

Étude de l'intégration du procédé de Stratoconception[®] dans le processus de conception d'architectures non-standards en bois

NEHLAWI Anwar^{1,2}, MEYER Julien¹, BLÉRON Laurent², FRÉCHARD Victor¹

¹École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, MAP-CRAI, Nancy, France

² Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Epinal, France
anwarnehlawi@hotmail.com

Mots clés : Stratoconception[®] ; nœuds d'assemblage ; conception paramétrique ; architecture non standard ; résilles

Contexte et objectifs

Le procédé de Stratoconception[®], appartenant à la famille des procédés de fabrication additive par stratification de couches solides permet la réalisation de pièces de forme complexe, évidées et fonctionnalisées (Barlier 1991; ISO/ASTM 2021). Ce procédé repose sur l'usinage de matériaux sous la forme de panneaux par des machines à commande numérique triaxiales. Ainsi, les panneaux en bois dont l'utilisation est courante dans les pratiques des entreprises de la construction se prêtent bien à l'exercice. Ce partage de moyens techniques et matériels favorise l'implémentation du procédé de Stratoconception[®] dans les pratiques de l'architecture et de la construction en bois (Frécharde et al 2022). Ainsi, Frécharde et al (2023) identifient le procédé de Stratoconception[®] comme « une technologie prometteuse qui permet de dépasser les limites actuelles de l'architecture en bois ».

Ce procédé s'intègre dans la phase de fabrication (Wiberg et al 2019), et est traité après la phase de conception de la pièce. Frécharde et al (2023) observent cependant une interdépendance entre la conception et la fabrication de composants architecturaux par Stratoconception[®], appelant à l'intégration des contraintes de fabrication dans le processus de conception. Il est également pointé un manque d'interopérabilité entre les logiciels utilisés pour la conception des composants et ceux concernant le processus de fabrication par Stratoconception[®].

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'interopérabilité entre la conception architecturale, du concept à la conception paramétrique, et la fabrication numérique par Stratoconception[®]. Ce travail s'intéressera particulièrement à l'intégration des opportunités et des contraintes de fabrication par Stratoconception[®] dès la phase amont du projet architectural par le développement d'outils numériques d'assistance à la conception. Ces derniers favoriseront le développement de composants architecturaux optimisés au regard de la gestion de leur consommation de matière ainsi que des temps et des coûts associés à leur réalisation. Ce développement participera à la mise en place d'une continuité informationnelle numérique liant les phases précoces de l'activité de conception de composants architecturaux à leur exécution.

Pour cela nous nous intéressons à un cas d'application traitant le développement de nœuds d'assemblage pour les systèmes constructifs basés sur des treillis tridimensionnels, particulièrement les résilles rigides. Les résilles rigides sont des coques autoportantes « constituées d'éléments relativement courts, fabriqués hors site et assemblés les uns aux autres sur site pour former une grille discontinue » (Charest et al. 2019) mettant en valeur le savoir-faire manuel et numérique des concepteurs et des constructeurs (Chilton et Tang 2016). Les différentes typologies de nœuds d'assemblage mises en œuvre dans ces structures sont presque exclusivement basées sur l'utilisation de matériaux métalliques (Hwang 2010). L'utilisation du procédé de Stratoconception[®] permet désormais la réalisation de nœuds d'assemblages

structuraux en bois intégrant d'autres fonctions comme le passage de réseaux sec et/ou humides, l'éclairage, la sécurité incendie ou encore le support des complexes de l'enveloppe tout en participant à l'expression architecturale du système constructif.

Matériel et méthode

Afin d'évaluer l'interopérabilité entre la conception architecturale et la fabrication numérique par Stratoconception[®] nous mettons en place une première expérience de « *conception – fabrication – mise en œuvre* » d'un treillis tridimensionnel constitué de nœuds d'assemblage en bois *stratoconçus* et de barres en bois réemployées et recalibrées à une section droite de 60x60 mm. Ce travail à l'échelle 1:1 nous permettra d'inventorier les différentes tâches et leurs implications, de collecter les données utilisées et échangées, mais également d'identifier les problématiques associées à la mise en place d'un continuum informationnel numérique. L'expérience se compose de quatre phases successives (Fig. 1) :

Phase 1 : Conception paramétrique :

Dans un premier temps, notre objectif était de créer un générateur de nœuds tridimensionnels dans le logiciel de conception paramétrique, Grasshopper⁶, qui nous permet de gérer des géométries complexes et d'automatiser les tâches de génération de formes. Des algorithmes ont été montés et optimisés pour créer des nœuds complexes, collecter des données et tester la cinématique de montage.

Phase 2 : Esquisse

Cette phase a comme but de tester l'outil paramétrique créé dans la phase précédente. Nous avons proposé le concept d'un abri à réaliser dans le patio sud de l'ENSA Nancy que nous appelons TADAM. Il s'agit d'une coque dessinée à la main et inspiré d'une feuille d'arbre qui s'appuie sur trois points et s'autoporte grâce à sa surface en double courbure. L'esquisse a été retranscrite en surface 3D puis reconstituée à l'aide d'une grille qui a généré, en filaire, la résille. Les données géométriques de cette structure filaire seront traitées automatiquement dans l'algorithme développé pour obtenir les nœuds tridimensionnels à fabriquer.

Phase 3 : Fabrication

Une fois la géométrie des nœuds générée et validée, nous procédons à la FAO. Le logiciel StratoPRO⁷ nous permet d'importer les modèles 3D afin de les trancher et créer le parcours d'outil pour l'usinage. L'usinage a été effectué à l'aide de la CNC ISEL FLATCOM4 sur des panneaux LVL de 1200x600x21 mm.

Phase 4 : Montage

À ce stade, nous sommes en train de finaliser la fabrication de derniers nœuds avant d'entamer cette phase finale qui consiste à monter toute la résille et à évaluer l'ensemble du processus conception-fabrication.



Fig . 1 : Les phases conception-fabrication, MAP-CRAI

⁶ Disponible à l'adresse : <https://www.grasshopper3d.com/>

⁷ Disponible à l'adresse : <https://www.stratoconception.com/produits/logiciels/stratopro>

Résultats et discussion

Limites physiques

Toute forme n'est pas réalisable par Stratoconception®. En effet, en fonction de l'épaisseur de la strate, il peut potentiellement subsister des zones non accessibles par fraisage avec un système d'usinage 3 axes tels que des contre-dépouilles. L'architecte doit donc avoir la moindre connaissance de ce procédé de fabrication pour s'en servir le mieux possible. Dans le cas de notre expérience, nous avons dû reprendre plusieurs éléments dans l'esquisse initiale afin d'être capables de fabriquer les nœuds par usinage triaxial.

Aspect itératif du processus

Ce travail de recherche implique des allers-retours fréquents entre les phases de développement, en raison de la nature non linéaire du processus. La Stratoconception® impacte la conception architecturale en demandant à l'architecte de comprendre comment les strates seront sculptées par la fraise. Le contexte expérimental de ce projet nous implique de faire de nombreuses itérations entre les différentes phases.

Chaîne numérique fragmentée

Le workflow est encore fragmenté entre l'esquisse et la conception paramétrique. Pour passer à StratoPRO également, une rupture numérique empêche d'avoir un workflow fluide.

Optimisation du temps de fabrication/assemblage

Sur StratoPRO, nous générons les parcours d'outils et les Gcodes pour usiner des nœuds en panneaux LVL des deux côtés. Avec une CNC ISEL FLATCOM 3 axes, nous avons obtenu de bons résultats sur des panneaux LVL de 21 mm d'épaisseur en utilisant une fraise de 8 mm à 18000 tr/min et une avance de 3000 mm/min (chipload = 0,18). Ces paramètres offrent actuellement le meilleur compromis entre vitesse, qualité et durabilité des outils, bien que des améliorations soient envisageables pour les nœuds restants dans ce contexte expérimental. La face verso de l'usinage est la plus lente en raison du détachement des strates. Fixées avec des rubans adhésifs double-face, les strates risquent de bouger à cause de la poussée latérale de la fraise, affaiblissant leur fixation sur la machine.

Il est important de noter que l'esquisse initiale impacte directement le temps d'usinage et d'assemblage des pièces en fonction de la complexité géométrique, la taille et la stratification désirée. La stratification, définie comme la hauteur des passes de finition, a un effet significatif sur la durée de l'usinage. Dans ce projet, nous avons choisi une stratification de 0,7 mm pour obtenir une surface de finition lisse en peu de temps.

Optimisation des pertes matières

Les strates sont mises en panoplie automatiquement sur les panneaux grâce au logiciel StratoPRO. Cependant, la distribution des strates n'est pas optimale et peut être encore développée pour usiner plus de pièces dans moins de panneaux (Figs. 2 et 3).



Fig. 2 : Usinage d'un nœud par Stratoconception®, MAP-CRA

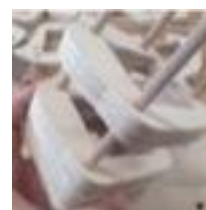


Fig. 3 : Assemblage d'un nœud, MAP-CRAI

Conclusion

La chaîne de conception prototypée a mis en évidence les avantages et les limitations inhérents à l'approche de Stratoconception® dans le contexte du "Design For Additive Manufacturing". Des travaux restent à mener pour que les architectes puissent pleinement bénéficier de ce procédé dans la réalisation d'architectures non standard. Les limites physiques, les ruptures dans la chaîne numérique et la nature itérative du processus rendent le continuum difficilement utilisable par les architectes. De plus, nous avons remarqué que l'architecte, avant la phase conception, doit s'introduire à la Stratoconception® pour mieux bénéficier de ses avantages et réussir à contourner ses contraintes dès la phase d'esquisse.

Travail en cours et perspectives

Afin de rendre la Stratoconception® plus efficace et fructueuse dans le domaine de l'architecture, un prototype à l'échelle 1:1, appelé TADAM, intégrant une réflexion architecturale est en cours de finalisation à l'ENSA Nancy. Les observations faites lors de l'évaluation de ce premier prototype serviront de base pour la conception du pavillon prévu dans le cadre du projet Archi-Folie soutenu par le Ministère de la Culture en vue de l'Olympiade Culturelle de 2024.

Remerciements

UMR 3495 MAP-CRAI, ENSA Nancy, CIRTES (pour l'utilisation du logiciel), Charpente Houot, Weisrock Vosges, LERMAB et le Ministère de la Culture

Références

- Barlier C (1991) Brevet original Stratoconception®: Procédé pour la création et la réalisation de pièces par C.A.O et pièces ainsi obtenues, 26.02.91 France FR 2.673.302 B1 et Europe EP 0585502B
- Charest P et al (2019) Assessing the Complexity of Timber Gridshells in Architecture through Shape, Structure, and Material Classification, *Bioresources*, 2019, 14: 1364-1378, doi : [10.15376/biores.14.1.1364-1378](https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1364-1378).
- Chilton J, Tang G (2017) *Timber gridshells: architecture, structure and craft*. London ; New York : Routledge, 258 p, ISBN : 978-1-138-77529-9.
- Frécharde V, Bléron L, Meyer J, Duchanois G, Besançon F (2023) Stratoconception, an additive manufacturing process for timber architecture: challenges and opportunities. *Proceedings of the World Conference of Timber Engineering, Oslö (NOR)*, doi : [10.52202/069179-0482](https://doi.org/10.52202/069179-0482).
- Hwang KJ (2010) *Advanced investigations of grid spatial structures considering various connection systems*. Dissertation de l'Université de Stuttgart. 129 p, ISBN : 978-3-922302-31-5.
- 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 de l'Université de Lorraine.