

La Stratoconception® : une méthode de fabrication additive au service de l'architecture bois

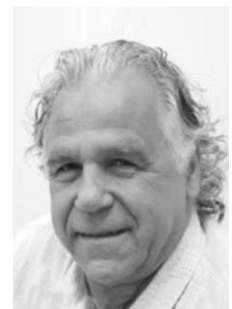
Victor FRÉCHARD
Laboratoire de recherche MAP-CRAI
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
Nancy, France

Laurent BLÉRON
Laboratoire de recherche LERMAB
École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois
Epinal, France



Julien MEYER
Laboratoire de recherche MAP-CRAI
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
Nancy, France

Gilles DUCHANOIS
Laboratoire de recherche MAP-CRAI
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
Nancy, France



Franck BESANÇON
Laboratoire de recherche MAP-CRAI
Chaire partenariale Architecture et Construction bois
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy
Nancy, France



1. L'association du bois et de la fabrication additive

1.1. Le bois, médium d'une architecture non-standard

Le développement d'une fabrication numérique en construction bois et l'émergence d'une gamme de produits d'ingénierie bois, tels que les panneaux de bois, favorisent depuis une vingtaine d'années l'essor d'une architecture bois contemporaine [1]. Ces produits et outils favorisent, par leur adaptabilité, l'apparition d'architectures et typologies constructives non-standards matérialisant des géométries complexes, résultats d'une morphogénèse répondant à des critères de performances [2] ou à une expressivité architecturale accrue. Le défi proposé par cette complexité formelle donne lieu à l'apparition de nouvelles tectoniques [3], réinterprétations de systèmes constructifs anciens par le numérique.

Par ce nouveau structuralisme [4], le matériau bois exprime tout son potentiel d'expression architecturale en s'imposant comme un médium privilégié pour des approches innovantes en termes de conception-fabrication numérique dans un contexte environnemental lui conférant une place privilégiée par ses qualités intrinsèques de ressource renouvelable au bilan carbone favorable.

1.2. Introduction de la fabrication additive en construction

La propagation du numérique dans les pratiques et outils de conception et de production du secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC) questionne les méthodes de fabrication associées et laisse apparaître de nouvelles solutions avec le développement de la fabrication additive. S'inscrivant originellement comme une réponse aux limites formelles liées aux contraintes techniques des procédés de fabrication soustractifs ou formatifs, la fabrication additive permet la réalisation de pièces à partir d'un tranchage virtuel et d'une reconstitution physique par addition de couche par le biais de machines-outils à commande numérique (MOCN). Cette fabrication par addition de couches de matière liquide, solide ou sous forme de poudre, regroupe sept familles de procédés normalisés et présente l'intérêt de pouvoir réaliser des pièces sans restriction formelle, extérieures comme intérieures, impossibles à produire à partir d'un brut [5].

Communément connue sous l'appellation d'impression 3D, la fabrication additive connaît un développement rapide dans le secteur de la construction [6]. Les travaux de recherche précurseurs procèdent par changement d'échelle de procédés, initialement conçus pour le prototypage rapide, comme l'extrusion de béton, de terre ou de polymères, la projection d'un liant sur un lit de sable ou encore le soudage à l'arc de couches de poudre métallique. Ces procédés reposent sur des matériaux liquides ou sous forme de poudre et semblent, à première vue, naturellement exclure le bois de construction de ces nouvelles méthodes de fabrication.

1.3. De la stratification dense à la Stratoconception[®]

Si la fabrication additive n'est pas adoptée en construction bois, la décomposition d'un modèle en éléments plans de faibles sections juxtaposés est une méthode qui s'est vue appliquée pour la réalisation d'architectures non-standards basées sur l'empilement de strates en panneaux de bois au profil usiné décrivant la morphologie dessinée [7].

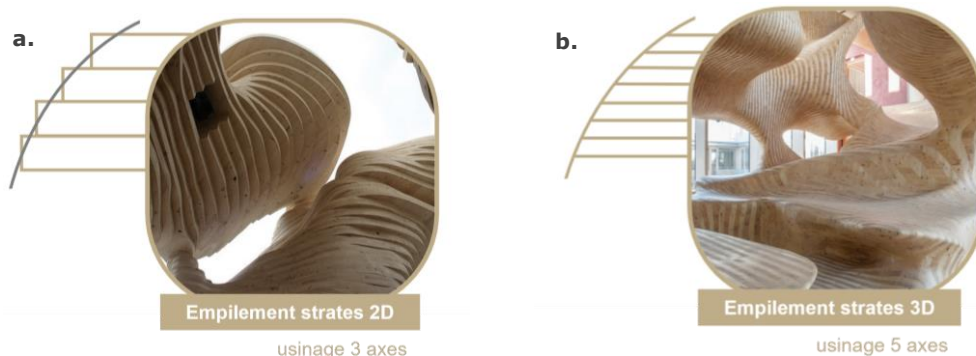


Illustration 1 : a. Termite Pavillon, Londres Softroom Architects, 2010 (empilement de strates 2D) ; b. Body, Klaus, Eichinger Offices (empilement de strates 3D).

Cette stratification dense se limite à des architectures éphémères et sculpturales, répondant à l'expression esthétique de morphologies complexes, bio-inspirées, généralement par de simples strates 2D, mais dénotant une absence de méthodologie de conception-fabrication, et une restriction dans les potentielles techniques inhérentes à cette tectonique architecturale comme à la fabrication additive reposant sur des principes similaires.

La Stratoconception®, procédé de fabrication additive breveté par le CIRTES [8] et normalisé par l'ISO 17296-2, donne accès à la réalisation de pièces aux morphologies complexes extérieures comme intérieures. Elle repose sur de moyens techniques et matériels relativement simples que sont l'usinage par MOCN trois axes et l'utilisation de matériaux en plaques, particulièrement les panneaux en bois [9]. Le modèle numérique tridimensionnel d'une pièce est décomposé en un ensemble de strates 3D, couches élémentaires et complémentaires. Chacune de ces strates est mise en panoplie puis fabriquée par des procédés d'usinage avant que ces couches élémentaires usinées se retrouvent assemblées pour reconstituer la pièce finale, originellement dessinée.

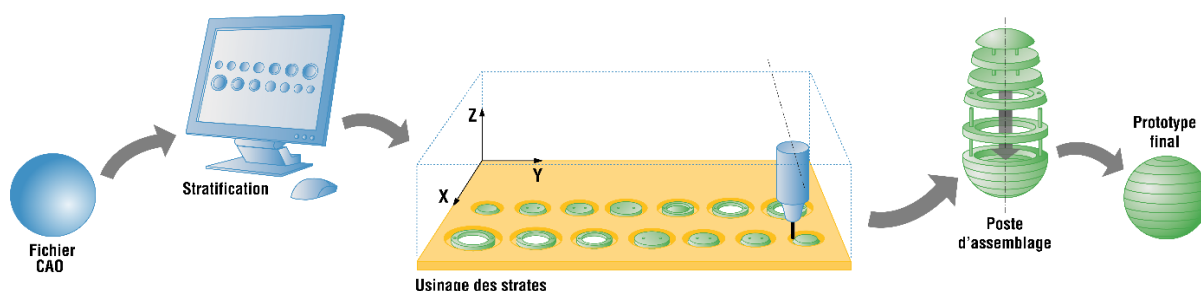


Illustration 2 : Principe du procédé breveté de Stratoconception®

Bien qu'absent du secteur de l'architecture et de la construction bois, sa forte adaptabilité à des parcs machines existants et son utilisation de panneaux en bois, produits accessibles et industrialisés, renforcent le fort potentiel d'application de ce procédé. L'additivité inhérente au procédé permet un évidement de pièces, impossible par des procédés soustractifs ou formatifs, et participe à un gain de liberté formelle.

L'intégration de la Stratoconception® dans le contexte d'une conception-fabrication architecturale conciliant ainsi fabrication additive et matériau bois dépasserait les limites des strates 2D de la stratification dense et développerait la richesse du vocabulaire de ce langage architectural.

Ce contexte fonde ces travaux de recherche visant à caractériser les potentialités, les limites et ainsi le champ d'application de la Stratoconception® en architecture, ingénierie et construction bois.

2. Construire une connaissance

2.1. Une expérience de conception-fabrication

Notre recherche nécessite des expériences dans le but de relever, appréhender et analyser les mécanismes d'une conception-fabrication architecturale par Stratoconception® et d'identifier puis traiter certains verrous scientifiques et technologiques qui y sont associés. Ces résultats engendreront la proposition d'une méthode théorique de conception-fabrication par Stratoconception® adaptée à notre contexte.

Ces expériences se décomposent en 4 phases successives et complémentaires. Une première phase, finalisée, concerne l'étude et la conception d'un projet architectural intégrant le procédé de Stratoconception®. Les concepts soulevés par ces travaux, réalisés en immersion dans un milieu pédagogique, seront vérifiés par de premiers tests d'usinage sous la forme de maquettes au 1/10^e (phase 2). Cette phase, en cours, est une première étape avant un passage à la réalisation d'un prototypage à l'échelle 1 (phase 3) en collaboration avec les différents partenaires industriels et académiques de la Chaire partenariale Architecture et Construction Bois, le CIRTES, Weisrock Vosges, Charpente Houot, l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy (ENSAN) et l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB).

Ces expériences seront des solutions temporaires dont l'analyse (phase 4) nous permettra de mettre à jour les données utilisées et échangées nécessaires à la définition d'un modèle de données global et d'inventorier les différentes tâches rencontrées et leurs répercussions lors d'un processus de conception-fabrication par Stratoconception[®].

À la suite de cette analyse, un modèle théorique sera formalisé sur la base des données recueillies et se positionnera comme une proposition de méthode de conception-fabrication, par le procédé de Stratoconception[®], adaptée à l'architecture bois dans un contexte paramétrique.

2.2. L'expérience pédagogique

Débutée en septembre 2021 et terminée en janvier 2022, la première phase s'inscrit dans le cadre d'activités pédagogiques en partenariat avec l'ENSAN. Elle vise à éprouver par le projet une conception intégrant les potentialités du procédé de Stratoconception[®].

Le résultat est ainsi huit propositions de microarchitectures, stratoconçues, réalisées par 25 étudiants du cycle Master 1, domaine Architecture Ingénierie Environnement (AIE), de l'ENSAN dans le cadre du séminaire thématique dédié à la construction bois.

L'objectif de ce projet de séminaire est de proposer une morphologie bio-inspirée, libre formellement, intégrable dans un continuum numérique, répondant à un programme fonctionnel qui était soit un stand démonstrateur, soit une résidence d'artiste. Un deuxième temps est consacré à l'interprétation constructive de ces projets par l'emploi du procédé de Stratoconception[®]. L'environnement numérique de conception a été laissé libre aux étudiants dans le but de représenter la diversité des pratiques auxquelles nous pourrions nous confronter.

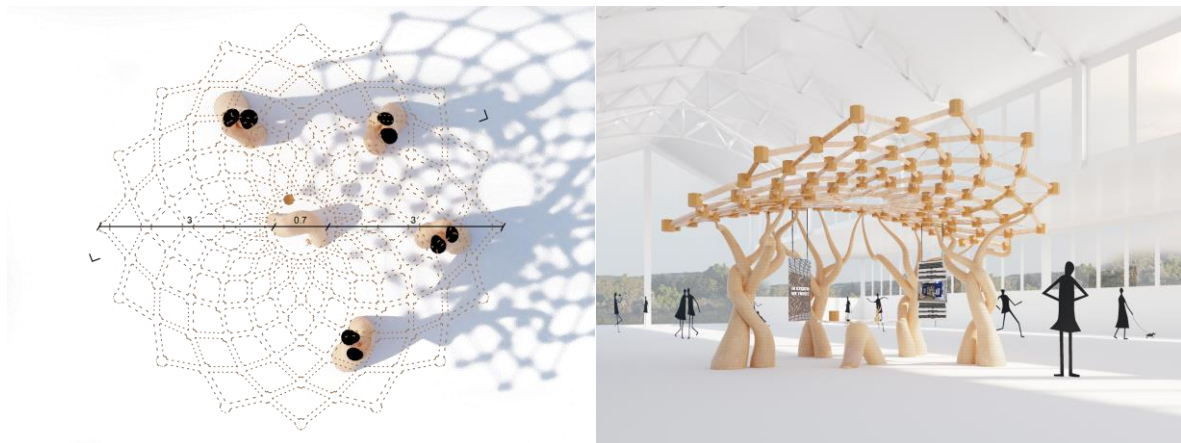


Illustration 3 : Projet « Mélèze nous tranquille ». Madeleine Pipart, Chaimae Rahhali, Lucas Thierty, étudiant(e)s de Master 1 à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

Le programme proposé permet un questionnement autour des diverses contraintes inhérentes à une conception architecturale. Les notions de maintien structurel, de durabilité, d'isolation thermique, de confort, d'esthétique, d'aménagement intérieur ou encore de préfabrication avec intégration du second œuvre sont ainsi abordées.

Les propositions d'utilisation de la Stratoconception[®] ne s'arrêtent pas à la simple utilisation de la strate comme moyen de représentation d'une surface complexe, purement artistique et sculpturale, mais répondent en tant que solution technique à des problématiques architecturales rencontrées à des points singuliers des projets.

La typologie d'éléments coques (éléments surfaciques), représentant les architectures démonstratives en strates rencontrées jusqu'alors, est complétée par deux autres typologies : une typologie poutre (élément linéaire) et une typologie solide 3D (élément volumique).

Cette première phase d'expérience nous a permis d'identifier différents paramètres associés à une conception architecturale par Stratoconception[®]. Les prochaines phases mettront à jour ces données utilisées et échangées dans un processus de conception-fabrication par Stratoconception[®] et mèneront à l'analyse des implications des paramètres associés et inventoriés.

3. Concevoir par Stratoconception®

La phase de conception par Stratoconception® apparaît comme un processus non-linéaire, dynamique et itératif appelant la modification de paramètres répondant à la recherche critériée d'une solution de tranchage optimisée et s'intégrant dans une logique de continuité numérique. La première phase d'expérience révèle le besoin de développement d'un outil paramétrique d'aide à la conception, apportant une aide à la prise de décision des concepteurs.

Un processus d'aide est proposé et repose sur l'analyse des données impliquées dans l'utilisation de la Stratoconception® dans le secteur de l'AEC¹ puis de l'évaluation du tranchage de la pièce étudiée suivant des critères identifiés.

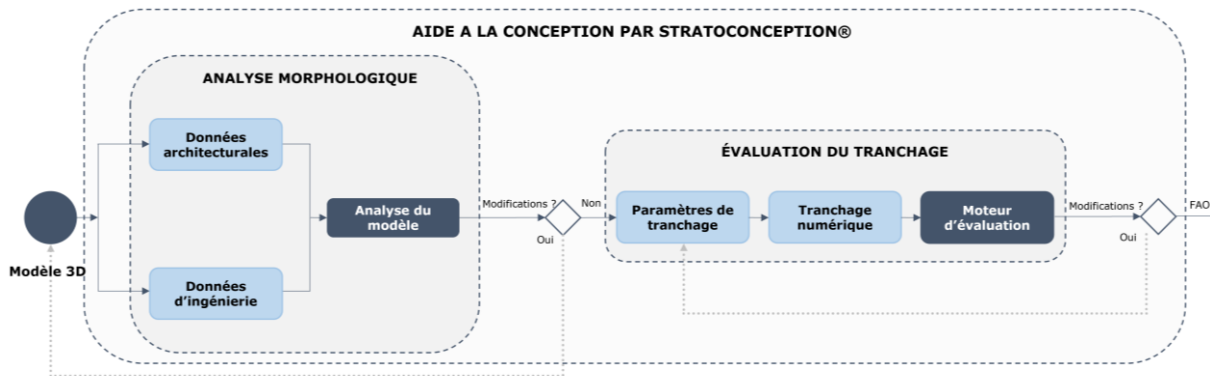


Illustration 4 : Diagramme du processus proposé d'aide à la conception par Stratoconception®.

3.1. Modélisation paramétrique

La Stratoconception® repose sur l'exploitation d'un modèle tridimensionnel, issu d'une morphogénèse numérique, et induit ainsi la maîtrise d'outils de représentation adaptés. Le manque de maîtrise de ces outils ou l'utilisation d'outils inadaptés par les étudiants participant à l'expérience apparaissent comme des freins à la représentation de formes non-standard, à l'exploitation de ces modèles par le procédé de Stratoconception® et ainsi à la conception d'architectures stratoconçues.

Bien que l'adoption des outils de modélisation paramétriques en architecture ne puisse être considérée comme courante en agences d'architecture [10], leur utilisation est nécessaire pour représenter ces géométries complexes dans notre contexte.

3.2. Analyse des données utilisées

La stratification architecturale d'un objet implique son analyse morphologique par une vision à la fois architecturale et technique, permettant au concepteur de prendre pleinement conscience des potentiels et des contraintes du procédé appliqué.

Le nouveau langage architectural de la Stratoconception® se décline dans les résultats de la première phase d'expérience, selon les trois typologies d'éléments identifiés : une typologie poutre pour les éléments linéaires, une typologie coque pour les éléments surfaciques et une typologie solides 3D pour les éléments volumiques.

Poutre (1D)



Coque (2D)



Solide (3D)

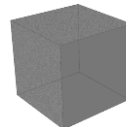


Illustration 5 : Trois typologies d'éléments stratoconcevables

¹ AEC : Architecture Engineering and Construction

La décomposition en strates permet l'obtention de parois aux géométries complexes, évidées, pouvant ainsi accueillir des réseaux et donnant accès à un haut niveau de préfabrication. La Stratoconception[®] permet d'amener une nouvelle lecture à la fonction de paroi, pouvant confondre les fonctions d'aménagement intérieur, de structure, d'enveloppe ou encore de vêture dans un unique élément stratoconçu. L'accessibilité à une liberté morphologique permet de réconcilier la forme et la structure d'une architecture non-standard en apportant une réponse unique, et non plus dissociée, à ces deux objectifs.

Si les potentiels de la réalisation de parois (éléments surfaciques) par fabrication additive ont déjà été soulevés avec d'autres procédés, la réalisation d'éléments linéaires ou volumiques reste peu abordée. La réalisation de poutres à doubles courbures, évidées, intégrant des réseaux, ou d'assemblages complexes est imaginable avec l'intégration de ce procédé dans le langage constructif de l'architecture. Les objets architecturaux stratoconçus ne se limitent pas à leur fonction première, mais peuvent donc répondre, au contraire, à des fonctions multiples en ne se limitant pas à la simple représentation d'une morphologie complexe.

L'analyse de la morphologie du modèle permet de soulever les points clés d'une conception architecturale par Stratoconception[®]. Du point de vue de l'architecte, l'aspect visuel de la strate et de la direction de tranchage prédomine dans ses choix, l'esthétisme associé au procédé lui étant propre et participant au même titre que la forme globale à l'expressivité du projet conçu. L'aspect visible de la strate, la texture, les matériaux et les couleurs utilisés sont autant de points à aborder pour qualifier et valider l'aspect visuel du projet stratoconçu. Du point de vue de l'ingénieur, ce tranchage amène des questionnements autour de critères techniques comme la tenue structurelle ou les performances de confort, thermique ou acoustique, qu'il est nécessaire de valider pour une telle architecture pour en assurer la faisabilité. Les données architecturales et d'ingénierie identifiées dépendent de paramètres de tranchage associés au procédé de Stratoconception[®]. La multiplicité des dépendances entre ces paramètres et ces données démontre qu'une conception architecturale par Stratoconception[®] n'est pas un processus linéaire, mais tend à être un processus dynamique et itératif, relevant la nécessité de création de moteurs d'évaluations s'intégrant dans un modèle d'aide à la conception, accompagnant le concepteur dans sa prise de décision.

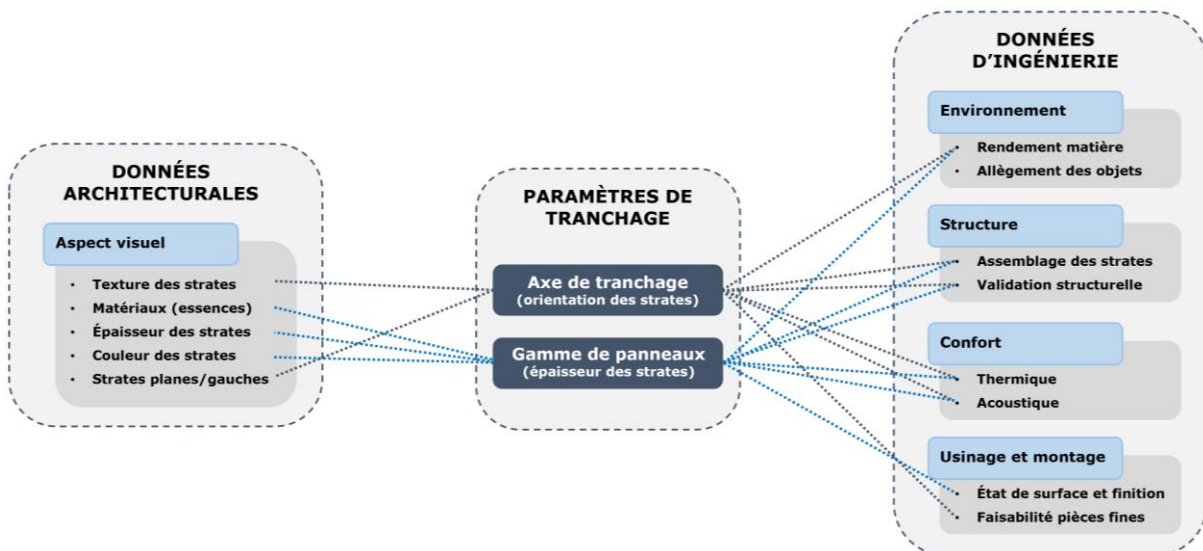


Illustration 6 : Schéma de principe des multiples interactions entre les paramètres de tranchage inhérents à la Stratoconception[®] et les données architecturales et d'ingénierie utilisées en phase de conception.

L'analyse des données morphologiques du modèle amène, soit une modification de sa géométrie pour s'adapter aux résultats de l'analyse menée, soit à une phase d'évaluation critériée de la stratification du modèle.

3.3. Évaluation du tranchage du modèle

La direction de tranchage d'un modèle numérique est un point incontournable de cette recherche dans la mesure où la solution adoptée devra répondre de manière optimisée à différents critères.

Un premier critère est l'aspect visuel de la strate : une direction peut être privilégiée dans l'objectif de participer à une expressivité accrue de l'architecture.



Illustration 7 : Différents exemples de directions de tranchage : a. par plan horizontal (selon l'axe vertical \vec{z}) ; b. par plan incliné (selon un axe incliné) ; c. par plans de tranchage multiples (un premier niveau de tranchage selon l'axe \vec{x} puis un second niveau selon l'axe \vec{y} d'une part et l'axe \vec{z} d'autre part).

Le procédé de Stratoconception®, bien qu'étant considéré comme un procédé de fabrication additive, repose sur une phase d'usinage, et donc de fabrication soustractive. L'enlèvement de matière dans des panneaux en bois soulève la question des pertes matières pouvant être générée. La mise en panoplie (ou *nesting*) des strates sur un panneau est une opération au fort impact sur le rendement matière du procédé. Si aucune direction n'est privilégiée par l'architecte, une recherche d'une direction de tranchage optimale, permettant une minimisation des pertes matières, pourra être mise en place. Nos prochains travaux caractériseront ces pertes matières inhérentes au procédé de Stratoconception®, comme à tout procédé d'usinage.

D'autres critères d'optimisation peuvent être implémentés comme le temps d'usinage ou le coût de la pièce, des directions de tranchages pouvant amener davantage d'opérations d'usinage, d'assemblage ou de mise en œuvre.

4. Perspectives

La Stratoconception® s'inscrit comme une nouvelle solution constructive possible, donnant accès à la réalisation d'objets aux morphologies complexes, en se reposant sur des moyens techniques et matériels simples et maîtrisés par l'industrie de la construction bois. La construction d'une connaissance des potentiels techniques, des limites et des paramètres influant de l'intégration de ce procédé dans le contexte de l'architecture, l'ingénierie et la construction bois constituent nos travaux de recherche actuels.

La première phase d'expérience nous a permis d'identifier des points clés de l'application du procédé de la Stratoconception® en conception architecturale qui nourriront la création d'un modèle théorique d'aide à la conception-fabrication par Stratoconception® dans le contexte de l'architecture, l'ingénierie et la construction bois. Ces concepts soulevés seront validés et complétés par la réalisation, en cours dans la deuxième phase d'expérience, de maquettes au 1/10^e par le procédé.

La troisième phase d'expérience, visant la réalisation d'un prototype à l'échelle 1, apportera une réponse à l'impact de la notion d'échelle dans le procédé. Une approche intuitive nous fait croire que l'intégration de la Stratoconception® à l'échelle d'une architecture ne se limitera pas à une simple mise à l'échelle des paramètres, mais au contraire à l'adaptation d'une conception en tenant compte de données possédant leurs limites dimensionnelles, comme les différentes gammes de panneaux en bois, matières premières sur lesquelles repose le procédé. Cette connaissance participera à donner toute sa matérialité à un objet stratoconçu dans un environnement numérique, souvent décrit comme éloigné des réalités constructives par son absence d'échelle.

Les perspectives de l'application de ce procédé à notre contexte laissent entrevoir des réponses à la réalisation d'objets techniques aux géométries complexes, dépassant la simple représentation de formes architecturales purement esthétiques et dont les potentiels restent à découvrir et expérimenter.

5. Références

- [1] A. Menges, T. Schwinn, et O. D. Krieg, *Advancing Wood Architecture: A Computational Approach*. Routledge - Taylor & Francis Group, 2016.
- [2] B. Kolarevic, « Digital morphogenesis », *Architecture in the digital age: Design and manufacturing*, p. 12-28, 2003.
- [3] H. U. Buri et Y. Weinand, *The tectonics of timber architecture in the digital age*, Kaufmann, Hermann; Nerdinger, Wilfried. Prestel Verlag, 2011.
- [4] R. Oxman et R. Oxman, « New structuralism: design, engineering and architectural technologies », *Architectural Design*, vol. 4, n° 80, p. 14-23, 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/ad.1101>.
- [5] A. Anastasiou, C. Tsirmpas, A. Rompas, K. Giokas, et D. Koutsouris, « 3D printing: Basic concepts mathematics and technologies », in *13th IEEE International Conference on BioInformatics and BioEngineering*, 2013, p. 1-4. doi: 10.1109/BIBE.2013.6701672.
- [6] N. Labonnote, A. Rønquist, B. Manum, et P. Rüther, « Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities », *Automation in construction*, vol. 72, p. 347-366, 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
- [7] L. Iwamoto, *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Princeton Architectural Press, 2013.
- [8] C. BARLIER - Brevet original Stratoconception® : « Procédé pour la création et la réalisation de pièces par C.A.O et pièces ainsi obtenues », 26 février 1991 France FR 2.673.302 B1 et Europe EP 0585 502 B
- [9] C. Barlier et A. Bernard, *Fabrication additive-2e éd.: Du prototypage rapide à l'impression 3D*. Dunod, 2020.
- [10] A. Stals, « Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille - Perceptions et usages de la modélisation paramétrique », sept. 2019.