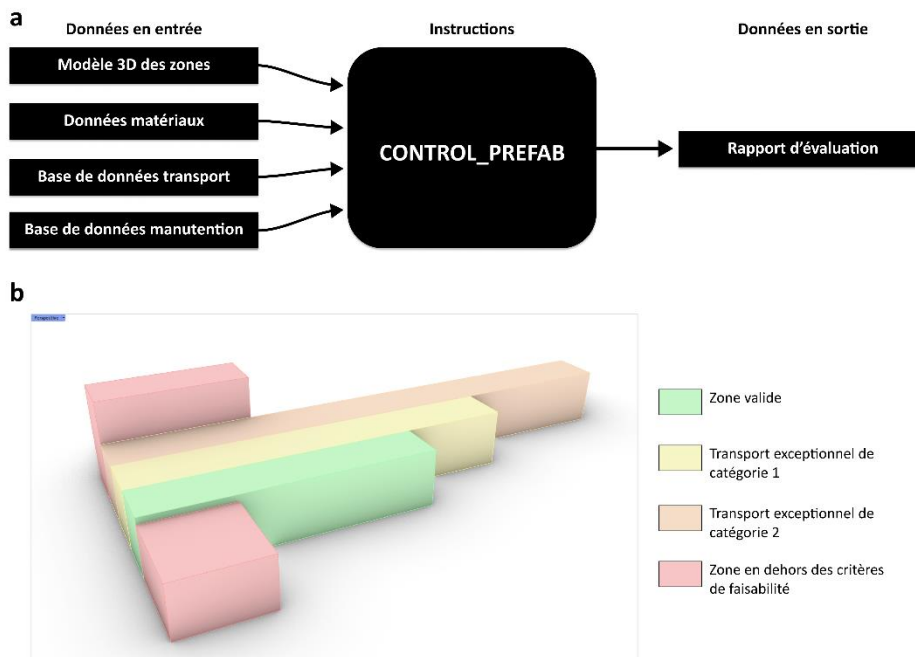


Figure 74. a : Composant « *Control_prefab* » d'évaluation de la séparation en zones du modèle de la paroi ; b : capture d'écran de la validation de la visualisation des résultats de l'évaluation par application à des géométries simples

6.1.1.2 Séparation des zones en strates

Après la validation de la séparation du modèle de la paroi en zones, le concepteur traite l'opération de tranchage de chaque zone. Cette opération se base sur l'utilisation des composants « *Set_slicing_planes* », « *Slicer* », exécutant l'opération de tranchage et « *Draft_angle_displaying* » informant le concepteur sur la présence de surfaces en dépouille et en contre-dépouilles. Ces composants ont été précédemment présentés (voir partie 5.1.3).

Nous portons une attention particulière sur le choix, par le concepteur, de l'épaisseur de tranchage. Nous postulons que contrairement aux composants architecturaux de petites dimensions pour lesquelles les courbures de leurs surfaces peuvent être importantes en comparaison à l'épaisseur des strates, les courbures des composants architecturaux de grandes dimensions sont moins sensibles à des changements de courbures et ainsi à la présence de zones inaccessibles nécessitant une réduction des épaisseurs des panneaux choisis pour assurer la faisabilité des composants. Nous émettons l'hypothèse que le choix de l'épaisseur des panneaux est ainsi moins dépendant d'une notion de faisabilité mais doit plutôt être considéré au regard des données de fabrication. Nous identifions deux données de fabrication impactées par le choix de l'épaisseur de tranchage :

- L'épaisseur totale traitée par des opérations de surfacage qui sont nécessaires lorsque l'épaisseur du panneau ne correspond pas à l'épaisseur finale de la strate (Figure 75a). Une épaisseur importante à traiter par des opérations de surfacage implique des temps d'usinage et des pertes de matières d'autant plus importantes, en volume, que les composants architecturaux, et leurs strates, sont de grandes dimensions.
- Le nombre de strates : l'épaisseur des panneaux impacte directement le nombre de strates et les volumes de matières enlevés par l'usinage 3D du profil des strates (Figure 75b). Plus l'épaisseur sera importante, plus le nombre de strates sera réduit ainsi que les opérations d'assemblage.

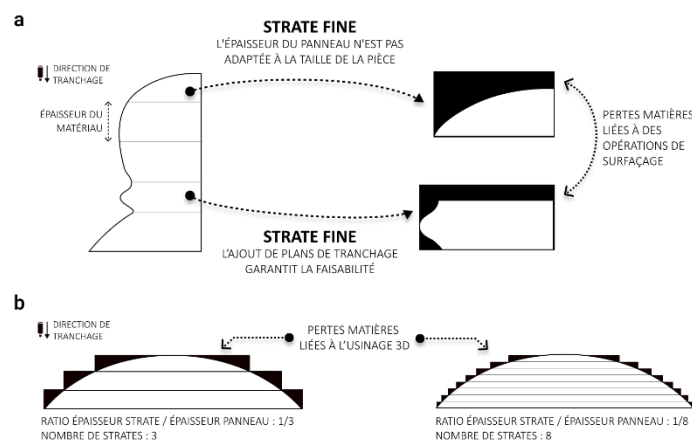


Figure 75. a : Opérations de surfacage induites par la présence de strates fines ; b : Évolution des données de fabrication en fonction du ratio épaisseur strate / épaisseur panneau : les pertes matières et les temps de fabrication associés à l'usinage 3D du profil des strates diminuent lorsque l'épaisseur des panneaux est réduite

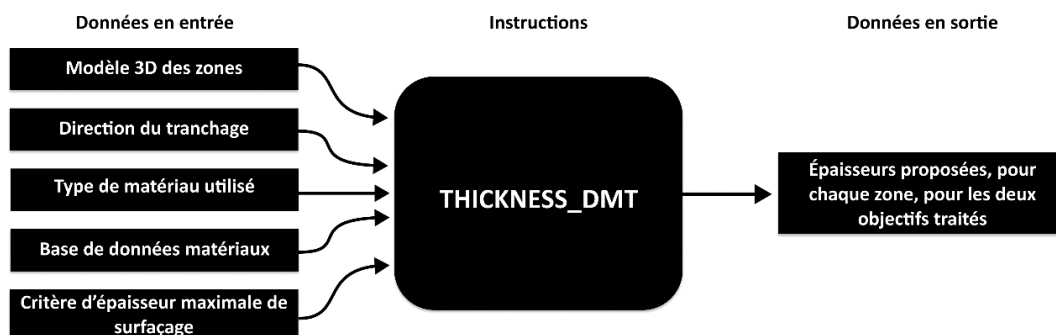


Figure 76. Composant « Thickness_dmt » d'aide à la prise de décision pour le choix des épaisseurs de matériaux (panneaux ou poutres) utilisés pour le tranchage des zones

Le composant « *Thickness_dmt* » est ainsi développé pour proposer au concepteur des solutions minimisant ces données identifiées (Figure 76). Dans un premier temps, le concepteur définit le type de matériau à utiliser. Les matériaux disponibles sont ceux identifiés comme favorables à l'utilisation de la Stratoconception® pour la production de composants architecturaux de grandes dimensions à usage structurel, c'est-à-dire les panneaux de CLT, de lamibois, de contreplaqué et les poutres en bois lamellé-collé. Chaque type de matériau est associé à une base de données regroupant ses caractéristiques dimensionnelles commerciales courantes. Le composant « *Thickness_dmt* » propose, pour le type de matériau sélectionné, l'épaisseur minimisant l'épaisseur totale traitée par des opérations de surfacage ainsi que l'épaisseur pour laquelle le nombre de strates sera le plus faible, tout en respectant un critère d'épaisseur maximale surfacée défini par le concepteur. La prise de décision finale est laissée au concepteur qui peut choisir soit le matériau qu'il souhaite utiliser, pouvant être associé à un stock existant et disponible, soit l'une des solutions optimisées proposées.

Le tranchage d'un volume quelconque par des plans parallèles produit des strates dont la géométrie est assimilable à deux types d'éléments architecturaux (Figure 77) :

- À un élément « *coque* » : il s'agit d'un volume dont l'une des dimensions est significativement faible vis-à-vis des autres, qui sont pour leur part d'un même ordre de grandeur. La représentation simplifiée de cette typologie de strate est établie par analogie à la représentation théorique des coques par leur surface moyenne, définie comme la surface équidistante aux faces de la coque.
- À un élément « *poutre* » : il s'agit d'un volume dont l'une des dimensions est significativement importante vis-à-vis des autres, qui sont pour leur part d'un même ordre de grandeur. La représentation simplifiée de cette typologie de strate est établie par analogie à la représentation des poutres par leur fibre neutre dans la théorie des poutres. La fibre neutre désigne une ligne, courbe, définie par le centre de gravité des sections droites de la poutre.

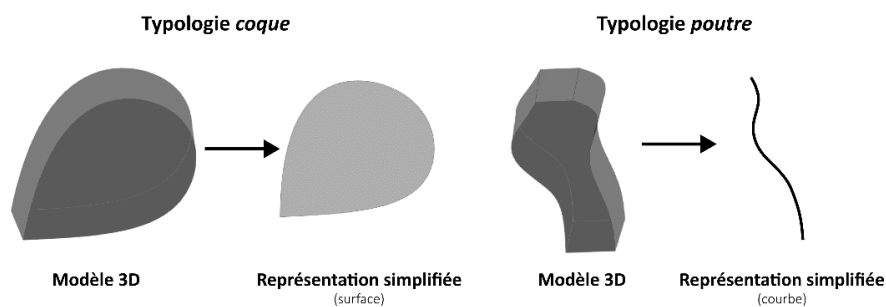


Figure 77. Représentation simplifiée de strates assimilables à des éléments coques (à gauche) et poutres (à droite)

La décomposition de strates peut ainsi s'opérer en considérant ces deux typologies ainsi que leur représentation simplifiée qui sont des surfaces et des courbes. Ces deux typologies sont confrontées aux deux méthodes identifiées de fabrication des strates de grandes dimensions pour définir le champ d'application de ces dernières :

- La fabrication des strates est réalisée par leur mise en panoplie sur des panneaux en bois : les grandes dimensions des strates impliquent une étape de décomposition de leur géométrie de manière à ce que leurs dimensions soient strictement inférieures à celles des panneaux. Cette approche permet le traitement de typologies *coque* comme *poutre*.

- La fabrication des strates est réalisée par l'usinage de poutres en bois lamellé-collé (voir partie 1.2.2.4) : cette approche n'est adaptée qu'à la typologie *poutre*.

De manière à comparer ces méthodes, nous nous intéresserons dans la suite de ces travaux aux strates appartenant à la typologie *poutre* en décrivant les règles de conception permettant l'automatisation des opérations de décomposition des strates pour leur mise en panoplie et des opérations de génération des géométries des bruts des poutres en bois lamellé-collé pour leur fabrication.

6.1.1.3 Méthode pour l'automatisation de la décomposition pour une mise en panoplie sur panneaux

La méthode proposée pour la décomposition des strates de grandes dimensions en parties, mises en panoplie sur des panneaux pour leur fabrication, est basée sur la division des courbes de leur représentation simplifiée en éléments se rapprochant d'éléments droits. Nous émettons l'hypothèse que cette approche intuitive favorise une meilleure imbrication des parties de strates lors de leur mise en panoplie.

La méthode proposée consiste à approximer la géométrie de la fibre neutre des strates appartenant à la typologie *poutre*, représentant une courbe, à identifier par analyse les points correspondant aux extremums locaux de cette courbe puis à ajouter des points de division supplémentaire répondant à des critères de dimensions maximales des parties de strates. Une seconde méthode consiste à diviser la fibre neutre approximée à des intervalles réguliers, mais cette méthode peut entraîner la présence de parties de strates possédant une forte courbure pouvant impacter la performance de la mise en panoplie, les points correspondant aux extremums locaux n'étant pas considérés (Figure 78).

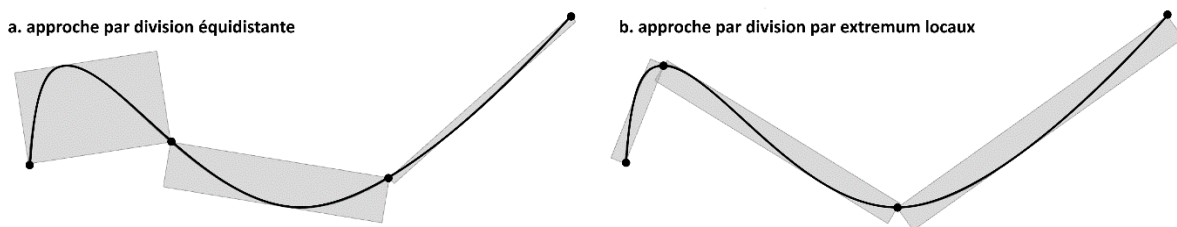


Figure 78. Méthodes de division de courbes en parties. a : la méthode par division équidistante peut créer des parties encombrantes pour la mise en panoplie ; b : la division par extremum locaux favorise la création de parties rectilignes

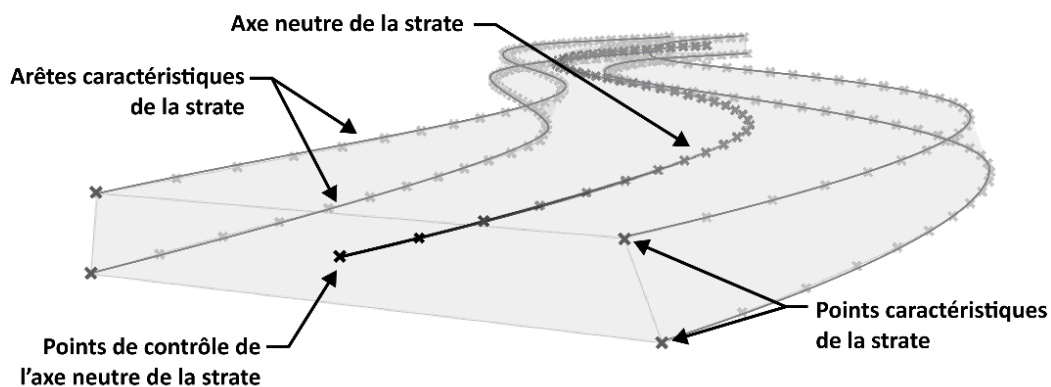


Figure 79. Méthode de génération de l'axe neutre des strates appartenant à la typologie *poutre*

L'approximation de la fibre neutre de la strate est traitée par le composant « *Neutral_axis* ». Une première étape est la sélection des arêtes caractéristiques de la modélisation *B-Rep*⁷ de la strate dont les longueurs sont du même ordre de grandeur que l'arête la plus longue. Ces arêtes caractéristiques sont décomposées en une liste de points équidistants. Le barycentre des points associés à chaque index des listes de points équidistants est ensuite généré. Cette opération produit une liste de points qui, par interpolation, permettent la création de la fibre neutre (Figure 79).

L'analyse de la fibre neutre renvoie la liste des points caractérisant ses extremums locaux (Figure 80). Certains de ces points peuvent être considérés comme proches par la distance qui les sépare et sont supprimés pour la suite du traitement. Cette distance minimale entre les plans de décomposition est définie par le concepteur et permet d'éliminer les extremums locaux associés à de faibles variations locales et rapprochées, dont la suppression n'a pas d'impact sur le résultat final de l'opération de décomposition.

La distance entre les points caractéristiques conservés est évaluée et comparée à un critère dimensionnel. Ce critère est le minimum des valeurs de la longueur des panneaux choisis, de la longueur maximale des centres d'usinage disponibles et de la distance maximale entre les plans de décomposition, définie par le concepteur. Les deux premières valeurs intègrent les contraintes de fabrication associées aux moyens techniques et matériels alors que la dernière valeur est associée à une notion de minimisation de la consommation de matière lors de la mise en panoplie. Si la distance entre les points caractéristiques conservés est supérieure au critère dimensionnel, de nouveaux points de décomposition sont ajoutés pour satisfaire ce critère (Figure 80). Les strates sont enfin décomposées par des plans de tranchage orthogonaux à la fibre neutre aux points de décomposition calculés.

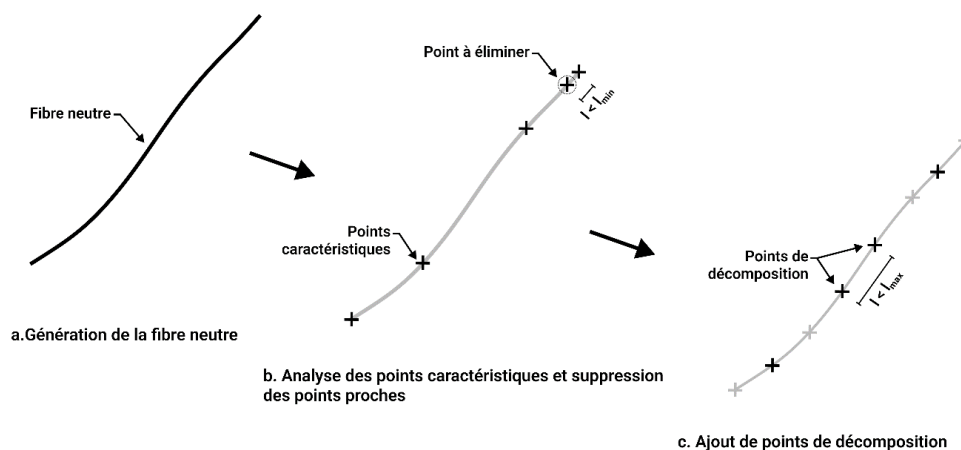


Figure 80. Méthode de génération des points de décomposition avec l_{min} , la distance minimale entre les plans de décomposition, et l_{max} , la distance maximale entre ces plans.

La définition de règles de conception permet d'isoler le paramètre de la distance maximale entre les plans de décomposition comme le paramètre essentiel pour l'optimisation, par le concepteur, des données économiques, environnementales et de fabrication associées à l'opération de décomposition des strates en parties.

⁷ Une modélisation *B-Rep*, ou *Boundary-Representation*, est une modélisation 3D géométrique de solides par un ensemble de surfaces. Une B-Rep est constituée de faces, d'arêtes et de sommets définissant sa géométrie.

Cette première approche, locale aux strates, est complétée par une approche globale par laquelle la fibre neutre de la zone de la paroi complète est calculée et utilisée pour la décomposition des différentes strates. Cette approche favorise un alignement des plans de décomposition entre les différentes strates du composant architectural, participant à son expression visuelle finale. L'alignement des décompositions peut cependant être adapté localement à chaque strate de manière à réaliser un assemblage, des strates et de leurs parties, en quinconce, par analogie aux murs maçonnés.

Le composant « *Decompose_strata* » est développé en implémentant la méthode présentée et permet une automatisation complète de la décomposition des strates appartenant à la typologie *poutre*. L'action du concepteur sur cette opération est réduite à la définition des distances limites (minimales et maximales) à respecter entre les points définissant les plans de décomposition des strates ainsi qu'à la définition des limites dimensionnelles des matériaux et des machines utilisées (Figure 81).

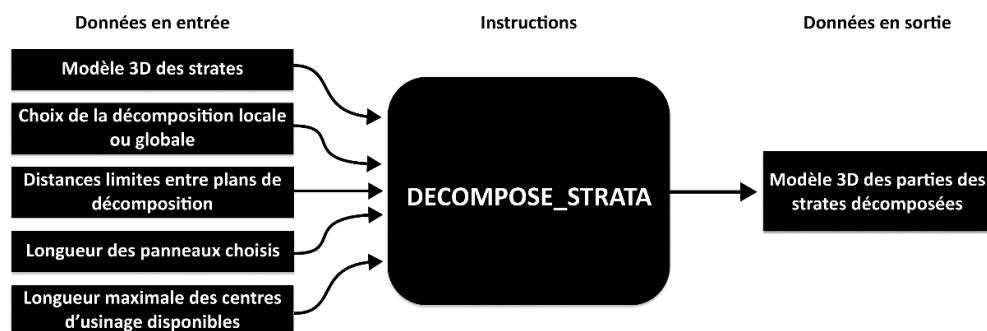


Figure 81. Composant « *Decompose_strata* » automatisant l'opération de décomposition des strates en parties

6.1.1.4 Méthode pour la fabrication des strates par des poutres en bois lamellé-collé

La méthode proposée pour la fabrication directe des strates par la fabrication de poutres en bois lamellé-collé repose sur la génération des bruts en lamellé-collé, correspondant à la géométrie des poutres avant leur usinage. Comme pour la décomposition des strates de grandes dimensions en parties, la méthode se base sur l'utilisation de la représentation simplifiée des strates, sous forme de courbe. Le composant « *Blank_glt* » génère automatiquement le modèle 3D des bruts des poutres en bois lamellé-collé pour la fabrication des strates de grandes dimensions (Figure 82). Le concepteur peut agir sur trois paramètres de ce composant : le type de brut des poutres en bois lamellé-collé, l'épaisseur des lamelles et l'homogénéisation des bruts pour une série de strates.

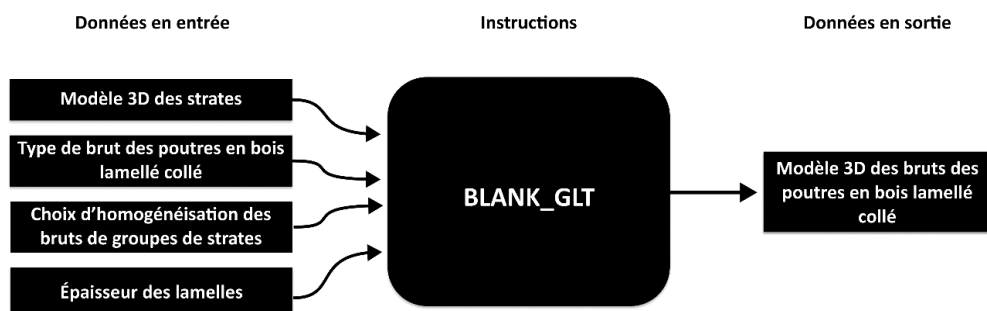


Figure 82. Composant « *Blank_glt* » permettant la génération automatique des modèles 3D des bruts des poutres en bois lamellé-collé pour la fabrication directe des strates de grandes dimensions

Types de bruts pour la fabrication de poutres en bois lamellé-collé

Le composant « *Blank_glt* » permet la génération de bruts des poutres rectilignes, de poutres à simple courbure ou de poutres à inertie variable (Figure 83). Les poutres rectilignes sont des éléments dont la production est standardisée (dans la limite d'épaisseurs maximales à considérer), qui favorisent une réduction des coûts, mais qui impliquent une perte de matière importante lors de la fabrication des strates tout en induisant également une absence de respect de l'orientation de l'angle du fil du bois dans le produit final. Les poutres courbes, pour leur part, respectent l'orientation de l'angle de fil du bois, réduisent les pertes de matière, mais impliquent des procédés de fabrication plus coûteux. La présence des différents choix dans l'outil est motivée par la nécessité, pour le concepteur comme pour le fabricant, de comparer les approches et d'identifier les solutions répondant à une rationalisation de la production.



Figure 83. Types de bruts des poutres en bois lamellé-collé sélectionnables par le concepteur (a : brut de poutre rectiligne ; b : brut de poutre à simple courbure ; c : brut de poutre à simple courbure, à inertie variable)

Épaisseur de lamelles et fibre neutre du brut

L'épaisseur des lamelles constituant les poutres en bois lamellé-collé est une donnée essentielle pour la génération des géométries des bruts car agissant sur leur hauteur finale ainsi que sur les rayons de courbures réalisables dans le cas de poutres courbes. La génération des géométries des bruts des poutres rectilignes est opérée par le redimensionnement de la boîte englobante des strates en fonction des dimensions des lamelles.

La génération des géométries des bruts des poutres à simple courbure débute par l'analyse de la fibre neutre de la strate en utilisant le composant « *Neutral_axis* ». Le rayon de courbure admissible, r_{adm} , est calculé à partir de l'épaisseur des lamelles définie par le concepteur, ou le fabricant, puis la fibre neutre est corrigée de manière à satisfaire ce rayon de courbure en tout point (Figure 84). L'approche choisie est celle du calcul d'un rayon de courbure admissible à partir du choix de l'épaisseur des lamelles et non l'inverse. Ce choix résulte de l'observation des pratiques des fabricants de bois lamellé-collé qui utilisent majoritairement des sections de lamelles standardisées qui ne les adaptent donc pas à chaque poutre à réaliser. L'ensemble des points caractéristiques de la courbe, regroupant les extremums locaux et les points d'inflexions, sont calculés par le composant « *Curve_kpoints* ». Ainsi, la correction s'opère par déplacement des extremum locaux de la courbe tout en conservant la position de ses points de début, de fin et d'inflexion. La courbe corrigée représente la fibre neutre du brut de la poutre en bois lamellé-collé. Cette courbe est répétée et translatée de manière à définir les arrêtes du brut final, assurant ainsi que les faces de ce dernier seront parallèles et assureront la faisabilité des opérations de collage et de pressage.

La réalisation des inerties variables s'opère après la création du brut de la poutre courbe par l'élimination de la matière là où elle n'est pas nécessaire pour la fabrication de la strate par une analyse en plan.

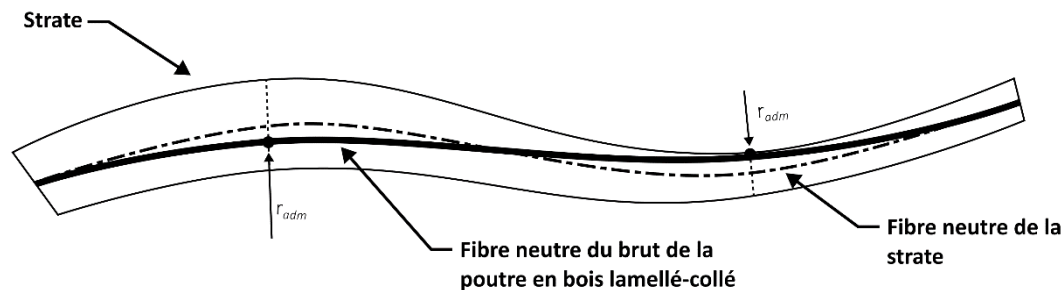


Figure 84. Correction de la fibre neutre de la strate pour la génération de la fibre neutre de la poutre en bois lamellé-collé respectant des rayons de courbures admissibles (r_{adm})

La correction de la courbe représentative des strates pour satisfaire des critères de fabrication peut être intégrée dès l'étape de la conception de l'enveloppe extérieure de la paroi traitée en opérant sur les courbes génératrices de sa géométrie. L'utilisation de ce composant pour l'ajustement de ces courbes génératrices participe alors à une démarche de conception du composant architectural pour sa fabrication par Stratoconception® par des poutres en bois lamellé-collé en optimisant, par la géométrie du composant, les données de fabrication.

L'homogénéisation des bruts pour une série de strates

Le paramètre d'homogénéisation des bruts permet de procéder, manuellement, à des regroupements de strates de manière à réaliser un modèle 3D de brut utilisable pour un ensemble de strates. Ce paramètre a été intégré dans une optique de standardisation de la production de petites séries de bruts, pour la réalisation de strates dont les dimensions et les géométries sont relativement proches. En raison de la spécificité de cette opération, nous choisissons de laisser le concepteur procéder à ces regroupements manuellement.

De même, nous avons, par simplification, considéré chaque strate indépendamment les unes des autres. Une approche complémentaire serait la définition de regroupements de deux ou plusieurs strates au sein d'un même brut de poutre, particulièrement pour les poutres rectilignes, de manière à optimiser la production. Cette approche n'a pas été implémentée mais peut être une ouverture pour de prochains développements, tout comme le développement d'algorithmes automatisant le regroupement de strates de dimensions et de courbures similaires.

6.1.2 Méthodes pour l'évidement des parois

L'intégration de fonctions d'isolation thermique ou acoustique aux parois réalisées par Stratoconception® implique un évidement de la structure des strates. Deux méthodes sont proposées : une méthode d'évidement opérant au niveau de la géométrie de chaque strate, ou partie de strate, et

une méthode d'évidement opérant au niveau de l'ensemble de la zone du composant pour proposer au concepteur un système constructif mixte « *Stratoconception*[®] – *Mur à ossature bois* ».

6.1.2.1 Méthode par évidement des strates

La méthode proposée pour l'évidement des parois se constitue de trois étapes : une étape de prédimensionnement des épaisseurs structurelles à conserver ; une étape de définition des géométries de structures alvéolaires à générer ; une étape d'évaluation des fonctions thermiques et acoustiques.

La fonction structurelle de la paroi implique un travail de prédimensionnement de manière à définir les épaisseurs minimales à conserver pour assurer sa stabilité. Ce prédimensionnement est réalisé par une analyse de la surface moyenne de la paroi, basée sur la théorie des coques. Nous identifions cependant un manque de données liées aux caractéristiques du matériau mis en œuvre ainsi qu'un manque de critères de prédimensionnement. Les caractéristiques du matériau mis en œuvre correspondent aux caractéristiques du système composé de deux strates et de leur assemblage. La définition de ces caractéristiques et des critères de prédimensionnement requièrent des travaux de recherche complémentaires basées sur des mesures expérimentales. Les résultats de ces travaux pourront être intégrés comme des données d'entrées des outils d'évidement des composants architecturaux en bois réalisés par *Stratoconception*[®] pour définir l'épaisseur minimale de la paroi à conserver.

Cette première étape définit un domaine de définition du volume à évider des strates, ou parties de strates. L'évidement se fait par application d'un motif de structures alvéolaires, choisi par le concepteur. Ce motif est extrudé dans la direction du tranchage sur la hauteur de la strate, ou partie de strate. Cette méthode assure la faisabilité de l'évidement par l'accessibilité à l'outil de l'ensemble des surfaces à usiner.

Une dernière étape vise l'évaluation des performances thermiques ou acoustiques de la paroi, dépendant des motifs définis par le concepteur ainsi que de l'épaisseur de la paroi assurant la fonction évaluée. Les performances thermiques ou acoustiques sont comparées aux exigences normatives. Si ces exigences ne sont pas respectées, l'épaisseur totale de la paroi doit être corrigée dans la conception initiale de l'enveloppe extérieure de la paroi.

6.1.2.2 Méthode par conception d'un système constructif

Le développement d'une méthode de conception d'un système constructif mixte « *Stratoconception*[®] – *Mur à ossature bois* » (Figure 85) est motivé par les pertes de matières importantes associées à la méthode par évidement de chaque strate ou parties de strate. Le composant « *Strato_mob* » est développé en se basant sur la conception proposée lors de la phase d'expérimentation menée (voir partie 3.2.4.3). Le composant permet le traitement de la géométrie de l'ensemble des strates pour les adapter à ce nouveau système constructif, avant l'opération de décomposition des strates en parties. Il consiste à répartir et à traiter les strates en deux catégories :

- Des strates continues sur l'épaisseur totale de la paroi : ces strates sont considérées comme des nervures horizontales dans la paroi participant à la stabilité du composant architectural et facilitant l'intégration des réseaux en identifiant leur positionnement par les vides créés pour

leur mise en œuvre. Le concepteur définit manuellement l'intervalle séparant ces strates continues. L'index de ces strates est enregistré et permet le traitement de leur évidement après l'étape de décomposition des strates en parties, de la même manière que dans la méthode présentée dans la partie 6.1.2.1.

- Des strates intermédiaires ne matérialisant que les surfaces extérieures de la paroi : les strates comprises dans l'intervalle entre les strates continues sont séparées en deux parties matérialisant les surfaces extérieures de la paroi par leur mise en épaisseur. La liaison entre les parties des strates intermédiaires se fait par l'ajout de montants d'ossature à la structure.

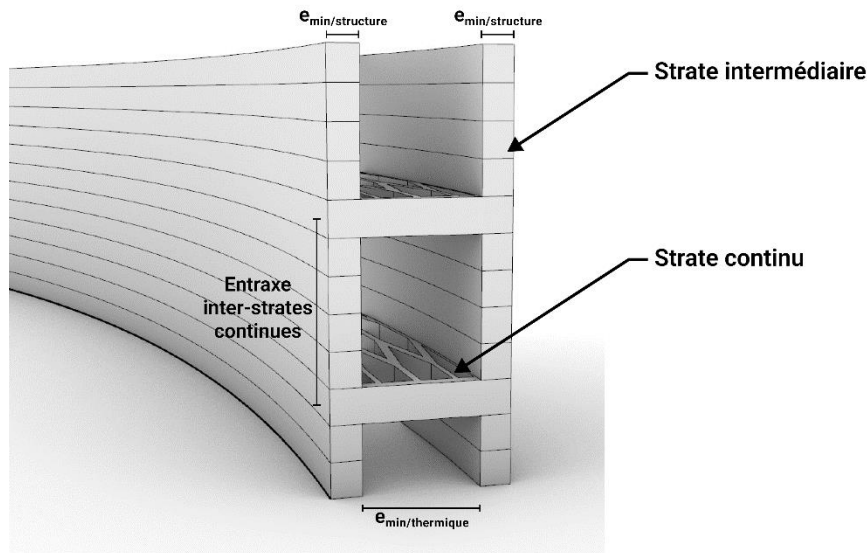


Figure 85. Schéma de principe du système constructif mixte « Stratoconception® - Mur à ossature bois » constitué de strates continues et de strates intermédiaire. L'épaisseur totale de la paroi est définie par la somme des épaisseurs minimales permettant à la paroi de répondre aux fonctions structurelles et de confort thermique ou acoustique.

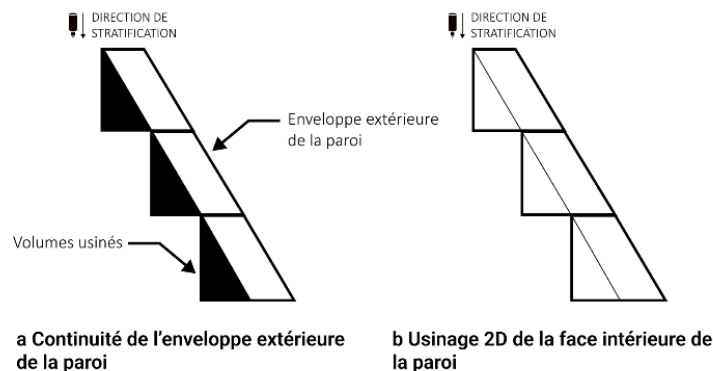


Figure 86. Configurations identifiées pour la génération de la géométrie des strates intermédiaires

Deux configurations sont identifiées pour la génération de la géométrie des strates intermédiaires (Figure 86):

- La face intérieure est déterminée en considérant un usinage 2D, minimisant les pertes de matières et les temps de fabrication.
- La face intérieure est à une mise en épaisseur assurant un respect de la continuité avec la surface de l'enveloppe extérieure de la paroi. La mise en épaisseur peut être constante ou

variable. La mise en épaisseur s'opère par le déplacement d'une grille de points de l'enveloppe extérieure de la paroi selon leur normale. Les variations de la mise en épaisseur sont traitées par la modification des valeurs de l'épaisseur définissant le déplacement des points. Le concepteur définit soit une valeur d'épaisseur maximale, soit une table de données d'épaisseurs adaptées à la grille de points générée.

En raison des petites sections des parties des strates intermédiaires, nous nous sommes limités au développement de ce système constructif pour une méthode du tranchage par décomposition pour une mise en panoplie sur panneaux. En effet, l'utilisation de bruts de poutres en bois lamellé-collé est davantage adaptée à la mise en œuvre de peu de strates de grandes dimensions alors que la méthode par mise en panoplie compose avec un grand nombre de parties de strates de petites dimensions en comparaison aux dimensions de la structure finale. L'intégration, au composant « *Blank_glt* », de l'opération de combinaison de plusieurs strates sur un même brut permettrait cependant d'utiliser les grandes dimensions des bruts pour réaliser plusieurs parties de strates.

6.2 Évaluation des solutions de tranchage de parois

La définition de stratégies de tranchage des parois réalisées par Stratoconception® permet la modélisation des géométries de strates des parois pour leur usinage sous une forme de parties mises en panoplie sur des panneaux en bois ou sous une forme de poutres en bois lamellé-collé droites, courbes ou à inertie variable.

L'outil *TiWa(s)* apporte une aide à la décision au concepteur en l'accompagnant dans ses choix de modélisation des géométries des parois pour leur usinage. Pour ce faire, l'outil intègre deux moteurs d'évaluation des approches de tranchage et d'évidement précédemment décrites : un moteur d'évaluation de la fabrication et un moteur d'évaluation économique. Les résultats des évaluations peuvent être interprétés comme de nouveaux paramètres de la conception de manière à accompagner le concepteur dans sa recherche d'une solution acceptable vis-à-vis de critères définis. Dans cette partie nous présenterons ces deux moteurs d'évaluation.

6.2.1 Méthode pour l'évaluation de la fabrication

L'évaluation de la fabrication est développée par le composant « *Eval_fab* » et consiste à calculer les données associées à la consommation de matière, aux temps de fabrication et aux temps de montage et de finition, à partir de la modélisation 3D des géométries des pièces à fabriquer. Ces données sont non exhaustives mais permettent d'approcher des ordres de grandeurs favorisant la comparaison d'approches différentes par le concepteur.

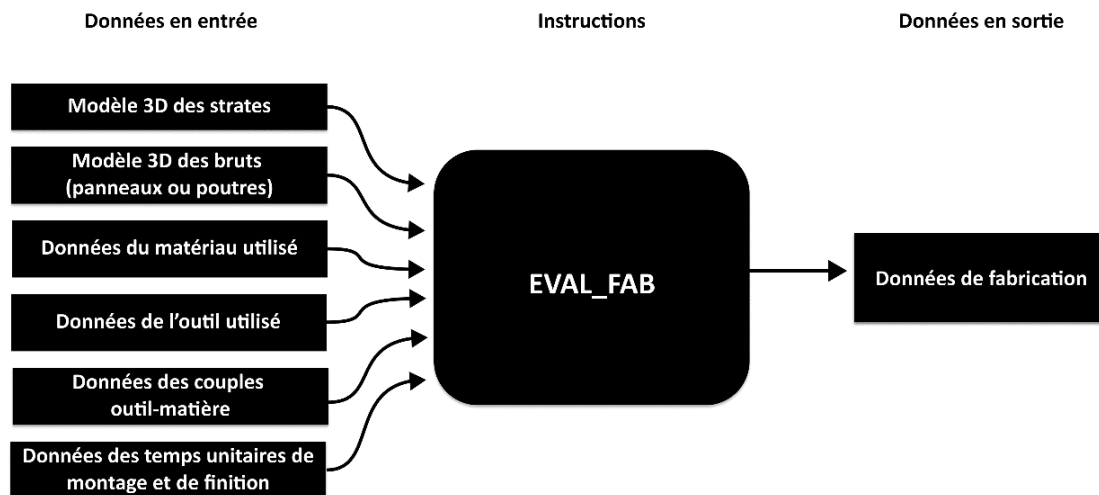


Figure 87. Composant « *Eval_fab* » permettant le calcul automatique d'ordres de grandeurs des données de fabrication (consommation de matière, temps de fabrication, de montage et de finition)

6.2.1.1 Évaluation des données de consommation de matière

L'évaluation des données de consommation de matière vise le calcul du volume des strates ou des parties de strates, des volumes usinés et des volumes des chutes dues à la mise en panoplie des parties de strates sur des panneaux ou aux dimensions des bruts des poutres en bois lamellé-collé. Le calcul

de ces volumes permet la définition du rendement matière, noté η , tel qu'il a été défini dans la partie 1.2.2.3 :

$$\eta = \frac{V_{\text{pièce}}}{V_{\text{pièce}} + V_{\text{usiné}} + V_{\text{chutes}}}$$

L'évaluation de ces données en phase amont minimise les pertes matières associées aux volumes usinés, de nouveaux vides devant être créés pour intégrer les diverses fonctions des composants architecturaux traités. Les tâches restant à traiter du processus de conception de la géométrie de la pièce n'interviennent que sur la géométrie interne des composants architecturaux. Ainsi, la consommation de matière évaluée en phase amont ne sera pas impactée.

La mise en panoplie des parties des strates sur des panneaux dépend de la qualité de l'algorithme de nesting utilisé. Dans le cadre du développement de l'outil *TiWa(s)*, nous choisissons, pour conserver un même environnement de conception, d'utiliser le plug-in *OpenNest* (Vestartas, 2021b) et non pas les algorithmes de mise en panoplie utilisés pour le procédé de Stratoconception® dans les logiciels *StratoPro* et *TopSolid'Strato*. Des comparaisons entre l'algorithme du procédé et l'algorithme du plug-in *OpenNest* sont réalisés et produisent des résultats du même ordre de grandeur. Notre choix d'utiliser un algorithme disponible dans l'environnement de conception paramétrique Grasshopper est une solution temporaire dans l'attente d'une intégration des algorithmes de mise en panoplie utilisés par le procédé de Stratoconception® au sein de notre outil.

6.2.1.2 Évaluation des temps de fabrication

L'opération d'évaluation des temps de fabrication est opérée par le composant « *Fab_time* » et se base sur le calcul des parcours d'outil. Nous approximons les temps de fabrication par le calcul des temps de coupes en omettant les temps associés aux opérations de retournement des panneaux ou poutres usinées dans un mode d'usinage recto-verso. Cette évaluation existe dans l'add-in *TopSolid'Strato* mais n'intègre pas l'ensemble des approches proposées, demande un niveau de définition supérieur à celui du projet en phase amont, nécessite une connaissance avancée du procédé de fabrication et des conditions d'usinage qui ne sont pas associées au travail du concepteur dans le cadre d'un projet architectural, et n'est pas liée aux autres données évaluées.

Nous avons précédemment défini le parcours d'outil comme étant l'ensemble des contours définis par la stratification adaptative des strates, ou parties de strates, auxquels est appliqué un décalage correspondant au rayon de l'outil utilisé. Le concepteur définit la précision de la stratification, représentant la distance séparant chaque contour, puis le rayon de l'outil utilisé. Les parcours d'outils sont directement générés et leur longueur est calculée.

La longueur du parcours d'outil est combinée à d'autres paramètres d'usinage de manière à calculer les temps de coupe et donc de fabrication. Les paramètres d'usinage nécessaires à ce calcul sont :

- La vitesse de rotation de la fraise n , exprimée en tr/min, qui correspond au nombre de tours que la fraise effectue par minute sur la broche.
- Le nombre de dents de la fraise Z .
- L'avance par dent de la fraise fz , exprimée en mm/tr, qui correspond à la distance parcourue par l'outil durant une rotation complète.

La vitesse d'avance V_f , exprimée en mm/min est calculée à partir de ces paramètres telle que :

$$V_f = f_z \times Z \times n$$

La vitesse d'avance dépend ainsi à la fois de l'outil et de la matière utilisée. Une base de données intégrant des couples outil-matière permet ainsi la définition de cette vitesse d'avance que nous utilisons pour le calcul des temps de coupe. L'utilisation de cette base de données permet la réduction des paramètres manipulables par le concepteur. Ces paramètres se composent de la précision de la stratification, du choix de l'outil et du choix du matériau utilisé, déjà défini pour les opérations de génération des géométries des strates, ou parties de strates, à réaliser.

Le temps de coupe T_c , exprimé en min est calculé à partir de la vitesse d'avance, du nombre de passes et de la longueur du parcours d'outil :

$$T_{fab} \approx T_c = \frac{L}{V_f}$$

6.2.1.3 Évaluation des temps de montage et de finition

L'évaluation des temps de montage est liée au calcul du nombre d'opérations d'assemblage, catégorisées, nécessaires à la production du composant architectural traité. Les assemblages comprennent l'assemblage des parties de strates, l'assemblage des strates et l'assemblage des zones du composant. Le nombre d'opérations est calculé pour chacune des catégories d'assemblage identifiée à partir de la modélisation de la géométrie du composant pour sa fabrication.

La dimension des pièces impacte les moyens utilisés pour leur assemblage : des parties de strates de petites dimensions ne requièrent que la force d'un opérateur humain alors que la manutention et l'assemblage de strates de grandes dimensions, réalisées par des poutres en bois lamellé-collé, nécessitent l'utilisation de machines. Le temps associé à l'assemblage de deux éléments est différent en fonction des moyens utilisés. Les temps d'assemblage dépendent également de la technique mise en œuvre qui n'est cependant pas définie en phase amont du projet. Pour le développement de l'outil *TiWa(s)*, nous considérons uniquement des assemblages sans ajout de matière, nous permettant de simplifier ce paramètre en ne considérant que le temps associé à la manutention des éléments à assembler. La constitution d'une base de données que le concepteur pourrait convoquer à des phases plus avancées de la conception est une voie d'amélioration de l'outil.

L'évaluation des temps de finition est liée au calcul de la surface du composant architectural à traiter en finition. Les temps associés à la finition d'une surface dépendent de la nature de la finition (ponçage, mise en œuvre d'un produit de finition, etc.) ainsi que des compétences et des moyens du fabricant. Les temps unitaires du traitement de la finition d'un composant sont donc caractérisés par le fabricant, impliquant le développement d'une relation étroite avec le concepteur dès la phase amont du projet pour avoir accès à l'ensemble des données nécessaires à la rationalisation de la conception des composants architecturaux pour leur fabrication. Cette évaluation n'est cependant pas prépondérante dans le choix d'une solution de tranchage par le concepteur, la donnée de surface à traiter dépendant de l'enveloppe extérieure du composant architectural et non de ses géométries pour l'usinage. Ainsi, bien que les temps de finition impactent les données de fabrication, elles impactent dans le même ordre de grandeur les différentes approches pouvant être comparées pour un même composant.

6.2.2 La méthode d'évaluation économique

L'évaluation économique est une combinaison des résultats de l'évaluation de la fabrication et des données des coûts correspondant à chacune des données de fabrication. Ces données se composent :

- Des coûts unitaires de la matière consommée C_{mat} (€/m³) ;
- Des coûts de fabrication des strates, ou parties de strates, par des centres d'usinage C_{fab} (€/h) ;
- Des coûts de l'opération d'assemblage des parties de strates, des strates ou des zones du composant architectural traité C_{ass} (€/h) ;
- Des coûts de l'opération de finition C_{fin} (€/h).

L'évaluation économique de la conception est traitée par le composant « *Eval_price* » et se formule de la manière suivante :

$$C \text{ [€]} = C_{mat} \times Q_{mat} + C_{fab} \times T_{fab} + C_{ass} \times T_{ass} + C_{fin} \times T_{fin}$$

Les informations produites par l'évaluation sont le coût global approché de la fabrication ainsi que la répartition des coûts pour chacune des opérations, permettant au concepteur d'identifier quelles données doivent être modifiées pour minimiser les coûts de production. L'évaluation de la fabrication favorise une comparaison des différentes opérations pour des solutions testées alors que l'évaluation économique permet une comparaison générale des approches au regard d'un critère économique. Une méthode similaire pourra être adoptée pour le développement d'un moteur d'évaluation environnementale.

6.3 Mise à l'épreuve de l'outil *TiWa(s)*

Pour valider notre travail relatif au développement de l'outil *TiWa(s)* et son intégration dans la méthode *TADAM(s)*, une expérimentation est menée. Cette expérimentation a pour objectif d'évaluer l'aptitude de l'outil à produire, de manière automatisée, des variantes de conception de stratégies de tranchage et à produire des données utiles pour le concepteur dans son choix d'une solution. L'expérimentation se concentre sur la modélisation des géométries des strates ou des parties de strates pour leur fabrication selon les différentes approches proposées ainsi que sur le calcul des données de consommation de matière. L'évaluation des temps de fabrication, des temps de montage et des temps de finition ainsi que l'évaluation économique ne sont pas traités par manque de données accessibles et utilisables. Nous nous appuyons sur la modélisation de l'enveloppe extérieure du projet *Cocon*, déjà étudiée dans notre approche expérimentale (voir partie 3.2).

6.3.1 Génération de solutions de tranchage

La conception initiale de l'enveloppe extérieure du projet *Cocon* a été générée à partir de courbes de référence (voir partie 3.2.2 et Figure 42). Nous nous concentrons pour cette expérimentation sur la partie centrale de la structure et particulièrement sur l'une des zones définie manuellement par le concepteur qui représente une paroi à double courbure. La séparation en zones du modèle a exigé une réflexion sur la méthode d'assemblage de la structure finale ainsi que sur le tranchage à privilégier pour répondre à une expression architecturale choisie. Les choix des plans de séparation sont étroitement liés aux spécificités du projet traité et ne permettent pas une généralisation de règles de conception, comme nous l'avons précédemment postulé.

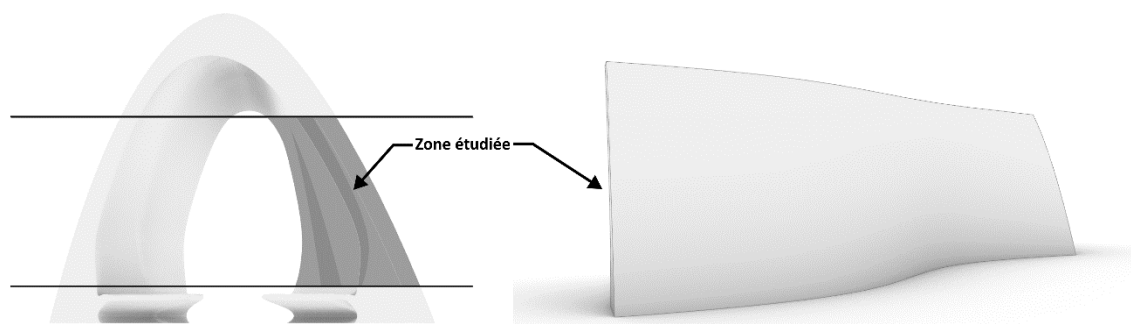


Figure 88. Définition des plans de séparation en zones du modèle de la conception initiale

Les règles de conception du tranchage des strates implémentées dans l'outil *TiWa(s)* permettent une automatisation complète de la génération des géométries des parties des strates mises en panoplie (Figure 89) ainsi que des géométries des bruts des poutres en bois lamellé-collé (Figure 90).

Les interventions du concepteur se limitent à des choix de configurations (type de matériau, type de décomposition, type de brut de poutres en bois lamellé-collé) ou à la modification de paramètres spécifiques, à forte influence sur le résultat final, tels que les longueurs minimales et maximales de parties de strates. Le temps accordé au concepteur pour son travail de conception peut ainsi s'orienter davantage vers des tâches créatives et sur la rationalisation de la conception par l'étude des différentes solutions générées.

Les limites de l'outil sont rencontrées dans la rationalisation de la fabrication par l'homogénéisation de bruts de poutres en bois lamellé-collé pour des strates dont les dimensions et les courbures sont relativement proches. L'opération d'homogénéisation est empirique et chronophage du fait de son traitement manuel par le concepteur. Ce résultat met en évidence la nécessité d'introduire de nouvelles règles de conception favorisant une automatisation du regroupement de strates pour favoriser la sérialisation de leur production pour des petites séries de bruts identiques.

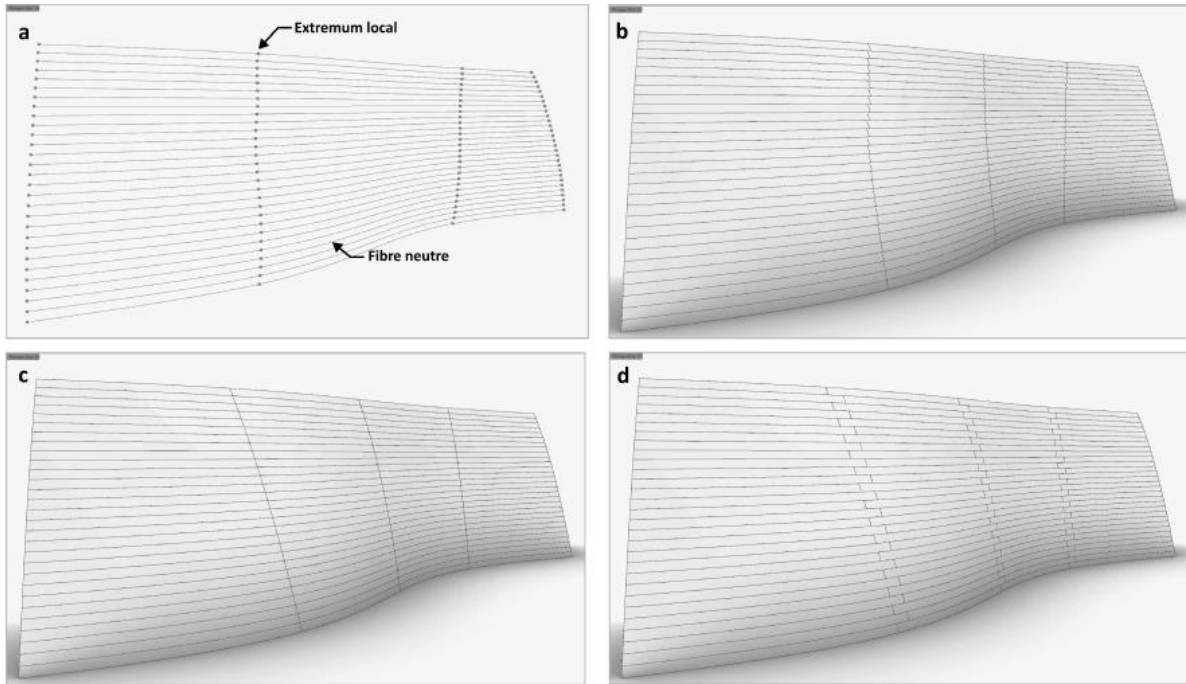


Figure 89. Génération automatique de la décomposition des strates en partie avant leur mise en panoplie selon les configurations implémentées dans l'outil TiWa(s) : a : génération automatique des fibres neutres des strates et des extrema locaux pour la décomposition des strates en parties ; b : décomposition locale ; c : décomposition globale alignée ; d : décomposition globale en quinconce.

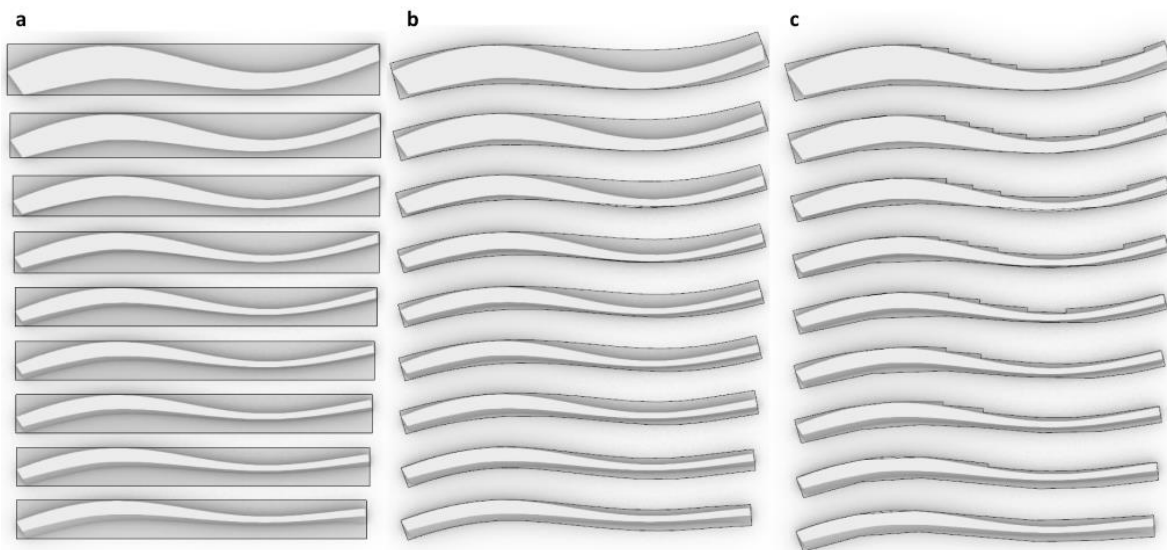


Figure 90. Génération automatique des bruts des poutres en lamellé-collé pour la fabrication directe des strates de grandes dimensions selon les configurations implémentées dans l'outil TiWa(s). a : brut rectiligne ; b : brut à simple courbure ; c : brut à inertie variable

6.3.2 Évaluation des solutions de tranchage

6.3.2.1 Problèmes et limites actuelles de l'outil

L'évaluation des solutions de tranchage étudiées par le concepteurs s'est confrontée à deux difficultés importantes : la performance des algorithmes de mise en panoplie pour le traitement d'un grand nombre d'éléments et l'accès à des données permettant l'exécution complète de l'outil *TiWa(s)*.

La paroi traitée dans cette expérimentation est constituée de plus de cent pièces (voir partie 6.3.2.2) lorsqu'elle est conçue par la méthode de décomposition pour une mise en panoplie sur panneaux. L'opération de mise en panoplie devient très chronophage lorsque le nombre d'éléments à traiter augmente significativement et ne propose pas des résultats optimisés. Cette observation est confirmée pour le plug-in *OpenNest* ainsi que pour l'algorithme utilisé dans le logiciel *TopSolid'Strato*. Le traitement de la mise en panoplie par l'opérateur humain, par positionnement manuel des éléments sur des panneaux, devient plus performant pour une durée équivalente, voire inférieure. Cette opération est identifiée comme un frein à la flexibilité et la rapidité de l'outil ; le temps consacré à la conception et à l'évaluation d'une solution est proche de celui requis pour l'opération de mise en panoplie. Ce résultat met en évidence la nécessité d'intégrer des règles pour minimiser les solutions possibles pour la mise en panoplie d'un grand nombre d'éléments.

L'accès aux données nécessaires à l'exécution complète de l'outil *TiWa(s)* requiert plusieurs actions :

- Les données liées au comportement mécanique des matériaux composant les parois réalisées par Stratoconception® ne sont pas caractérisées et nécessitent des mesures expérimentales. Ces données sont utilisées par l'opération d'évidement des strates ;
- Les données liées aux fabricants ne nous sont pas accessibles. Ces données comprennent notamment les coûts de production des matériaux, pour le cas du bois lamellé-collé, les coûts de fabrication des strates (usinage), ainsi que les coûts et des temps associés aux opérations de montage et de finition. Ces données dépendent de chaque entreprise et ne peuvent être connues par le concepteur dès la phase amont du projet. Cette observation souligne l'intérêt de caractériser des ratios entre les coûts des matériaux, les coûts de fabrication et les coûts de montage et de finition de manière à appréhender l'importance de ces données les unes par rapport aux autres et favoriser ainsi une comparaison des solutions de tranchage conçues sans nécessité le prix exact du composant à produire.

Ces données d'entrée sont absentes à l'outil *TiWa(s)* ce qui limite notre évaluation au calcul des données de consommation de matière et du nombre d'opérations d'assemblage, de manière à avoir une première compréhension des résultats des méthodes proposées.

6.3.2.2 Comparaison des solutions de tranchage proposées

L'expérimentation menée a permis la modélisation des géométries des strates ou des parties de strates pour leur fabrication pour plusieurs solutions étudiées qui représentent les différentes méthodes de traitement des strates identifiées : la décomposition pour une mise en panoplie sur panneaux, la fabrication de bruts de poutres en bois lamellé-collé. L'évaluation des consommations de matières et du nombre d'opérations d'assemblage est réalisée pour des strates non évidées. En effet, nous considérons que l'évidement sera équivalent à chacune des méthodes si nous ne considérons pas la

méthode de conception d'un système constructif mixte « *Stratoconception*[®] – Mur à ossature bois ». Pour la méthode de décomposition pour une mise en panoplie sur panneaux, le concepteur évalue plusieurs variations d'une solution utilisant des panneaux de lamibois (LVL) pour laquelle la longueur maximale des parties des strates est modifiée. Pour la méthode de fabrication de bruts de poutres en bois lamellé-collé, ce sont les types de bruts qui sont évalués : droit, courbe et à inertie variable. L'épaisseur des panneaux et du bois lamellé-collé est choisie de manière à minimiser le nombre de strates en garantissant une épaisseur totale de surfacage de deux centimètres sur l'ensemble de la structure. Les résultats produits par l'évaluation de l'outil *TiWa(s)* sont présentés dans le Tableau 2 et la Figure 91. Nous proposons une discussion de ces résultats de manière à appréhender la compréhension du champ d'application de chacune des méthodes.

Tableau 2. Résultats de l'évaluation des consommations de matière et du nombre d'opérations d'assemblage pour plusieurs solutions étudiées par le concepteur

	V _{pièce} (m ³)	V _{usiné} (m ³)	V _{chutes} (m ³)	V _{total} (m ³)	Rendement η	Nombre d'opérations d'assemblage
Panneau LVL - 69 mm (sans évidement) - l_{max} = 2.50 m	3.24	1.09	3.89	8.22	39 %	116
Panneau LVL - 69 mm (sans évidement) - l_{max} = 1.75 m	3.24	1.10	3.19	7.53	43 %	145
Panneau LVL - 69 mm (sans évidement) - l_{max} = 1.50 m	3.24	1.15	2.34	6.73	48 %	232
Bois lamellé-collé droit - 240 mm (sans évidement)	3.24	2.08	7.16	12.47	26 %	9
Bois lamellé-collé courbe - 240 mm (sans évidement)	3.24	2.08	2.44	7.76	42 %	9
Bois lamellé-collé à inertie variable - 240 mm (sans évidement)	3.24	2.08	1.03	6.35	51 %	9

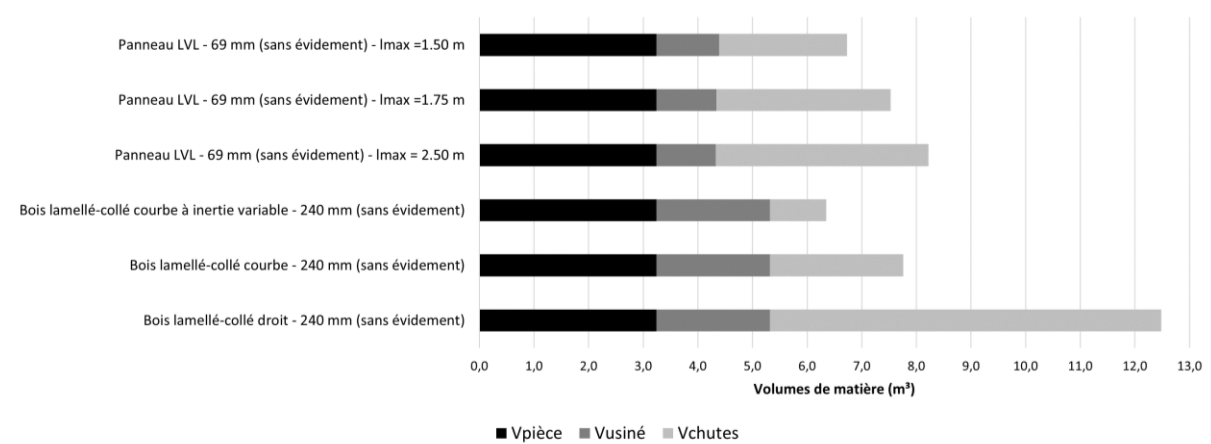


Figure 91. Représentation graphique des résultats de l'évaluation des consommations de matière pour les solutions étudiées par le concepteur

Discussion des résultats pour la méthode de fabrication des strates par des poutres en bois lamellé-collé

La donnée impactée par le changement de type de brut des poutres en bois lamellé-collé est le volume des chutes. Le choix du type de brut est essentiellement lié à la consommation de matière et donc au volume des chutes, les opérations de fabrication, de montage et de finition étant identiques quels que soient les types. Les poutres courbes et à inertie variable sont significativement favorables à une minimisation du volume des chutes en comparaison aux poutres droites et sont donc à privilégier si l'objectif du concepteur est la minimisation de la consommation de matière. Si l'objectif de la conception est la rationalisation économique de la fabrication, il faut considérer le coût de production des différents types de poutres en bois lamellé-collé en les associant à leur volume de matière consommée.

Nous observons que les volumes usinés sont importants en raison des fortes épaisseurs et de l'usinage 3D des strates. Cette méthode peut impliquer des temps de fabrication importants, comme l'a souligné la réalisation du projet *Body*, présenté en partie 1.1.1, qui a nécessité deux mois d'usinage en continu avec jusqu'à six passes par pièces (Berchtold, 2015). Ces temps d'usinage associés à la production de composants non-standards sont à évaluer, pour les fabricants, en considérant également les projets courants qui ne peuvent pas être traités durant cette période d'indisponibilité des moyens de fabrication.

Discussion des résultats pour la méthode de décomposition des strates en parties pour leur mise en panoplie

Les différentes solutions de décomposition des strates en parties sont basées sur une diminution du critère de longueur maximale des parties des strates. Trois données évaluées sont impactées par l'évolution de ce critère :

- Le volume des chutes qui diminue lorsque la longueur maximale des parties des strates diminue, ces parties favorisant une amélioration de leur imbrication par l'opération de mise en panoplie. ;
- Le nombre d'opérations d'assemblage augmente lorsque la longueur maximale des parties des strates diminue ;
- Le volume usiné qui augmente sensiblement lorsque la longueur maximale des parties des strates diminue en raison de l'augmentation du nombre d'éléments.

Afin de comparer les évolutions des volumes des chutes et du nombre d'opérations d'assemblage en fonction de l'évolution de la précision de la décomposition, nous estimons un ordre de grandeur des coûts de matière à 100€/m² pour des panneaux de lamibois d'une épaisseur de 69 mm, d'après des données collectées auprès de fournisseurs, et un ordre de grandeur des coûts de main d'œuvre associés à l'opération de montage à 40€/h. Pour notre cas d'expérimentation, l'économie réalisée par la diminution du volume des chutes entre les deux solutions extrêmes est équivalente à 54 h de travail alors que 116 opérations d'assemblage sont ajoutées. Nous manquons de données caractérisant les temps unitaires associés aux différentes opérations d'assemblage afin de caractériser l'influence des temps de montage et de la consommation de matière sur le coût final du projet. Nous pouvons

cependant postuler que la réduction de la consommation de matière devra être priorisée dans le cadre d'une minimisation des coûts de production des parois réalisées par décomposition des strates.

Discussion de la comparaison des méthodes

Les deux méthodes proposées et étudiées dans le cadre de cette expérimentation de l'outil *TiWa(s)* proposent des approches opposées : la décomposition des strates en parties implique l'assemblage d'un grand nombre d'éléments de petites dimensions, manuportables, pour la production d'une paroi alors que la fabrication de bruts de poutres en bois lamellé-collé implique la mise en œuvre de peu de strates de très grandes dimensions, avec l'aide de moyens mécanisés. Le grand nombre d'éléments à traiter nous font émettre l'hypothèse que la méthode par décomposition est particulièrement adaptée pour des parois de petites dimensions ou de dimensions intermédiaires alors que la méthode par fabrication de poutres en bois lamellé-collé est davantage adaptée pour des parois de grandes dimensions. Pour les deux méthodes, l'expérimentation menée montre que nous pouvons obtenir des consommations de matières similaires pour un même composant. Le choix de l'une des méthodes se rapporte alors à la comparaison des opérations de fabrication et de montage.

Nous soulignons que les rendements matières sont faibles pour la fabrication de parois par le procédé de *Stratoconception*[®]. Les solutions étudiées par le concepteur dans le cas d'étude de l'expérimentation produisent des rendements compris entre 40 et 50% sans considérer un évidement des strates. L'opération d'évidement des strates impactera fortement ce rendement matière. Nous identifions que la conception de systèmes constructifs mixtes, tels que le système « *Stratoconception*[®] – *Mur à ossature bois* » proposé, est à privilégier pour réduire les pertes matières associées aux opérations d'évidement, de manière à répondre aux enjeux environnementaux contemporains.

Chapitre 7. Développement d'une continuité informationnelle numérique

Le concept de continuum informationnel numérique vise le développement d'un flux informationnel favorisant un dialogue entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication d'un composant architectural par un échange de données facilité. Nous avons souligné que la traduction des données entre la conception architecturale, la conception d'ingénierie et la fabrication est actuellement lente, fastidieuse et source d'erreurs car faisant intervenir différents logiciels, formats de fichiers et méthodes de travail. Nous pouvons regrouper les logiciels utilisés dans le secteur de la construction en plusieurs catégories qui sont les logiciels de conception dédiés à l'architecture (*Revit, Archicad*, etc), les logiciels de modélisation (*CATIA, Rhinoceros3D, Blender*, etc), les logiciels de simulation (*RFEM, Pléiade*, etc) et les logiciels de fabrication (*Fusion, TopSolid*, etc). Ces logiciels sont commercialisés par des éditeurs différents qui ne développent généralement qu'une seule catégorie de logiciel et qui ne traitent donc pas directement une interopérabilité basée sur des liens directs entre des logiciels complémentaires. Cette fragmentation des outils numériques employés dans le secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction implique des échanges de données par des formats de fichiers propriétaires ou des formats de modèles de données de produits publiques. Les transferts d'informations entre les logiciels du secteur de la construction se basent alors sur l'envoi d'un ensemble de données liées au projet, ou aux composants traités, qui ne sont pas précisées par rapport aux besoins du destinataire qui procède à une phase de traitement des données reçues afin d'isoler celles qui lui sont nécessaires. Ces opérations d'export et d'import de fichiers et de traitement des données reçues freinent le développement d'une continuité informationnelle numérique entre l'ensemble des logiciels impliqués dans le processus de conception et de production d'un projet d'architecture, ou de composants architecturaux.

Dans un contexte différent, les éditeurs de logiciels des secteurs industriels ont développé des écosystèmes permettant la mise en place de liens directs et propriétaires entre les environnements logiciels impliqués dans un projet. Ces développements favorisent une collaboration entre les acteurs d'un projet dont les compétences sont complémentaires en permettant des échanges d'informations spécifiques aux besoins des destinataires. Un exemple est la plateforme *3DEXPERIENCE*, développée par *Dassault Systèmes* qui regroupe l'ensemble des parties prenantes d'un projet et leurs environnements logiciels de conception, de simulation et de production associés. La traduction des données est simplifiée, spécifiée et favorise une flexibilité des processus de travail bien que se limitant à un écosystème fermé. Ces développements font directement référence au concept de connectivité

ubiquitaire qui permet de connecter numériquement et continuellement un ensemble de technologies disponibles.

Dans la suite de nos travaux, nous proposons la mise en place d'une continuité informationnelle numérique, basée sur le concept de connectivité ubiquitaire, pour le processus de conception et de fabrication par Stratoconception® de composants architecturaux en implémentant la méthode *TADAM(s)*. La méthode proposée englobe l'ensemble des processus d'idéation, de conception et de fabrication d'un composant architectural et doit ainsi composer avec les différents acteurs du projet, principalement les architectes, les ingénieurs et les constructeurs. De plus, le développement d'outils d'aide à la conception a souligné l'intérêt d'utiliser des logiciels adaptés aux exigences du projet pour chacune de ces étapes. Ainsi, un logiciel de conception paramétrique est privilégié pour l'étape de conception de la géométrie de la pièce, nécessitant des études faisant évoluer la conception par itération, alors qu'un logiciel de *Fabrication Assistée par Ordinateur* est privilégié pour l'étape de conception du processus de fabrication, répondant aux exigences requises pour la génération des commandes machines. La continuité informationnelle numérique de la méthode ne peut pas se limiter à une solution implémentée dans un unique logiciel mais doit permettre l'articulation des flux de données échangées entre les différents logiciels utilisés dont les capacités sont différentes, complémentaires et adaptées à une étape du processus. Le développement d'une continuité informationnelle numérique comprend ainsi la gestion des échanges de données entre les acteurs du projet et l'interopérabilité entre les logiciels utilisés. Nous privilégions une interopérabilité basée sur la mise en place de liens directs entre différentes solutions logiciels, en dehors des écosystèmes propriétaires fermés, qui favorise le développement d'une continuité informationnelle numérique basée sur l'utilisation de plusieurs logiciels.

Dans ce chapitre, nous proposerons le développement d'une continuité informationnelle numérique adaptée à la méthode *TADAM(s)*, tenant compte de scénarios probables de collaboration autour d'un projet d'architecture dont des composants sont réalisés par Stratoconception® et des logiciels utilisés, particulièrement *Rhinoceros 3D* et son environnement de programmation visuelle *Grasshopper* pour l'étape de conception de la géométrie de la pièce et l'add-in *TopSolid'Strato* du logiciel *TopSolid* pour l'étape de conception du processus de fabrication par Stratoconception®. Nous procéderons ensuite à une mise à l'épreuve des solutions proposées à travers des cas d'application concrets.

7.1 Proposition de mise en place d'un continuum informationnel numérique

L'utilisation des logiciels *Rhinoceros3D – Grasshopper* et *TopSolid* implique, à l'heure actuelle, une rupture de la chaîne numérique entre les étapes de conception de la géométrie de la pièce et de conception du processus de fabrication par l'import de données géométriques dans un format de fichier STEP dans *TopSolid*. De même, le développement de la conception de la géométrie de la pièce implique des échanges de données entre l'architecte et l'ingénieur qui s'opère par des phases d'export et d'import dans des formats de fichiers propriétaires ou de modèles de données de produits publiques.

Dans cette partie, nous nous concentrons sur l'intégration, pour l'implémentation de la méthode *TADAM(s)*, de solutions permettant la mise en place de liens directs entre différentes solutions logicielles, et différents acteurs du projet, favorisant le développement d'une continuité informationnelle numérique. Pour cela, nous proposons plusieurs scénarios probables de collaboration autour d'un projet d'architecture dont les composants sont réalisés par *Stratoconception*®. Nous identifions les données pouvant être échangées entre les différents acteurs du projet, en fonction du scénario considéré. Enfin, nous recensons des solutions d'amélioration de la chaîne numérique actuelle favorisant le développement de liens directs entre les différents logiciels convoqués dans la méthode *TADAM(s)* et permettant la mise en place d'une continuité informationnelle numérique entre la conception architecturale et la fabrication numérique.

7.1.1 Identification des scénarios d'échange de données dans le projet

La recherche expérimentale menée nous a fait émerger des situations qui agissent comme des variables du processus de conception et de fabrication d'un projet architectural dont au moins un des composants est réalisé par *Stratoconception*®. Nous définissons ainsi trois situations :

- La conception du projet d'architecture se compose uniquement de composants réalisés par *Stratoconception*® ou la conception du projet d'architecture se compose de composants réalisés par *Stratoconception*® et de composants réalisés par d'autres moyens de fabrication ;
- La géométrie des composants est conçue pour une fabrication additive par *Stratoconception*®, en employant la méthode *TADAM(s)*, ou la géométrie de la pièce est conçue indépendamment du procédé de fabrication ;
- La conception de la géométrie des composants, développée pour une fabrication par *Stratoconception*® en employant la méthode *TADAM(s)*, est réalisée par un unique acteur ou par plusieurs acteurs dont les compétences sont complémentaires (architecte et ingénieur).

Nous émettons l'hypothèse que ces variables permettent la description, par leur combinaison, des scénarios probables de collaboration autour d'un projet dont au moins un des composants est réalisé par *Stratoconception*®. La définition de scénarios probables nous sert à l'identification des données échangées entre les acteurs du projet et entre les logiciels utilisés de manière à traiter ces transferts d'informations en développant une continuité informationnelle numérique basée sur la mise en place de liens directs. Dans la suite de cette partie, nous développons les scénarios résultant des combinaisons de ces variables en explicitant les données échangées entre les étapes et les acteurs du projet ainsi qu'en précisant les logiciels pouvant être utilisés.

7.1.1.1 Interopérabilité entre la conception du projet et la conception du composant

Nos travaux ont souligné que le procédé de Stratoconception® peut être utilisé dans le domaine de l'architecture et de la construction en bois pour concevoir des composants architecturaux non-standards, tels que des nœuds d'assemblage en bois, mais également pour concevoir des architectures complètes, en considérant la réalisation du projet *Sazae* de Kengo Kuma (voir partie 1.1.1.2). Ces différentes utilisations du procédé impactent les échanges de données intervenant dans la méthode *TADAM(s)* entre la conception du système et la conception de la géométrie du composant architectural traité par Stratoconception®. Nous nous concentrons ici sur l'interopérabilité entre les logiciels pouvant être utilisés pour la conception du projet et la conception des géométries des composants architecturaux non-standards à réaliser par Stratoconception®.

Dans le cas de la conception d'une architecture dont la fabrication des composants sera intégralement traitée par Stratoconception®, les données des géométries environnantes, définies dans la conception du système, ne seront pas directement liées aux géométries du projet mais à l'implantation de ce dernier sur son site. La conception du projet et des composants non-standards à réaliser par Stratoconception® sont confondus et peut ainsi s'opérer au sein d'un même logiciel, paramétrique. Il n'y a donc pas d'échanges de données géométriques numériques entre les étapes de conception du système et de conception initiale de la géométrie de la pièce, ici du projet.

Au contraire, des projets peuvent se limiter à la conception de quelques composants non-standards dont la fabrication sera réalisée par Stratoconception®, qui s'associent alors à d'autres composants réalisés par d'autres moyens de fabrication. Dans ce cas, la conception initiale de la géométrie des composants requiert la géométrie des composants qui leur sont environnants. Ces composants environnants sont définis dans le modèle 3D du projet architectural, développé dans un logiciel de conception architecturale (*Revit, Archicad, etc*), différent du logiciel de modélisation, paramétrique, privilégié pour la conception de la géométrie de composants non-standards. Dans la suite de nos travaux, nous choisissons le logiciel de conception architecturale *Revit*, en raison de sa forte utilisation et sa capacité d'adaptation à des projets BIM, ainsi que le logiciel de modélisation *Rhinoceros 3D - Grasshopper* que nous avons privilégié pour l'implémentation de la méthode *TADAM(s)*. Un échange de données géométriques s'effectue alors entre le logiciel de conception du projet et le logiciel de conception des composants non-standards (Figure 92).

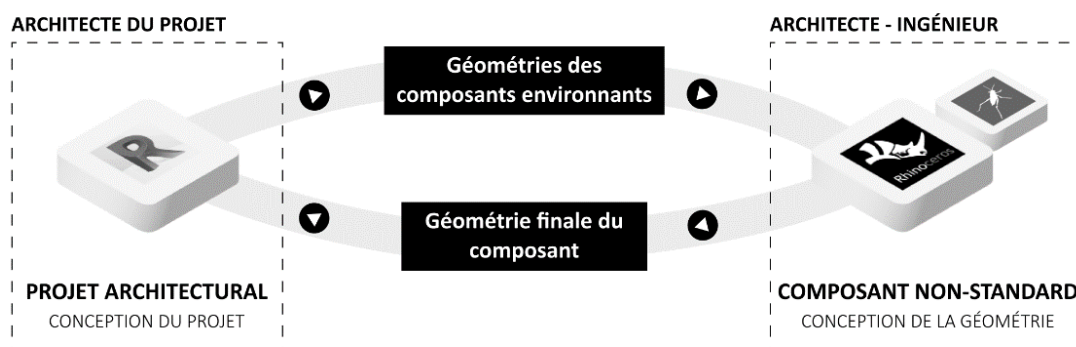


Figure 92. Exemple d'échange de données numériques entre la conception du projet architectural développée dans le logiciel de conception architecturale *Revit* et la conception des composants non-standards à réaliser par Stratoconception® développée dans le logiciel de modélisation paramétrique *Rhinoceros3D - Grasshopper*

Pour initier la conception de la géométrie des composants architecturaux non-standards, les géométries et le géoréférencement des composants environnants sont ainsi envoyés depuis le modèle du projet. Ces géométries comprennent le modèle 3D des composants environnants mais peuvent également être complétées par les entités géométriques qui ont servi à la génération de ce modèle 3D (points, plans, courbes et surfaces de référence). En effet, ces entités géométriques peuvent être requises par les règles de conception ou les opérations de traitement constituant l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)*. Par exemple, nous avons utilisé l'axe des barres constituant un treillis tridimensionnel, des courbes et non des volumes, pour l'opération de séparation en zones des nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels pour permettre un tranchage multiaxes (voir partie 5.1.3.1).

Une fois la conception de la géométrie du composant non-standard à réaliser par Stratoconception® finalisée, le modèle 3D du composant est envoyé vers le logiciel de conception du projet architectural afin de compléter son modèle. L'échange de données géométriques peut être complété par toutes les données, non-géométriques, associées aux résultats des évaluations du composant architectural intégrées à la méthode *TADAM(s)*.

7.1.1.2 Pluridisciplinarité et collaboration autour de la conception de la géométrie de la pièce

L'étape de la conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)* associe les compétences de l'architecte, de l'ingénieur et du constructeur. L'architecte conçoit, à minima, la géométrie initiale de la pièce qui sera étudiée, développée et rationalisée pour la fabrication par l'ingénieur. Le constructeur, quant à lui, informe l'architecte et l'ingénieur des capacités dimensionnelles des moyens de fabrication dont il dispose et partage les autres données nécessaires associées aux opérations de fabrication, de montage et de finition des composants. Les données échangées par le constructeur pour la conception de la géométrie de la pièce sont des données non-numériques.

Nous nous concentrons donc sur les échanges de données entre l'architecte et l'ingénieur dans l'étape de conception de la géométrie du composant non-standard réalisé par Stratoconception®. Pour cela, nous avons identifié trois scénarios d'articulation de leurs missions. Ces scénarios ont été établis à partir des situations recensées lors des expériences menées ainsi qu'à partir des résultats d'une étude qualitative, réalisée en complément, des pratiques numériques des bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards (Rederstorff et al., 2023). Les bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards traitent la conception de composants spécifiques du projet d'architecture. La mission attribuée à ces bureaux d'études peut s'assimiler aux pratiques que nous pourrions rencontrer pour la conception de composants architecturaux non-standards à réaliser par Stratoconception®, qui ne seraient pas directement réalisés par l'architecte du projet. Nous avons alors proposé une étude qualitative, basée sur six entretiens semi-directifs, nous permettant de poser un regard sur les pratiques numériques de ces bureaux d'études. Nous avons identifié un processus de travail global homogène par la description de l'articulation des pratiques numériques utilisées, en soulignant leur positionnement dans le processus de conception et en identifiant la manière dont elles interviennent dans la circulation de l'information entre les acteurs et les étapes du projet.

Bien qu'aucun projet architectural n'a été mené à ce jour en utilisant le procédé de Stratoconception® pour la production de composants non-standards, nous considérons ces scénarios comme représentatifs d'une réalité que nous pourrions rencontrer et assumons leur non-exhaustivité. Le

scénario 1 est représentatif des pratiques recensées dans l'étude menée auprès des bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards tandis que les scénarios 2 et 3 sont représentatifs des situations vécues dans les expériences menées.

Scénario 1 : L'architecte du projet ne traite pas la conception du composant non-standard.

La conception du composant non-standard est attribuée à un bureau d'étude qui propose une conception de la géométrie du composant à l'architecte répondant à l'expression architecturale du projet ou répondant à des intentions initialement explicitées et transmises par ce dernier. Cette configuration est, nous l'avons souligné précédemment, similaire à celle des missions des bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards, auxquels l'architecte attribue la conception de la façade du projet. Les échanges de données correspondent aux échanges entre la conception du projet architectural et la conception des composants non-standards à réaliser par Stratoconception® décrits dans la partie 7.1.1.1. Toute la conception de la géométrie de la pièce est réalisée par un concepteur dont nous émettons l'hypothèse que son profil est mixte, architecte-ingénieur, pouvant utiliser la méthode *TADAM(s)* au sein d'un unique logiciel de modélisation paramétrique, *Rhinoceros3D - Grasshopper*.

Scénario 2 : L'architecte du projet conçoit le composant non-standard sans tenir compte du procédé de fabrication.

Le procédé de Stratoconception® favorise la conception de composants architecturaux d'une grande liberté formelle. La méthode *TADAM(s)* a été proposée de manière à diriger le concepteur vers une solution tenant compte de son intention architecturale initiale tout en acceptant des variations des géométries initiales du composant de manière à répondre à des critères d'optimisation des performances, de faisabilité et de rationalisation de la fabrication.

Bien que cette démarche soit à privilégier, nous identifions également une démarche par laquelle le concepteur ne tient pas compte du procédé de fabrication dans la conception des géométries du composant traité. Dans ce cas, le logiciel de modélisation de la géométrie initiale du composant peut être différent de celui utilisé par l'ingénieur pour étudier les solutions possibles pour la fabrication de ce dernier par Stratoconception® (Figure 93). L'architecte transmet à l'ingénieur le modèle 3D du composant architectural à traiter. Ce modèle 3D ne comprend pas les entités géométriques qui ont permis la génération de ce modèle, telles que des points, des courbes ou des surfaces de référence. La méthode *TADAM(s)* est utilisée par l'ingénieur qui ne peut cependant pas agir, par rétroaction, sur la géométrie initiale du composant en proposant des modifications. Par conséquent, les règles de conception définies dans la méthode *TADAM(s)* ne peuvent pas s'appliquer automatiquement, certaines reposant sur des entités géométriques ayant participé à la génération du modèle. Dans cette configuration, l'ingénieur doit alors effectuer un traitement du modèle 3D reçu de manière à définir les données géométriques nécessaires pour le traitement de certaines tâches dont les règles de conception dépendent de ces données, non échangées. En fin de conception, le modèle 3D du composant architectural traité pour sa fabrication par Stratoconception® est transmis à l'architecte pour qu'il puisse l'intégrer dans son projet architectural.

La rupture de la continuité informationnelle numérique entre la modélisation de la géométrie du composant et sa conception pour sa fabrication par Stratoconception® ne favorise pas une conception

rationalisée basée sur des modifications, par rétroactions, de la géométrie initiale du composant. Pour ces raisons, cette configuration n'est pas considérée dans la suite de nos travaux, car elle ne permet pas une implémentation complète de la méthode TADAM(s).

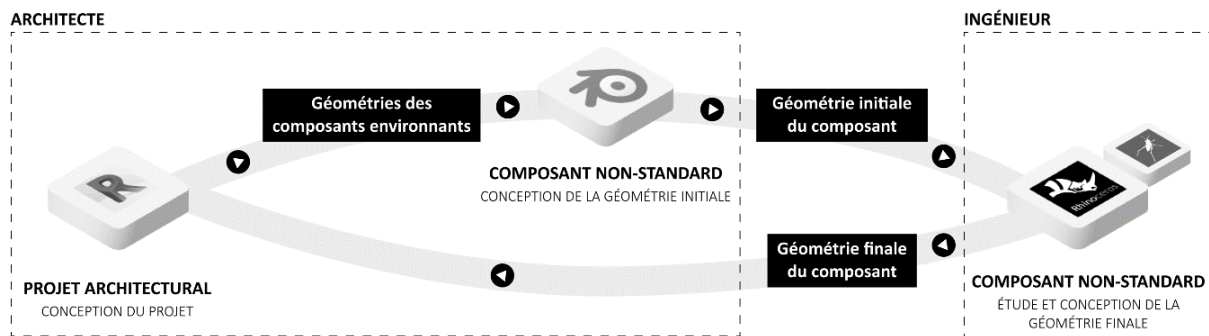


Figure 93. Exemple d'échange de données numériques pour la configuration où l'architecte du projet conçoit le composant à réaliser par Stratoconception® indépendamment de la méthode TADAM(s), dans un logiciel de modélisation choisi (ici, par exemple, Blender), en considérant les géométries des composants environnants, extraits du modèle 3D du projet architectural. L'ingénieur reçoit la géométrie initiale du composant proposée par l'architecte et la développe pour aboutir à sa géométrie finale, en suivant la méthode TADAM(s). La géométrie finale du composant est transmise à l'architecte pour qu'il puisse l'intégrer au modèle 3D du projet architectural.

Scénario 3 : L'architecte et l'ingénieur collaborent sur des tâches successives de la conception du composant non-standard.

L'architecte du projet réalise la conception initiale de la géométrie du composant non-standard que l'ingénieur développe, étudie et rationalise en proposant à l'architecte des modifications de la géométrie initiale. Cette configuration, contrairement à la précédente, permet l'application de la méthode TADAM(s) en utilisant le logiciel de modélisation Rhinoceros 3D avec son environnement de programmation visuelle Grasshopper par l'architecte et par l'ingénieur (Figure 94).

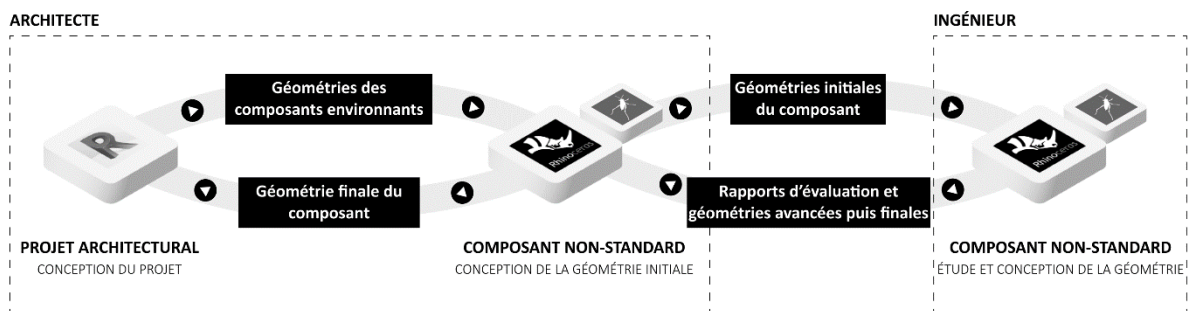


Figure 94. Échanges de données numériques pour l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode TADAM(s) dans les configurations où l'architecte et l'ingénieur travaillent conjointement à cette étape en utilisant tous deux un environnement de conception paramétrique, ici Grasshopper

L'architecte transmet à l'ingénieur les géométries initiales du composant ainsi que les géométries des composants environnants, qui seront nécessaires dans la suite du processus, par exemple pour les évaluations structurales. Ces données géométriques se composent des modèles 3D des composants mais également des entités géométriques sur lesquels reposent la génération paramétrique des modèles 3D nécessaires aux tâches effectuées par l'ingénieur. Ces éléments peuvent être des points, des courbes ou des surfaces de référence en fonction des typologies de composant et des opérations

traitées par l'ingénieur. Ainsi, les données échangées doivent être spécifiées et connues par les deux acteurs du projet, pour chaque typologie de composant. Après chaque tâche impliquant une modification de la géométrie initiale du composant, ou impactant son expressivité architecturale, l'ingénieur transmet à l'architecte les résultats des rapports d'évaluation générés ou le modèle 3D avancé du composant mis à jour. En fin de conception, il transmet la géométrie finale du composant traité pour que l'architecte puisse l'intégrer dans le modèle 3D du projet architectural.

Une variante de ce scénario est une répartition complète des tâches de la méthode *TADAM(s)* entre l'architecte et l'ingénieur. L'architecte, en plus de la conception des géométries initiales de la pièce, se voit attribuer les tâches répondant à des critères architecturaux. Ces tâches sont par exemple le tranchage de la pièce. L'ingénieur traite pour sa part les autres tâches, davantage techniques ou nécessitant des études.

Cette variante souligne l'importance d'une définition rigoureuse des échanges de données entre les acteurs pour chaque tâche de la méthode de manière à ne pas rompre la continuité informationnelle numérique. En fonction de la répartition des tâches et des typologies de composants traités, les données échangées évoluent et doivent être cohérentes avec les données requises par les règles de conception ou les opérations de traitement automatisant les tâches non-créatives. Cette définition rigoureuse des échanges forme des protocoles d'échanges et est nécessaire pour éviter le traitement par le concepteur d'un volume trop important de données dont certaines seraient inutiles à la tâche qu'il effectue. De même, un transfert d'informations incomplètes, au regard des besoins du destinataire, implique une définition manuelle de certaines données requises, rendant cette opération chronophage et inutile en considérant que ces données existent en amont de la tâche traitée. La mise en place de protocoles d'échanges apparaît ainsi comme essentiel pour répondre au concept de connectivité ubiquitaire visé.

7.1.1.3 Échanges entre la conception de la géométrie du composant et la conception du processus de fabrication

Nous considérons maintenant les échanges entre l'étape de conception de la géométrie de la pièce, menée comme nous l'avons souligné par l'architecte et l'ingénieur, et l'étape de conception du processus de fabrication, attribuée au constructeur. Quelle que soit la configuration de la collaboration entre l'architecte et l'ingénieur autour de la conception de la géométrie de la pièce, le constructeur reçoit les géométries finales du composant architectural à fabriquer par *Stratoconception*[®], constituées des modèles 3D des strates ou des parties de strates. Cet échange de données s'effectue entre deux logiciels distincts : *Rhinoceros3D – Grasshopper* et *TopSolid* (Figure 95). D'autres données, non-numériques, peuvent être transmises entre ces deux étapes, comme les paramètres définis pour les évaluations de la fabrication ou la nature et les dimensions des matériaux utilisés. L'échange de données intervient une fois que la géométrie finale du composant est définie et validée par des études mais peut être réactivé, à tout moment, en cas de modification de la géométrie du composant par les concepteurs.

Un dernier transfert de données s'opère entre les logiciels de fabrication assistée par ordinateur et les logiciels de programmation des commandes des centres d'usinage de la construction en bois. Les entreprises de la construction en bois utilisent des logiciels de programmation des commandes machines adaptés à leur savoir-faire et aux matériaux qu'elles traitent, comme *Lignocam*. *Lignocam*

importe et interprète des données d'usinage définies dans un format de fichier *BTL*. Ce format de fichier est établi comme un format d'échange standard pour la génération des commandes des machines à commandes numériques utilisées dans les entreprises de la construction en bois. Notre travail se limite à la définition des données d'usinage pour une fabrication par le procédé de Stratoconception®. Des travaux complémentaires sont nécessaires de manière à caractériser et traiter l'interopérabilité entre *TopSolid*, et son add-in *TopSolid'Strato*, et les logiciels de programmation des commandes machines utilisés par les entreprises de la construction en bois pour favoriser l'intégration du procédé dans les pratiques courantes de ces entreprises.

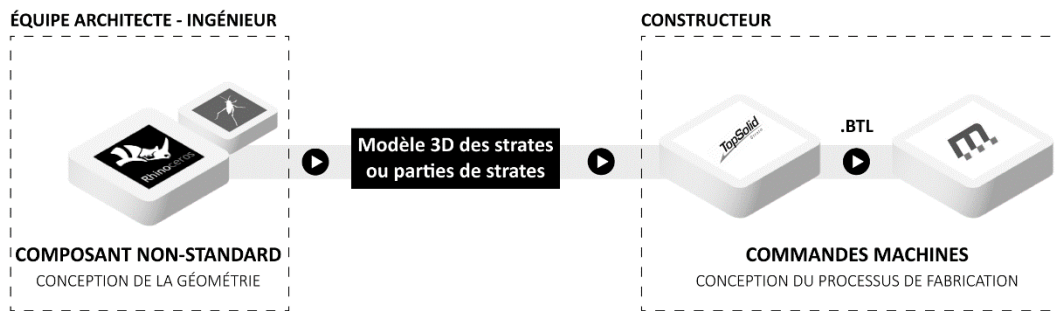


Figure 95. Échange des données numériques entre l'étape de conception de la géométrie de la pièce et l'étape de conception du processus de fabrication de la méthode TADAM(s)

7.1.1.4 Synthèse des types d'échanges

L'identification de scénarios probables de collaboration a fait émerger la présence de deux modes d'échanges de données :

- Un échange de données entre des logiciels différents : il s'agit des échanges entre le logiciel utilisé pour le projet architectural et le logiciel utilisé pour la conception de la géométrie du composant architectural traité ainsi qu'entre ce dernier logiciel et le logiciel de fabrication assistée par ordinateur. Ces échanges de données entre des logiciels différents n'impliquent pas nécessairement des échanges entre des acteurs différents.
- Un échange de données entre des acteurs du projet différents : il s'agit des échanges entre l'architecte du projet, l'architecte en charge de la conception du composant architectural traité, l'ingénieur et le constructeur. Ces échanges de données peuvent s'effectuer entre un même logiciel, particulièrement pour l'étape de conception de la géométrie de la pièce.

Les données numériques échangées sont principalement des données géométriques mais peuvent être complétées par des informations associées à ces entités géométriques, issues des rapports d'évaluations menées dans l'étape de conception de la géométrie de la pièce ou définies par le concepteur, telles que la nature des matériaux par exemple.

La description du scénario 3 a souligné l'importance de la mise en place de protocoles d'échange entre les acteurs du projet, quels que soient les logiciels utilisés. Ces protocoles d'échange permettront de connecter continuellement et automatiquement l'ensemble des logiciels utilisés par les acteurs du projet. Ces protocoles favoriseront ainsi une automatisation des tâches non-créatives ainsi qu'une flexibilité des processus de conception et de fabrication de composants architecturaux par Stratoconception®.

7.1.2 Proposition de solutions d'amélioration de la chaîne numérique actuelle

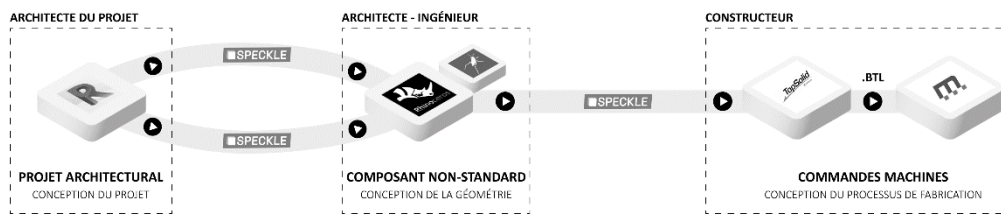
Les différents échanges de données recensés par l'identification de scénarios probables de collaboration réalisée précédemment reposent, à ce jour, sur des échanges par des formats de fichiers propriétaires ou de modèles de données de produits publics, impliquant des opérations d'export et d'import rompant le lien avec le modèle initial et ne permettant pas la mise en place d'une continuité informationnelle numérique. Notre étude bibliographique a cependant souligné le développement de recherches portant sur le développement d'une interopérabilité basée sur la mise en place de liens directs entre différents logiciels, en dehors des écosystèmes propriétaires fermés. Nous explicitons les développements de solutions s'articulant autour du logiciel *Rhinoceros3D* pouvant être utilisés dans l'implémentation de la méthode *TADAM(s)* et les positionnons dans le flux de données numériques associées à cette même méthode. Nous nous concentrons sur l'utilisation de deux solutions existantes :

- *Rhino.Inside* qui est une technologie qui permet à *Rhinoceros3D* de s'exécuter au sein d'un autre logiciel. Actuellement, le projet *Rhino.Inside* traite l'interopérabilité entre *Rhinoceros3D* – *Grasshopper* et *Revit*, *CADWork* et *TopSolid* (Ismail and Marin, 2022a). Nous privilégions cette solution pour des échanges de données entre des logiciels différents, utilisés par un même acteur du projet. Ces échanges de données se retrouvent dans les échanges entre le logiciel de modélisation du projet architectural (*Revit*, *Cadwork*) et le logiciel de modélisation de la géométrie initiale du composant traité (*Rhinoceros3D* – *Grasshopper*), s'il est réalisé par le même concepteur, ainsi que dans les échanges entre le logiciel de modélisation des strates ou parties de strates du composant traité (*Rhinoceros3D* – *Grasshopper*) et le logiciel de fabrication assistée par ordinateur (*TopSolid*), si l'ingénieur est intégré à l'entreprise de construction.
- *Speckle* qui est une technologie basée sur la communication des logiciels du secteur de la construction à l'aide de connecteurs agissant comme clients pour établir une connexion avec un serveur (Poinet et al., 2020). Nous utilisons cette solution pour des échanges de données entre les différents acteurs du projet, quels que soient les logiciels utilisés. Ces échanges de données se retrouvent dans la collaboration entre l'architecte du projet et l'ingénieur ainsi qu'entre l'ingénieur et le constructeur. Actuellement, le projet *Speckle* traite l'interopérabilité entre *Rhinoceros3D* – *Grasshopper*, *TopSolid*, *Revit*, *Blender* et d'autres logiciels du secteur de la construction.

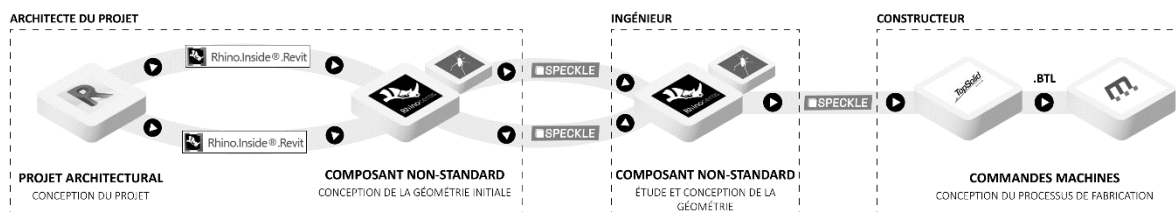
La combinaison de ces solutions favorise le développement d'une continuité informationnelle numérique, basée sur des liens directs sans exports et imports de fichiers, entre l'ensemble des logiciels, des acteurs et des tâches associés à la conception et à la fabrication numérique d'un composant architectural par *Stratoconception*[®]. Cette continuité informationnelle numérique trouve sa limite avec l'export dans un fichier BTL des données de fabrication pour la programmation des commandes machines adaptées à la construction en bois. Nous proposons, pour chacun des scénarios de collaboration, identifiés précédemment, l'implémentation de ces solutions (Figure 96).

Dans les représentations de la Figure 94, l'utilisation de *Revit* peut être remplacée par l'utilisation de *Cadwork* avec la solution associée *Rhino.Inside.Cadwork*. Les scénarios 3a et 3b se différencient par l'intégration, ou non, de l'ingénieur au sein de l'entreprise de construction. Un scénario où la gestion de la continuité informationnelle numérique serait simplifiée serait celui d'un projet architectural conçu dans *Rhinoceros3D* – *Grasshopper*.

SCÉNARIO 1



SCÉNARIO 3a



SCÉNARIO 3b

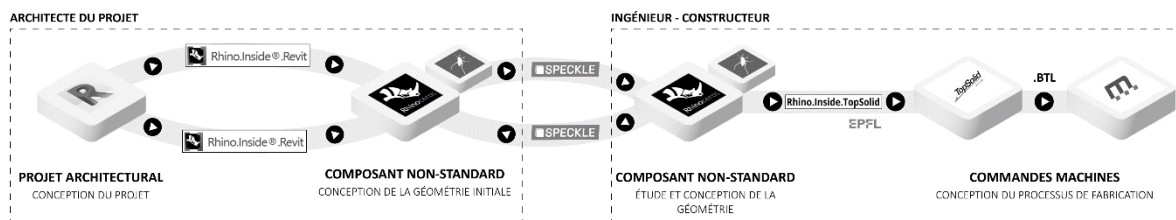


Figure 96. Proposition d'implémentation de solutions pour le développement d'une continuité informationnelle numérique de la méthode TADAM(s) pour des scénarios de collaboration identifiés

Quels que soient les liens directs mis en place, il est nécessaire de définir précisément les données à transférer entre des logiciels ou des acteurs pour chaque typologie de composant architectural à réaliser par le procédé de Stratoconception®. La caractérisation des échanges implique une communication et une coordination entre les acteurs du projet de manière à assurer une continuité informationnelle numérique, sans ruptures, minimisant les interventions manuelles du concepteur pour des tâches non-créatives de traitement des données reçues. Le diagramme d'activité de la méthode TADAM(s) identifie, de manière générale, les données échangées entre chacune de ses tâches constitutives ; une précision de ces dernières est requise pour des cas d'application caractérisés. Une approche simplificatrice serait de considérer que, par défaut, toutes les données géométriques générées en amont de la tâche considérée peuvent être transmises, bien que certaines ne soient pas utiles. Ces données comprennent les modèles 3D de l'avancement de la conception de la géométrie de la pièce mais également les entités géométriques générateurs de ces modèles 3D sur lesquels des règles de conception ou des opérations de traitement peuvent se baser. Cette approche n'est cependant pas à privilégier en raison du volume de données non requises pouvant être échangées engendrant un impact environnemental inutile.

7.2 Mise à l'épreuve du continuum informationnel numérique proposé

Afin de valider notre proposition d'implémentation de solutions pour le développement de la continuité informationnelle numérique de la méthode *TADAM(s)*, nous mettons en place une expérimentation. Cette expérimentation a pour objectif d'évaluer l'aptitude des solutions à assurer une continuité informationnelle numérique entre les logiciels et les acteurs impliqués dans le processus de conception et de fabrication numérique de composants architecturaux non-standards par Stratoconception®. De même, la flexibilité de la méthode implémentée est évaluée.

L'expérimentation se concentre particulièrement sur les scénarios 3a et 3b de la Figure 96 qui nous permet d'évaluer l'utilisation de deux solutions existantes, *Speckle* et *Rhino.Inside.TopSolid*. Une première expérimentation vise des échanges de données entre l'architecte, qui conçoit la géométrie initiale du composant architectural, et l'ingénieur, qui développe cette conception, notamment par des opérations de tranchage. La seconde expérimentation concerne des échanges de données entre *Rhinoceros3D-Grasshopper* et *TopSolid*, correspondant au transfert des géométries des strates et des parties de strates pour le traitement de leur fabrication. La flexibilité des solutions est évaluée par la capacité d'adaptation de la méthode implémentée lors des opérations de mise à jour des données d'entrée des tâches considérées.

Pour réaliser cette expérimentation, nous nous appuyons sur le projet développé dans le cadre de l'expérimentation de l'outil *TAN(s)*, présentée dans la partie 5.2. Nous nous concentrerons sur le traitement d'un unique nœud d'assemblage en bois.

7.2.1 Échanges de données dans l'étape de conception de la géométrie de la pièce

L'utilisation de *Speckle* est particulièrement intéressante pour des échanges de données dans l'étape de conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)* où l'architecte et l'ingénieur travaillent de manière collaborative. Afin d'évaluer la continuité informationnelle numérique de cette étape de la méthode, nous comparons un échange caractéristique de données géométriques effectué en utilisant *Speckle* et le traitement des mêmes tâches dans un unique logiciel, *Grasshopper*. En effet, ce second cas ne présente, par définition, aucune rupture de la continuité informationnelle numérique et est ainsi le cas le plus favorable. Nous décrivons les données échangées entre la tâche de conception de la géométrie initiale du nœud d'assemblage, traitée par l'architecte, et les tâches de séparation en zone et de tranchage de la géométrie, traitées par l'ingénieur (Figure 97). Ensuite, nous expérimentons ces échanges de données (Figure 98, Figure 99, Figure 100, Figure 101) et discutons les résultats obtenus.

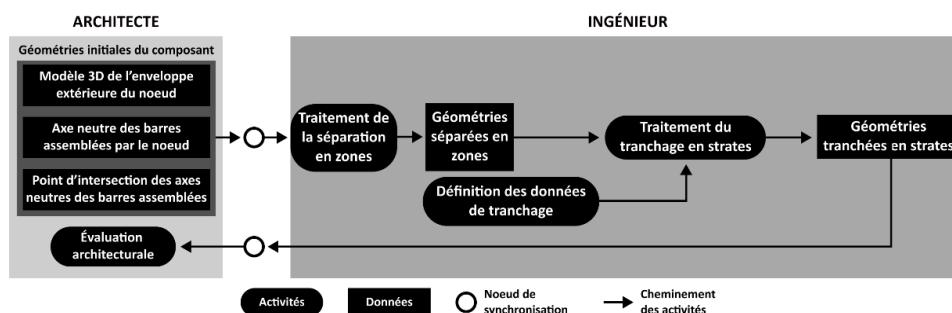


Figure 97. Diagramme d'activité de l'échange de données de l'expérimentation menée

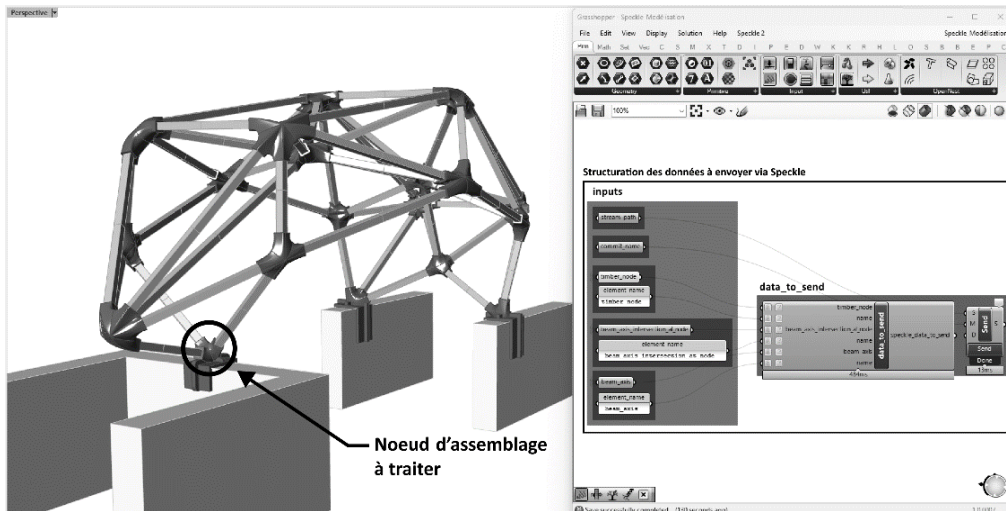


Figure 98. Structuration de l'envoi des données par Speckle entre la tâche de conception de la géométrie initiale du nœud d'assemblage traité et les tâches associées à sa séparation en zone et à son tranchage

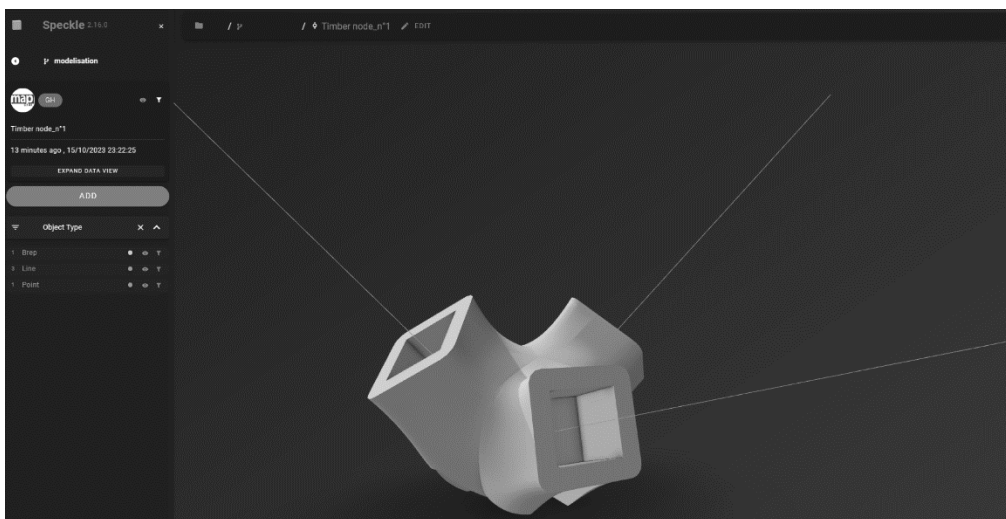


Figure 99. Partage des données géométriques sémantiques (Brep, ligne et point) sur la plateforme collaborative de Speckle, accessible en ligne via un navigateur

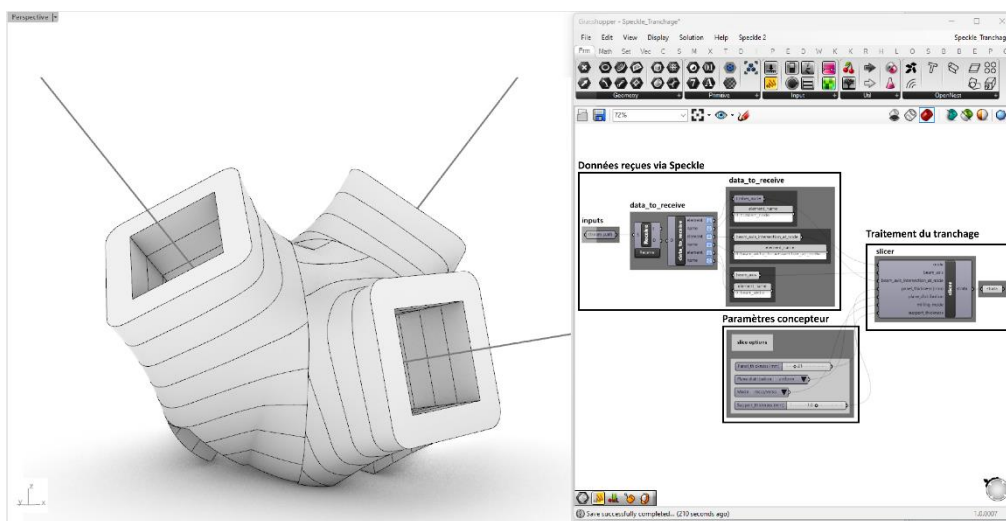


Figure 100. Réception des données structurées via Speckle et traitement automatique des tâches de séparation en zones et de tranchage multiaxes du nœud d'assemblage traité

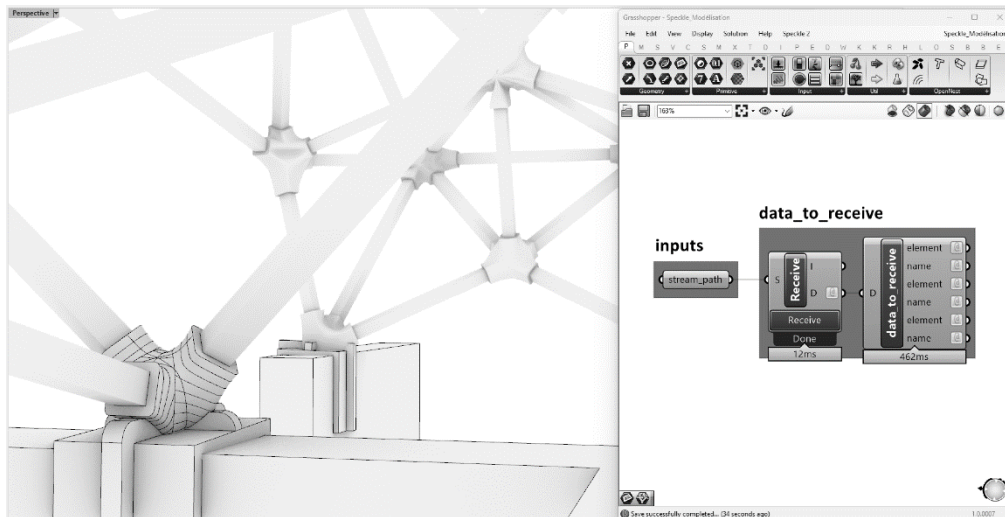


Figure 101. Renvoi via Speckle de la géométrie du nœud d'assemblage tranché, traitée par l'ingénieur, à l'architecte pour une évaluation de l'expression architecturale du tranchage

L'expérimentation réalisée nous a permis de valider l'utilisation de *Speckle* dans notre flux de travail pour développer une interopérabilité basée sur la mise en place de liens directs entre les logiciels utilisés par les différents acteurs collaborant autour de la conception de la géométrie du composant architectural à réaliser par *Stratoconception*®. Cette interopérabilité favorise une continuité informationnelle numérique, facilitant les transferts d'informations entre les différentes tâches de la méthode.

Dans notre expérimentation, l'ingénieur reçoit des données qui ne nécessitent pas de traitement particuliers pour être immédiatement exploitables dans son flux de travail. Au contraire, les données sont directement associées à des opérations constituant les tâches de séparation de la géométrie en zones de tranchage, en se combinant avec des paramètres manipulés par le concepteur. Cette association directe est similaire à celle que nous aurions pu observer en traitant toute la conception de la géométrie au sein d'un même logiciel, par un unique opérateur. Ainsi, les modifications des géométries initiales du composant, quelle que soit leur importance, engendrent une mise à jour automatisée des données associées aux tâches de séparation en zones et de tranchage, grâce à l'implémentation dans l'outil *TAN(s)* des règles de conception basées sur les géométries initiales du composant. Les interventions du concepteur se limitent à la modification des paramètres qui lui sont accessibles, ici les paramètres de définition des épaisseurs de tranchage. Les règles de conception et les opérations de traitement des géométries implémentées permettent donc une automatisation des tâches non-créatives qui accélèrent le processus de conception et favorise le développement de nombreuses variantes, sans être impactée par des modifications de la géométrie initiale et les échanges de données associés.

Nous avons ainsi pu conserver les intérêts de la conception paramétrique, particulièrement l'automatisation des tâches non-créatives et la flexibilité du processus de conception, malgré les échanges de données entre des acteurs du projet qui n'ont finalement pas d'impact sur la continuité informationnelle numérique de la méthode *TADAM(s)*. Cette continuité informationnelle numérique atteinte repose cependant sur une structuration des données spécifique avant leur envoi afin qu'elles soient exploitables et intelligibles dans le flux de travail du concepteur destinataire de ces données. Un non-respect de la structure des données mise en place rompt en effet la continuité

informationnelle numérique et implique une intervention manuelle du concepteur pour associer les données reçues aux opérations qui leur sont dépendantes. La structure des données doit être clairement définie, respectée et partagée entre les acteurs concernés par l'échange d'informations. Cette expérimentation souligne ainsi qu'une continuité informationnelle numérique est rendue possible par l'utilisation de *Speckle*. Cependant un travail de coordination important est à prévoir entre les acteurs du projet pour permettre cette continuité.

7.2.2 Échange de données entre les étapes de conception de la géométrie de la pièce et de conception du processus de fabrication

L'utilisation de *Rhino.Inside.TopSolid* est identifiée comme intéressant pour des échanges de données entre l'étape de conception de la géométrie de la pièce et l'étape de conception du processus de fabrication de la méthode *TADAM(s)*, lorsqu'elles sont effectuées par un même opérateur. Afin d'évaluer la capacité de cette solution à traiter la continuité informationnelle numérique entre les logiciels *Rhinoceros3D – Grasshopper* et *TopSolid*, nous réalisons un transfert des géométries des strates du nœud d'assemblage conçu en utilisant *Speckle* et *Rhino.Inside.TopSolid*. La conception du processus de fabrication est menée en s'appuyant sur l'add-in *TopSolid'Strato* et des mises à jour des géométries des strates sont opérées de manière à appréhender la flexibilité de la méthode. Nous décrivons l'échange de données (Figure 102), expérimentons ce transfert d'informations (Figure 103) puis discutons les résultats obtenus.

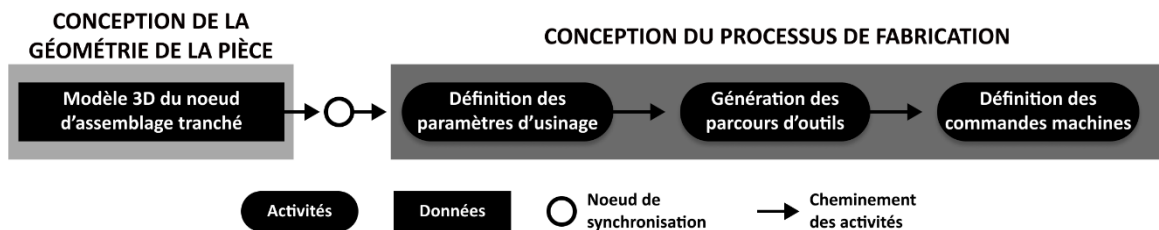


Figure 102. Diagramme d'activité de l'échange de données de l'expérimentation menée

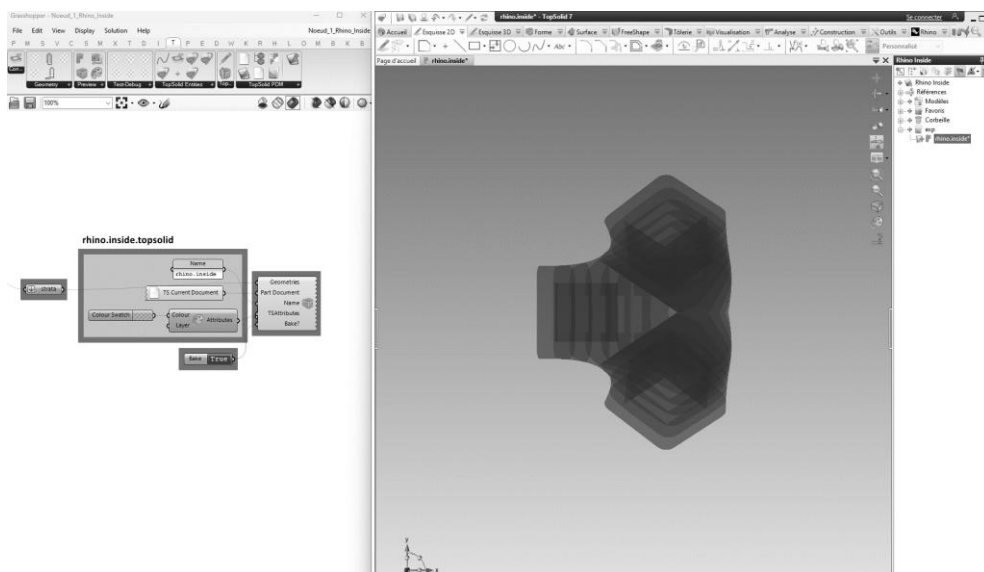


Figure 103. Envoi via *Rhino.Inside.TopSolid* des géométries des strates du nœud d'assemblage tranché entre les logiciels *Rhinoceros3D/Grasshopper* et *TopSolid*

L'expérimentation menée nous a permis de montrer que l'utilisation des solutions *Rhino.Inside.TopSolid* et *Speckle* permettent des échanges de données basés sur la mise en place de liens directs entre le logiciel associé à la conception de la géométrie de la pièce, *Rhinoceros3D – Grasshopper*, et le logiciel de conception du processus de fabrication, *TopSolid'Strato*, pour l'implémentation de la méthode *TADAM(s)*. Le transfert des géométries des strates ou des parties de strates du composant traité peut ainsi s'opérer sans phase d'export et d'import de fichier. Nous soulignons cependant une limite actuelle relative à l'utilisation de l'add-in *TopSolid'Strato* dans la méthode *TADAM(s)* et discutons la notion de continuité informationnelle numérique entre conception et fabrication.

Une limite identifiée est le lien actuel entre les données transmises depuis l'étape de conception de la géométrie de la pièce et les opérations traitées via l'add-in *TopSolid'Strato*. La méthode *TADAM(s)* induit le traitement de certaines opérations associées à la conception du processus de fabrication existant dès l'étape de conception de la géométrie de la pièce comme les opérations de séparation en zones, de tranchage, de décomposition et d'assemblage. Actuellement, l'add-in *TopSolid'Strato* nécessite le retraitement de ces opérations qui ne peuvent pas être considérées comme optionnelles si elles ont déjà été traitées. Le traitement des tâches de la conception du processus de fabrication fonctionne mais demande une répétition d'opérations déjà effectuées, impactant les temps associés à la conception ainsi que la flexibilité du processus.

Cette expérimentation, visant le développement de liens directs entre la conception et la fabrication d'un composant architectural à réaliser par Stratoconception®, fait émerger des questionnements relatifs aux limites de la continuité informationnelle numérique à développer pour l'implémentation de la méthode *TADAM(s)*. Nous avons défini la continuité informationnelle numérique comme le moyen d'assurer un dialogue entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication de manière à assurer une transition d'une forme géométrique abstraite vers une réalité constructive tenant compte des contraintes associées à cette matérialisation (voir partie 2.2.2.3). La méthode *TADAM(s)* nous a permis d'intégrer, dès l'étape de conception de la géométrie de la pièce, les contraintes de fabrication nécessaire par le traitement d'opérations liées à la transformation de la géométrie pour sa fabrication (séparation en zones, tranchage, décomposition, assemblage) et par le développement de moteurs d'évaluation assurant notamment la faisabilité de la géométrie abstraite modélisée. Par cette méthode, le concepteur est accompagné vers la traduction physique de la géométrie abstraite qu'il a initialement modélisée : il s'agit bien d'une conception de la géométrie du composant architectural pour sa fabrication par Stratoconception®. Nous avons montré que cette étape peut être traitée par un ou plusieurs acteurs du projet aux compétences complémentaires et peu impliquer un ou plusieurs logiciels, impliquant le développement d'une continuité informationnelle numérique entre les différentes tâches constitutives de la méthode.

Ainsi, si le développement d'une continuité informationnelle numérique est essentiel et nécessaire dans l'étape de conception de la géométrie de la pièce, elle n'est pas requise pour le transfert de données entre la conception de la géométrie de la pièce et la conception du processus de fabrication, cette étape n'impliquant pas de modifications des géométries, les contraintes liées à la fabrication par Stratoconception® ayant déjà été appliquées en amont de la conception. Ce transfert d'informations s'effectue alors que la géométrie finale du composant architectural traité est fixée. L'échange de données représente une occurrence, ou un nombre très faible d'occurrences en cas de modifications minimales de la conception. La conception du processus de fabrication est donc extérieure à la

transformation d'une géométrie abstraite vers sa réalité constructive au sein de laquelle une continuité informationnelle numérique est requise et peut être traitée en se basant sur un échange de données par des formats de modèles de données de produits publiques (STEP), rompant la continuité informationnelle numérique, ou par des liens directs entre les logiciels, comme nous l'avons montré dans cette expérimentation.

La continuité informationnelle numérique développée s'applique ainsi aux étapes de conception du système et de conception de la géométrie de la pièce de la méthode *TADAM(s)* mais n'intègre pas l'étape de conception du processus de fabrication (Figure 104). Nous avons montré que cette continuité informationnelle numérique peut s'appliquer pour un scénario où un concepteur utilise un unique logiciel mais également dans des scénarios où plusieurs concepteurs, aux compétences complémentaires, utilisent des logiciels différents, grâce à l'utilisation de solutions telles que *Speckle* ou *Rhino.Inside*. Une attention particulière sera alors portée à la structuration des données pour leur transfert entre les acteurs du projet et les logiciels utilisés de manière à assurer une bonne intégration de ces dernières dans la méthode *TADAM(s)* implémentée.

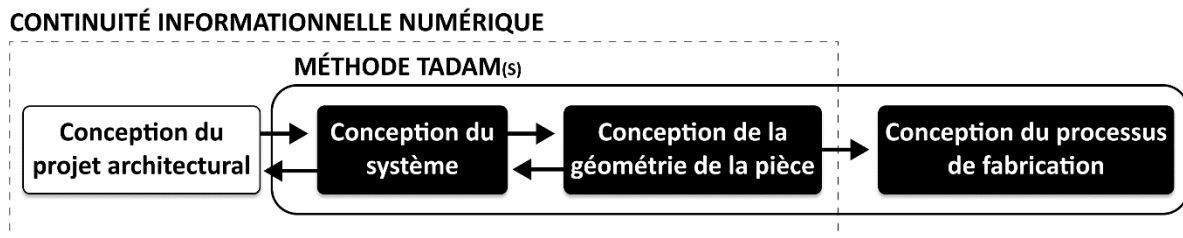


Figure 104. Définition des limites du développement de la continuité informationnelle numérique pour la conception et la fabrication de composants architecturaux non-standards d'un projet architectural à réaliser par *Stratoconception*® avec l'aide de la méthode *TADAM(s)*

Conclusion de la partie 3

La méthode *TADAM(s)* a été proposée dans le but de favoriser une conception pour la fabrication additive par Stratoconception® de composants architecturaux non-standards, multi-échelles, à usage structurel, en bois. Une évaluation de la méthode a été menée par son implémentation dans des outils *TAN(s)* et *TiWa(s)* associés aux cas d'application des nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels et des parois. Cette implémentation et les mises à l'épreuve des outils développés ont permis de souligner les gains apportés par la méthode au processus initial de conception et de fabrication numérique par Stratoconception® de composants architecturaux.

La méthode *TADAM(s)* favorise la mise en place d'une continuité informationnelle numérique liant la conception du projet, la conception des composants architecturaux à réaliser par Stratoconception® et leur fabrication numérique.

Nous avons montré la capacité de la méthode *TADAM(s)* à favoriser le dialogue entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication d'un composant architectural par l'intégration des contraintes associées à l'utilisation du procédé de Stratoconception® dès la phase amont de la conception de la géométrie du composant. Nous avons identifié que le développement d'une continuité informationnelle est requis, à minima, à l'étape de conception du projet architectural et de conception de la géométrie du composant architectural à réaliser par Stratoconception®. Le développement d'une continuité informationnelle numérique s'appuie alors davantage sur le développement d'outils d'aide à la conception intégrant les contraintes du procédé de Stratoconception® dans les logiciels adaptés à la conception architecturale plutôt que sur le traitement de l'interopérabilité entre des logiciels de conception architecturale et des logiciels de fabrication assistée par ordinateur traitant le procédé de Stratoconception®. L'expérimentation de l'utilisation de *Speckle* dans des scénarios de collaboration probables valide la mise en place de cette continuité par l'amélioration de l'interopérabilité des logiciels impliqués dans la conception du projet et dans la conception de la géométrie des composants architecturaux à traiter par Stratoconception®. Des travaux restent à mener pour caractériser et traiter l'interopérabilité entre *TopSolid*, et son add-in *TopSolid'Strato*, et les logiciels de programmation des commandes machines utilisées par les entreprises de la construction en bois pour favoriser l'intégration du procédé dans les pratiques courantes de ces entreprises.

La conception paramétrique favorise la conception rationalisée de composants architecturaux non-standards pour leur fabrication par Stratoconception®

Le développement des outils *TAN(s)* et *TiWa(s)* ont montré l'intérêt de l'utilisation d'une conception paramétrique pour implémenter la méthode *TADAM(s)*. Nous avons confirmé les gains de flexibilité apportés au processus de conception de la géométrie du composant architectural pour sa fabrication par Stratoconception® par le lien établi avec les règles de conception de la géométrie initiale du composant architectural traité et par l'automatisation des tâches non-créatives du processus. Le développement de règles de conception basées sur les géométries initiales du composant architectural permet une mise à jour automatisée des données lors de la modification des paramètres de la conception. De même, la variation des géométries des composants appartenant à une même typologie n'impactent pas les temps de conception. Nous avons ainsi souligné les possibilités de minimisation des interventions du concepteur pour la production de composants non-standards spécifiques et caractérisés. La flexibilité apportée permet au concepteur de concentrer son temps alloué au projet

sur des tâches créatives, à forte valeur ajoutée, tout en accélérant le processus de conception de la géométrie du composant traité de manière à maintenir compétitive la production par Stratoconception® de composants architecturaux non-standards.

La conception paramétrique favorise les opérations de recherche formelle, de matérialisation et d'études de rationalisation de la fabrication par Stratoconception® pour la conception de composants architecturaux non-standards. L'évaluation constante de la conception accompagne le concepteur vers des prises de décision informées. Le développement de l'outil *TAN(s)* a montré comment la conception paramétrique permet l'émergence de nouveaux composants architecturaux non-standards dont la conception peut être rationalisée par la possibilité de mise en place d'un processus de conception itératif intégrant les contraintes de fabrication du procédé de Stratoconception® et les exigences propres au domaine de l'architecture et de la construction. Cette approche pourra être transcrite pour le développement d'autres cas d'application d'utilisation du procédé de Stratoconception® dans le domaine de l'architecture et de la construction en bois.

Nous nous sommes cependant confrontés, lors de l'implémentation de la méthode *TADAM(s)*, à certaines limites actuelles de l'utilisation du procédé de Stratoconception® dans le domaine de l'architecture et de la construction en bois pour la production de composants non-standards à usage structurel. Des pistes d'évolution du procédé pour la réalisation de parois ont également été abordées.

Des travaux complémentaires sont nécessaires pour développer des moteurs d'évaluation de la conception.

Nous avons identifié la nécessité de mener des travaux de recherche complémentaires afin de caractériser et de quantifier des données relatives au comportement mécanique et à l'impact environnemental des composants architecturaux en bois réalisés par Stratoconception®. Ces travaux complémentaires favoriseront le développement de moteurs d'évaluation que nous pourrions intégrer aux outils *TAN(s)* et *TiWa(s)* implémentés. Ces moteurs d'évaluation permettront notamment l'application des méthodes d'évidement proposées et accompagneront le concepteur vers une rationalisation de la conception au regard des enjeux environnementaux, sociétaux et économiques contemporains.

Des évolutions apportées au procédé de Stratoconception® peuvent favoriser la conception de solutions rationalisées pour la fabrication de parois non-standards, multifonctionnelles.

Le développement de l'outil *TiWa(s)* a montré que des évolutions du procédé de Stratoconception® permettraient l'utilisation de nouveaux matériaux, adaptés à la réalisation directe de strates de grandes dimensions, ou de nouveaux systèmes constructifs qui pourraient être avantageux pour la réalisation de parois non-standards, multifonctionnelles, en bois. Des travaux complémentaires sont cependant nécessaires pour définir précisément le champ d'application de ces approches pour la réalisation de parois par Stratoconception®. De même, des travaux sont requis pour rationaliser le processus de production de parois, en portant une attention particulière à la minimisation des pertes de matières que nous avons identifiées comme un problème inhérent à ce procédé de fabrication additive que nous devons traiter pour répondre aux enjeux environnementaux contemporains.

Conclusion générale

L'utilisation croissante du numérique dans les pratiques de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction a permis la réunion de trois opportunités autour d'un contexte environnemental partagé : la conception d'architectures non-standards, l'utilisation du matériau bois en construction et les capacités du procédé de fabrication additive de Stratoconception® pour produire des pièces multifonctionnelles d'une grande complexité formelle.

Cette thèse présente la recherche, menée dans une visée exploratoire, se rapportant à l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception et la fabrication numérique de composants non-standards pour l'architecture et la construction en bois. Préalablement à ces travaux, nous avons émis l'hypothèse que l'utilisation de ce procédé de fabrication pourrait favoriser l'exploration de nouvelles potentialités de conception et de fabrication de composants architecturaux répondant à des exigences fonctionnelles cohérentes avec des enjeux contemporains tout en présentant une forte capacité d'adaptation aux moyens techniques et matériels de la construction en bois qui favorise son implémentation.

Méthode et contribution de la recherche

Le procédé de Stratoconception® ne s'appliquait pas, jusqu'à présent, à la conception et à la fabrication de composants architecturaux fonctionnels, à usage structurel, pouvant être de grandes dimensions. Dans un premier temps, nous nous sommes ainsi employés à constituer une base de connaissances des mécanismes et des problématiques de l'utilisation de ce procédé de fabrication dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois pour en comprendre les implications. Ainsi, nous avons développé une connaissance des opportunités de l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception d'architectures en bois en concentrant nos efforts sur la compréhension de l'attrait de l'utilisation de la fabrication additive dans le secteur de la construction puis sur l'identification des moyens techniques et matériels de la construction en bois favorables à l'utilisation de ce procédé. Ce dernier point nous a permis d'appréhender des premières problématiques relatives au changement d'échelle du procédé pour la réalisation de composants de grandes dimensions.

Nous avons par la suite confronté les pratiques de conception mises en place autour de l'utilisation actuelle du procédé de Stratoconception® aux pratiques de *Design for Additive Manufacturing* et aux pratiques de conception architecturale, particulièrement d'architectures non-standards, exercées dans un environnement numérique. Cette confrontation de pratiques différentes a fait émerger des problèmes relatifs à l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la conception de composants

architecturaux non-standards, particulièrement au regard du développement d'un *continuum informationnel numérique* qui s'oppose à l'ordonnement actuel des tâches associées à la conception et à la fabrication de pièces par Stratoconception®. Cet ordonnancement résulte de l'utilisation du procédé de Stratoconception® pour la fabrication de prototypes ou d'outillages, impliquant que la pièce finale ne sera pas réalisée directement par ce procédé. A l'inverse, la conception d'architectures non-standards a montré l'importance du développement d'une continuité informationnelle numérique visant la mise en place d'un dialogue continu entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication d'un composant architectural pour transformer une géométrie « *abstraite* » en une réalité constructive.

Ces premiers travaux de recherche ont été complétés par la mise en place d'expériences de « *conception-fabrication* » par Stratoconception® de composants architecturaux qui ont permis le recensement de cas d'applications prometteurs comme les nœuds d'assemblage en bois de treillis tridimensionnels et les parois multifonctionnelles.

Ces expériences ont également permis la validation d'hypothèses émises après les premiers travaux de recherche tout en identifiant de nouvelles problématiques par la mise à jour des données nécessaires au développement du processus de conception de composants architecturaux non-standards par Stratoconception®. Nous avons ainsi particulièrement souligné le manque d'efficacité du processus lorsqu'il doit développer une continuité informationnelle numérique avec les outils actuels de conception architecturale et composer avec un grand nombre d'itérations, chaque variante nécessitant des opérations d'échanges de fichiers et des interventions manuelles du concepteur pour traiter des tâches non-créatives.

Enfin, nous soulignons un manque d'évaluation des données du projet ne permettant pas des prises de décision informées par le concepteur ainsi que la nécessité de mettre en place des flux de travail adaptés à une conception de composants architecturaux multifonctionnels, à usage structurel, qui seront fabriqués directement par Stratoconception®. Bien qu'une grande liberté formelle soit permise par le procédé de Stratoconception®, la recherche formelle associée à la conception d'un composant architectural doit intégrer les contraintes de fabrication associées à l'étape d'usinage triaxial du procédé, sans quoi une conception non maîtrisée pourra engendrer des efforts, des impacts environnementaux et des coûts excessifs dans les processus de production.

Nous avons capitalisé les résultats de l'ensemble de ces travaux dans la proposition d'un modèle numérique théorique de conception de composants architecturaux pour leur fabrication par Stratoconception® traitant les problématiques rencontrées. La méthode *TADAM(s)* est ainsi établie dans le but de développer un continuum informationnel numérique fiabilisant la conception de composants architecturaux non-standards d'un point de vue technique, environnemental et économique. Elle se constitue de trois étapes liant la conception du projet architectural à la conception de la géométrie finale du composant, traitée par Stratoconception® et analysée par des moteurs d'évaluation, puis à la programmation des commandes machines exécutant la fabrication. La contribution de la méthode *TADAM(s)* par rapport au processus actuel expérimenté est l'intégration des tâches de tranchage et d'assemblage dans le processus de conception de la géométrie d'un composant architectural ainsi que le développement de moteurs d'évaluation, informant le concepteur sur la pertinence de ses choix.

Cette méthode, et son implémentation, soulignent l'intérêt de l'utilisation de la conception paramétrique dans le secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction pour la génération, l'interprétation technique, la rationalisation et la fabrication de composants architecturaux. La conception paramétrique est essentielle au développement d'une continuité informationnelle numérique dans la méthode *TADAM(s)* et favorise une grande flexibilité du processus de conception en facilitant l'automatisation de tâches non-créatives, augmentant le temps du concepteur mobilisable pour le traitement de tâches créatives, sources d'innovation.

Nous avons enfin développé deux outils d'aide à la conception implémentant tout ou partie de la méthode *TADAM(s)* : l'outil *TAN(s)*, appliquant la méthode pour la conception de nœuds d'assemblage en bois, et l'outil *TiWa(s)*, permettant la comparaison de systèmes constructifs de parois réalisées par Stratoconception en phase amont du projet. Les limites actuelles de ces outils résident dans leur champ d'application spécifique à des typologies de composants ainsi que dans le manque de données collectées, ou accessibles, permettant le développement de moteurs d'évaluation technique, notamment structurels, qui, par extension, ne permettent pas le traitement des opérations d'évidement des composants. Ces limites soulignent la nécessité d'initier des travaux de recherche complémentaires, étudiant particulièrement le comportement mécanique des composants architecturaux réalisés par Stratoconception®, favorisant le développement des outils *TAN(s)* et *TiWa(s)*. L'adaptation de ces outils à d'autres typologies de composants est également une perspective de développement à considérer.

Enfin, nous proposons une amélioration de la chaîne numérique actuelle par l'emploi de solutions basées sur le développement de liens directs entre les logiciels du secteur de la construction, particulièrement *Speckle*, pour le traitement de l'interopérabilité liée à la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans la conception d'un composant architectural à traiter par Stratoconception®. La collaboration entre les acteurs du projet repose alors sur la définition de protocoles d'échanges de données, faisant directement référence au concept de connectivité ubiquitaire que nous visons par l'implémentation de la méthode *TADAM(s)*. Des travaux restent à mener pour traiter l'interopérabilité des logiciels de fabrication assistée par ordinateur associés au procédé de Stratoconception et les logiciels de programmation des commandes machines utilisées par les entreprises de la construction en bois.

Principales conclusions et discussion des résultats de la recherche

Nos travaux se rapportent à l'utilisation d'une technologie, développée pour le secteur de l'industrie, dans le contexte spécifique de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction. Ce nouveau champ d'application du procédé de Stratoconception® implique son adaptation aux pratiques actuelles d'un secteur qui ne peut pas utiliser à l'identique des méthodes de travail présentes dans l'industrie. Bien que le secteur de la construction cherche à développer des parallèles avec des méthodes et des outils développées pour l'industrie (industrie 4.0 / construction 4.0 ; PLM / BIM ; etc), les spécificités de ce secteur montrent qu'il est impossible d'utiliser des modèles strictement identiques.

Nous avons validé la possibilité de concevoir des composants architecturaux non-standards, multifonctionnels et de les fabriquer par Stratoconception®. La chaîne numérique associée au procédé de Stratoconception®, lorsqu'il est utilisé pour réaliser directement des composants architecturaux, multi-échelles, à usage structurel, doit néanmoins s'adapter aux pratiques du secteur de l'architecture,

de l'ingénierie et de la construction, pour faciliter son adoption. Les expériences de « *conception-fabrication* » ont montré qu'il est ainsi préférable de favoriser le développement d'une flexibilité et d'une continuité informationnelle numérique entre l'étape de modélisation et l'étape de fabrication plutôt que de privilégier l'emploi de deux écosystèmes fermés, communiquant par des échanges de fichiers. Ces résultats confirment l'existence d'une influence mutuelle, démontrée depuis une dizaine d'années, des formes, des fonctions, des matériaux et des techniques de fabrication dès la phase amont de la conception d'un composant (Menges et al., 2016). Le procédé de Stratoconception® doit ainsi évoluer pour favoriser le développement de liens entre l'ensemble de ces données, dès la phase amont de la conception d'un composant architectural, pour éviter une absence de rationalisation de la production.

Nos travaux ont permis de discuter les limites à donner à la continuité informationnelle numérique. L'idée d'associer l'esquisse architecturale à la commande numérique des machines-outils est attrayante mais non nécessaire dans notre contexte. Nous avons souligné, par la proposition de la méthode *TADAM(s)*, que l'intégration des contraintes de fabrication dès la phase amont de la conception d'un composant architectural permet la gestion de cette continuité informationnelle numérique. Pour ce faire, la méthode *TADAM(s)* permet la validation de la faisabilité de la fabrication et en limitant les échanges de données entre les étapes de conception de la géométrie d'une pièce et de conception de son processus de fabrication. Ainsi, un seul échange de données est théoriquement requis entre l'étape de conception de la géométrie de la pièce et l'étape de conception du processus de fabrication qui peuvent s'opérer de manière séquentielle. Au contraire, le développement de la continuité informationnelle numérique entre la conception architecturale du projet et la conception de la géométrie du composant architectural est nécessaire.

Bien que ce procédé de fabrication additive favorise la conception de composants architecturaux d'une grande liberté formelle, de petites et de grandes dimensions, il est impératif de quantifier les efforts et les impacts de leur production pour répondre favorablement aux enjeux sociétaux, environnementaux et économiques contemporains. Ainsi, si la fabrication additive est attrayante pour la conception de nouvelles spatialités, favorisant des performances des bâtiments, nous devons également considérer l'impact du processus de production des architectures non-standards réalisées par Stratoconception®. Nous soulignons deux résultats particulièrement impactant de ce processus : la gestion des pertes de matières et les temps d'usinage. La production d'un composant architectural en bois par Stratoconception® implique plusieurs opérations de transformation du matériau liant le bois de l'arbre au bois mis en forme pour son utilisation dans l'architecture. Une mauvaise gestion de la consommation de matière implique des efforts, non maîtrisés et inutiles, liés à la production d'une matière transformée destinée à être perdue. L'usinage 3D du profil des strates, particulièrement des strates de grandes dimensions, induit pour sa part des temps d'usinage pouvant devenir très importants, impactant alors les coûts associés à la production de composants architecturaux non-standards par Stratoconception®. Ces temps d'usinage dépendent directement de la précision de la stratification, une précision élevée au regard de l'épaisseur de la strate, de l'ordre des précisions requises pour la production de pièces de petites dimensions pour l'industrie, engendrant des longueurs de parcours d'outils très importants. Une relation existe entre la précision de la stratification, les temps d'usinage, les temps de finition et les coûts indirects associés à l'arrêt de la production de composants standards pour le marché de la construction en bois induit par l'utilisation des machines pour la production de composants par le procédé de Stratoconception®. Des études sont

à mener pour déterminer quelle combinaison de ces paramètres favorise la viabilité économique de la production des composants architecturaux non-standards, particulièrement de grandes dimensions. Le développement de moyens d'évaluation et de quantification de ces données est ainsi primordial pour valider l'intérêt et favoriser la rationalisation de la production de composants non-standards par Stratoconception®. Nous postulons ainsi que la méthode *TADAM(s)* est un support adéquat pour accompagner les concepteurs vers le développement de projets utilisant le procédé de Stratoconception® cohérents avec les enjeux contemporains mis en avant.

L'optimisation topologique mise en avant par la fabrication additive ne s'applique ainsi pas « telle qu'elle » lorsque nous utilisons le procédé de Stratoconception®. Nous devrions plutôt considérer une optimisation de la forme qui considère les performances environnementales et économiques associées au processus de production et non pas uniquement les performances structurelles ou thermiques généralement mises en avant. Ces considérations pourront orienter le concepteur vers certaines typologies de formes de composants au sein desquelles il pourra exprimer sa créativité.

Le développement de solutions rationnelles pour la production de composants architecturaux de grandes dimensions pourra impliquer une adaptation du procédé de Stratoconception® favorisant l'utilisation de nouveaux matériaux ou la création de nouveaux systèmes constructifs qui pourraient être avantageux, notamment pour la réalisation de parois non-standards, multifonctionnelles, en bois.

Perspectives de la recherche

Nos travaux de recherche, à visée exploratoire, ont soulevé de nouvelles questions de recherche qu'il sera nécessaire de traiter, pour certaines, afin de permettre l'adoption du procédé de Stratoconception® dans les pratiques courantes de l'architecture et de la construction en bois.

Une première perspective de la recherche est l'étude du comportement mécanique des composants architecturaux réalisés par Stratoconception® de manière à valider leur usage structurel et permettre le développement de moteurs d'évaluation structurelle dans les outils implémentant la méthode *TADAM(s)*. Le développement de travaux relatifs au dimensionnement de nœuds d'assemblage en bois réalisés par Stratoconception® est ainsi une perspective à fort intérêt dont les résultats pourront s'étendre au-delà du cadre de nos travaux, nécessitant des études portant sur la recherche de critères de dimensionnement pour un calcul volumique d'une pièce en bois, les critères adaptés aux matériaux homogènes isotropes ne pouvant être appliqués pour le matériau bois en raison de son orthotropie, de son hétérogénéité et de sa lamellisation lorsque nous considérons des bois d'ingénierie.

Ces travaux de recherche favoriseront la quantification et la classification des méthodes d'assemblage des parties des strates entre-elles, des strates entre-elles, des zones entre-elles ou des composants architecturaux au système. L'étude du comportement mécanique pourra s'orienter vers l'amélioration des performances de typologies de composants architecturaux spécifiques, notamment les nœuds d'assemblage en bois qui présentent un fort potentiel pour la réalisation de structures réticulées. De façon similaire la mise en place d'étude de l'impact environnemental de la conception numérique et de la production de composants architecturaux non-standards par Stratoconception® est souhaitable. Nous avons souligné un manque de données bloquant le développement de moteurs d'évaluation environnemental dans les outils implémentant la méthode *TADAM(s)*.

L'implémentation de la méthode *TADAM(s)* s'est effectuée pour des cas d'applications spécifiques et n'a pas concerné l'entièreté des tâches qui la constitue. Ainsi, la méthode doit être éprouvée par des concepteurs aux profils pluridisciplinaires, architectes, ingénieurs et constructeurs, de manière à identifier les modifications et les compléments à apporter. De même, les outils *TAN(s)* et *TiWa(s)* devront être mis à l'épreuve en situation de conception de projets pour être évalués et améliorés. Enfin, l'étude de nouveaux cas d'applications favorisera l'enrichissement de ces outils.

Une autre perspective de la recherche se rapporte à l'étude approfondie des systèmes constructifs de parois non-standards réalisées par Stratoconception®. Nous avons proposé dans nos travaux des évolutions possibles du procédé de Stratoconception® pour favoriser la conception de systèmes constructifs rationalisés mais celles-ci doivent être quantifiées, comparées et complétées. D'autres orientations de la recherche pourront porter sur la multifonctionnalisation des parois, particulièrement la gestion des performances thermiques, acoustiques, hygroscopiques ainsi que de résistance et de réaction au feu. En ce sens, des travaux ont été initiés avec le projet *Mycobat*, qui vise l'isolation de parois libres formellement par des myco-composites (LUE, 2023).

Une limite de notre travail est l'absence de traitement du champ de la recherche se rapportant à l'implémentation du procédé de Stratoconception® dans les pratiques des entreprises de la construction en bois. Le projet *Stratobois* complétera nos travaux en se concentrant sur l'intégration du procédé dans les pratiques de deux entreprises de la construction en bois, Charpente Houot et Weisrock Vosges. Le processus d'adoption d'une innovation dans le secteur de la construction pourra ainsi être observé. L'étude de l'adaptation de la chaîne numérique aux logiciels de programmation des commandes machines des entreprises de la construction en bois pourra ainsi être abordé. De même, des travaux relatifs à l'usinage, particulièrement à la notion d'ablocage des strates, sont une orientation de développement.

Ces perspectives de la recherche identifiées favoriseront l'adoption du procédé de Stratoconception® dans les pratiques courantes de l'architecture et de la construction en bois ainsi que l'exploration par les architectes, les ingénieurs et les constructeurs des potentiels inhérents à la fabrication additive pour améliorer les approches actuelles de conception en répondant aux enjeux contemporains.

Liste des figures

FIGURE 1. STRATIFICATION SELON DEUX DIRECTIONS DE LA GEOMETRIE COMPLEXE DU PROJET METROPOL PARASOL DE SEVILLE. D'APRES (BIGNON, 2021).	14
FIGURE 2. TORE PLISSE REALISE PAR L'ASSEMBLAGE DE STRATES DECOUPEES PUIS USINEES (CACHE, 1996).	15
FIGURE 3. ESPACEMENT DES STRATES SOULIGNANT LA TECHNIQUE CONSTRUCTIVE. PROJET D'AMENAGEMENT INTERIEUR CONÇU PAR KENGO KUMA (A GAUCHE) ET DE RENOVATION DE BUREAUX CONÇUE PAR DECOI ARCHITECTS (A DROITE). DISPONIBLES A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NAG8 ET A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NAGE [CONSULTEES LE 13 SEPTEMBRE 2023]	16
FIGURE 4. JEUX D'OMBRES ET DE LUMIERES GENERES PAR LA FORME DU PROJET SAZAE A SANA MANE AU JAPON (A GAUCHE) ET PAR LA TECHNIQUE DE CONSTRUCTION PAR EMPILEMENT DE STRATES AU PROFIL DECOUPE EN 2D (A DROITE). DISPONIBLES A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NAGB [CONSULTEE LE 13 SEPTEMBRE 2023]	16
FIGURE 5. FINE DISCRETISATION DU MODELE NUMERIQUE DANS SA MATERIALITE PHYSIQUE APPORTANT UNE CONTINUTE VISUELLE DU PROFIL DES STRATES : PAR UTILISATION DE STRATES DE FAIBLE EPAISSEUR DANS LE PROJET MAFOOMBAY (A GAUCHE) ET PAR UTILISATION D'UN USINAGE 5 AXES DANS LE PROJET BODY (A DROITE). DISPONIBLES A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NAGJ ET A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NAGS [CONSULTEES LE 13 SEPTEMBRE 2023]	17
FIGURE 6. CLASSIFICATION DES SEPT FAMILLES DE PROCEDES DE FABRICATION ADDITIVE NORMALISEES PAR L'ISO/ASTM 52900:2021 (ISO/ASTM, 2021) PAR L'ETAT PHYSIQUE DE LEUR MATERIAU DE BASE. ILLUSTRATIONS ADAPTEES DE (WIBERG, 2021).	18
FIGURE 7. FABRICATION PAR LE PROCEDE FFF DU PROJET BIOHOME3D. LA FABRICATION REPOSE SUR L'UTILISATION D'UNE SOLUTION D'IMPRIMANTE SUR PORTIQUE D'UNE CAPACITE DIMENSIONNELLE DE 30 M X 6 M X 3 M. DISPONIBLE A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NAGW [CONSULTEE LE 13 SEPTEMBRE 2023]	19
FIGURE 8. PROCEDE DE STRATOCONCEPTION®. LOGICIELS, MARQUES ET BREVETS – CLAUDE BARLIER – CIRTES – FRANCE – STRATOCONCEPTION®, STRATOCONCEPT®, STRAT®, PACK&STRAT®	21
FIGURE 9. COMPLEXITE GEOMETRIQUE DES PROJETS REALISES PAR DES PROCEDES D'EXTRUSION DE MATERIAUX : LE PROJET THE CHICON HOUSE REALISE PAR ICON AUX ETATS-UNIS PRESENTE DES PAROIS COURBES (A GAUCHE) ; LE PROJET GAIA REALISE PAR WASP EN ITALIE PRESENTE DES PAROIS DONT LA STRUCTURE EST ALVEOLAIRE (A DROITE). DISPONIBLES A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NFQC ET A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NFQF [CONSULTEES LE 13 SEPTEMBRE 2023]	23
FIGURE 10. LIBERTE FORMELLE EXPERIMENTEE A DIFFERENTES ECHELLES : SYSTEME DE REVETEMENT DE FAÇADE SEED STITCH MIS EN ŒUVRE DANS LE PROJET CABIN OF 3D PRINTED CURIOSITIES PAR EMERGING OBJECTS (A GAUCHE) ET MX3D SMART BRIDGE (A DROITE). DISPONIBLES A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NFQI ET A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NFQQ [CONSULTEES LE 13 SEPTEMBRE 2023]	24

FIGURE 11. PROJET (ULTRA) LIGHT NETWORK COMPRENANT DES NŒUDS D'ASSEMBLAGE INTEGRANT UN SUPPORT D'ECLAIRAGE. DISPONIBLE A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NFQU [CONSULTEE LE 13 SEPTEMBRE 2023].....	24
FIGURE 12. ÉVOLUTION DES TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION DE LA CONSTRUCTION EN BOIS EN FONCTION DES PARAMETRES SYSTEME SUIVANT : ENERGIE, MATERIAUX ET INFORMATION. ADAPTE D'APRES (SCHINDLER, 2007).	27
FIGURE 13. À GAUCHE : LES MARQUES DE CHARPENTIER PERMETTENT D'IDENTIFIER LES PIECES LORS DU MONTAGE, CHAQUE PIECE CORRESPONDANT A UNE UNIQUE SECONDE (ROLAND, 2008) ; À DROITE : UNE LIBERTE FORMELLE EST ASSOCIEE AU TRAVAIL MANUEL, ICI DANS UN TRAVAIL D'ORNEMENTATION DU SOMMET DES PILIERS CORNIERS DE MAISONS A PAN DE BOIS A AUXERRE EN FRANCE (BURGUIERE-LABRUNIE, 2003).	28
FIGURE 14. BUGA WOOD PAVILION REALISE PAR L'ICD EN COLLABORATION AVEC L'ITKE DE L'UNIVERSITE DE STUTTGART. LE PROJET EST REALISE AVEC UNE PATEFORME DE FABRICATION ROBOTISEE D'ASSEMBLAGE ET DE FRAISAGE DES COMPOSANTS DE LA COQUE EN BOIS SEGMENTEE MATERIALISANT LE PAVILLON. LA FLEXIBILITE DE PRODUCTION DES TECHNOLOGIES DES OUTILS DE L'INFORMATION PERMET LA CREATION DE NOUVELLES SPATIALITES (WAGNER ET AL., 2020).	30
FIGURE 15. REPRESENTATION PROPOSEE DES TECHNOLOGIES DE TRANSFORMATION IMPLIQUEES, EN SE COMPLETANT, DANS LA REALISATION COURANTE DE PIECES PAR LE PROCEDE DE STRATOCONCEPTION®. LES TECHNOLOGIES DES OUTILS DE L'INFORMATION PERMETTENT LA TRANSFORMATION DU PANNEAU EN STRATES ALORS QUE LES TECHNOLOGIES DES OUTILS A MAIN PERMETTENT LA TRANSFORMATION DES STRATES EN PIECE FINIE.	31
FIGURE 16. VARIABILITE DE LA DENSITE ENTRE LE BOIS INITIAL (DE PRINTEMPS) ET LE BOIS FINAL (D'ETE) (SIMON, 2009).	32
FIGURE 17. REPRESENTATION DE L'ORIENTATION DE LA STRUCTURE DU BOIS AUX ECHELLES MACROSCOPIQUE (A), MESOSCOPIQUE (B) ET MICROSCOPIQUE (C). ADAPTE D'APRES (NORIMOTO AND GRIL, 1989).	33
FIGURE 18. CHAINE DE TRANSFORMATION DES BOIS D'INGENIERIE. D'APRES (RAMAGE ET AL., 2017)	34
FIGURE 19. REPRESENTATION DES EPAISSEURS DISPONIBLES PAR TYPE DE PANNEAUX (A) ET TRANCHAGE D'UNE SPHERE D'UN DIAMETRE DE 2 METRES SELON LES EPAISSEURS MAXIMALES DISPONIBLES PAR TYPE DE PANNEAUX ; L'EPAISSEUR DE PANNEAU EST EGALE A L'EPAISSEUR DE LA STRATE (B)	37
FIGURE 20. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DES STRATES (HS) PAR RAPPORT A LA HAUTEUR DE LA PIECE (HP) SUR LE VOLUME A USINER...37	37
FIGURE 21. RESULTAT DU TRANCHAGE D'UNE PAROI LIBRE FORMELLEMENT. LA GEOMETRIE DES STRATES OBTENUES EST COMPARABLE A LA GEOMETRIE D'UNE POUTRE A DOUBLE COURBURE REALISEE EN BOIS LAMELLE-COLLE.	38
FIGURE 22. REPRESENTATION DES PARAMETRES INTERVENANT DANS LA DEFINITION DU RAYON DE COURBURE MINIMAL DU BOIS LAMELLE-COLLE. D'APRES (EN 1995-1-1, 2004).	38
FIGURE 23. EXEMPLES DE CENTRES D'USINAGE DE L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION EN BOIS D'UNE CAPACITE DIMENSIONNELLE DE PLUSIEURS METRES DE LARGE ET PLUSIEURS DIZAINES DE METRES DE LONG, UTILISES POUR LA TAILLE DE CHARPENTE (A GAUCHE) ET POUR LA REALISATION DE POUTRES EN BOIS LAMELLE-COLLE A DOUBLE COURBURE (A DROITE). PHOTOGRAPHIES DE L'AUTEUR.	39
FIGURE 24. ASSEMBLAGE D'UN FAIBLE NOMBRE DE PIECES DE GRANDES DIMENSIONS DANS LE PROJET BODY, DE EICHINGER OFFICES (A GAUCHE) ET D'UN GRAND NOMBRE DE PIECES DE PETITES DIMENSIONS DANS LE PROJET SAZAE (A DROITE). DISPONIBLES A L'ADRESSE : HTTPS://URLZ.FR/NFQF ET A L'ADRESSE : [CONSULTEES LE 13 SEPTEMBRE 2023]	41
FIGURE 25. DEFINITION DE L'UTILISATION DE LA MATIERE DANS LA MISE EN PANOPLIE DES PIECES SUR DES MATERIAUX SOUS FORME DE PANNEAU DANS LA PHASE DE FABRICATION DU PROCEDE DE STRATOCONCEPTION®	42

FIGURE 26. ÉTAPES CHRONOLOGIQUES DU PROCESSUS DE DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING EXPLOREES DANS LES TRAVAUX DE RECHERCHE SELON WIBERG. ADAPTE D'APRES (WIBERG ET AL., 2019)	48
FIGURE 27. ZONES ACCESSIBLES ET INACCESSIBLES A L'OUTIL EN RAISON DE LA TAILLE DE L'OUTIL ET EN RAISON DE LA PRESENCE, MEME APRES RETOURNEMENT, DE SURFACES EN CONTRE-DEPOUILLE. ADAPTE D'APRES (LAUVAUX, 2005).....	50
FIGURE 28. SEPARATION EN ZONES DE LA GEOMETRIE D'UNE PIECE POUR REALISER DES GEOMETRIES INTERNES INACCESSIBLES (A), POUR REALISER UN TRANCHAGE MULTIAXES (B), POUR UTILISER DIFFERENTS MATERIAUX (C) ET POUR FACILITER L'ACCESSIBILITE D'UNE ZONE A L'USINAGE (D)	50
FIGURE 29. IDENTIFICATION DES ZONES INACCESSIBLES DES CONTOURS D'USINAGE : LES FORMES CONCAVES ENGENDRENT DES ZONES LOCALEMENT INACCESSIBLE A L'OUTIL (EN HAUT) CONTRAIREMENT AUX FORMES CONVEXES (EN BAS). D'APRES (LAUVAUX, 2005).....	52
FIGURE 30. IDENTIFICATION DES RUPTURES DE LA CHAINE NUMERIQUE ASSOCIEE AU LOGICIEL DE FAO STRATOCONCEPT®.....	54
FIGURE 31. QUATRE PHASES DE L'EVOLUTION DE LA CONCEPTION ASSISTEE PAR ORDINATEUR PROPOSEE PAR AISH. D'APRES (AISH AND BREDELLA, 2017).....	60
FIGURE 32. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA DUREE DE LA PHASE DE CONCEPTION D'UN PROJET TRADITIONNEL, D'UN PROJET PARAMETRIQUE ET D'UN PROJET PARAMETRIQUE UTILISANT DES OUTILS AYANT DEJA ETE DEVELOPPES AU SEIN DESQUELS UNE MODIFICATION EST APPORTEE. ADAPTE D'APRES (WOJSLAW, 2022).....	63
FIGURE 33. CONSTRUCTION D'UNE BASE DE CONNAISSANCES DE L'UTILISATION DE LA STRATOCONCEPTION® DANS LE SECTEUR DE L'ARCHITECTURE ET DE LA CONSTRUCTION EN BOIS PERMETTANT LA PROPOSITION D'UN MODELE THEORIQUE DE CONCEPTION DE COMPOSANTS ARCHITECTURAUX PAR STRATOCONCEPTION®	73
FIGURE 34. METHODE ADOPTEE DE RECOLTE DES DONNEES UTILES POUR LE PROCESSUS DE CONCEPTION DE COMPOSANTS ARCHITECTURAUX FABRIQUES PAR STRATOCONCEPTION®	75
FIGURE 35. RESULTAT PEDAGOGIQUE DE L'EXPERIENCE : CONCEPTS DE MICROARCHITECTURES REALISABLES PAR STRATOCONCEPTION® PROPOSES PAR DES ETUDIANTS ARCHITECTES DE CYCLE MASTER	77
FIGURE 36. NŒUDS D'ASSEMBLAGE PROPOSES PAR RÖVER (RÖVER, 2020) : DES TIGES FILETEES COLLEES PERMETTENT LA TRANSMISSION DES EFFORTS DES BARRES AUX NŒUDS D'ASSEMBLAGE. LA PROTECTION INCENDIE EST GERE PAR L'APPLICATION D'UNE PEINTURE INTUMESCENTE SUR LES NŒUDS D'ASSEMBLAGE. DISPONIBLE A L'ADRESSE : HTTPS://WWW.BAUNETZ-CAMPUS.DE/NEWS/DIEMERSTEINER-HOLZBAUCAMPUS-WERKSTATTGEBAEUDE-FEIERT-RICHTFEST-8111483#&gid=1&pid=22 [CONSULTEE LE 13 SEPTEMBRE 2023].....	78
FIGURE 37. CNC ISEL FLATCOM40 UTILISEE POUR LA FABRICATION DES PIECES DES EXPERIENCES (PHOTOGRAPHIES DE L'AUTEUR).....	80
FIGURE 38. GENERATION DE LA RESILLE (A) ET DEFINITION DE LA GEOMETRIE DU NŒUD CONSTITUE DE DEUX PARTIES ASSEMBLEES PAR UN BOULON (B).....	83
FIGURE 39. OBSERVATION DES GEOMETRIES DE NŒUDS D'ASSEMBLAGE METALLIQUES CONÇUS PAR OPTIMISATION TOPOLOGIQUE (A), D'APRES (LI ET AL., 2021), ET DES GEOMETRIES DES STRUCTURES OSSEUSES (B) (RADIOGRAPHIE DU GENOU GAUCHE DE L'AUTEUR, REALISE PAR LE LABORATOIRE IMALO LE 08 DECEMBRE 2022).....	85
FIGURE 40. ESQUISSES A LA MAIN DE NŒUDS D'ASSEMBLAGE REALISEES PAR ANWAR NEHLAWI, ARCHITECTE, EN S'APPUYANT SUR LES GEOMETRIES COURBES OBSERVEES DANS LES STRUCTURES NATURELLES ET DANS LES STRUCTURES CONÇUES PAR OPTIMISATION TOPOLOGIQUE.....	85

FIGURE 41. MODELISATION DU NŒUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE A PARTIR DE COURBES DE REFERENCE.....	85
FIGURE 42. MODELISATION DE L'ENVELOPPE INITIALE DU PROJET COCON A PARTIR DE COURBES DE REFERENCE PRIMAIRES ET SECONDAIRES.....	86
FIGURE 43. OPERATIONS SUCCESSIVES DE SEPARATION DE LA PIECE EN ZONES (A), DE TRANCHAGE DES ZONES EN STRATES (B) ET DE DECOMPOSITION DES STRATES EN PARTIES (C).....	87
FIGURE 44. DEUX APPROCHES DE TRANCHAGE PROPOSEES POUR LE CAS D'APPLICATION DU NŒUD D'ASSEMBLAGE DONT LA FORME EST UNE SPHERE DEFORMEE : TRANCHAGE VERTICAL DE LA PARTIE HAUTE DU NŒUD D'ASSEMBLAGE (A) ET TRANCHAGE SELON LA NORMALE A LA SURFACE DE REFERENCE DE LA RESILLE (B).....	88
FIGURE 45. STRATEGIES DE TRANCHAGE DEVELOPPEES POUR LE TRAITEMENT DU NŒUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE : MODELE INITIAL DE LA PIECE (A), RECUPERATION DES AXES DES BARRES POUR DEFINIR LA DIRECTION DE TRANCHAGE ET DES COURBES GENERATRICES DE LA GEOMETRIE DU MODELE INITIAL POUR DEFINIR LES PLANS DE SEPARATION DU MODELE EN ZONES DE TRANCHAGE (B), SEPARATION DU MODELE INITIAL EN ZONES DE TRANCHAGE (C), TRANCHAGE DES ZONES (D).....	89
FIGURE 46. PARTIE CARACTERISTIQUE DE LA PAROI, ISSUE DE LA MODELISATION DE L'ENVELOPPE INITIALE DU PROJET COCON ET ISOLEE POUR L'OPERATION DE FONCTIONNALISATION.....	90
FIGURE 47. MODELISATION DES SYSTEMES FONCTIONNELS INTEGRES DANS LA PAROI (A) ET INTEGRATION D'UN JEU POUR FACILITER L'ASSEMBLAGE DES PIECES INTEGREES AVEC LA STRUCTURE FABRIQUEE PAR STRATOCONCEPTION® (B).....	90
FIGURE 48. EXEMPLES DE MODELES PHYSIQUES REALISES PAR PROTOTYPAGE RAPIDE DANS LE CADRE DE LA CONCEPTION DE L'ASSEMBLAGE DES ZONES DU NŒUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE (PROCEDE UTILISE : DEPOT DE FIL FONDU).....	92
FIGURE 49. PRINCIPE D'ASSEMBLAGE DES ZONES CONSTITUANT LE NŒUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE CHOISI. UNE CLE PERMET LE POSITIONNEMENT DES ZONES ENTRE-ELLES ; DES TOURILLONS PERMETTENT LA LIAISON DES ZONES A LA CLE ; L'ASSEMBLAGE DES ZONES ENTRE-ELLES EST RENFORCE PAR COLLAGE.....	92
FIGURE 50. À GAUCHE : CONCEPTION AVANCEE PROPOSEE POUR LE CAS D'APPLICATION DE LA PAROI ; À DROITE : COMPARAISON DES MISES EN PANOPLIE DES STRATES COMPOSANT LE PROTOTYPE DE PAROI NON-STANDARD MULTIFONCTIONNELLE EN BOIS SELON LES DEUX APPROCHES PROPOSEES : UNE APPROCHE COMPRENANT UNIQUEMENT DES STRATES COMPOSEE D'UNE STRUCTURE TREILLIS (APPROCHE A) ET UNE APPROCHE COMPRENANT DES STRATES COMPOSEES DE STRATES COMPOSEES D'UNE STRUCTURE TREILLIS ET DE STRATES COMPOSEES DES PAROIS DU COMPOSANT (APPROCHE B).....	93
FIGURE 51. OPERATIONS DE TRANSFERT DE DONNEES LIANT LA CONCEPTION DE LA PIECE ET LA DEFINITION DES COMMANDES D'USAGE.....	94
FIGURE 52. MISE EN PANOPLIE DE LA PRODUCTION DU NŒUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE A TROIS BRANCHES REALISEE DANS LE LOGICIEL STRATOCONCEPT®. L'ESPACEMENT ENTRE LES STRATES EST DEFINI DE MANIERE A REPENDRE AUX CONTRAINTES D'ABLOCAGE.....	95
FIGURE 53. PROTOTYPES DE NŒUDS D'ASSEMBLAGE PRODUITS DANS LE CADRE DES EXPERIENCES MENEES : NŒUD D'ASSEMBLAGE INTEGRANT PLUSIEURS FONCTIONS (A) ET NŒUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE (B).....	96
FIGURE 54. METHODE TADAM(S) REPRESENTANT LES TROIS ETAPES DU PROCESSUS DE CONCEPTION POUR LA FABRICATION ADDITIVE PAR STRATOCONCEPTION® DE COMPOSANTS ARCHITECTURAUX ET LES DIFFERENTES TACHES CONSTITUTIVES DE CES ETAPES.....	100
FIGURE 55. DIAGRAMME D'ACTIVITE DES TACHES DE CONCEPTION INITIALE ET DE TRANCHAGE DE L'ETAPE DE CONCEPTION DE LA GEOMETRIE DE LA PIECE (POUR LA SUITE DU DIAGRAMME D'ACTIVITE VOIR FIGURE 56).....	110

FIGURE 56. DIAGRAMME D'ACTIVITE DES TACHES DE FONCTIONNALISATION, D'ASSEMBLAGE ET D'EVIDEMENT DE L'ETAPE DE CONCEPTION DE LA GEOMETRIE DE LA PIECE (POUR LE DEBUT DU DIAGRAMME D'ACTIVITE VOIR FIGURE 55).....	111
FIGURE 57. DIAGRAMME D'ACTIVITE DES TACHES DE LA METHODE TADAM(S) IMPLEMENTEE DANS L'OUTIL TAN(S) POUR LA CONCEPTION DE NŒUDS D'ASSEMBLAGES EN BOIS DE TREILLIS TRIDIMENSIONNELS	123
FIGURE 58. DESCRIPTION GEOMETRIQUE DES BARRES ASSEMBLEES A UN POINT DE RENCONTRE PAR UN NŒUD D'ASSEMBLAGE.....	124
FIGURE 59. TYPOLOGIES DE FORME DES NŒUDS D'ASSEMBLAGE : A. NŒUD D'ASSEMBLAGE DONT LES GEOMETRIES SONT ORIENTEES DANS LA DIRECTION DE LA FIBRE NEUTRE DES BARRES QU'IL LIE ; B. NŒUD D'ASSEMBLAGE DONT LES GEOMETRIES NE SONT PAS ORIENTEES, ET REPRESENTENT UNE SPHERE DEFORMEE.....	124
FIGURE 60. COMPOSANT « DECOMPOSE_NODE » PERMETTANT LA SEPARATION AUTOMATIQUE DU NŒUD D'ASSEMBLAGE TRAITÉ EN ZONES POUR UN TRANCHAGE MULTIAxes.....	126
FIGURE 61. DEFINITION DES PLANS CARACTERISTIQUES DE LA SEPARATION D'UN EMBRANCHEMENT D'UN NŒUD D'ASSEMBLAGE. LES PLANS A, B ₁ ET B ₂ SONT SECANTS AU POINT D'INTERSECTION DES FIBRES NEUTRES DES BARRES	127
FIGURE 62. SEPARATION D'UNE ZONE DU NŒUD D'ASSEMBLAGE EN UTILISANT LES PLANS BISSECTEURS DES PLANS A ET B ₁ , ET DES PLANS A ET B ₂	128
FIGURE 63. EXEMPLE DE SURFACE D'ANALYSE DES NORMALES, GENERANT LES ZONES DES SURFACES ANALYSEES EN DEPOUILLES OU EN CONTRE-DEPOUILLES.....	129
FIGURE 64. RESULTATS DE L'EVALUATION DE LA FAISABILITE DE LA FABRICATION DES STRATES : VISUALISATION DES ZONES EN DEPOUILLES ET EN CONTRE-DEPOUILLES SELON LES TROIS DIRECTIONS DE TRANCHAGE POSSIBLES (A, B ET C).....	129
FIGURE 65. ÉVALUATION ARCHITECTURALE DE LA SEPARATION EN ZONES ET DU TRANCHAGE D'UN NŒUD D'ASSEMBLAGE POUR LES TROIS DIRECTIONS DE TRANCHAGE POSSIBLES	130
FIGURE 66. AUTOMATISATION DU TRACE D'UN RESEAU ENTRE UN POINT DE DEPART ET UN POINT D'ARRIVEE. UN GRAPHE DES CHEMINS POSSIBLE EST GENERE (A) PUIS LE CHEMIN LE PLUS COURT RELIANT LE POINT DE DEPART ET LE POINT D'ARRIVEE EST CALCULE PAR L'ALGORITHME DE DIJKSTRA (B).....	132
FIGURE 67. SEPARATION DU NŒUD D'ASSEMBLAGE EN DEUX PIECES (A) ; LES DEUX PIECES S'ASSEMBLENT PAR BOULONNAGE AUX BARRES EN EXERÇANT UNE PRESSION SUR CES DERNIERES (B)	133
FIGURE 68. GENERATION DES GEOMETRIES DE LA CLE D'ASSEMBLAGE DES ZONES DU NŒUD D'ASSEMBLAGE CONSTITUE DE DEUX PIECES S'ASSEMBLANT PAR BOULONNAGE AVEC LES BARRES QU'ELLES LIENT.....	134
FIGURE 69. IMAGE DE SYNTHESE DU PROJET DE PROTOTYPE D'ETUDE CONÇU PAR ANWAR NEHLAWI, ARCHITECTE.....	136
FIGURE 70. EXEMPLE DE TRAITEMENT D'UN NŒUD D'ASSEMBLAGE DU PROTOTYPE : A. GENERATION DES GEOMETRIES INITIALES DE L'ENVELOPPE EXTERIEURE DU COMPOSANT ; B. SEPARATION EN ZONES ET TRANCHAGE MULTIAxes ; C. ASSEMBLAGE DES ZONES PAR UN POSITIONNEMENT PAR UNE CLE D'ASSEMBLAGE	137
FIGURE 71. IDENTIFICATION DES NŒUDS A REALISER EN UNE OU EN DEUX PIECES PAR L'ANALYSE DE LA CINEMATIQUE DE MONTAGE DE LA STRUCTURE RETICULEE DU PROTOTYPE.....	138
FIGURE 72. POSITIONNEMENT DE L'OUTIL TIWA(S) DANS L'ETAPE DE CONCEPTION DE LA GEOMETRIE DE LA PIECE DE LA METHODE TADAM(S).	142

FIGURE 73. DIAGRAMME D'ACTIVITE DE L'OUTIL TiWA(S) SE CONSTITUANT DE LA DEFINITION DES STRATEGIES DE TRANCHAGE, INTEGRANT UN CHOIX DU TYPE D'EVIDEMENT, ET DE MOTEURS D'EVALUATION DES DONNEES DE FABRICATION ET DES DONNEES ECONOMIQUES. LES STRATEGIES DE TRANCHAGE COMPRENNENT LA SEPARATION DE LA PAROI EN ZONES, LE TRANCHAGE DES ZONES ET LA PREPARATION DES STRATES POUR LA FABRICATION PAR DECOMPOSITION DES STRATES OU PAR GENERATION DES GEOMETRIES DES POUTRES EN BOIS LAMELLE-COLLE.....	142
FIGURE 74. A : COMPOSANT « CONTROL_PREFAB » D'EVALUATION DE LA SEPARATION EN ZONES DU MODELE DE LA PAROI ; B : CAPTURE D'ECRAN DE LA VALIDATION DE LA VISUALISATION DES RESULTATS DE L'EVALUATION PAR APPLICATION A DES GEOMETRIES SIMPLES.....	144
FIGURE 75. A : OPERATIONS DE SURFAÇAGE INDUITES PAR LA PRESENCE DE STRATES FINES ; B : ÉVOLUTION DES DONNEES DE FABRICATION EN FONCTION DU RATIO EPAISSEUR STRATE / EPAISSEUR PANNEAU : LES PERTES MATIERES ET LES TEMPS DE FABRICATION ASSOCIES A L'USINAGE 3D DU PROFIL DES STRATES DIMINUENT LORSQUE L'EPAISSEUR DES PANNEAUX EST REDUITE	145
FIGURE 76. COMPOSANT « THICKNESS_DMT » D'AIDE A LA PRISE DE DECISION POUR LE CHOIX DES EPAISSEURS DE MATERIAUX (PANNEAUX OU POUTRES) UTILISES POUR LE TRANCHAGE DES ZONES.....	145
FIGURE 77. REPRESENTATION SIMPLIFIEE DE STRATES ASSIMILABLES A DES ELEMENTS COQUES (A GAUCHE) ET POUTRES (A DROITE) 146	
FIGURE 78. METHODES DE DIVISION DE COURBES EN PARTIES. A : LA METHODE PAR DIVISION EQUIDISTANTE PEUT CREER DES PARTIES ENCOMBRANTES POUR LA MISE EN PANOPLIE ; B : LA DIVISION PAR EXTREMUM LOCAUX FAVORISE LA CREATION DE PARTIES RECTILIGNES.....	147
FIGURE 79. METHODE DE GENERATION DE L'AXE NEUTRE DES STRATES APPARTENANT A LA TYPOLOGIE POUTRE.....	147
FIGURE 80. METHODE DE GENERATION DES POINTS DE DECOMPOSITION AVEC L_{MIN} , LA DISTANCE MINIMALE ENTRE LES PLANS DE DECOMPOSITION, ET L_{MAX} , LA DISTANCE MAXIMALE ENTRE CES PLANS.....	148
FIGURE 81. COMPOSANT « DECOMPOSE_STRATA » AUTOMATISANT L'OPERATION DE DECOMPOSITION DES STRATES EN PARTIES..	149
FIGURE 82.COMPOSANT « BLANK_GLT » PERMETTANT LA GENERATION AUTOMATIQUE DES MODELES 3D DES BRUTS DES POUTRES EN BOIS LAMELLE-COLLE POUR LA FABRICATION DIRECTE DES STRATES DE GRANDES DIMENSIONS.....	149
FIGURE 83. TYPES DE BRUTS DES POUTRES EN BOIS LAMELLE-COLLE SELECTIONNABLES PAR LE CONCEPTEUR (A : BRUT DE POUTRE RECTILIGNE ; B : BRUT DE POUTRE A SIMPLE COURBURE ; C : BRUT DE POUTRE A SIMPLE COURBURE, A INERTIE VARIABLE)150	
FIGURE 84. CORRECTION DE LA FIBRE NEUTRE DE LA STRATE POUR LA GENERATION DE LA FIBRE NEUTRE DE LA POUTRE EN BOIS LAMELLE-COLLE RESPECTANT DES RAYONS DE COURBURES ADMISSIBLES (R_{ADM}).....	151
FIGURE 85. SCHEMA DE PRINCIPE DU SYSTEME CONSTRUCTIF MIXTE « STRATOCONCEPTION® - MUR A OSSATURE BOIS » CONSTITUE DE STRATES CONTINUES ET DE STRATES INTERMEDIAIRE. L'EPAISSEUR TOTALE DE LA PAROI EST DEFINIE PAR LA SOMME DES EPAISSEURS MINIMALES PERMETTANT A LA PAROI DE REpondRE AUX FONCTIONS STRUCTURELLES ET DE CONFORT THERMIQUE OU ACOUSTIQUE.....	153
FIGURE 86. CONFIGURATIONS IDENTIFIEES POUR LA GENERATION DE LA GEOMETRIE DES STRATES INTERMEDIAIRES.....	153
FIGURE 87. COMPOSANT « EVAL_FAB » PERMETTANT LE CALCUL AUTOMATIQUE D'ORDRES DE GRANDEURS DES DONNEES DE FABRICATION (CONSOMMATION DE MATIERE, TEMPS DE FABRICATION, DE MONTAGE ET DE FINITION).....	155
FIGURE 88. DEFINITION DES PLANS DE SEPARATION EN ZONES DU MODELE DE LA CONCEPTION INITIALE.....	159

FIGURE 89. GENERATION AUTOMATIQUE DES DECOMPOSITIONS DES STRATES EN PARTIE AVANT LEUR MISE EN PANOPLIE SELON LES CONFIGURATIONS IMPLEMENTEES DANS L'OUTIL TIWA(S) : A : GENERATION AUTOMATIQUE DES FIBRES NEUTRES DES STRATES ET DES EXTREMA LOCAUX POUR LA DECOMPOSITION DES STRATES EN PARTIES ; B : DECOMPOSITION LOCALE ; C : DECOMPOSITION GLOBALE ALIGNEE ; D : DECOMPOSITION GLOBALE EN QUINCONCE.....	160
FIGURE 90. GENERATION AUTOMATIQUE DES BRUTS DES POUTRES EN LAMELLE-COLLE POUR LA FABRICATION DIRECTE DES STRATES DE GRANDES DIMENSIONS SELON LES CONFIGURATIONS IMPLEMENTEES DANS L'OUTIL TIWA(S). A : BRUT RECTILIGNE ; B : BRUT A SIMPLE COURBURE ; C : BRUT A INERTIE VARIABLE.....	160
FIGURE 91. REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS DE L'EVALUATION DES CONSOMMATIONS DE MATIERE POUR LES SOLUTIONS ETUDIEES PAR LE CONCEPTEUR.....	162
FIGURE 92. EXEMPLE D'ECHANGE DE DONNEES NUMERIQUES ENTRE LA CONCEPTION DU PROJET ARCHITECTURAL DEVELOPPEE DANS LE LOGICIEL DE CONCEPTION ARCHITECTURALE REVIT ET LA CONCEPTION DES COMPOSANTS NON-STANDARDS A REALISER PAR STRATOCONCEPTION® DEVELOPPE DANS LE LOGICIEL DE MODELISATION PARAMETRIQUE RHINOCEROS3D - GRASSHOPPER	170
FIGURE 93. EXEMPLE D'ECHANGE DE DONNEES NUMERIQUES POUR LA CONFIGURATION OU L'ARCHITECTE DU PROJET CONÇOIT LE COMPOSANT A REALISER PAR STRATOCONCEPTION® INDEPENDAMMENT DE LA METHODE TADAM(S), DANS UN LOGICIEL DE MODELISATION CHOISI (ICI, PAR EXEMPLE, BLENDER), EN CONSIDERANT LES GEOMETRIES DES COMPOSANTS ENVIRONNANTS, EXTRAITS DU MODELE 3D DU PROJET ARCHITECTURAL. L'INGENIEUR REÇOIT LA GEOMETRIE INITIALE DU COMPOSANT PROPOSEE PAR L'ARCHITECTE ET LA DEVELOPPE POUR ABOUTIR A SA GEOMETRIE FINALE, EN SUIVANT LA METHODE TADAM(S). LA GEOMETRIE FINALE DU COMPOSANT EST TRANSMISE A L'ARCHITECTE POUR QU'IL PUISSE L'INTEGRER AU MODELE 3D DU PROJET ARCHITECTURAL.....	173
FIGURE 94. ÉCHANGES DE DONNEES NUMERIQUES POUR L'ETAPE DE CONCEPTION DE LA GEOMETRIE DE LA PIECE DE LA METHODE TADAM(S) DANS LES CONFIGURATIONS OU L'ARCHITECTE ET L'INGENIEUR TRAVAILLENT CONJOINTEMENT A CETTE ETAPE EN UTILISANT TOUS DEUX UN ENVIRONNEMENT DE CONCEPTION PARAMETRIQUE, ICI GRASSHOPPER.....	173
FIGURE 95. ÉCHANGE DES DONNEES NUMERIQUES ENTRE L'ETAPE DE CONCEPTION DE LA GEOMETRIE DE LA PIECE ET L'ETAPE DE CONCEPTION DU PROCESSUS DE FABRICATION DE LA METHODE TADAM(S).....	175
FIGURE 96. PROPOSITION D'IMPLEMENTATION DE SOLUTIONS POUR LE DEVELOPPEMENT D'UNE CONTINUITE INFORMATIONNELLE NUMERIQUE DE LA METHODE TADAM(S) POUR DES SCENARIOS DE COLLABORATION IDENTIFIES.....	177
FIGURE 97. DIAGRAMME D'ACTIVITE DE L'ECHANGE DE DONNEES DE L'EXPERIMENTATION MENE.....	178
FIGURE 98. STRUCTURATION DE L'ENVOI DES DONNEES PAR SPECKLE ENTRE LA TACHE DE CONCEPTION DE LA GEOMETRIE INITIALE DU NŒUD D'ASSEMBLAGE TRAITE ET LES TACHES ASSOCIEES A SA SEPARATION EN ZONE ET A SON TRANCHAGE	179
FIGURE 99. PARTAGE DES DONNEES GEOMETRIQUES SEMANTIQUES (BREP, LIGNE ET POINT) SUR LA PLATEFORME COLLABORATIVE DE SPECKLE, ACCESSIBLE EN LIGNE VIA UN NAVIGATEUR.....	179
FIGURE 100. RECEPTION DES DONNEES STRUCTUREES VIA SPECKLE ET TRAITEMENT AUTOMATIQUE DES TACHES DE SEPARATION EN ZONES ET DE TRANCHAGE MULTIAxes DU NŒUD D'ASSEMBLAGE TRAITE	179
FIGURE 101. RENVOI VIA SPECKLE DE LA GEOMETRIE DU NŒUD D'ASSEMBLAGE TRANCHE, TRAITEE PAR L'INGENIEUR, A L'ARCHITECTE POUR UNE EVALUATION DE L'EXPRESSION ARCHITECTURALE DU TRANCHAGE.....	180
FIGURE 102. DIAGRAMME D'ACTIVITE DE L'ECHANGE DE DONNEES DE L'EXPERIMENTATION MENE.....	181

FIGURE 103. ENVOI VIA RHINO.INSIDE.TOPOLID DES GEOMETRIES DES STRATES DU NŒUD D'ASSEMBLAGE TRANCHE ENTRE LES LOGICIELS RHINOCEROS3D/GRASSHOPPER ET TOPOLID	181
FIGURE 104. DEFINITION DES LIMITES DU DEVELOPPEMENT DE LA CONTINUITE INFORMATIONNELLE NUMERIQUE POUR LA CONCEPTION ET LA FABRICATION DE COMPOSANTS ARCHITECTURAUX NON-STANDARDS D'UN PROJET ARCHITECTURAL A REALISER PAR STRATOCONCEPTION® AVEC L'AIDE DE LA METHODE TADAM(s).....	183

Liste des tableaux

TABLEAU 1. DONNEES DE FABRICATION DE LA REALISATION DU NCEUD D'ASSEMBLAGE BIO-INSPIRE.....	95
TABLEAU 2. RESULTATS DE L'EVALUATION DES DONNEES DE FABRICATION POUR PLUSIEURS CONCEPTIONS DE PAROIS.....	162

Bibliographie

- Aish, R., Bredella, N., 2017. The evolution of architectural computing: from Building Modelling to Design Computation. *arq: Architectural Research Quarterly*. Cambridge University Press, 21(1), pp. 65–73. DOI:10.1017/S1359135517000185
- Aish, R., Woodbury, R., 2005. Multi-level interaction in parametric design. In: Butz, A., Fisher, B., Krüger, A., Olivier, P. (Eds.), *International Symposium on Smart Graphics, SG2005*. Springer, Berlin, Heidelberg, 3638, pp. 151–162. DOI:10.1007/11536482_13
- Anastasiou, A., Tsirmpas, C., Rompas, A., Giokas, K., Koutsouris, D., 2013. 3D printing: Basic concepts mathematics and technologies, in: *13th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering*. Chania, Greece, 10-13 November, 2013. IEEE, pp. 1–4. DOI:10.1109/BIBE.2013.6701672
- André, J.-C., Corbel, S., Perrin, J.-P., Bur, D., Desprez, P., 1996. Du virtuel au réel. La Stéréophotolithographie laser, de la numérisation à la réalisation de maquettes architecturales. *Annales des Ponts et Chaussées, Lavoisier Abonnements*, Paris, 78, pp. 13–20.
- Archer, B., 2011. The Nature of Research, in: Grand, S., Jonas, W. (Eds.), *Mapping Design Research: Positions and Perspectives*. Birkhäuser, Basel. pp. 109-122.
- Audibert, L., 2014. UML2 - De l'apprentissage à la pratique, 2ème édition. ed. Ellipses Marketing, Paris.
- Babič, N.Č., Rebolj, D., 2016. Culture change in construction industry: from 2D toward BIM based construction. *Journal of Information Technology in Construction, ITcon*, 21, pp. 86–99. <http://www.itcon.org/2016/6>
- Barlier, C., 1991. *Procédé pour la création et la réalisation de pièces de C.A.O et pièces ainsi obtenues*. Brevet français No .91–02437, brevet européen n°EP 0585 502 (OEB 27/8/92), 26 février 1991.
- Bendsøe, M.P., Kikuchi, N., 1988. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 71, pp. 197–224.
- Berchtold, H., 2015. In Scheiben Zum Perfekten “Body.” *HolzbauAustria*, Wien, 7, pp. 14–21.

- Bhardwaj, A., Vasselli, J., Lucht, M., Pei, Z., Shaw, B., Grasley, Z., Wei, X., Zou, N., 2020. 3D Printing of Biomass-Fungi Composite Material: A Preliminary Study. *Manufacturing Letters*, 24, April 2020, pp. 96–99. DOI:10.1016/j.mfglet.2020.04.005
- Bignon, J.-C., 2021. *L'Architecture en bois - 80 bâtiments remarquables: Une généalogie de l'Antiquité à nos jours*. Illustrated édition. Le Moniteur, Antony.
- Bignon, J.-C., Gamez, O., Meyer, J., Besançon, F., 2021. Poetic structuralism, new figures in wood architecture. In: *World Conference on Timber Engineering 2021*, Santiago, Chile 9-12 August 2021. Curran Associates, New York, Vol. 1, pp. 819–826.
- Bléron, L., 2000. *Contribution à l'optimisation des performances d'assemblages bois en structure: Analyse de la portance dans les assemblages de type tige*. (Thèse de doctorat). Université Henri-Poincaré, Nancy 1.
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., Salet, T., 2016. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(3), pp. 209–225. DOI:10.1080/17452759.2016.1209867
- Bourell, D.L., Beaman, J.J., Leu, M.C., Rosen, D.W., 2009. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead 7. US–Turkey Workshop On Rapid Technologies, September 24 – 24, 2009, pp. 5-11.
- Bpifrance, 2017. Communiqué de presse : Projet C-Fast. 28 mars 2017. URL: <https://www.cirtes.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/03/CP%20PIAVE%20C-Fast%20Bpifrance%20MISSLER%20CIRTES%20-%2028%2003%202017.pdf> (consulté le 28 septembre 2022)
- Bressani, M., Carpo, M., Martin, R., Picon, A., Vardouli, T., 2019. L'architecture à l'heure du numérique, des algorithmes au projet: Un débat entre Martin Bressani, Mario Carpo, Reinhold Martin et Theodora Vardouli, mené par Antoine Picon. «*L'architecture à l'heure du numérique, des algorithmes au projet*», *Perspective*, 2, pp. 113–140. DOI: 10.4000/perspective.14830
- Burguière-Labrunie, F., 2003. *Les maisons à pans-de-bois d'Auxerre. Inventaire sommaire et analyse des maisons d'angle de rues*. Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre, BUCEMA [WWW Document], mis en ligne le 05 décembre 2007. URL : <http://journals.openedition.org/cem/3702> ; DOI:10.4000/cem.3702 (consulté le 28 octobre 2022)
- Buri, H.U., Weinand, Y., 2011. The tectonics of timber architecture in the digital age. *Kaufmann, H., Nerding, W., (Eds.). Building with Timber Paths into the Future*. Prestel Verlag, Munich. pp. 56-63
- Buschmann, B., Henke, K., Talke, D., Saile, B., Asshoff, C., Bunzel, F., 2021. Additive Manufacturing of Wood Composite Panels for Individual Layer Fabrication (ILF). *Polymers*, 13, no. 3423. DOI: 10.3390/polym1319342

- Buswell, R.A., Soar, R.C., Gibb, A.G., Thorpe, A., 2007. Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in Construction*, 16(2), pp. 224–231. DOI: 10.1016/j.autcon.2006.05.002
- Cache, B., 1996. *Terre meuble*. HYX, Orleans.
- Caetano, I., Leitão, A., 2020. Architecture meets computation: an overview of the evolution of computational design approaches in architecture. *Architectural Science Review*, 63(2), pp. 165–174. DOI:10.1080/00038628.2019.1680524
- Camacho, D.D., Clayton, P., O'Brien, W.J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S., 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, pp. 110–119. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.031
- Charest, P., Potvin, A., Demers, C.M., Ménard, S., 2019. Assessing the complexity of timber gridshells in architecture through shape, structure, and material classification. *BioResources*, 14(1), pp. 1364–1378. DOI:10.15376/biores.14.1.1364-1378
- Chupin, J.-P., Simonnet, C., 2006. *Le Projet tectonique*. Infolio, Gollion.
- Cichocka, J.M., Browne, W.N., Rodriguez, E., 2017. Optimization in the architectural practice. In: P. Janssen, P. Loh, A. Raonic, M. A. Schnabel (eds.), *Protocols, Flows, and Glitches - Proceedings of the 22nd CAADRIA Conference*, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, China, 5-8 April 2017, pp. 387–396. DOI:10.15376/biores.14.1.1364-1378
- Correa, D., Krieg, O.D., Meyboom, A., 2019. Beyond form definition: Material informed digital fabrication in timber construction. In: Bianconi, F., Filippucci, M., (Eds.), *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer International Publishing. pp. 61–92. DOI:10.1007/978-3-030-03676-8_2
- D'Amico, B., 2015. *Timber Grid-shell Structures: form-finding, analysis and optimisation*. (Doctoral Thesis). Edinburgh Napier University. Retrieved from <http://researchrepository.napier.ac.uk/id/eprint/9833>
- de Boissieu, A., 2013. *Modélisation paramétrique en conception architecturale: Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie*. (Thèse de doctorat). Université Paris-Est.
- De l'Orme, P., 1561. *Novvelles inventions povr bien bastir et a petits fraiz*. De l'imprimerie de Frederic Morel, Paris.
- Delebecque, B., 2007. *Intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception - Méthodologie et développement des outils associés*. (Thèse de doctorat) Université Henri-Poincaré, Nancy 1.
- Delebecque, B., Lauvaux, G., Barlier, C., 2000. Stratification Adaptative. Une évolution logicielle pour améliorer la qualité et optimiser le temps de réalisation des prototypes par le procédé de Stratoconception®. 8ème Assises du Prototypage Rapide, CNIT Paris La Défense - France, p. 9.

- Dubor, A., Cabay, E., Chronis, A., 2018. Energy efficient design for 3D printed earth architecture. In: De Rycke, K., (Eds.), *Humanizing Digital Reality*. Springer, Singapore. pp. 383–393. DOI:10.1007/978-981-10-6611-5_33
- Durling, D., Niedderer, K., 2007. The benefits and limits of investigative designing. In: Poggenpohl, S., (Eds.) *Proceedings of the IASDR International Conference 2007 (CD)*. Hong Kong Polytechnic University.
- EN 1995-1-1, 2004. Eurocode 5 Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), 24 november 2004.
- Enns, J., 2010. Intelligent wood assemblies: incorporating found geometry and natural material complexity. *Architectural Design*, 80(2), pp. 116–121. DOI:/10.1002/ad.1171
- Eversmann, P., Gramazio, F., Kohler, M., 2017. Robotic prefabrication of timber structures: towards automated large-scale spatial assembly. *Construction Robotics*, 1, pp. 49–60. DOI:10.1007/s41693-017-0006-2
- Feygin, M., Pak, S.S., 1999. Laminated Object Manufacturing Aparatus and Method. US Pat. 5876550.
- Finnish Woodworking Industries Federation (Ed.), 2019. *LVL handbook Europe*. Federation of the Finnish Woodworking Industries, Helsinki.
- Frampton, K., 1995. *Studies in tectonic culture: the poetics of construction in nineteenth and twentieth century architecture*. MIT press, Cambridge.
- Fraser, M., 2013. *Design Research in Architecture: an overview*. Ashgate Publishing, Farnham.
- Frayling, C., 1993. Research in art and design. *Royal College of Art Research Papers*, 1(1), pp. 1–5.
- Frazer, J., 2016. Parametric computation: history and future. *Architectural Design*, 86(2), pp. 18–23. DOI: 10.1002/ad.2019
- Fréchar, V., Bléron, L., Meyer, J., Besançon, F., Duchanois, G., 2023. Stratoconception®, an additive manufacturing process for timber architecture : challenges and opportunities. World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 9-22 June 2023, Oslo, Norway. pp. 3708-3717. DOI: 10.52202/069179-0482
- Gallas, M., 2013. *De l'intention à la solution architecturale, proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception*. (Thèse de doctorat). Université de Lorraine.
- Gámez Bohórquez, O., 2017. *Fab-Cell: outil d'aide à la conception de parois non standards en bois*. (Thèse de doctorat). Université de Lorraine.
- Gardner, L., Kyvelou, P., Herbert, G., Buchanan, C., 2020. Testing and initial verification of the world's first metal 3D printed bridge. *Journal of Construction Steel Research*, 172. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106233

- Gibson, I., 2005. Rapid Prototyping: a tool for product development. *Computer Aided Design and Applications*, 2(6), pp. 785–793. DOI: 10.1080/16864360.2005.10738342
- Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., 2010. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer US, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9
- Global Alliance for Building and Construction, International Energy Agency, United Nations Environment Programme, 2019. *2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*. UN Environment and the International Energy Agency, 11 December 2019, COP25 press conference [Online publication], URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/3da9daf9-ef75-4a37-b3da-a09224e299dc/2019_Global_Status_Report_for_Buildings_and_Construction.pdf (consulté le 20 janvier 2020)
- Gould, S.J., Lewontin, R.C., 2020. The spandrels of San Marco and the Panglossian paradigm: a critique of the adaptationist program. *Shaping Entrepreneurship Research*. Routledge, London, pp. 204–221.
- Guitard, D., 1987. *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues éditions, Toulouse.
- Harty, C., 2005. Innovation in construction: a sociology of technology approach. *Managing Projects as Complex Social Settings*, 33(6), pp. 512–522. DOI: 10.1080/09613210500288605
- Hassani, V., Khabazi, Z., Raspall, F., Banon, C., Rosen, D., 2019. Form-Finding and Structural Shape Optimization of the Metal 3D Printed Multi-Branch Node with Complex Geometry. *Computer-Aided Design and Applications*, 17(1), pp. 205–225. DOI: 10.14733/cadaps.2020.205-225
- Hawasly, F., Matsumoto, N., Koshihara, M., Adachi, K., 2023. Designing and Testing of a Wood-only Timber Frame Connection Inspired By the Growth Formation of Tree's Stem-Branch Junction, In: World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023), 9-22 June 2023, Oslo, Norway, pp. 1365–1374. DOI: 10.52202/069179-0186
- Hochscheid, E., 2021. *Diffusion, adoption et implémentation du BIM dans les agences d'architecture en France*. (Thèse de doctorat). Université de Lorraine.
- Houtmann, Y., 2007. *Décomposition avancée de modèles numériques CAO pour le procédé de Stratoconception - Développement des outils associés*. (Thèse de doctorat). Université Henri-Poincaré, Nancy 1.
- Hwang, K.J., 2010. *Advanced investigations of grid spatial structures considering various connection systems*. (These de doctorat). Universität Stuttgart Inst. f. Tragkonstr. Technik.
- IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. C.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. URL: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Ismail, A.W., Marin, P., 2022a. Direct Interoperability between Industrial Engineering and AEC: Technical and Geometric Challenges. In: Pak, B., Wurzer, G., Stouffs, R., (Eds.), *Co-creating the Future: Inclusion in and through Design - Proceedings of the 40th Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2022) - Volume 1*, Ghent, 13-16 September 2022, pp. 537–546. DOI: 10.52842/conf.ecaade.2022.1.537
- Ismail, A.W., Marin, P., 2022b. Faciliter l'interopérabilité à l'aide de flux de données directs, expérimentation d'une plateforme distribuée ouverte. SHS Web Conf., 147, 01003. SCAN'22 - 10e Séminaire de Conception Architecturale Numérique, DOI: 10.1051/shsconf/202214701003
- ISO, 2019. ISO and innovation. Technical report. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2018. NF EN ISO 19650-1. Norme Internationale pour la gestion de l'information dans la construction. Février 2016. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO/ASTM, 2021. ISO/ASTM 52900: 2021 Additive Manufacturing-General Principles-Terminology. Norme Internationale. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Iwamoto, L., 2013. *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press, New York.
- Jihong, Z.H.U., Han, Z., Chuang, W., Lu, Z., Shangqin, Y., Zhang, W., 2021. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(1), pp. 91–110. DOI: 10.1016/j.cja.2020.09.020
- Kaminski, J., 2011. Diffusion of innovation theory. *Canadian Journal Nursing Informatics*, 6(2), Theory in Nursing Informatics Column, pp. 1–6.
- Kawasaki, A., Watanabe, R., 1997. Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials. *Ceramics International*, 23(1), pp. 73–83. DOI: 10.1016/0272-8842(95)00143-3
- Khoshnevis, B., 2004. Automated construction by contour crafting - related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13, pp. 5–19. DOI:10.1016/j.autcon.2003.08.012
- Klahn, C., Leutenecker, B., Meboldt, M., 2015. Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia Cirp* 36, pp. 230–235.
- Kolarevic, B., 2003. Digital morphogenesis. *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*, pp. 12–28.

- Krapež Tomec, D., Kariž, M., 2022. Use of wood in Additive Manufacturing: Review and future prospects. *Polymers*, 14(6), 1174. DOI: 10.3390/polym14061174
- Krieg, O.D., 2022. *Architectural potentials of robotic manufacturing in timber construction : strategies for interdisciplinary innovation in manufacturing and design* (Doctoral Thesis). Stuttgart : Institute for Computational Design and Construction, University of Stuttgart.
- Kromoser, B., Reichenbach, S., Hellmayr, R., Myna, R., Wimmer, R., 2022. Circular economy in wood construction - Additive manufacturing of fully recyclable walls made from renewables: Proof of concept and preliminary data. *Construction and Building Materials*, 344. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128219
- Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., Rütger, P., 2016. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72(3), pp. 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026
- Lauvaux, G., 2005. *La réalisation d'œuvres d'art par prototypage rapide avec le procédé de Stratoconception®*. (Thèse de Doctorat). Université de Reims Champagne-Ardenne, IFTS.
- Li, Z., Tsavdaridis, K.D., Gardner, L., 2021. A review of optimised additively manufactured steel connections for modular building systems. In: Meboldt, M., Klahn, C. (Eds), *Industrializing Additive Manufacturing*, AMPA 2020. Springer, Cham. pp.357-373. DOI:10.1007/978-3-030-54334-1_25
- Lienhard, J., Alpermann, H., Gengnagel, C., Knippers, J., 2013. Active bending, a review on structures where bending is used as a self-formation process. *International Journal of Space Structures*, 28(2-3), pp. 187–196. DOI:10.1260/0266-3511.28.3-4.187
- Liu, J., Ma, Y., 2016. A survey of manufacturing oriented topology optimization methods. *Advances in Engineering Software*, 100, pp. 161–175. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.07.017
- Lucas, R., 2016. *Research methods for architecture*. Hachette UK.
- LUE, 2023. *Accompagnement de la dynamique interdisciplinaire - Appel 2022 - Résultats* [Online Document]. LUE - Lorraine Université, Excell. URL: <https://www.univ-lorraine.fr/lue/2023/04/11/accompagnement-de-la-dynamique-interdisciplinaire-appel-2022-resultats/> (consulté le 17 septembre 2023).
- Lynn, G., 1999. *Animate form*. Princeton Architectural Press, New York.
- Marcos, C.L., 2011. New materiality: ideation, representation and digital fabrication. In: *Respecting Fragile Places*, 29th eCAADe Conference Proceedings, University of Ljubljana, Faculty of Architecture, Slovenia, 21-24 September 2011, pp. 351-360. DOI: 10.52842/conf.ecaade.2011.351
- Megahed, Y., 2017. On research by design. *Architectural Research Quarterly*, 21(4), pp. 338–343. DOI:10.1017/S1359135518000179

- Meibodi, M.A., Jipa, A., Giesecke, R., Shammass, D., Bernhard, M., Leschok, M., Graser, K., Dillenburger, B., 2018. Smart Slab: Computational design and digital fabrication of a lightweight concrete slab. In: Recalibration. On imprecision and infidelity. [Proceedings of the 38th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Mexico City, Mexico, 18-20 October 2018, pp. 434–443. DOI:10.52842/conf.acadia.2018.434
- Menges, A., Schwinn, T., Krieg, O.D., 2016. Advancing wood architecture: a computational approach. Routledge - Taylor & Francis Group. Routledge, London. DOI: 10.4324/9781315678825
- Meyer, J., 2017. *Proposition d'un modèle numérique pour la conception architecturale d'enveloppes structurales plissées: application à l'architecture en panneaux de bois.* (Thèse de Doctorat). Université de Lorraine.
- Mitchell, W.J., 1995. *Digital design media.* John Wiley & Sons, N.Y.
- Mohd Ishak, S.S., Newton, S., 2016. An innovation resistance factor model. *Construction Economics and Building*, 16(3), pp. 87–103. DOI:10.5130/AJCEB.v16i3.5164
- Natterer, J., 2004. *Construction en bois: matériau, technologie et dimensionnement.* Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne - Volume 13, PPUR presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Norimoto, M., Gril, J., 1989. Wood Bending Using Microwave Heating. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 24, pp. 203–212. DOI: 10.1080/08327823.1989.11688095
- Oxman, R., 2006. Theory and design in the first digital age. *Design Studies*, 27(3), pp. 229–265. DOI: 10.1016/j.destud.2005.11.002
- Oxman, Rivka, Oxman, Robert, 2010. New structuralism: design, engineering and architectural technologies. *Architectural Design*, 80(4), pp. 14–23. DOI: 10.1002/ad.1101
- Pegna, J., 1997. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5, pp. 427–437. DOI: 10.1016/S0926-5805(96)00166-5
- Peltola, S., 2018. Steps on a 3D-printed bridge. [Online Document], URL <https://www.upm.com/news-and-stories/articles/2018/10/steps-on-a-3d-printed-bridge/> (consulté le 13 juin 2023).
- Pham, D.T., Gault, R.S., 1998. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(10-11), pp. 1257–1287. DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00137-5
- Picon, A., 2018. *La matérialité de l'architecture.* Parenthèses, Marseille.
- Picon, A., 2010. *Culture numérique et architecture.* Birkhäuser, Basel.
- Pine, B.J., Victor, B., Boynton, A.C., 1993. Making mass customization work. *Harvard Business Review*, 71, pp. 108–11.

- Poinet, P., Stefanescu, D., Tsakiridis, G., de Boissieu, A., Papadonikolaki, E., 2020. Supporting collaborative design and project management for AEC using Speckle's interactive data flow diagram. Design Computation Input/Output. *Design Computation*, London, United Kingdom. DOI:10.47330/DCIO.2020.VYBA4375
- Poirier, P., Cunin, D., Barlier, C., Weinstoerffer, M., 2000. Application de la Stratoconception® à la réalisation de maquettes d'urbanisme. In: 8èmes Assises du Prototypage Rapide – Le CNIT, Paris la Défense, 3-4 Mai 2000. p. 10.
- Rael, R., San Fratello, V., 2018. *Printing architecture: Innovative recipes for 3D printing*. Princeton Architectural Press, New York.
- Rael, R., San Fratello, V., 2011. Developing concrete polymer building components for 3D Printing. In: ACADIA 11: Integration through Computation, Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), Banff (Alberta), 13-16 October, 2011, pp. 152–157. DOI:10.52842/conf.acadia.2011.152
- Ramage, M.H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D.U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., 2017. The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), pp. 333–359. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.107
- Raspall, F., 2015. A procedural framework for design to fabrication. *Automation in Construction*, 51, pp. 132–139. DOI:10.1016/j.autcon.2014.12.003
- Raynaud, D., 2001. Compétences et expertise professionnelle de l'architecte dans le travail de conception. *Sociologie du Travail*, 43, pp. 451–469. DOI: 10.4000/sdt.35398
- Rederstorff, J., Rimlinger, F., Fréchar, V., De Fouquet, M., 2023. Analyse des pratiques numériques cartographiées de six bureaux d'études spécialistes de la conception de façades non-standards. *DNArchi in 3|2023 - Cartographier la diversité des pratiques numériques pour l'architecture*. 3. DOI : 10.48568/aqfr-0f16
- Rogers, E.M., 2003. *Diffusion of Innovations*, 5th Edition. Free Pres, New York.
- Roland, I., 2008. L'étude des charpentes comme élément de datation du patrimoine rural : l'exemple genevois. *In Situ* [Online journal], 9 (2008), mis en ligne le 15 mai 2012, URL : <http://journals.openedition.org/insitu/3619> ; DOI: 10.4000/insitu.3619 (consulté le 30 septembre 2022)
- Röver, D.F.A., 2020. *Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken mit Kunstharzpressholz (KP)*. (Doctoral Thesis). Technische Universität Kaiserslautern.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P., 2018. *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*. John Wiley & Sons, Hoboken.

- Schindler, C., 2009. *Ein architektonisches Periodisierungsmodell anhand fertigungstechnischer Kriterien, dargestellt am Beispiel des Holzbaus (Doctoral Thesis)*. ETH Zurich. DOI: 10.3929/ethz-a-005956976
- Schindler, C., 2007. Information-Tool-Technology: Contemporary digital fabrication as part of a continuous development of process technology as illustrated with the example of timber construction. In: Lilley, B., Beesley, P., (Eds.) *Proceedings of the 27th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, Halifax, Canada, October 2006, Dalhousie Architectural Press, pp. 1-5.
- Schmal, P.C., 2004. *Workflow: Structur-Architektur: Architecture-engineering: Klaus Bollinger+ Manfred Grohmann*. Birkhauser-Publishers for Architecture, Basel.
- Schon, D.A., 1984. *The reflective practitioner: How professionals think in action*. Basicbooks, New York.
- Schumpeter, J.A., 1999. *Théorie de l'évolution économique. Recherches sur le profit, le crédit, l'intérêt et le cycle*. Editions Dalloz, Sirey.
- Sepasgozar, S.M., Shi, A., Yang, L., Shirowzhan, S., Edwards, D.J., 2020. *Additive manufacturing applications for industry 4.0: A systematic critical review*. Buildings, 10(12), article number 231. DOI: 10.3390/buildings10120231
- Sigmund, O., Maute, K., 2013. Topology optimization approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimisation*, 48, pp. 1031–1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6
- Silvestri, C., 2009. *Perception et conception en architecture non-standard*. (Thèse de Doctorat). Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.
- Simon, H.A., Le Moigne, J.L., 1991. *Sciences des systèmes : sciences de l'artificiel*. Dunod, Paris.
- Simon, P., 2009. *Approche multiéchelle du comportement mécanique du bois dans le plan transverse*. (These de Doctorat). INSA de Lyon.
- Simpson, T.W., 2017. *Trade-offs with AM*. Modern Machine Shop Magazine (June).
- Smid, P., 2003. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc, New York.
- Stals, A., Jancart, S., Elsen, C., 2018. Influence of parametric tools on the complexity of architectural design in everyday work os SME's. *International Journal of Architectural research Archnet-IJAR* 12(3). DOI:10.26687/archnet-ijar.v12i3.1665
- Svilans, T., 2020. *Integrated material practice in free-form timber structures*. (Doctoral Thesis). The Royal Danish Academy of Fine Arts, Schools of Architecture, Design and Conservation.
- Thompson, D.W., 1945. *On growth and form*. University Press, Cambridge ; Macmillan, New York.

- Turrin, M., Von Buelow, P., Stouffs, R., 2011. Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), pp. 656–675. DOI: 10.1016/j.aei.2011.07.009
- Van Langen, P.H., Brazier, F.M., 2006. Design space exploration revisited. *AiEdam*, 20(2), pp. 113–119. DOI: 10.1017/S0890060406060100
- Veliz Reyes, A., Gomaa, M., Chatzivasileiadi, A., Jabi, W., Wardhana, N.M., 2018. Computing craft: early stage development of a robotically supported 3D printing system for cob structures. In: 36th annual Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe), Lodz, Poland, 17-21 September 2018, pp. 791–800. DOI:10.52842/conf.ecaade.2018.1.791
- Verbeke, J., 2021. This is research by design, in: *Design Research in Architecture*. Routledge, London. pp. 137–160.
- Vestartas, P., 2021a. *Design-to-Fabrication Workflow for Raw-Sawn-Timber using Joinery Solver*. (Doctoral Thesis). EPFL.
- Vestartas, P., 2021b. OpenNest. [Consulté le 21 octobre 2023]. Disponible à l'adresse : <https://www.food4rhino.com/en/app/opennest>
- Viguiier, J., 2015. *Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique*. (Thèse de Doctorat) Université de Lorraine.
- Von Buelow, P., Oliyan Torghabehi, O., Mankouche, S., Vliet, K., 2018. Combining parametric form generation and design exploration to produce a wooden reticulated shell using natural tree crotches. In: Proceedings of IASS Annual Symposia. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), pp. 1–8.
- Wagner, H.J., Alvarez, M., Groenewolt, A., Menges, A., 2020. Towards digital automation flexibility in large-scale timber construction: integrative robotic prefabrication and co-design of the BUGA Wood Pavilion. *Construction Robotics*, 4, pp. 187–204. DOI:10.1007/s41693-020-00038-5
- Ward, T., 2022. First 100% bio-based 3D-printed home unveiled at the University of Maine. UMaine News. [Online document], URL <https://umaine.edu/news/blog/2022/11/21/first-100-bio-based-3d-printed-home-unveiled-at-the-university-of-maine/> (consulté le 13 juillet 2023).
- Wetzel, J.-P., 2009. *Proposition d'un modèle et d'un outil dédiés à la conception morphologique architecturale en phase esquisse* (Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Wiberg, A., 2021. *Design Automation for Additive Manufacturing : A Multi-Disciplinary Optimization Approach*. (Doctoral Thesis). Linköping University Electronic Press, Linköping. DOI: 10.3384/9789179291082
- Wiberg, A., Persson, J., Ölvander, J., 2019. Design for additive manufacturing: a review of available design methods and software. *Rapid Prototyping Journal*, 25(6), pp. 1080–1094. DOI: 10.1108/RPJ-10-2018-0262

Wiener, N., 1949. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT press, Cambridge.

Wojslaw, K., 2022. Webinar: All engineers should utilise the power of Grasshopper. [Online document]. YouTube. URL <https://www.youtube.com/watch?v=XXXXXX> (consulté le 1 juin 2022).

Woodbury, R., 2010. *Elements of parametric design*. Routledge, Oxon.