

Table des matières

Résumé	iii
Abstract.....	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	viii
Remerciements	xi
Chapitre 1 - Introduction	1
1 Contexte de la recherche.....	1
2 Problématique	3
3 Anatomie d'une structure en CLT	5
Le panneau CLT.....	6
Le CLT en structure	9
Forme libre et forme prédéfinie	11
4 Objectifs	14
5 Structure du mémoire	16
Chapitre 2 – Méthodologie de conception.....	18
1 Recherche-Création.....	18
2 Construction non standard en panneaux de bois	25
Systèmes constructifs	25
Assemblages	32
3 Conception intégrée – l'architecture numérique solution intégrative	41
4 Facteurs de validation	48
Les facteurs dans le contexte numérique	51
5 Le projet.....	58
La Jetée Alexandra – Port de Montréal	59
La toiture-terrasse du terminal de croisière.....	62
6 Critères de conception	66
Choix du système à l'aide de nos trois facteurs décisionnels	68
Chapitre 3 – Conception	75
1 Composantes et limites du système	77
2 Planarisation des motifs.....	80
3 Les formes mathématiques	81
4 Épaisseur et matériau	84
5 Form finding.....	90
6 Propositions finales.....	97
Proposition A – L'organique	98
Proposition B – Les collines	103

Chapitre 4 — Validation de la structure et fabrication	108
AVANT-PROPOS	108
Résumé	109
Abstract	110
1 Introduction	111
2 Context and Previous Work.....	112
3 Joinery System and Manufacturing	115
4 Preliminary Analysis.....	119
Configurations and limitations	120
Analysis and results	123
5 Validation	124
Material properties, connections and configurations.....	124
Results	126
RFEM analysis	128
Analysis of the results.....	135
6 Practical implications	136
7 Conclusions	138
Acknowledgment	139
Conclusion.....	140
Bibliographie	143
Annexes	149
Annexe 1 – Tableau récapitulatif des principales combinaisons systèmes constructifs – assemblages recensées	150
Annexe 2 – Article soumis pour le WCTE.....	151
Annexe 3 – Propriétés Nordic X-Lam.....	159
Annexe 4 – Code Python Épaisseur et Joint en queue d’aronde	162
Code pour créer la surface en offset	162
Code préparation des lignes guides pour le dessin des assemblages	163
Code de création des joints en queue d’aronde	164

Liste des tableaux

Tableau 1 Grille d'objectifs à définir pour un projet d'architecture à géométrie complexe en CLT.....	51
Tableau 2 Grille d'objectifs pour la toiture-terrasse de la Jetée Alexandra	67
Tableau 3 Agencement type d'îlot	100
Tableau 4 Aménagement urbain par parcours.....	100
Tableau 5 Aménagement possible des collines.....	104
Tableau 6 Load combinations	121
Tableau 7 Sensibility test values for the spring constant	132
Tableau 8 Summary of the deformations of the different models tested.....	136
Tableau 9 Deformations of alternative tessellation pattern – Rigid Model	137
Tableau 10 Évaluation de notre système constructif	141

Liste des figures

Figure 1 A. Équivalent d'émissions de CO ₂ pour une poutre en lamellé-collé, en béton et en acier (Cecobois, 2016); B. ACV comparative entre 1 mètre carré de plancher de CLT et de béton (Gagnon et al., 2011).	1
Figure 2 Impact de la forme d'une structure sur l'efficacité énergétique d'une maison (Pavliček et Kaftan, 2012)	4
Figure 3 Relations « matériel » d'un projet en CLT	5
Figure 4 Composition d'un panneau de CLT (Gagnon, S. et Pirvu, C., 2011)	7
Figure 5 A. Transfert bidirectionnel (Gagnon, S. et Pirvu, C., 2011); B. Sens des plis et force de cisaillement (FPInnovation).	8
Figure 6 A. Projet G100 à Strasbourg, (agence G.studio); B. Résidence Alma (Plasma studio, 2012)	10
Figure 7 Schéma de classification des systèmes constructifs	11
Figure 8 A. Principe structurel de l'origami (Buri, 2010). Le pli apporte une raideur à une surface qui autrement resterait souple; B. Étude de forme en origami (Buri, 2010)	12
Figure 9 Imager, présenter, tester (Zeisel, 1984)	23
Figure 10 A. Hall d'exposition LaGa (ICD Stuttgart); B. Serpent Pavillion (TU Graz)	27
Figure 11 A. Metropol Parasol (Schmid, Koppitz et Thurik, 2011); B. Motorway Church Siegerland	28
Figure 12 A. Courbe de Von Koch (Stotz, Gouaty et Weinand, 2009); B. Modèle développé sous le principe d'itération/fractale (Stotz, 2009)	31
Figure 13 Schéma des différentes catégories de stratégies d'assemblage	33
Figure 14 A. Assemblage de la Chapelle Saint-Loup (Buri, 2010); B. Hiérarchie/coordination de montage pour les assemblages internes (Stotz, 2009)	34
Figure 15 Les assemblages "sewing timber" développés par Schimek et al. 2012	35
Figure 16 A. Assemblages traditionnels typiques Tugite et Shiguchi paramétrés par Kanasaki & Tanaka (2011); B. Maison en contreplaqué à la découpeuse 2 axes CNC (Sass, 2006); C. Cheville de bois dans un assemblage en angle (Stotz, 2009); D. Connecteurs Snap-fit en LVL fabriqués par une CNC (Robeller, Mayencourt, & Weinand, 2014)	37
Figure 17 A. Le hall d'exposition LaGa en construction. L'ouvrier est en train de poser les vis structurelles permettant de renforcer l'assemblage linéaire à queue d'aronde des panneaux en LVL (ICD Stuttgart); B. Détail de l'assemblage mixte utilisé pour le pavillon (ICD Stuttgart)	38
Figure 18 A. Connecteurs métalliques (Gagnon et Pirvu, 2011); B. Connecteurs externes sur mesure (Stotz, 2009); C. Vis structurelles (Mohammad, 2011)	40
Figure 19 A. Vis structurelles (Stotz, 2009); B. Connecteur par emboîtement (Rothoblaas, 2015)	40
Figure 20 A. Centre des congrès de Montréal; B. École Tino à Villes Saint-Denis (France) par AAVP Architecture; C. CCTV HQ à Pékin; D. Centre Pompidou Metz, Metz; E. Pavillon Serpentine Ito-Balmond, Londres.	44
Figure 21 Organigramme des outils de conception	46
Figure 22 Schéma décisionnel	48
Figure 23 Conception intégrée du système constructif et des assemblages	49
Figure 24 Volume de croisières à Montréal (http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/692660/quai-alexandra-revitalisation-investissements-projet-port-de-montreal)	59
Figure 25 Carte des limites du Vieux Montréal et site du projet	60
Figure 26 Aménagement projeté du nouveau terminal de croisière (Provencher_Roy)	61
Figure 27 Design intérieur proposé pour le projet (Provencher_Roy)	62

Figure 28 Aménagement paysage extérieur (NIP - Provencher_Roy).....	63
Figure 29 Rendu extérieur de la toiture-terrasse tel qu'imaginé par NIP (NIP Provencher_Roy)	63
Figure 30 Étude des vues (Provencher_Roy)	64
Figure 31 Exemple de subdivision d'une surface à l'aide d'une stratégie ornementale (Stavric, Hirschberg et Wiltsch, 2010)	70
Figure 32 Exemple d'un ouvrage temporaire (échafaudage) nécessaire à la mise en œuvre d'une structure complexe en CLT (Schimek, Wiltsche et Pfaller)	72
Figure 33 Découpe et perte de matériau – triangle vs quadrilatère (Tsigkari, 2006)	79
Figure 34 Processus de panalisation exploré par UTGRAZ. A. choix de l'ornementation et disposition sur une surface; B. Panalisation des ornements et déformation de ceux-ci.....	80
Figure 35 Opera sydney - composante géométrique - Victoria and Albert Museum image	83
Figure 36 Transformation de l'hexagone de concave à convexe	83
Figure 37 “Planar hexagons on a surface. The hexagons are convex where the Gaussian curvature is positive, and concave at negative Gaussian curvature.” (Henriksson & Hult, 2016)	83
Figure 38 Dans cette illustration les surfaces des murs ne sont pas alignées en haut et en bas. La fonction « trim » ne fonctionnera pas et les surfaces devront être raccourcies ou rallongées pour pouvoir s'entrecouper	84
Figure 39 Méthode d'offset de Stotz (Stotz, 200).....	85
Figure 40 Obtention du vecteur de transition du point v_4	86
Figure 41 Mon adaptation du système de Stotz.....	87
Figure 42 Une fois la matérialité ajoutée	89
Figure 43 A. Superposition des vecteurs de déplacement; B. Panneaux issus de l'ajout d'épaisseur; C. Intervention manuelle pour éliminer la superposition	89
Figure 44 Résoudre les intersections en éliminant les coins, Stotz, 2010	89
Figure 45 Maquettes et esquisses de formes	91
Figure 46 Coupe de concept - niveau et fonction	92
Figure 47 Reconstruction du modèle suspendu de Gaudi pour la Colonia Güell Chapel	93
Figure 48 Exploration de différents motifs de trame de base.....	94
Figure 49 Exploration de subdivision du panneau hexagonal.....	95
Figure 50 A. 12 Aménagement de parcours issus de notre algorithme génératif; B. Le parcours est généré pour s'orienter vers les vues qu'offre la Jetée Alexandra.....	97
Figure 51 Subdivision adopté pour le panneau hexagonal lorsque non subordonné au parcours.....	98
Figure 52 Les lignes générés (A) par l'algorithme de parcours permettent d'identifier les panneaux qui serviront à la circulation (B et C). Les panneaux restant (D) sont subdivisés en sous-panneaux auxquels ont appliquera nos forces de déformation.	99
Figure 53 Aménagement proposé à Provencher Roy	101
Figure 54 Perspective habité de la proposition	102
Figure 55 Esquisse d'exploration pour la proposition des collines	103
Figure 56 Deux exemples d'aménagement issus de deux parcours	104
Figure 57 Aménagement des collines proposé à Provencher Roy	105
Figure 58 Exploration en maquette de la proposition.....	106
Figure 59 Design process software workflow.....	112
Figure 60 The two final architectural propositions.....	115
Figure 61 Dovetail detail model - Rendering in Rhinoceros.....	116

Figure 62 A. gap in a standard offset panel; B. Intersection plane ($P_{1,3}$) obtained by the intersection of the offsets (p_3') of the sub-surface panels' (s_1 and s_3) plane (p_1 and p_3).....	117
Figure 63 A. 3DOF (basic design); B. 1DOF.....	118
Figure 64 A. with finishing milling; B. with no milling	119
Figure 65 Basic material definitions for wood	122
Figure 66 Deformation studies of the initial analysis for the two concepts. The importance of the deformation goes from yellow to pink, pink being the biggest deformation	123
Figure 67 Cross section of a 5-ply CLT panel.....	124
Figure 68 Hinge Model A. deformation; B. von Mises stress distribution	126
Figure 69 Rigid Model - Deformation	126
Figure 70 Rigid model - von Mises stress distribution	127
Figure 71 Principal moments — A. Hinged Model; B. Rigid Model on the right	127
Figure 72 Force Flow — A. Hinged Model; B. Rigid Model.....	127
Figure 73 Stress lines — A. Hinged Model; B. Rigid Model.....	127
Figure 74 Line release configuration in RFEM (source RFEM)	130
Figure 75 Rigid model in RFEM.....	131
Figure 76 Hinged model in RFEM.....	131
Figure 77 Sensibility of the structure of the Spring Constant	132
Figure 78 Dovetail section model.....	134
Figure 79 Dovetail simulation to determine the spring constant	134
Figure 80 Graphic summary of the design integrated process of the structure.....	139

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement André Potvin, quoiqu'en dise la page frontispice, ton travail de co-direction dans ce mémoire ne peut être oublié. Tu as été d'une grande aide du début à la fin de ce projet de recherche. Merci.

Samuel, Alexander et André; votre aide, votre écoute et la confiance que vous m'avez témoignée dans la direction de ce mémoire m'ont été fort précieuses. Merci d'avoir cru en ce projet et de m'avoir encouragée à le pousser et à le développer, aussi loin que je le pouvais.

Je désire aussi exprimer ma gratitude envers toute l'équipe du CIRCERB, dont un merci particulier à Pierre Blanchet et Natalie Noël. Le CIRCERB a été une famille pendant toute la durée de cette maîtrise, votre soutien et votre générosité envers les étudiants sont remarquables et ont rendu cette recherche particulièrement stimulante.

Un merci particulier aussi à Claude Bourbeau, Sonia Gagné et toute l'équipe de Provencher_Roy pour m'avoir accueillie chez vous pendant trois mois et pour avoir été aussi enthousiaste pour mon projet. Mon séjour chez vous a été mémorable et constitue un apprentissage inestimable.

Un grand merci à ma famille. À mes parents, vous m'avez menée jusqu'ici, vous avez cru en moi, vous m'avez soutenue constamment, même quand mes choix m'ont menée plusieurs fois sur le vieux continent. Simon, tu m'as appris à ne pas abandonner, même quand c'est difficile et long. Merci aussi pour tous tes conseils et les « brainstorm » qui m'ont définitivement aidée au début de mon projet. Un merci très spécial à Constance pour tes corrections, conseils et ton œil de lynx, je te dois beaucoup !

À Dominique Sanscartier-Pilon et Jean-Philippe Tremblay-Auclair, vous m'avez été d'un grand secours dans l'assimilation de RFEM. Votre patience est à souligner, car sans votre aide j'aurais eu bien des difficultés à venir à bout de toutes mes analyses ! Merci !

J'aimerais aussi saluer Lucie et tous mes amis du GRAP, il ne faut jamais sous-estimer le soutien émotionnel durant une maîtrise. Vous avez illuminé mes journées. À Claire, merci d'avoir été là pour le meilleur et le pire ! Ton amitié m'a soutenue tout au long de cette aventure.

Un dernier merci à toute l'équipe de l'ENSTIB : Pascal Triboulot, Caroline Rogaume, Jean-Claude Bignon, Gilles Duchanois, Frank Besançon, pour ne nommer que ceux-là. Le Défi du bois m'a donné la pique du bois et le Master ABC m'a donné mes premiers jalons dans la construction bois en plus de me fournir tous les outils nécessaires pour attaquer cette maîtrise. Vous avez laissé une marque indélébile dans ma vie.

Chapitre 1 - Introduction

1 Contexte de la recherche

En relativement quelques années, des normes environnementales, certifications et systèmes de standardisation de haute qualité environnementale ont émergé et occupent une place essentielle de plus en plus admise dans la conception architecturale. Cette soudaine conscience de l'impact de notre milieu bâti sur l'environnement nous encourage à nous questionner davantage sur les matériaux que nous utilisons. En parallèle, les outils de conception numérique permettent maintenant des innovations dans le milieu du bâtiment en tirant des performances supérieures de nos matériaux, pour un impact carbone limité.¹ Dans ce contexte, le bois, par ses qualités intrinsèques, sa capacité à séquestrer le carbone et sa grande abondance au Québec, représente un choix de matériau de structure judicieux pour la conception de bâtiments écoresponsables. À l'opposé des matériaux plus courants, comme l'acier et le béton, il présente un impact réduit au plan du bilan carbone lorsqu'on s'intéresse à son analyse de cycle de vie (ACV). (Figure 1). On dit d'ailleurs qu'un mètre cube de bois c'est une tonne de CO₂ en moins dans l'atmosphère. (Cecobois, 2016)

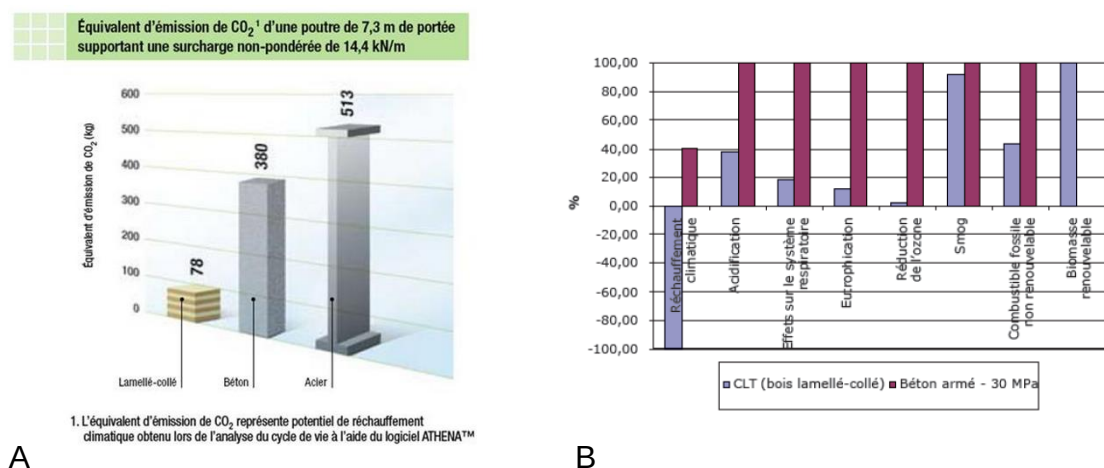


Figure 1 A. Équivalent d'émissions de CO₂ pour une poutre en lamellé-collé, en béton et en acier (Cecobois, 2016); B. ACV comparative entre 1 mètre carré de plancher de CLT et de béton (Gagnon et al., 2011).

¹ L'impact carbone fait référence au calcul d'émission de carbone lors de l'analyse de cycle de vie d'un matériau. L'analyse de cycle de vie « mesure l'énergie nécessaire et les incidences sur l'environnement des opérations d'extractions de la matière première, du transport, de la fabrication, de l'installation, de l'entretien, de la démolition jusqu'au recyclage du produit en fin de vie. » (Cecobois, 2016)

De plus, avec la nouvelle Charte du bois (Gouvernement du Québec, 2016), le gouvernement du Québec s'est lui-même engagé à donner l'exemple en obligeant dorénavant, pour tout projet financé par les fonds publics, à évaluer l'utilisation du bois au même titre que l'acier et le béton, ainsi qu'à en comparer les émissions de gaz à effet de serre.

Depuis cette nouvelle charte, on trouve déjà plus de bois en remplacement du béton ou de l'acier dans la construction de bâtiments multilogements à plusieurs étages (5 et 6 étages) et dans les bâtiments publics. Toutefois, pour que le bois soit avantageux dans une gamme étendue de bâtiments, il doit permettre une plus grande liberté des formes, comparable à celle de l'acier et du béton, de sorte que les concepteurs voient dans ce matériau une réelle valeur ajoutée.

Dans ce contexte, le CLT, et d'autres bois d'ingénierie, proposent des caractéristiques particulièrement intéressantes pour ce type de construction innovante et durable.² En conséquence, cette recherche s'intéresse principalement au processus de conception numérique d'un système constructif pour un bâtiment écoresponsable à géométrie complexe en CLT.

² En français, les appellations pour ce matériau sont variées : bois massif contrecollé, panneau à plis multicouches, panneaux de bois lamellé-croisé, panneau massif contrecroisé, panneau massif à plis multiples ou encore panneau X-LAM, alors que l'anglais utilise le terme *Cross Laminated Timber* (CLT) de manière générale. Pour alléger la lecture de ce texte, l'appellation la plus courante, CLT, sera utilisée puisqu'elle est aussi très présente dans la littérature francophone, entre autres dans le *CLT : manuel sur le bois lamellé-croisé*.



2 Problématique

Si les panneaux de CLT sont présents sur le marché européen depuis les années 1990, ils demeurent un produit émergent en Amérique du Nord, où la production locale date du début des années 2010 (Conseil canadien du bois, 2017). En Europe, les règles de dimensionnement des structures en CLT sont guidées par l'Eurocode 5 (JRC European Commission, 2004) sans toutefois proposer de règles spécifiques pour le CLT.³ Dans quelques pays, ce système constructif reste cependant considéré comme une méthode de mise en œuvre particulière et demande un encadrement plus spécifique. (Lyon, 2013). L'Agrément Technique Européen (ATE), une spécification technique harmonisée, permet l'apposition du marquage de qualité CE qui assure l'encadrement nécessaire aux professionnels dans la réalisation de leurs projets en CLT.⁴ L'équivalent de l'ATE européen a dernièrement vu le jour en Amérique du Nord sous les traits du *CLT : manuel sur le bois lamellé-croisé* (Gagnon et Pirvu, 2011). Produit par le centre de recherche FPInnovations, ce guide comprend les prescriptions élémentaires pour la conception et les calculs de structure dans un cadre canadien. Ce manuel a permis, en 2016, d'intégrer les règles de calcul des structures en CLT dans les codes et normes du bâtiment nord-américains lors de l'amendement de la norme CSA O86-2014 AMD1.⁵

³ Les Eurocodes sont des normes et codes européens de conception et de calcul des ouvrages de bâtiment et de génie civil. L'Eurocode 5 s'applique spécifiquement aux calculs de structures en bois.

⁴ « Le marquage CE se veut un véritable passeport pour la libre circulation des produits sur l'ensemble du marché de l'Union européenne. Cette procédure est obligatoire pour de nombreux produits. Il s'agit d'une garantie de sécurité corporelle pour les utilisateurs. C'est un symbole visuel qui atteste que le produit est conforme aux exigences essentielles de sécurité. Le représentant autorisé du fabricant est la personne qui assume personnellement et solidairement la responsabilité de la conception et de la fabrication d'un produit en vue de sa mise en marché. Une fois marqué CE, le produit peut circuler librement sans être soumis à d'autres formalités, normes nationales de sécurité ou essais. » (Gouvernement du Québec, 2015)

⁵ La norme CSA O86-09 englobe l'ensemble des règles de calcul des charpentes en bois et est à ce titre l'équivalent canadien de l'Eurocode 5.

Ce cadre normatif laisse supposer que la construction en CLT évolue dans un contexte très particulier à l'heure actuelle. En effet, quoiqu'il soit de plus en plus aisé de proposer des bâtiments répondant adéquatement à ces réglementations techniques, concevoir un bâtiment hors de ces normes est encore peu envisageable vu le manque de précédent significatif.

De plus, les bâtiments en CLT cherchant à offrir un haut niveau d'efficacité énergétique sont assujettis à ces directives, codes et règles de l'art, lesquels limitent les possibles explorations formelles qui pourraient mener à des stratégies passives découlant de la forme du bâtiment. (Figure 2). Il est donc intéressant, dans ce contexte, de se questionner sur les méthodes de conception et de mise en œuvre de bâtiments en CLT afin d'ouvrir le champ des possibles.

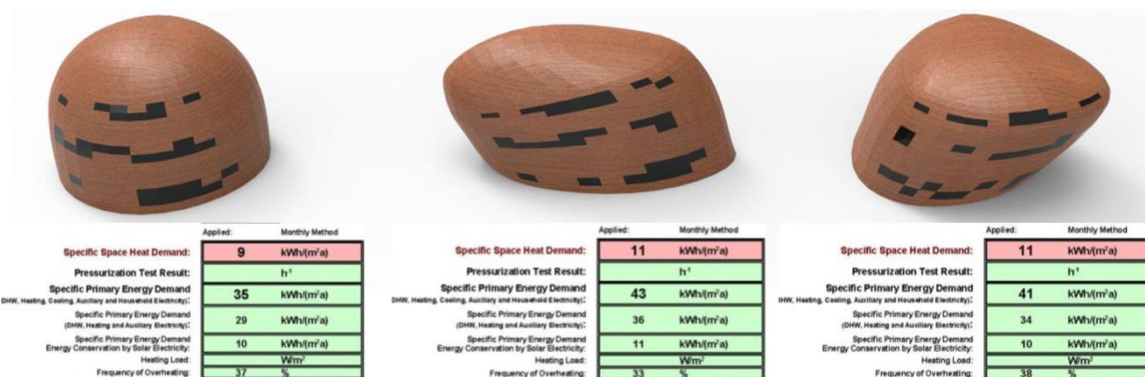


Figure 2 Impact de la forme d'une structure sur l'efficacité énergétique d'une maison (Pavlíček et Kaftan, 2012)

3 Anatomie d'une structure en CLT

Dans un contexte de construction standard, le cadre normatif guide le concepteur aux différentes étapes de réalisation. Dans un contexte de forme complexe, par contre, les recommandations ne suffisent plus pour un design éclairé de la structure. Nous proposons donc d'aborder le projet à forme complexe en CLT selon un schéma de conception où le système constructif découle du matériau et du système d'assemblage. (Figure 3). Manifestement, les conditions et particularités du projet vont avoir un impact global dans le processus de décision et les choix conceptuels de ces composantes. Entre autres, le choix du CLT comme matériau orientera forcément les décisions lors de la conception des assemblages et du système constructif. Il importe donc de connaître les principales caractéristiques de ce matériau afin de faciliter la compréhension des principes de mise en œuvre d'un projet hors norme en CLT.

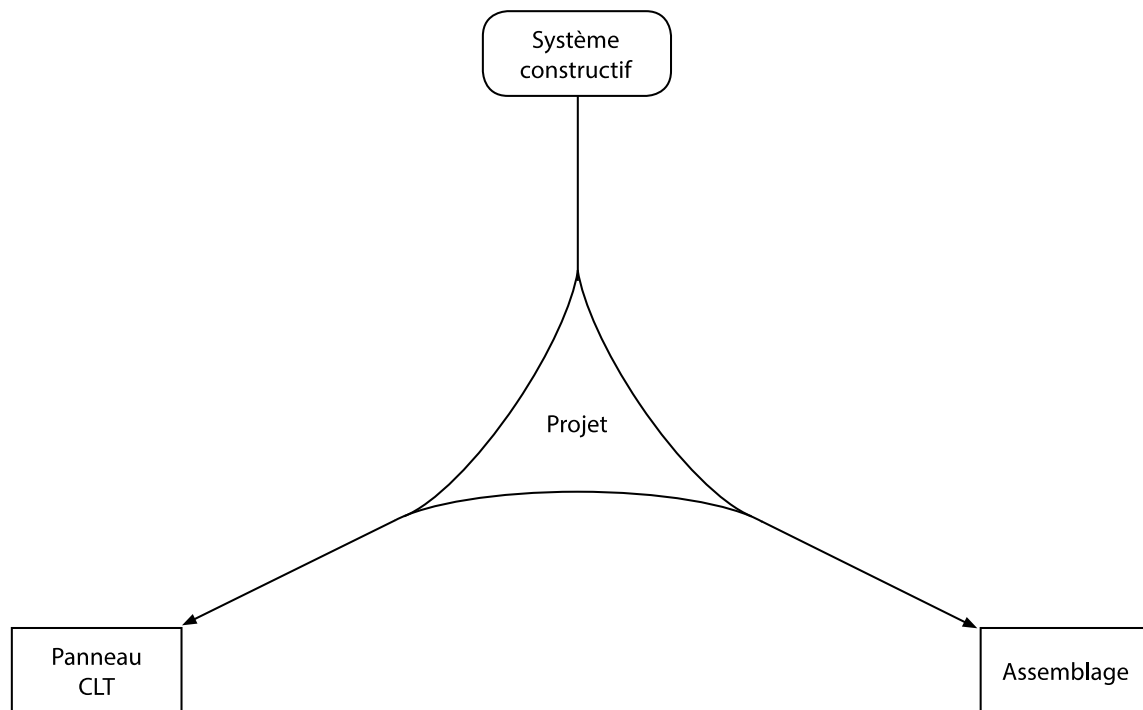


Figure 3 Relations « matériel » d'un projet en CLT

Le panneau CLT

Il faut savoir que si tous les panneaux de CLT possèdent des caractéristiques générales communes, décrites dans les documents de référence ou documents techniques, certaines caractéristiques individuelles peuvent varier selon l'entreprise fabricante. Ces différences s'expliquent principalement par l'essence de bois utilisée par le fabricant – chaque essence possédant ses propriétés intrinsèques –, par la nature des adhésifs ou encore par les procédés de fabrication.⁶⁷ Si ces caractéristiques individuelles sont importantes dans les calculs structuraux, elles le sont moins ici, dans cette introduction élémentaire au matériau. Nous les passerons donc sous silence pour le moment, mais celles qui sont d'intérêt particulier dans notre recherche seront examinées en détail dans les prochains chapitres.^{8 9}

⁶ Par exemple : La densité du bois utilisé affecte les valeurs de résistance pour une même épaisseur, la résistance mécanique et le module élastique. La résistance au cisaillement sera aussi propre à une essence particulière. (Boucher-Côté, 2013)

⁷ En 2011, l'APA-Engineered Wood Association publie l'un des premiers standards nord-américains pour le panneau CLT (ANSI/APA PRG 320-2011). Ce dernier est principalement axé sur les standards de production du panneau.

⁸ X-LAM de Chantiers Chibougamau

⁹ Si le lecteur désire s'informer au-delà de ce qui sera présenté dans le présent chapitre, il est invité à consulter le chapitre traitant de l'analyse de la structure du projet ainsi que les documents cités dans cette section: Kolb, 2011 ; Gagnon, S. et Pirvu, C., 2011 ; Boucher-Côté, 2013 ; ANSI/APA PRG 320-2011.

Compositions du CLT

Les panneaux de CLT sont composés d'une multitude de couches, communément appelées plis, constituées de planches de bois d'œuvre empilées et collées perpendiculairement au moyen d'adhésifs structuraux entre chacun des plis. (Kolb, 2011; Gagnon et Pirvu, 2011; Boucher-Côté, 2013).¹⁰ Le nombre de couches, ou plis, est généralement impair et varie généralement de 3 à 7, afin que les fibres des tranches extérieures soient de même orientation. (Figure 4). Il est courant de doubler certains plis afin d'apporter une plus grande résistance mécanique au panneau, au besoin. Au Québec, les dimensions courantes présentent une épaisseur allant de 78 à 381 mm (3" à 15"), une largeur variant de 0,6 m à 2,4 m (2' à 8') et une longueur allant jusqu'à 19,5 m (64') tel que le décrit *CLT : manuel sur le bois lamellé-croisé*. (Gagnon et Pirvu, 2011).

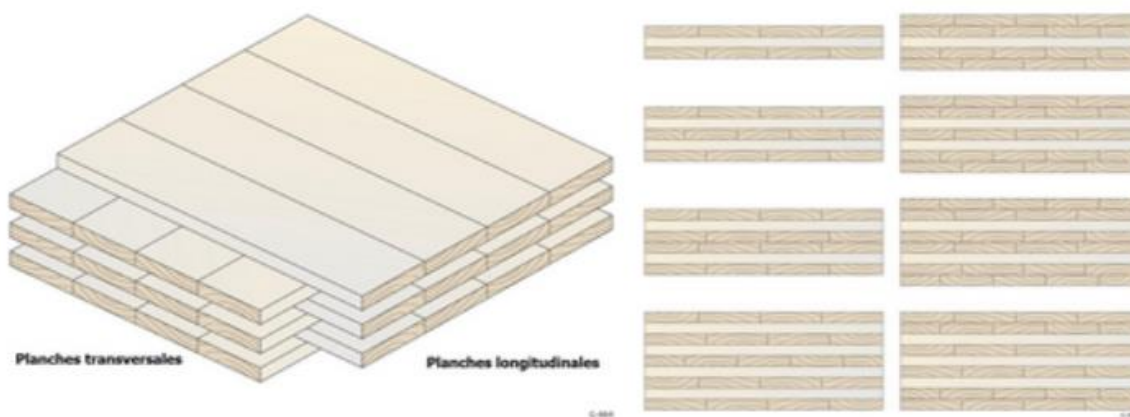


Figure 4 Composition d'un panneau de CLT (Gagnon, S. et Pirvu, C., 2011)

¹⁰ Certains fabricants ajouteront des adhésifs entre les planches en plus d'entre les plis. Ce n'est toutefois pas le cas du panneau produit par Chantiers Chibougamau, que nous décrivons dans le texte et sur lequel nous baserons.

Cette composition particulière confère au panneau une grande stabilité dimensionnelle, une capacité portante plantaire et permet un transfert de charges bidirectionnel. (Figure 5 A). Le sens des plis extérieurs, qui sont en nombre supérieur, dicte toutefois le sens de portée principale; l'autre sens devient le sens de portée secondaire. (Kolb, 2011 ; Boucher-Côté, 2013). On priorisera donc la reprise de charge dans le sens de ces plis. Il s'agit là d'une caractéristique importante qui doit être prise en compte dans les systèmes constructifs plus complexes. Schimek, Meisel et Bogenperger (2010) ont d'ailleurs intégré le sens de portée principale dans leur modèle numérique afin d'optimiser le transfert des efforts dans leurs structures non standard en CLT.

Finalement, il importe de considérer la résistance et la rigidité du panneau en flexion et en cisaillement (Gagnon et Pirvu, 2011) dans la façon dont on met le panneau en œuvre. Si, en général, le panneau présente une résistance et une rigidité accrues en raison de ses plis perpendiculaires, il est par contre moins résistant au cisaillement roulant (*rolling shear*). (Gagnon et Pirvu, 2011) (Figure 5 B)

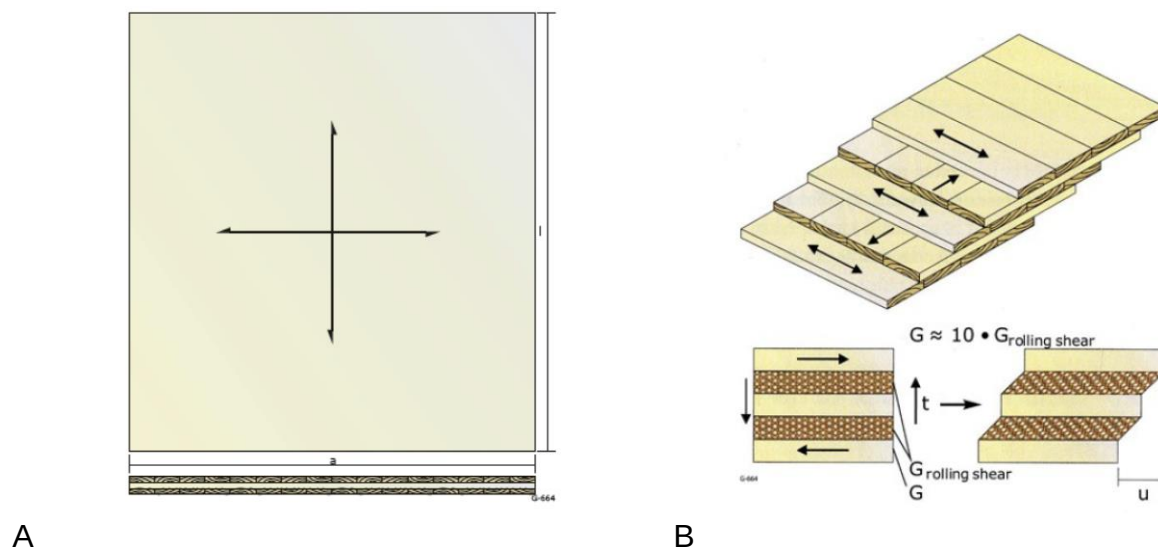


Figure 5 A. Transfert bidirectionnel (Gagnon, S. et Pirvu, C., 2011); B. Sens des plis et force de cisaillement (FPInnovations)

Le CLT en structure

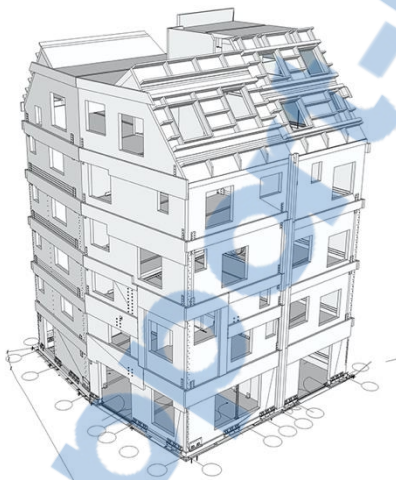
Sous les prescriptions existantes, le CLT est le plus communément utilisé dans des systèmes porteurs plans, puisqu'il est adapté à la reprise de charges importantes.¹¹ (Kolb, 2011). De ce fait, on l'utilise couramment en tant qu'éléments horizontaux (plancher, toiture), voile travaillant (Richard, 2012), ou éléments verticaux (mur). En élément vertical, le panneau reprend les efforts horizontaux et permet de se soustraire à du contreventement supplémentaire. (Kolb, 2011). Le matériau est donc préconisé dans les bâtiments d'habitation de plusieurs étages (Bernasconi, 2013; Kolb, 2011) en système claire-voie, plate-forme ou mixte. En claire-voie, les concepteurs privilégient la continuité des panneaux, où les éléments muraux se prolongent sur plusieurs étages et les planchers viennent s'y fixer à l'aide de systèmes d'assemblage intermédiaires. Dans le système à plate-forme, les panneaux de plancher reposent directement sur les panneaux de mur et les murs des étages supérieurs s'appuient directement sur le panneau de plancher.¹² Ce dernier système est couramment utilisé en Europe. (Gagnon et Pirvu, 2011). Même si Kolb (2011) affirme que ces systèmes ne sont pas limités par des questions de modules ou de trames, d'autres auteurs (Bernasconi, 2013; Gagnon et Pirvu, 2011) semblent plutôt suggérer qu'une trame, même irrégulière, doit à la rigueur être continue d'étage en étage afin d'assurer la continuité de la résistance et du transfert des charges. La plupart des bâtiments existants en CLT corroborent cette dernière affirmation.¹³ Il n'est toutefois pas possible de déterminer si l'absence de projet sans module ni trame est due aux contraintes imposées par les directives et normes de conception ou à quelque autre facteur.

¹¹ Les éléments de structure sont constitués d'éléments plans qui transfèrent des charges par voiles. (Kolb, 2011)

¹² Le système claire-voie est limité par la longueur maximale des panneaux de CLT et il est de ce fait plus souvent confiné à des projets de faible hauteur.

¹³ Par exemple : à Londres, le bâtiment de 9 étages Stadthaus, Murray Grove par Waugh Thistleton Architects; à Milan, le complexe résidentiel Via Cenni de Rossiprodi Associati S.R.L.; et à Saint-Dié-des-Vosges en France, la moins connue tour Jules Ferry par ASP architecture. Plus près de chez-nous, on peut nommer le projet d'écocondos Origine de la Pointe-aux-Lièvres, à Québec, d'Yves Blouin architecte et la résidence étudiante Brock Commons, Phase 1 à Vancouver par Acton Ostry Architects en collaboration avec l'architecte autrichien Hermann Kaufmann connu pour ses constructions en bois, à noter que le CLT est ici utilisé uniquement pour les éléments de plancher.

L'intégration des deux systèmes précités (claire-voie et plateforme) dans un même bâtiment relève du possible lorsqu'un projet présente des besoins particuliers comme une géométrie complexe, des ouvertures irrégulières ou une trame plus complexe. C'est le cas du projet G100 (G. studio, 2016) de l'agence G.studio de Strasbourg où les nombreuses ouvertures de la façade et la configuration intérieure complexe ont nécessité l'intervention accrue de l'ingénieur et du charpentier à chaque étape du projet. (Figure 6 A). Il ne faut toutefois pas voir en ces deux systèmes une solution entièrement restrictive au niveau de la forme. Des projets de petite échelle, comme l'agrandissement de la résidence Paramount – Alma Residence (construction originale de 1960) par l'agence Plasma Studio (Plasma Studio, 2017) permettent une certaine souplesse dans l'exploration géométrique de l'enveloppe, pour autant que la trame intérieure reste plus traditionnelle. (Figure 6 B). Ce genre d'exploration ne semble toutefois possible que dans des projets spéciaux, de petite à moyenne échelle, selon les normes actuelles.



A



B

Figure 6 A. Projet G100 à Strasbourg, (agence G.studio); B. Résidence Alma (Plasma studio, 2012)

Forme libre et forme prédéfinie ¹⁴

Les systèmes constructifs présentés précédemment sont restreints à des types de bâtiments bien définis : de petits ou grands bâtiments d'habitation et des bâtiments à usages variés comportant une trame plus ou moins régulière, mais toujours compartimentée. Même si, en début de projet d'un programme architectural de ce genre, la forme n'est pas pleinement déterminée, on sait qu'une certaine typologie de bâtiment sera présente (porteur plan). Il est rapidement possible d'envisager la résolution de la structure avec des panneaux de CLT sous réserve de quelques ajustements mineurs. C'est ce que nous appellerons ici les systèmes constructifs répondant à des formes prédéfinies. En opposition, nous parlerons aussi des systèmes constructifs à forme libre qui ont la particularité d'être adaptables à la forme même du bâtiment, voire d'être développés expressément pour elle, et qui n'offrent pas nécessairement une typologie standard permettant d'utiliser un système donné. (Figure 7)

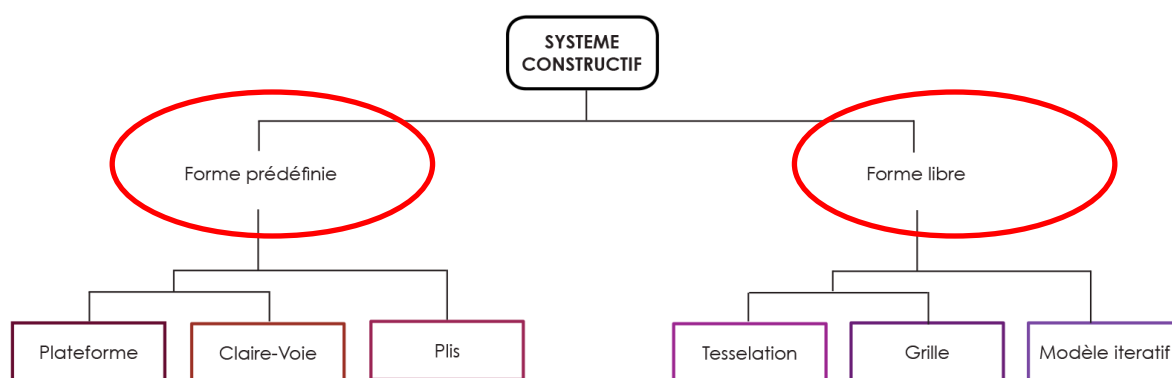


Figure 7 Schéma de classification des systèmes constructifs

¹⁴ Nous reconnaissons l'existence de systèmes constructifs utilisant le CLT courbé mais, compte tenu de sa mise en œuvre complexe, nous avons délibérément décidé d'en faire abstraction dans cette recherche et de nous concentrer sur les systèmes planaires.

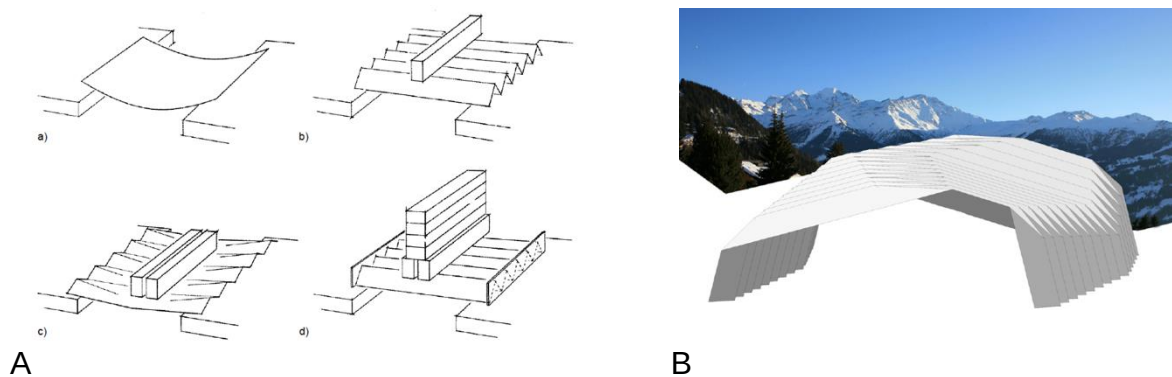


Figure 8 A. Principe structurel de l'origami (Buri, 2010). Le pli apporte une raideur à une surface qui autrement resterait souple; B. Étude de forme en origami (Buri, 2010)

Nous avons déjà présenté les systèmes à claire-voie, à plate-forme et mixte associés aux systèmes à forme prédéfinie. Un dernier mérite d'être mentionné, Le Pli, car il a été largement étudié ces dernières années, entre autres par le laboratoire IBOIS (IBOIS, 2017) de l'EPFL à Lausanne et le MAP-CRAI (MAP-CRAI, 2016) à Nancy. C'est aussi le premier système que nous pourrions qualifier de non-standard.¹⁵ Inspiré du concept de l'origami, Le Pli fait l'objet de premières recherches et expérimentations dans les années 1950-1960.¹⁶ (Buri H. U., 2010) (Meyer, 2013). Ce qui est moins courant, c'est son utilisation avec le matériau bois en tant que structure. Comme le présente Meyer (2013) dans son mémoire de recherche, l'origami est en constante évolution et de nouvelles formes sont découvertes quotidiennement. Malgré cela, nous avons classé ce système dans la catégorie des formes prédéfinies, car le système vient toujours en réponse à une même typologie de bâtiment.

Dans ce système, les plis composent des arcs ou des portiques qui vont imposer une typologie de dôme ou de bâtiment en longueur (gymnases, entrepôts, églises) puisque les plis ont la capacité d'atteindre de grandes portées. (Figure 8 A) Pour

¹⁵ Le non-standard, tel que nous le concevons, se rapporte à une des premières définitions du concept de non-standard proposé par Barnard Cache dans *Terre Meubles* en 1995. Par non-standard il fait référence au nouveau mode de production où il est possible pour un fabricant de faire différentes formes pour une même série. Cette capacité est issue du fait que l'objet n'est pas seulement conçu, mais calculé par l'introduction de paramètres dans le processus de conception. Mais surtout, ce système permet de concevoir des formes complexes que les méthodes traditionnelles de dessin, ou de fabrication ne peuvent soutenir. (Cache, 1995)

¹⁶ L'origami, art japonais du pliage du papier. Le principe sous-tendant l'origami est de pouvoir, à l'aide d'une surface mince et légère, aller chercher une capacité structurelle supérieure au matériau lui-même.

confirmer cette tendance, il suffit de regarder les projets existants qui s'inspirent de ce système, tels la Chapelle Saint-Loup, développée par l'agence Local Architecture et le laboratoire IBOIS, ainsi que les explorations effectuées par Buri (2010). (Figure 8 B). L'apport esthétique est indéniable; la structure plissée ajoute des qualités perceptuelles à l'espace en créant un rythme avec les effets d'ombre et de lumière. (Buri H. U., 2010). La complexité et la richesse de la technique apportent une variété appréciable dans la conception des espaces, mais la liberté formelle est moindre et ne répond donc pas aux besoins de notre recherche.

Parce qu'ils délaissent le cadre du normatif et les typologies qui en découlent, les systèmes constructifs applicables aux formes libres sont davantage ce qui nous intéresse. Libre de toute typologie particulière, la géométrie finale du bâtiment découlera souvent, en partie, du système constructif lui-même. Les possibilités de formes sont donc exponentielles.

Par ailleurs, les exemples de non-standard sont souvent accompagnés de budgets élevés (Stavric, Hirschberg, et Wiltche, 2010; Reiser et Umemoto, 2006), s'expliquant en particulier par le processus de design et de résolution du projet. Plutôt que de travailler au développement d'une structure comme telle, le plus courant est de partir d'une esquisse de concept à laquelle on intégrera une structure en bois, par raboutage technologique s'il le faut. Notre recherche vise donc à revoir l'approche conceptuelle souvent contreproductive de ces structures non-standard.

Pour stimuler l'innovation et l'utilisation de ces méthodes non normatives, il faut repenser à la fois les méthodes de conception et de fabrication. La première étape consiste à travailler avec des équipes multidisciplinaires, et la seconde, à intégrer les outils de conception numérique permettant de nouvelles explorations formelles et matérielles. Cependant, vu la multiplicité des logiciels et des compétences impliqués dans de tels projets, il y a un besoin pressant de faciliter le travail de tous par l'adoption d'une approche de conception intégrée qui a fait ses preuves pour stimuler l'innovation dans la construction.

À titre d'exemple, dans un processus plus standard, l'architecte pourrait effectuer ses explorations formelles dans SketchUp (logiciel de modélisation 3D). Une fois un premier concept choisi, il sera dessiné dans Autocad (logiciel de dessin assisté par ordinateur) afin d'en générer des plans préliminaires qui pourront être envoyés à l'ingénieur et aux autres intervenants dans l'équipe de conception. Cela implique que le concept doit être assez avancé. L'ingénieur modélisera ensuite la structure à partir des plans de l'architecte dans son propre logiciel d'analyse de structure et pourra en sortir des analyses préliminaires. Il pourra, à partir de ses analyses, appliquer des commentaires dans le plan Autocad qui sera renvoyé à l'architecte. Les architectes pourront reprendre les explorations formelles en SketchUp à partir des commentaires reçus, pour redessiner dans Autocad un nouveau concept ou un concept mis à jour et renvoyer le nouveau fichier AutoCad aux collaborateurs. La boucle sera reprise jusqu'à ce qu'un concept soit assez stable et avancé pour être modélisé dans un logiciel BIM (building information modeling). Ce n'est qu'à cette étape avancée de conception qu'il sera possible d'avoir un suivi mieux intégré des différents collaborateurs dans un seul fichier de conception.

4 Objectifs

Le premier enjeu de cette recherche-crédation consiste à rendre efficaces et économiques la conception et la fabrication d'un projet non-standard en CLT. Pour cela, nous proposons de développer un processus de conception sur mesure spécifique à un projet qui mènera à la conception d'un système constructif adapté à ce même projet. En concevant le système constructif dès les premières étapes du projet, les notions de structure et de fabrication spécifiques au matériau sont entièrement intégrées aux aspects architecturaux et esthétiques de la conception.

Par ailleurs, les recherches sur les géométries complexes en bois ont démontré que ces structures doivent être issues de la conception intégrée lorsqu'on souhaite une réalisation efficace et économique. Cette recherche s'intéresse donc aux avantages et retombées d'une telle approche de conception. De plus, l'objectif est de démontrer qu'un processus intégré combiné à la précision de la fabrication numérique permet aux concepteurs d'explorer des formes plus complexes en CLT.

Logiquement, le second enjeu est donc l'intégration de la fabrication numérique dans le processus et l'accès aux moyens de mise en œuvre du système constructif. Pour pouvoir compter sur la fabrication par commande numérique pour fabriquer des structures demandant un haut degré de précision, il importe que cette précision se concrétise de manière efficace et économique à l'étape de la construction. Cet enjeu s'est avéré critique pour plusieurs chercheurs qui en encourageaient l'intégration dès le début de la conception. (Stotz, 2009; Schimek, Wilsche, Manahl, et Pfaller, 2013). C'est pourquoi notre travail de conception se fera en fonction des ressources en matière de machine-outil à commande numérique des partenaires de cette recherche afin de proposer une solution en phase avec la réalité québécoise.¹⁷

L'ensemble des objectifs consiste donc à :

- Étendre les possibilités constructives du CLT en proposant un projet innovant adapté aux moyens techniques dont nous disposons.
- Proposer une solution originale en CLT, à la place de l'acier ou du béton, pour des projets jugés trop complexes et/ou coûteux pour le matériau bois.
- Démontrer les avantages d'une approche intégrée dans un contexte de conception d'un projet d'architecture en CLT pour favoriser :
 - La qualité de l'espace architectural
 - La conception efficace de la structure
 - La production par fabrication numérique 3D

Pour mener à bien ces objectifs, cette recherche adoptera *l'approche émergente*, se situant entre développement technologique et innovation conceptuelle. Elle est considérée par certains comme une « nouvelle science » en architecture et décrite par Hensel, Weinstock, et Menges (2010) comme « [...] une compréhension du comportement des systèmes complexes et de la mécanique de leurs processus, ainsi que du transfert systématique de ce savoir à la conception et la production ».¹⁸ En d'autres mots, *l'approche émergente* s'intéresse à l'évolution d'un système

¹⁷ L'Université Laval et les partenaires de la chaire de recherche, entre autres Chantiers Chibougamau.

¹⁸ Angl. « [...] an understanding of the behaviour of complex systems and mathematics of their processes, and of the systematic transference of that knowledge to design and production. » Traduction libre de l'auteure.

naturel et suggère des modèles et méthodes pour la conception et la fabrication de formes architecturales qui s'en inspirent des systèmes matériels présentant un comportement complexe semblable. Les nouvelles stratégies de design qui sont proposées dérivent donc du développement évolutif de systèmes vivants, de leurs propriétés matérielles et métaboliques et de leurs réponses adaptatives à leur environnement.

L'approche émergente pointe vers la recherche-crédation comme méthode de recherche compte tenu de la relation étroite, lors de la conception, entre les paramètres matériels, l'utilisation d'un type d'assemblage innovant et la forme complexe du bâtiment en CLT.¹⁹ La recherche-crédation est aussi la méthode employée par la plupart des équipes de conception, citées dans ce mémoire, qui se sont intéressées aux géométries complexes en bois.

Plus spécifiquement, le projet de recherche-crédation développera son propre modèle évolutif qui résultera en :

- Un mécanisme de conception de la structure
- Une application du savoir issu de ce processus pour alimenter la conception et la production de l'objet architecture
- Une proposition de processus d'autovalidation de notre système
-

5 Structure du mémoire

Pour répondre à ces objectifs nous verrons, dans le chapitre 2, en quoi consiste la recherche-crédation et comment nous l'aborderons spécifiquement dans le cadre de ce projet. Nous verrons aussi comment nous approcherons la conception intégrée dans nos travaux. Nous présenterons ensuite comment cette recherche intégrée se transpose principalement dans l'usage des divers outils de conception de l'architecte et comment nous les mettrons en relation pour optimiser le travail et la collaboration entre les différents intervenants.

¹⁹ La recherche-crédation sera définie au prochain chapitre, voir page 19 du mémoire.

Nous aborderons ensuite la conception directement et, pour ce faire, nous ferons un portrait des différents systèmes constructifs et systèmes d'assemblage à notre disposition pour la conception de non-standard en CLT. Nous verrons ensuite quels sont nos critères de validation pour la conception de notre projet et comment ils nous aideront par la suite à définir la méthode constructive idéale et le processus de conception du projet. Le chapitre 2 se clôt sur la présentation du projet sur lequel nous appliquerons notre processus de conception : une toiture-terrasse pour la Jetée Alexandra à Montréal.

Dans le chapitre 3, nous présenterons le système constructif développé ainsi que les théories et défis de conception qui s'y rattachent. Une simplification du processus de création de nos propositions et leurs résultats quant à la forme seront présentés en déconstruisant notre algorithme génératif.

Finalement, le chapitre 4 ira un peu plus loin dans le processus de conception en se concentrant sur la validation structurelle et constructive de notre projet architectural. Ce chapitre contient un article soumis au périodique *Research in Engineering Design*. On y définira les avantages et les limites de l'analyse de structure intégrée à notre processus de design itératif.

En conclusion, nous évaluerons, à partir des critères définis dans les chapitres précédents, les résultats du projet développé dans ce mémoire. Nous verrons comment cette recherche démontre que, lorsque le bâtiment est pensé dans son ensemble dès sa conception, à l'aide des outils numériques de modélisation paramétrables, il peut être plus économique et écoresponsable qu'un bâtiment conçu avec l'approche de conception courante.

Du point de vue scientifique, les détails de la démarche numérique employée dans cette recherche favoriseront l'avancement des connaissances sur les possibilités constructives du CLT au Québec. Les résultats de la recherche alimenteront aussi la réflexion sur les avantages des méthodes de conception intégrant dès le départ les caractéristiques et propriétés du matériau dans l'exploration formelle d'un objet architectural..

Chapitre 2 – Méthodologie de conception

1 Recherche-Création

La recherche-création n'est pas une méthode courante dans le milieu de la recherche et l'on ne peut que constater la rareté de définitions précises. Pourtant sa pratique est présente dans de nombreux milieux. Dans le milieu académique de l'architecture, même si elle n'est que très rarement nommée, on la devine par exemple dans les projets de fin d'études des étudiants.    l'Université Laval, la conception du projet de fin d'études découle d'une étude effectuée sous forme d'essais où les théories étudiées sont appliquées dans un projet d'architecture. Comme ces explorations ne s'effectuent pas dans un cadre de recherche proprement dit, certains raccourcis et une certaine flexibilité dans la définition de la méthode et des liens entre la théorie et son résultat pratique sont tolérés. Aussi, il semble important, dans la première partie de ce chapitre, de définir de notre mieux ce qu'est la recherche-création et comment elle s'inscrit dans le milieu scientifique en général. Nous pourrions ainsi nous positionner face à la méthode et expliquer comment nous l'utiliserons dans notre contexte particulier.

Il faut se tourner vers les instances gouvernementales, nommément le Conseil de recherches en sciences humaines (Gouvernement du Canada, 2016) et le Fonds de recherche du Québec – Société et culture (Gouvernement du Québec, 2017) pour trouver une mention directe de la recherche-création dans laquelle on l'associe traditionnellement aux milieux de disciplines artistiques comme l'architecture, le design, la création littéraire, les arts visuels, les arts d'interprétation, le cinéma, la vidéo, les arts de la performance, les arts interdisciplinaires, les arts médiatiques et électroniques, et les nouvelles pratiques artistiques (Gouvernement du Canada, 2016). Le CRSH tente une définition :

Approche de recherche combinant des pratiques de création et de recherche universitaires et favorisant la production de connaissances et l'innovation grâce à l'expression artistique, à l'analyse scientifique et à l'expérimentation. Le processus de création, qui fait partie intégrante de l'activité de recherche, permet de réaliser des œuvres bien étoffées sous diverses formes d'art. La recherche-crédation ne peut pas se limiter à l'interprétation ou à l'analyse du travail d'un créateur, de travaux traditionnels de développement technologique ou de travaux qui portent sur la conception d'un curriculum.

Toutefois, cette description souligne davantage ce que la recherche-crédation n'est pas, à savoir simplement une interprétation, une analyse ou une création, et, la nature du résultat : une production issue de la création, d'une analyse scientifique et d'expérimentation. Elle donne malheureusement peu d'indications sur le processus lui-même et sur l'interrelation entre les trois fondements de cette production de connaissances et d'innovation. Elle reste aussi vague quant à l'interprétation des connaissances et des innovations qui doivent en émerger pour ne pas seulement être en présence de recherche ou de création.

Il faut donc se tourner vers une autre définition officielle de la recherche-crédation pour saisir davantage la « mécanique » sous-jacente au processus de recherche-crédation et, ainsi, mieux comprendre comment un processus typiquement associé aux arts peut aussi être intégré dans un processus de recherche faisant appel à des concepts d'ingénierie.

Le Fonds de recherche du Québec - Société et culture (Gouvernement du Québec, 2017) donne la définition la plus intéressante, car elle suggère un processus, des règles à suivre pour soutenir l'objectif de recherche, structurer la démarche créatrice et en retirer des connaissances, non seulement une œuvre.

Par recherche-création, le Fonds désigne toutes les démarches et approches de recherche favorisant la création considérée comme un processus continu. S'y conjuguent, de façon variable suivant les pratiques et les temporalités propres à chaque projet : conception, expérimentation, production, saisie critique et théorique du processus créateur. Considérant qu'il n'est pas de recherche-création sans allées et venues entre l'œuvre et le processus de création qui la rend possible et la fait exister, le Fonds pose comme principe la nécessité d'une problématisation de la pratique artistique en vue de produire de nouveaux savoirs esthétiques, théoriques, méthodologiques, épistémologiques ou techniques.

Selon le Fonds, une démarche de recherche-création repose sur :

- L'exercice d'une pratique artistique ou créatrice soutenue ;
- L'élaboration d'un discours intégré à la réalisation d'œuvres ou de productions présentant un caractère de nouveauté, ou à la mise en œuvre de processus de création inédits ;
- [...]

Une démarche de recherche-création doit ainsi contribuer au développement du champ concerné par un renouvellement des connaissances ou des pratiques, ou par des innovations de tous ordres.

Les activités de recherche-création menées dans le cadre de ce programme doivent plus précisément contribuer :

- Au développement de productions issues d'une pratique artistique ou créatrice à la condition qu'elles offrent un caractère de renouvellement ou d'innovation du point de vue de la démarche suivie, des processus déployés, des technologies ou des matériaux utilisés, des modes de présentation ou d'expérimentation, du répertoire ou du style d'interprétation ;
-    la formation de la relève étudiante ;
- [...]

On retient de cette définition : le processus continu d'une pratique créatrice soutenue, la présence d'expérimentation, de production, de saisie-critique et de théorie durant le processus de création. La présence d'allées et venues entre l'œuvre et le processus création est pleinement reconnue comme étant centrale    l'existence même de l'œuvre et à la recherche-création même. La présence d'une problématique est aussi considérée comme essentielle pour la production de savoirs issus de la recherche-création.

Dans les résultats attendus, les nouveaux savoirs produits par la recherche-création peuvent prendre plusieurs formes – esthétiques, méthodologiques et techniques – et doivent contribuer au champ étudié par un renouvellement des connaissances ou des pratiques.

Toutefois, dans un contexte où la conception d’un bâtiment et d’une structure à géométrie complexe va de pair avec l’intégration de notions d’ingénierie, donc de sciences pures, il est difficile de s’en tenir à une définition strictement associée à des domaines dits artistiques.

Malheureusement, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (Gouvernement du Canada, 2017), ne mentionne pas la recherche-création et semble, indirectement, consolider l’idée que cette approche est confinée aux sciences humaines.

Pourtant, considérant le processus et l’objectif d’une recherche-création, ce sont là autant d’éléments qui semblent applicables à la recherche en « génie » et, comme le souligne avec justesse Mathieu Boucher-Côté (2013) dans sa revue de littérature sur la recherche-création, « Il est raisonnable de suggérer, selon ce que nous apprend l’histoire de l’architecture, que les grandes découvertes de l’ingénierie architecturale ne découlent pas toutes d’une démarche scientifique, mais aussi de démarches plus empiriques où l’intuition et la création ont pu jouer un rôle important. Rel  guer la création au domaine des sciences humaines paraît, sur cette base, pour le moins réducteur. »

Pour mieux comprendre qu’est-ce qui peut relier, d’une part, la recherche telle qu’on la conçoit en sciences naturelles et en génie, et, d’autre part, la création, il faut s’intéresser à la nature du premier de ces volets. Selon Marcel Jean (Gosselin et LeCoquiec, 2006), dans le milieu universitaire, la recherche a plutôt pour but de comprendre, d’expliquer ce qu’elle étudie par un processus d’analyse, de décomposition et d’expérimentation. De ce fait, elle ne laisse que peu de place au hasard, à l’improvisation ou à l’erreur; des aspects inhérents de la création qui s’apparente plus à l’action de connaître par un travail de synthèse que de décomposition.

La conciliation de la recherche et de la création passerait donc par la liaison entre le travail de recherche basé sur l'objectivité et la compréhension, et celui de création plus ouvert à la subjectivité et à la connaissance résultant d'un travail de synthèse. On réalise alors que ce lien existe peut-être déjà sous la forme du « processus de bricolage ». (Boucher-Côté, 2013). Le chercheur objectif qui ne trouve aucune méthode préexistante va se tourner vers d'autres méthodes apparentées et développer la sienne à partir de ces dernières, en se basant sur des recherches et en s'ajustant à ses propres besoins. On a ici les éléments de base définissant la recherche-crédation : la présence d'une problématique (le thème de recherche), autour de laquelle s'effectuent des allers-retours entre explorations, production (d'une méthode le cas échéant) et des saisies-critiques pour défendre la méthode.

Ce processus de bricolage peut donc servir de base pour faire le pont entre la rigueur d'une méthodologie de recherche et l'intégration de la création dans un processus de recherche. Appliqué à un point de vue plus large qu'une recherche en science naturelle et en génie, on peut envisager que le processus de bricolage ne se déroulera pas exclusivement à la définition de la méthode.

Ainsi, durant un processus de création, le bricolage servira à informer les réflexions associées à l'approche plus intuitive de la création de principes techniques et théoriques. Ce bricolage aura pour effet de soutenir et de raffiner les résultats de la création, ou encore de les ancrer dans un contexte plus objectif. Entre alors en jeu le processus d'allers-retours mentionné plus haut où l'on va osciller entre les « la subjectivité expérientielle et de l'objectivité conceptuelle »²⁰ (Boucher-Côté, 2013).

Jamais linéaire, la recherche-crédation est constituée de phases d'itérations où chaque nouvelle question et nouvelle piste viennent informer l'itération suivante et étendre la portée de la recherche par l'accumulation de connaissances et de résultats. On se rapproche d'une solution idéale puisqu'à chaque itération on raffine les solutions.

²⁰ L'objectivité conceptuelle fait référence à l'évaluation critique des expérimentations durant le processus de conception.

Zeisel propose un modèle pour interpréter le concept de non-linéarité dans le processus créatif et les cycles de représentation itératifs où les idées sont imagées, présentées et testées. (Figure 9) (Zeisel, 1984)

Dans un contexte plus concret de conception architecturale, l'inclusion dans un processus de bricolage de différentes théories architecturales, de précédents et de systèmes constructifs innovants ou expérimentaux pour développer un nouveau projet mènera à une somme de connaissances plus grandes que si elles étaient considérées indépendamment. Le processus émergeant de cette somme des connaissances et utilisant ces études, théories et principes constructifs dans le développement du projet, est assimilable au développement d'une méthodologie propre au projet.

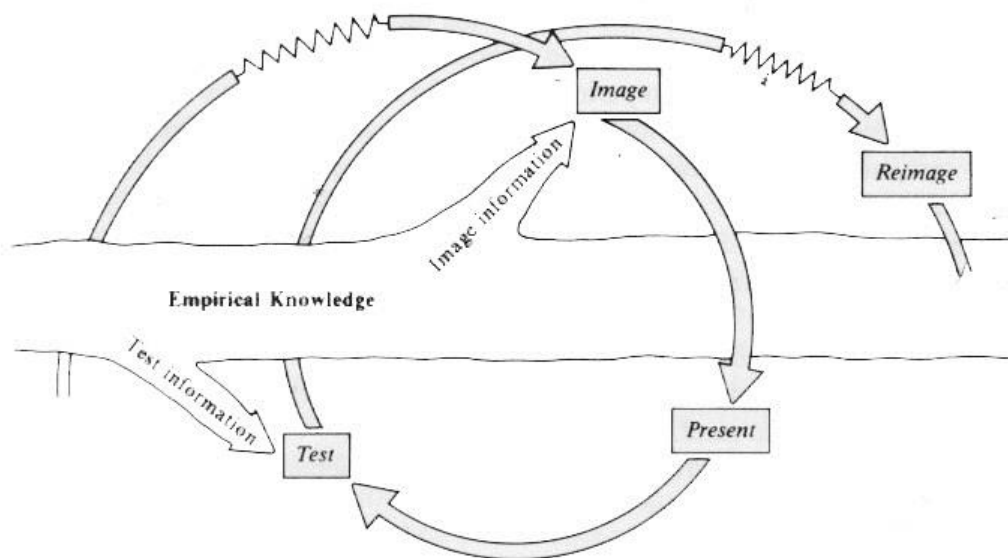


Figure 9 Imager, présenter, tester (Zeisel, 1984)

Ainsi, comme le souligne Verderbe (2005), une partie de la connaissance créative réside dans la dimension tacite des pratiques réflexives. Cela sous-entend que les réflexions, les expérimentations et les résultats, et toutes autres parties impliquées dans le processus de création, contribuent aux connaissances générées par la recherche. Ces nouvelles connaissances se retrouveront à la fois dans la méthode, les résultats et les conclusions de la recherche. Cette particularité de la recherche-crédation permet de mieux comprendre et manier certaines réalités plus complexes, généralement implicites au projet, qui ne peuvent être comprises autrement que dans un ensemble.

Finalement comme l'exprime Steven Johnson (dans Bernier-Lavigne, 2014) « Les collisions [d'idées] conduisent à la créativité ; les collisions qui se produisent lorsque différents domaines d'expertise convergent dans un espace physique ou intellectuel commun. C'est alors que les étincelles paraissent. » C'est l'émergence de ces réalités complexes qui permet d'amener un-niveau de compréhension et de connaissance supérieur. La chaire industrielle de recherche en construction écoresponsable en bois (Université Laval, 2016) reconnaît ce chemin d'innovation et c'est dans un contexte pluridisciplinaire que les réflexions de notre recherche seront menées.

Dans le contexte de notre recherche, qui consiste essentiellement à construire du non-standard en panneau de bois, nous nous permettons donc de quitter les techniques traditionnelles dont la mise en œuvre serait difficile dans le contexte du projet, pour nous intéresser aux nouvelles techniques afin de proposer une conception contemporaine et innovante. La section suivante expose les grandes méthodes constructives non standard en panneaux de bois. Ces méthodes nous permettront de créer notre propre « processus de bricolage ».

2 Construction non standard en panneaux de bois

Systèmes constructifs

L'introduction a fait état des systèmes constructifs à formes prédéfinies, ainsi que des limites formelles de ces dernières. Pour développer un projet d'architecture à forme libre, il convient de se tourner plutôt vers les systèmes non standard qui peuvent découler d'une surface libre, d'une volumétrie irrégulière ou même s'autogénérer. Nous verrons les différents systèmes d'assemblage convenant à la construction en panneaux de bois. Ils font partie intégrante de tout projet car ils assurent la stabilité de la structure tout en offrant la polyvalence nécessaire pour s'adapter autant au système qu'aux conditions de mise en œuvre du projet.

La Tessellation

La tessellation consiste à subdiviser une surface courbe en une multitude d'éléments plans. C'est la méthode employée lorsque l'on travaille avec une surface libre, c'est-à-dire non plane et complexe. La tessellation est issue du besoin de construire une surface à double courbure de façon économique (Tsigkari, 2006 ; Pavlíček et Kaftan, 2012 ; Stavric, Hirschberg, et Wiltsche, 2010) et efficace.

Les principaux exemples de cette méthode utilisant des panneaux de bois sont le Laga Exhibition Hall (Schwinn, Olivier, et Menges, 2014) et le pavillon serpent de l'UT Graz. (Schimek, Meisel, et Bogenperger, 2010) (Figure 10 A et B). Les chercheurs de l'Université de Graz ont même réussi à concevoir une surface en CLT à double courbure entièrement faite en bois, y compris au niveau des assemblages (voir assemblage Bois-Bois page 35). Le prototype construit dénote une intégration contrôlée des assemblages dans le modèle. La géométrie des panneaux résulte quant à elle de la recherche préliminaire (Stavric, Hirschberg, et Wiltsche, 2010) veillant à intégrer un « pattern » ornemental dans la subdivision de la surface en panneau.

L'équipe du Laga Exhibition Hall s'est intéressée dans son processus à l'utilisation du mode agent (angl. *Walking Agent*) (voir section 2

Planarisation des motifs pour plus de détails sur le principe du mode agent et de l'approche ascendante (angl. *Bottom up*) qui y est associée). Selon cette approche, la géométrie du panneau est définie selon les propriétés de la surface (i.e. rayon de courbure) à un point précis de cette surface. La méthode est cumulative puisque les propriétés de la surface à ce point vont définir l'emplacement du prochain point à analyser. Les propriétés de la surface à ce nouveau point détermineront la géométrie du nouveau panneau annexe au premier panneau. L'analyse se poursuit ainsi à partir du dernier point et panneau généré. C'est le principe génératif du mode agent. Le résultat est un panneau qui s'adapte très précisément à la forme, comme l'on peut le voir à la figure 10 où les panneaux changent progressivement de forme à mesure que la courbe de la surface devient convexe. Le pavillon serpent quant à lui découle, comme mentionné plus haut, d'une étude antérieure sur l'ornementation où les motifs de la tessellation devenaient un facteur esthétique majeur pour rehausser un projet.

A



B



Figure 10 A. Hall d'exposition LaGa (ICD Stuttgart); B. Serpent Pavillion (TU Graz)

Structures en gaufre

Le système de gaufrage est le mieux adapté lorsqu'on fait face à un volume libre. L'exemple le plus éloquent, le Metropol Parasol (Schmid, Koppitz, et Thurik, 2011) de l'architecte Jürgen Mayer-Hermann, exprime bien le principe de la grille comme système constructif. Pour ce projet, c'est un autre matériau d'ingénierie en bois structurel qui a été retenu, le bois de placages stratifiés (LVL).²¹ (Figure 11 A). Bien que cet exemple ne soit pas en CLT, la grille reste cependant un système envisageable pour ce matériau.

Dans ce projet, comme c'est souvent le cas lorsque le système vient en réponse à la forme, le choix du matériau est venu en aval. Avec des porte-à-faux imposants, la structure nécessitait un matériau léger. C'est principalement pour cette raison que le LVL a été retenu.

Cependant, si la structure convient à l'ambition du projet et à ses particularités, le système, employé et développé de cette manière, n'est pas des plus abordables. En outre, son utilisation sur une structure de plus petite échelle semble compromettre l'intérêt même d'utiliser le CLT, le LVL pouvant à priori offrir plus économiquement le résultat recherché.



A



B

Figure 11 A. Metropol Parasol (Schmid, Koppitz et Thurik, 2011); B. Motorway Church Siegerland

²¹ Le bois de placages stratifiés (*Laminated Veneer Lumber*) est panneau de bois d'ingénierie constitué de plis sont constitué de placage de bois dont les fibres sont généralement alignées dans la même direction. (cecobois.ca)

La forme par système

Oscillant entre la programmation et l'architecture, cette approche est employée dans un projet où le système est développé de façon « sur mesure » par une équipe multidisciplinaire ayant à son bord plusieurs architectes-programmeurs. Plus complexe sera le système, plus grand sera le nombre de facteurs pris en compte dans la génération de sa forme et de ses détails, dans un souci d'optimisation. Cela aura généralement un impact positif sur l'économie et l'efficacité du projet. Cependant, développer son propre système est un processus fastidieux et nécessite que le concepteur soit familier avec ce genre de conception par programmation. C'est toutefois l'approche qui offre le plus de possibilités et d'adaptabilité. Afin de favoriser la compréhension d'un tel système, nous présenterons un exemple, développé par le laboratoire IBOIS, où les notions de mathématiques avancées utilisées témoignent de la complexité de l'approche. (Gouaty, 2010)

Géométrie itérative sous contrainte

Le projet du laboratoire IBOIS s'inspire des modèles itératifs existants en conception assistée par ordinateur tels que le Catmull-Clark et le Doo-Sabin, qui sont des algorithmes de subdivision (descendant), ou le L-System qui est, à l'inverse, un algorithme de croissance (ascendant). Ces modèles permettent de représenter des formes lisses polynomiales ou rationnelles en y appliquant, par l'intermédiaire d'un algorithme, un certain procédé de subdivision itérative. (Gouaty, 2010). Le principe consiste à répéter une action ou une fonction sur un objet selon un nombre de niveaux préalablement défini. La résultante de l'action subira elle-même cette action de nouveau jusqu'à ce que soit atteint le nombre de niveaux défini au départ. Cette méthode s'inspire des fractales. (Stotz, Gouaty, et Weinand, 2009) (Figure 12)

Généralement utilisée dans des applications purement graphiques, la démarche de Stotz, Gouaty et Weinand (2009) consiste à utiliser l'addition de vecteurs afin de créer une surface itérative constituée d'éléments plans. L'avantage c'est qu'il est possible de concevoir une surface avec n'importe quelle paire de courbes individuelles. La surface ainsi créée génère des points de contrôle qui permettent de modifier l'aspect global de la structure et de jouer sur l'aspect « souple » ou « rugueux » de la surface. Ils combinent ainsi une logique de subdivision à une logique additive afin de faire croître un modèle 3D.

À cette approche, les concepteurs ont ajouté un certain nombre de contraintes topologiques et constructives, notamment la conception en panneau, l'épaisseur du matériau, le nombre d'éléments par nœud (pour diminuer le nombre d'éléments qui se recoupent en un point), en vue d'optimiser la production d'une architecture non standard. Ces contraintes de conception ont une incidence directe sur la fabrication, les coûts et le temps de montage. (Stotz, Gouaty, et Weinand, 2009).

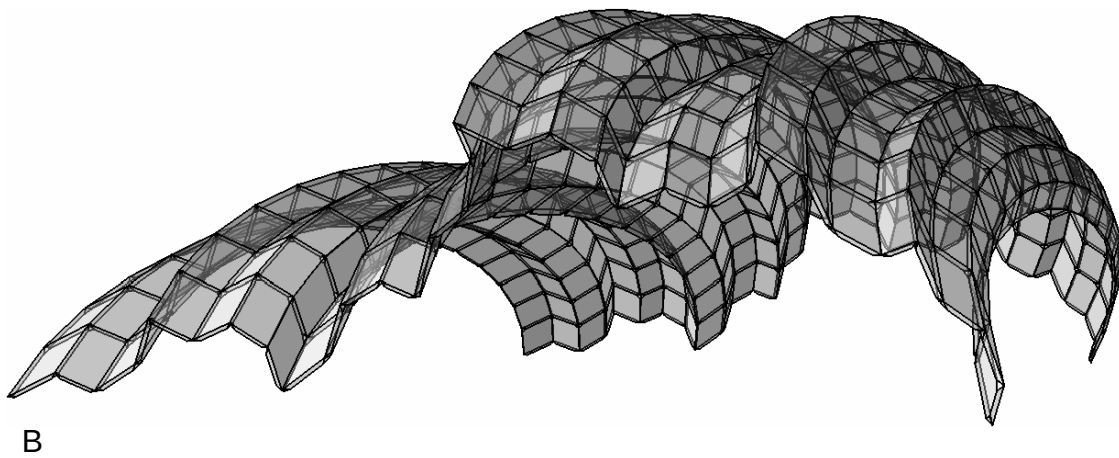
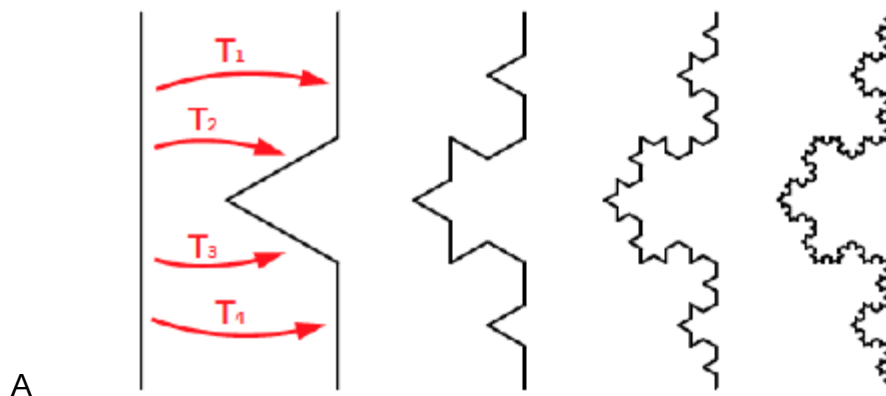


Figure 12 A. Courbe de Von Koch (Stotz, Gouaty et Weinand, 2009); B. Modèle développé sous le principe d'itération/fractale (Stotz, 2009)

Assemblages

Le choix d'un bon assemblage vient toujours de pair avec le système constructif. Si, en principe, il a comme rôle d'assurer l'intégrité de la structure en maintenant la continuité de la résistance et de la rigidité, en pratique par contre, les systèmes ne réagissent pas toujours de la même façon. Ainsi, parfois trop de rigidité peut augmenter les forces internes dans la structure (Haasis et Weinand, 2008; Buri, Stotz, et Weinand, 2011), il faut alors trouver l'assemblage qui permettra le juste équilibre. En non-standard, on parle plutôt de transmettre les charges et les forces de tension d'un panneau à l'autre. (Haasis et Weinand, 2008 ; Schimek, Dominguez, Wiltsche, et Manahl, 2012) C'est pourquoi l'ingénieur doit être impliqué le plus rapidement possible dans le projet afin d'intégrer les assemblages dans l'ensemble de la structure de façon harmonieuse, surtout s'ils sont visibles.

Dans la littérature, il n'existe pas de catégorisation précise des différents types d'assemblage. Dans la fabrication standard, on parle principalement d'assemblage traditionnel ou moderne (Gagnon et Pirvu, 2011) ou encore de charpenterie (Mohammad, 2011). Cependant, ce genre de catégorisation n'existe pas en dehors de la sphère du standard, et les solutions employées n'entrent pas toujours dans l'une de ces catégories. Aussi, trois catégories plus générales sont proposées afin de distinguer ce qui existe comme assemblages à ce jour pour le CLT : Bois-Bois, mixte et avec connecteurs. Stotz (2009) propose aussi deux sous-catégories que nous avons appliquées aux catégories principales et qui viennent influencer la mise en œuvre globale de notre structure : les assemblages internes et les assemblages externes. (Figure 13)

Externe vs Interne

Les connecteurs externes comprennent tous les assemblages qui sont visibles lorsque la structure est entièrement exposée. Ces connecteurs sont en général plus simples à mettre en place et seront habituellement installés sur le chantier. L'économie et la valeur esthétique de ces assemblages varieront beaucoup en fonction du projet. Par exemple, un système de plaque d'acier installé à l'extérieur de la structure a été employé lors de la construction de la Chapelle Saint-Loup utilisant le système constructif du pli-origami (Buri H. U., 2010). (Figure 14 A). Le nombre limité de panneaux et la simplicité d'installation rendaient la solution appropriée. De plus, puisque posés sur les faces extérieures de la structure, l'apparence peu esthétique de ces connecteurs se trouvait cachée par l'enveloppe du bâtiment, laissant l'intérieur exempt d'assemblages apparents. La multiplication de ce genre de connecteurs sur mesure peut cependant devenir inappropriée. Lorsqu'ils sont apparents, une attention particulière aux détails d'assemblage doit alors être portée à leur conception puisqu'ils feront partie de la signature architecturale du projet.

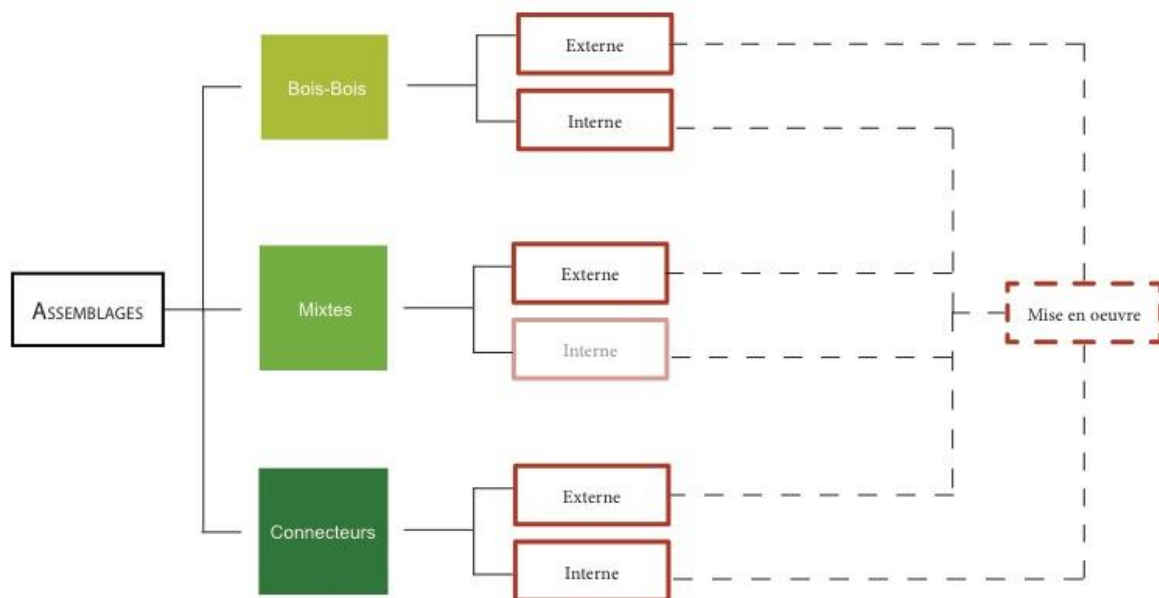
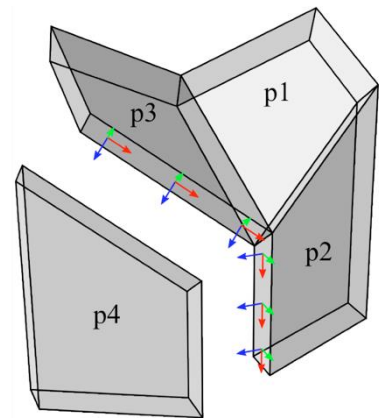


Figure 13 Schéma des différentes catégories de stratégies d'assemblage



A



B

Figure 14 A. Assemblage de la Chapelle Saint-Loup (Buri, 2010);
B. Hiérarchie/coordination de montage pour les assemblages internes (Stotz, 2009)

Les connecteurs internes sont quant à eux souvent considérés plus esthétiques puisque complètement invisibles. Ils demandent moins d'effort d'intégration en termes de finition et sont aussi plus sécuritaires, car protégés de l'extérieur. Ils offrent également une meilleure résistance au feu.

Par contre, ils exigent une grande réflexion en ce qui concerne la fabrication et la mise en œuvre puisqu'ils impliquent très souvent de la préfabrication et du prémontage. Lors de la mise en œuvre, ce type de connexion nécessite un espace minimal entre les panneaux afin de permettre la mise en place du panneau qui doit se glisser selon un axe précis d'insertion. C'est pourquoi l'assemblage simultané d'un panneau avec deux éléments voisins est souvent impossible à cause des deux directions de glissement nécessaires. (Stotz, 2009) (Figure 14 B). La méthode et les détails de mise en œuvre doivent donc impérativement être pris en compte. Un seul panneau peut présenter deux types d'assemblages différents. Ces assemblages devront être déterminés dès la conception pour qu'il en soit tenu compte lors de la fabrication numérique du panneau.

Bois-Bois

Ces assemblages entièrement constitués de bois sont aussi les plus complexes à concevoir puisqu'ils doivent, sans le renfort de vis ou clous, assurer leur rôle structural en atteignant les exigences de rigidité et de résistance. La fabrication numérique est omniprésente dans l'utilisation de ce type d'assemblage.

Pour plusieurs auteurs (Schimek, Dominguez, Wiltsche, et Manahl, 2012 ; Calderon, Schimek et Wiltsche, 2011), les assemblages sont des éléments clés de la structure et leur apparence a un impact crucial sur l'ensemble d'un projet à structure visible. Parmi les assemblages notables Bois-Bois, le nouveau système d'assemblage développé par l'équipe de l'Université de Graz se distingue par son efficacité et sa contribution à l'esthétique de la structure.

Nommée « sewing timber » cette solution innovante utilise des tasseaux en LVL insérés et collés dans des rainures préusinées sur les panneaux. (Schimek, Dominguez, Wiltsche et Manahl, 2012) (Figure 15). Toutefois, ce système exige énormément de précision dans sa découpe (5 axes) et dans sa mise en œuvre où l'imprécision du travail manuel se trouve confrontée à la précision des modèles et des découpes numériques.²² Cette exigence de précision soulève des craintes chez certains auteurs (Stotz, 2009) dans tout projet non standard de grande échelle.

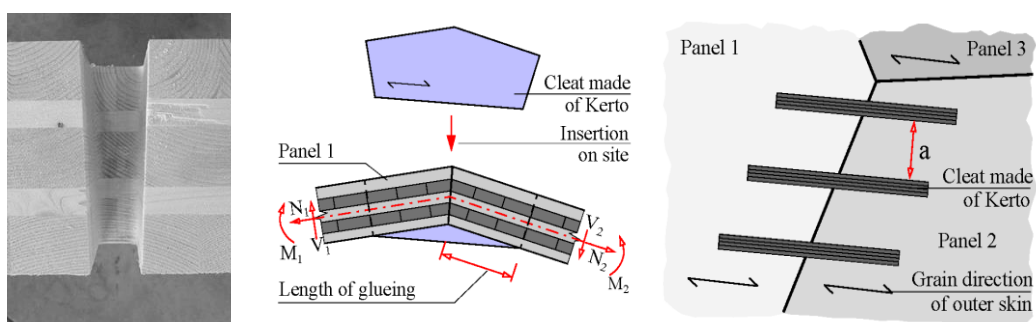


Figure 15 Les assemblages "sewing timber" développés par Schimek et al. 2012

²² Le terme 5 axes réfère à la capacité de la machine à commande numérique de bouger dans 5 différents axes simultanément. Une machine 3 axes, par exemple, bougera dans deux directions (X et Y) et l'outil de découpe se déplacera typiquement de haut en bas (Z). Une machine 5 axes pourra pivoter dans deux axes supplémentaires (A et B) ce qui permettra à l'outil de découpe d'approcher la découpe de toutes les directions.

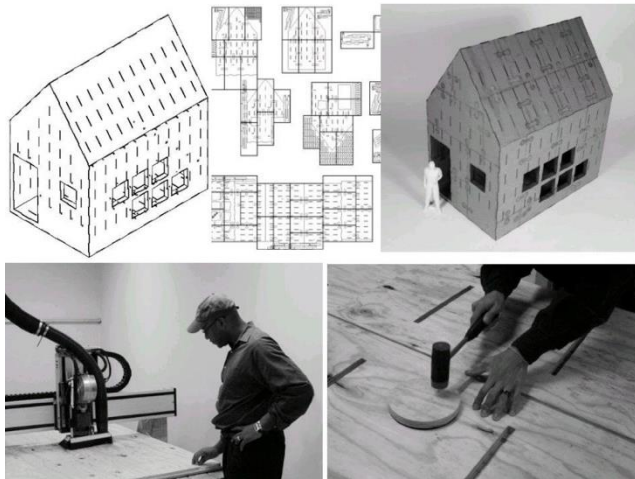
Parmi les autres assemblages Bois-Bois possibles, on peut penser aux vis de bois massif de l'entreprise Rombach-Holzhaus (2016) ou aux chevilles de bois que propose Stotz (2009) dans son mémoire. (Figure 16 C). Le système de chevilles est toutefois limité à certains angles. En effet, à 90 degrés, la profondeur de bois disponible étant plus mince, ce choix est peu réaliste.

Les systèmes présentés jusqu'à maintenant se caractérisent par l'ajout d'une nouvelle pièce dans le détail d'assemblage afin d'assurer la solidité de la connexion. Certains se sont intéressés à la transformation même des panneaux pour un assemblage direct, à l'image d'un casse-tête. Pensons aux systèmes japonais d'assemblage traditionnel en bois sans colle, de type Tugite et Shiguchi. Ces assemblages, grâce à une configuration 3D complexe de leurs articulations, permettent d'assurer toute la rigidité et la solidité nécessaire à la structure. Plus typiquement utilisés dans des systèmes poteaux poutres, on en connaît aussi quelques applications dans l'assemblage de panneaux selon des configurations orthogonales en ameublement. Kanasaki et Tanaka (2011) explorent d'ailleurs déjà la paramétrisation de ces assemblages japonais en vue d'une expansion de leur utilisation dans la conception numérique de petits objets. Il est aisément envisageable de considérer leur application à l'échelle d'un bâtiment. (Figure 16 A). Lawrence Sass (2009) va un peu plus loin en envisageant le panneau comme un élément d'assemblage en soi. Il propose une grammaire de panneau de bois en prenant le pari réussi et particulier de concevoir une maison en contreplaqué à l'aide seulement d'une machine-outil à commande numérique 2 axes. (Figure 16 B)

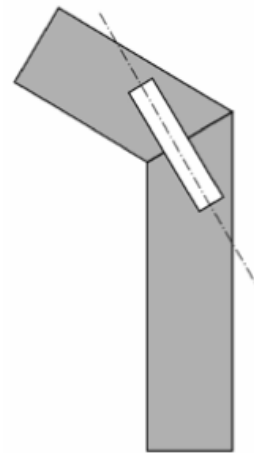
Plus récemment, Christopher Robeller (Robeller, Mayencourt et Weinand, 2014) propose un système inusité de « snap-fit joints » pour assembler des panneaux de bois dans une structure utilisant les principes de l'origami et en l'y intégrant dans un système de double couche. (Figure 16 D)



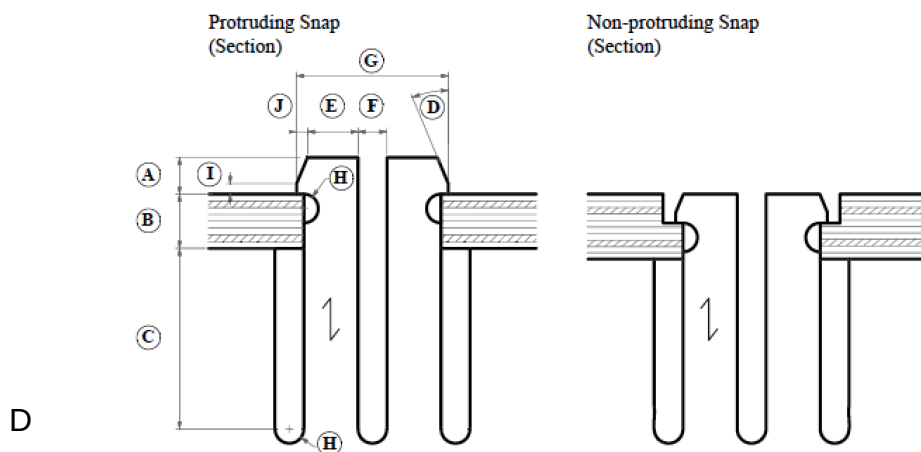
A



B



C

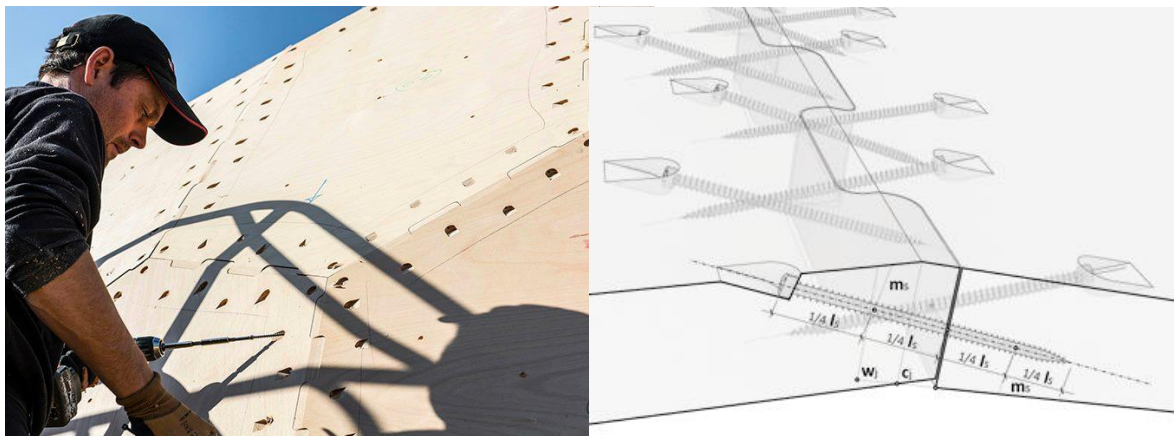


D

Figure 16 A. Assemblages traditionnels typiques Tugite et Shiguchi paramétrés par Kanasaki & Tanaka (2011); B. Maison en contreplaqué à la découpeuse 2 axes CNC (Sass, 2006); C. Cheville de bois dans un assemblages en angle (Stotz, 2009); D. Connecteurs Snap-fit en LVL fabriqués par une CNC (Robeller, Mayencourt, & Weinand, 2014)

Mixte

Ces assemblages sont à la base des assemblages Bois-Bois auxquels on a ajouté des renforts structuraux (i.e. des vis structurelles) afin d'apporter la rigidité et la résistance nécessaires au système. Les assemblages à queue d'aronde sur de grandes structures fournissent l'exemple le plus couramment rencontré. Le LaGa Exhibition Hall (Schwinn, Olivier, et Menges, 2014), résultat du projet de recherche entre l'Université de Stuttgart et le Müller Blaustein Timber GmbH, est un bon exemple de ce type d'assemblage. (Figure 17). Fait à noter, comme pour les assemblages Bois-Bois, il y a une grande part de fabrication numérique, autant pour la découpe des queues d'aronde que le préperçage des trous réceptionnant les vis structurelles. Ce préperçement est essentiel afin d'assurer l'efficacité et l'économie du chantier en permettant une mise en œuvre rapide et aisée. Le centre de recherche IBOIS a depuis 2011 un projet de recherche en cours explorant plus particulièrement ces joints linéaires à queue d'aronde afin de les rendre conformes à l'Eurocode 5. (IBOIS, 2015)



A

B

Figure 17 A. Le hall d'exposition LaGa en construction. L'ouvrier est en train de poser les vis structurelles permettant de renforcer l'assemblage linéaire à queue d'aronde des panneaux en LVL (ICD Stuttgart) ; B. Détail de l'assemblage mixte utilisé pour le pavillon (ICD Stuttgart)

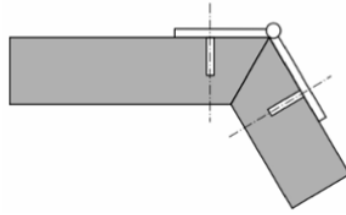
Connecteurs

Ce type d'assemblage est le plus courant et consiste le plus souvent à ajouter un connecteur métallique externe afin d'assurer la rigidité et la résistance de la structure. (Figure 18). Leur intérêt réside dans leur efficacité et leur disponibilité lorsque le sur-mesure n'est pas exigé. (Mohammad, 2011). Lorsque les panneaux s'assemblent dans des angles autres que 90 degrés, des connecteurs externes sur mesures sont nécessaires. Il faudra faire appel à la fabrication assistée par ordinateur à la fois pour la découpe en angle des panneaux et pour la fabrication des connecteurs. Le degré de précision exigé pour la réalisation de ces détails d'assemblage est toutefois moindre que les deux catégories d'assemblages présentés précédemment. Puisqu'ils sont considérés comme moins esthétiques, les connecteurs externes sont généralement dissimulés par des éléments de finition. Ces éléments de finition sont essentiels puisque l'acier, qui a une résistance au feu inférieure à celle du bois, doit être protégé afin de respecter les normes de résistance au feu.

L'utilisation de connecteurs internes peut être une solution intéressante pour contrer ce désavantage. (Figure 19). Cependant, à moins que le design de la structure permette l'utilisation d'un modèle de connecteur interne industrialisé, innovant, mais dispendieux, il faudra se tourner vers une fabrication sur mesure. Puisque les connecteurs internes nécessiteraient davantage d'usinage pour une structure non standard, autant pour les connecteurs que pour les panneaux, et que leur fabrication est indépendante de la chaîne de fabrication du panneau CLT, contrairement aux assemblages mixtes ou Bois-Bois, le coût de leur production serait prohibitif. Par ailleurs, un connecteur interne sur mesure est aussi expérimental qu'un assemblage Bois-Bois ou mixte et présente peu d'avantage au-delà de l'aspect esthétique.



A

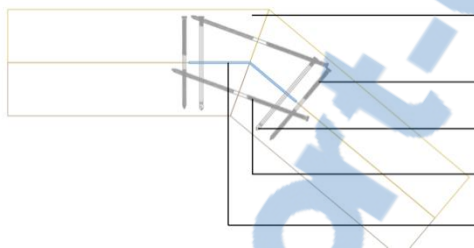


B



C

Figure 18 A. Connecteurs métalliques (Gagnon et Pirvu, 2011); B. Connecteurs externes sur mesure (Stotz, 2009); C. Vis structurelles (Mohammad, 2011)



A

1. Two layers of cross glued timber panel, 110mm
2. 2 x SFS WT, 190mm
3. 2 x SFS WS, 190mm
4. 2 x SFS WT, 300mm
5. Metal plate, 3mm



B

Figure 19 A. Vis structurelles (Stotz, 2009); B. Connecteur par emboîtement (Rothoblaas, 2015)

3 Conception intégrée – l'architecture numérique solution intégrative

Schématiquement, nous avons déterminé en introduction que le système constructif d'une structure en CLT, qu'elle soit standard ou non, découle de la combinaison du matériau, le CLT, et d'une stratégie d'assemblage. (Figure 3). Plus encore qu'une structure standard, la structure non standard doit toujours être considérée comme un objet d'ingénierie et elle nécessite de ce fait des équipes pluridisciplinaires dès les premières phases du projet. Une stratégie de conception intégrée est par conséquent essentielle dans leur cas afin d'optimiser et d'intégrer les différents aspects du projet dans la structure.

La réticence des donneurs d'ouvrage à construire du non-standard en bois dépend souvent du critère économique du projet. Les coûts de construction et de réalisation sont généralement élevés parce que, souvent, il n'existe pas de moyen préétabli pour concevoir l'esquisse du projet. On s'attelle alors à résoudre des problèmes plutôt qu'à concevoir autrement. Harald Kloft (2010) évoque d'ailleurs trois façons d'aborder la conception de la structure dans un projet non standard en architecture : modeler la forme, trouver la forme et générer la forme.^{23 24}

Reprenons l'exemple du Metropol Parasol (Schmid, Koppitz et Thurik, 2011), structure élégante et impressionnante, mais qui a été coûteuse à mettre en œuvre. L'examen du processus du projet nous apprend que l'idée du concours n'incluait aucune matérialité (Schmid, Koppitz et Thurik, 2011). Le bois a été choisi dans les phases ultérieures du projet, pour sa légèreté. Donc, il s'avère un matériau de solution, la structure n'ayant pas, de prime abord, été conçue pour le bois. Conséquence : il a fallu accomplir un travail énorme pour assurer la viabilité de la structure, et surtout pour rationaliser les assemblages. En définitive, les assemblages développés sont polyvalents et permettent d'accommoder toutes les jonctions uniques de la structure, en contrepartie d'un coût élevé de production. Aurait-on pu réduire les coûts si le concept initial du projet avait été basé sur le bois ?

²³ Angl. « Shaping form, finding form, and generating form » (Kloft, 2010, p. 121) Traduction libre de l'auteur.

²⁴ « Trouver la forme » ne renvoie pas au terme employé en anglais « Form Finding ». Kloft emploie d'ailleurs l'expression « Finding Form » plutôt que « Form Finding ». « Générer la forme » (angl. Generating Form » s'apparente plus au « Form finding » qui inclut la physique dans le processus de génération de la forme.

C'est là un bel exemple de « trouver la forme » au lieu de « modeler la forme », parce qu'on a consenti à modifier avec parcimonie la géométrie initiale afin de faire coïncider la structure avec le concept et la structure (Kloft, 2010). « Modeler la forme » interdit pareille liberté, la forme devant impérativement respecter le concept initial, ce qui revient à « faire rentrer » la structure dans le concept à tout prix, littéralement et figurativement. Les deux approches ont cependant un point commun : l'intégration de la structure vient toujours après l'élaboration du concept et se fait donc de façon plus ou moins efficace.

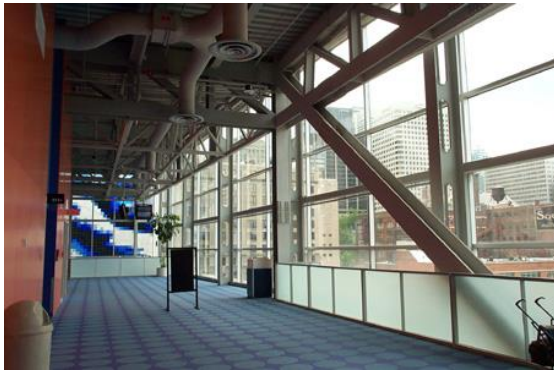
L'approche intégrée part du principe qu'en incorporant la complexité au développement du projet d'architecture et en planifiant, dès les premières phases du projet, les aspects qui seront problématiques ou qu'il faudra optimiser, il devient possible de surmonter les défis d'un projet non standard, entre autres sur le plan financier. C'est la troisième approche évoquée par Kloft (2010) : générer la forme.

Donc, si la conception intégrée rend possible un design à la fois optimal et économique, en plus de faciliter le contrôle rapide de plusieurs aspects du projet, elle suppose de réunir le plus grand nombre de compétences dès les premières étapes du projet. Dans la pratique, cela signifie qu'on invitera l'ensemble de l'équipe à travailler à la conception : l'ingénieur en structure, les ingénieurs des systèmes, le paysagiste, l'urbaniste, l'expert en programmation, etc. . Par souci de simplification, nous nous concentrerons sur l'élaboration d'un concept du point de vue de l'équipe architecte-ingénieur.

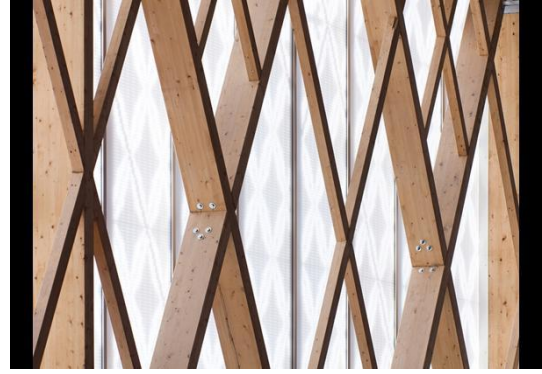
De prime abord, il paraît déjà difficile de réunir une équipe bidisciplinaire architecte-ingénieur en structure autour d'une même table pour développer les premières idées du projet. Le problème s'amplifie lorsque le milieu professionnel pratique en silo comme c'est le cas au Québec. Collaborer efficacement dans ces conditions demande de la volonté doublée d'un grand sens de l'organisation. L'ingénieur en structure a l'habitude de baser ses commentaires sur la structure qu'on lui soumet; il peut donc être difficile de l'impliquer dans la conception même d'une structure, en collaboration avec un architecte, s'il n'est pas habitué, ou du moins ouvert à l'idée de faire plusieurs explorations de structures et aussi

d'envisager des solutions qui ne lui seront peut-être pas familières. L'architecte, pour sa part, doit faire évoluer son concept architectural au gré de la structure, plus encore, intégrer des notions de structure dans ses esquisses. Une mauvaise intégration ou une conception en silo va donner des structures inadaptées au projet d'architecture ou des aberrations comme un contreventement massif placé au milieu d'un mur rideau plutôt-qu'intégré dans la structure. Des collaborations réussies nous ont offert des bâtiments iconiques. Pensons aux collaborations de Cecil Balmond et de plusieurs architectes connus qui ont mené entre autres à la réalisation de la résille de bois du centre Pompidou Metz par Shigeru Ban, Cecil Balmond, Jean de Gastines, Philip Gumuchdjian et Arup, au Pavillon Serpentine Ito-Balmond ou encore à la CCTV HQ Tower de Rem Koolhaas, Ole Scheeren d'OMA, Cecil Balmond et Arup. (Figure 20).

Considérons plutôt des circonstances idéales où l'ingénieur et l'architecte ont l'habitude de collaborer; un défi demeure : développer un processus de conception fluide. Le travail de l'architecte est marqué par un processus de création, d'allers-retours et d'expérimentations sur la forme, les fonctions, les espaces et le programme architectural. Durant l'étape de l'esquisse, il doit pouvoir évaluer rapidement la viabilité et les potentiels de la structure. Dans une structure simple, la contribution de l'ingénieur peut être assez brève; il peut facilement identifier les lacunes et les soumettre à l'architecte qui poursuivra ses explorations formelles en fonction de cette rétroaction. Dans le cas d'une structure complexe, l'ingénieur peut difficilement s'avancer à donner son approbation sans effectuer des analyses structurelles préliminaires qui présupposent un certain niveau de développement de la structure.



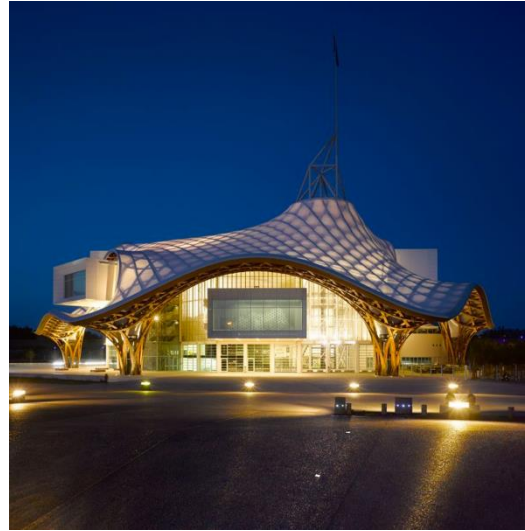
A



B



C



D



E

Figure 20 A. Centre des congrès de Montréal; B. École Tino à Villes Saint-Denis (France) par AAVP Architecture; C. CCTV HQ à Pékin; D. Centre Pompidou Metz, Metz; E. Pavillon Serpentine Ito-Balmond, Londres.

Imaginez la complexité. Pour chaque configuration non standard, l'architecte doit envoyer le projet à l'ingénieur qui, lui, doit la modéliser dans un logiciel d'analyse de structure exigeant des données précises, bien qu'elle ne soit pourtant encore qu'une esquisse. Il doit ensuite retourner son interprétation de l'analyse à l'architecte qui l'utilisera pour optimiser la version de départ.

Bref, le non-standard doit passer par l'utilisation d'outils numériques, à la fois pour l'architecte et pour l'ingénieur, afin de faciliter la modélisation et les explorations rapides, pour l'un, et de tester structurellement des formes complexes, pour l'autre. Évidemment, les outils numériques employés par chacun n'étant pas forcément les mêmes, des problèmes de compatibilité sont à prévoir mais, plus grave, on fractionne et déconstruit et reconstruit constamment le modèle pour progresser dans le travail.

Plusieurs considèrent les logiciels BIM (*Building Information Modeling*) comme la solution, l'outil permettant de rassembler tous les corps de métier au même endroit. Cependant, ces logiciels n'offrent pas la souplesse de conception nécessaire en début de conception, car ils limitent les explorations formelles. Ce n'est qu'une fois le design assez avancé que les logiciels BIM deviennent vraiment intéressants, croyons-nous.

Comme l'architecte reste fondamentalement maître du design initial, il nous a semblé naturel de nous questionner plus spécifiquement sur la polyvalence de ses outils de conception et les moyens d'y intégrer les autres compétences. L'objectif est d'optimiser et de simplifier le processus de design architectural par l'utilisation d'un seul outil permettant, entre autres, l'intégration de notions de structure et de fabrication. La solution réside dans l'utilisation du logiciel de modélisation 3D Rhinoceros (Robert McNeel et Associates, 2017) et de son *plug in* de conception paramétrique Grasshopper (éditeur d'algorithme graphique pour la gestion de données de géométrie paramétrée) (Robert McNeel et Associates, 2017), dans un processus rétroactif d'itération.²⁵

²⁵ Ang. «Editor of graphic algorithm for parametric geometric data management» Traduction libre de l'auteur.

Grâce à ces deux logiciels, l'architecte est en mesure d'intégrer et d'extraire une grande variété de données sur la structure en développement : volume total de matériau, dimensions du projet, dimensions des panneaux, analyse de la structure, détails d'assemblage. Il n'est pas contraint à naviguer d'un logiciel à l'autre pour « tester » ses formes ou à attendre qu'un collaborateur puisse consulter ses hypothèses formelles. Tout se fait rapidement et simultanément. Mieux encore, ces logiciels lui permettront de générer des résultats comparables et compatibles avec ceux des logiciels employés par ses collègues des autres disciplines, au moment où le design avancé exigera des données plus précises.

Comme le montre la Figure 21, l'ensemble de la conception se déroule dans le logiciel de modélisation Rhinoceros 3D. Cette interface graphique est aussi l'espace numérique qui permettra d'exporter vers des logiciels externes le modèle 3D de la structure, généré paramétriquement dans Grasshopper.

Plus précisément, le modèle 3D est développé dans le plug-in Grasshopper à partir d'une large gamme de fonctions et de paramètres. C'est avec des plug-ins supplémentaires au sein de Grasshopper qu'il sera possible de développer notre algorithme génératif de planarisation et d'y intégrer l'analyse de structure et les détails des assemblages.

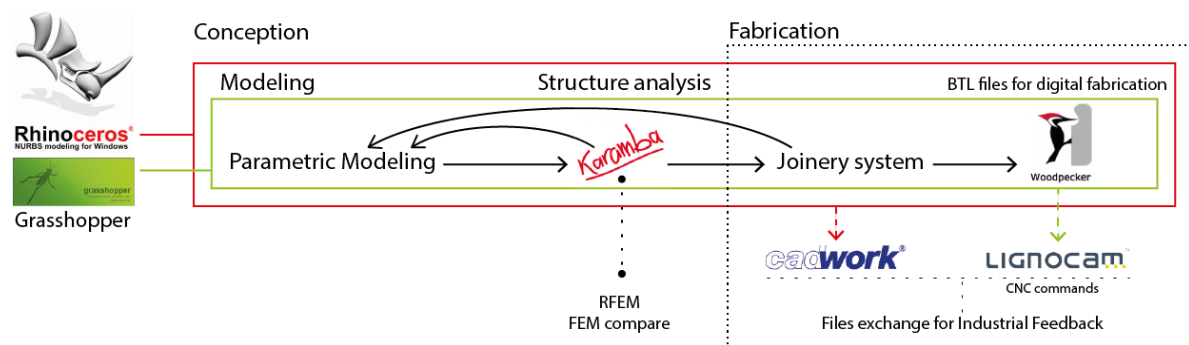


Figure 21 Organigramme des outils de conception

Le logiciel utilisé pour l'analyse de structure lors de notre processus de design est Karamba (Preisinger, 2016), un plug-in par analyse d'élément fini. Conçu pour être facile à utiliser par des non-experts, il permet de valider ou d'invalidier rapidement certaines hypothèses de conception. Karamba a été développé par Clemens Preisinger en coopération avec Bollinger-Grohmann-Schneider ZT GmbH à Vienne. La version actuelle permet d'analyser des structures en poutre et coque.

Ce plug-in est largement utilisé dans la réalisation de pavillons de recherche partout dans le monde. Dans notre cas, il permet d'obtenir une analyse primaire de la structure lors des premières explorations formelles. Aux stades plus avancés, il offre des résultats quantifiables et comparables à ceux d'un logiciel comme RFEM (Dlubal Software Inc., 2016) qui prend en compte le CLT dans ses analyses de structure d'élément fini.

En ce qui concerne le volet fabrication, il fallait pouvoir communiquer et partager facilement avec un des principaux collaborateurs du projet, les Chantiers Chibougamau (2016). Il importait de valider avec eux des hypothèses de structure et de fabrication en fonction des panneaux disponibles et des limites de leurs outils de fabrication. L'interface Rhinoceros a permis l'exportation des fichiers dans un format compatible avec Cadwork (Cadwork Group, 2016).²⁶

Enfin, le plug-in de fabrication Woodpecker (LIGNOCAM SA, 2016), développé par LIGNOCAM (LIGNOCAM SA, s.d.) vient boucler la boucle de conception-fabrication numérique en générant nos propres fichiers de découpe BTL.²⁷ Dans un contexte de recherche-crédation, même si des plans détaillés ne sont pas encore disponibles pour l'ensemble du bâtiment, nous sommes en mesure de fabriquer facilement et rapidement des éléments tests ou des modèles à échelle réduite pour d'éventuels tests de structure ou de contrôle de qualité.

²⁶ Logiciel 3D-CAD/CAM largement utilisé dans la construction en bois et souvent employé par l'entreprise.

²⁷ Lignocam est un logiciel qui importe et interprète les données d'usinage à partir d'un fichier BTL pour le passage aux machines CNC et à la fabrication assistée par ordinateur.

4 Facteurs de validation

Face à la perspective d'une conception d'un projet non standard en bois, il nous faut trouver un moyen de guider la prise de décision afin de déterminer quels seront les systèmes constructifs et d'assemblage les plus adaptés au projet. Une compréhension du projet, de son programme, de son contexte et de ses enjeux sont les critères premiers qui guideront cette prise de décision. Au-delà de ces impératifs, il nous a fallu définir une base décisionnelle supplémentaire afin de développer un système constructif répondant aux critères plus abstraits du projet. Voyons d'abord où vient se poser cette base décisionnelle dans notre processus de conception.

Si nous reprenons la Figure 3 qui met en relation, autour du projet, les trois constituants d'une structure en CLT et qu'on y précise le type de relation entre eux, nous obtenons la Figure 22. Dans ce trio, les retours du système constructif et de l'assemblage vers le panneau seront essentiellement des modifications physiques concernant la découpe numérique et le dimensionnement (nombre de plis, type de finition, orientation des panneaux, découpe des détails d'assemblage).

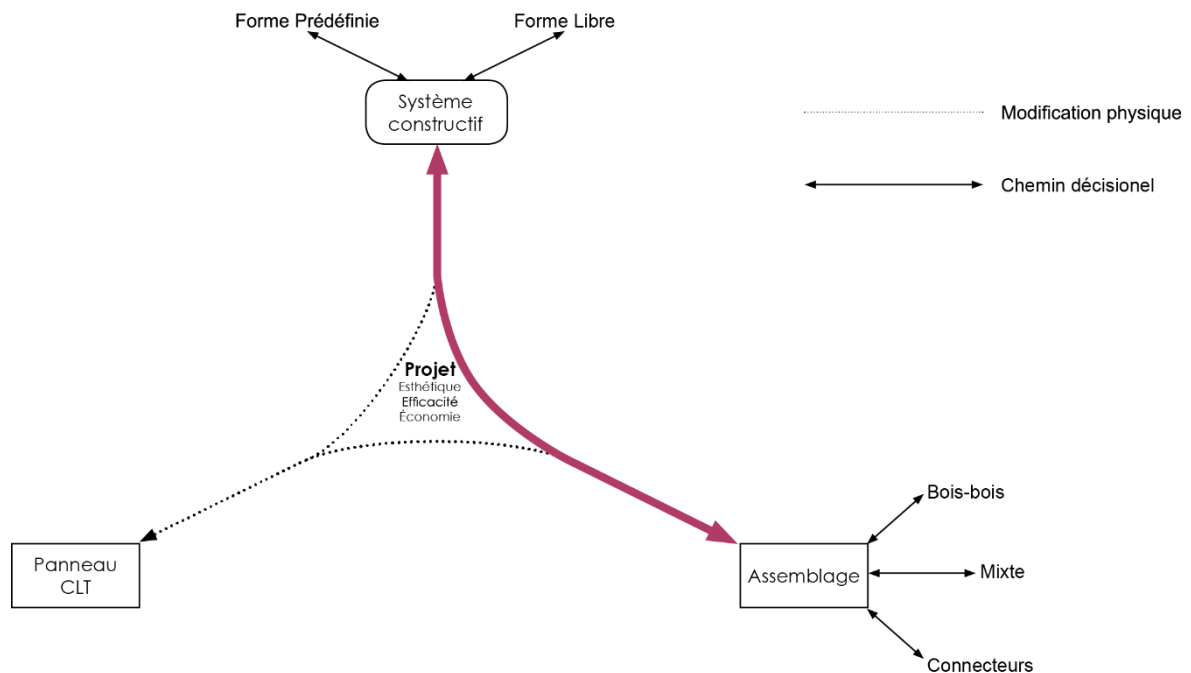
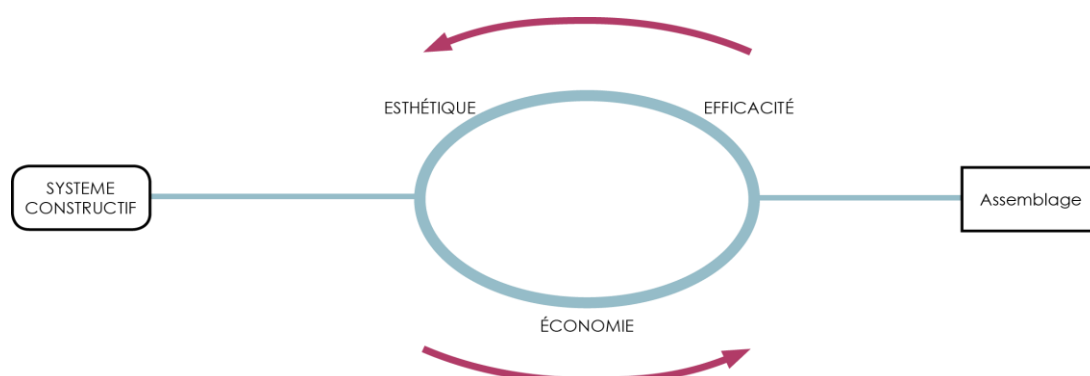


Figure 22 Schéma décisionnel

Les rapports décisionnels où les choix du concepteur sont significatifs sur la forme que le projet pourra prendre se situent plutôt entre le système constructif et l'assemblage. Le choix de l'un est étroitement déterminé par l'autre et les deux plus amplement par le projet lui-même. Ainsi le choix d'un système constructif aura une grande influence sur le choix du système d'assemblage et une modification de l'un aura un impact sur l'autre.

Les critères du projet alimenteront ces allers-retours entre système constructif et assemblage et c'est à cette étape que nous effectuerons un travail de conception. Afin de guider les décisions conceptuelles, les critères du projet se traduiront par trois facteurs dominants : l'esthétique, l'efficacité et l'économie. (Figure 23).

Ce sont donc les facteurs d'esthétique, d'efficacité et d'économie qui forment notre base décisionnelle dans la sélection et la conception du système constructif et des stratégies d'assemblage. Le choix précis de ces trois facteurs découle d'une analyse des critères qui ont affecté les choix conceptuels des projets non standard en bois nommés dans la première partie de ce chapitre. Les décisions des équipes de conception de ces projets peuvent souvent être décomposées et identifiées comme étant l'un de ces trois facteurs, quand ils ne sont pas directement évoqués. Le choix de ces facteurs est finalement renforcé par (Stavric, Hirschberg et Wiltche, 2010 ; Calderon, Schimek et Wiltche, 2011 ; Pavlček et Kaftan, 2012), qui en font aussi leurs critères de bases dans



l'élaboration de leurs projets.

Figure 23 Conception intégrée du système constructif et des assemblages

En revenant toujours à ces facteurs pour définir la pertinence de nos décisions, on est certain de toujours avoir une vue d'ensemble sur les différents critères du projet et de faire un choix éclairé de notre système constructif et d'assemblage lors du processus de recherche-crédation.

Puisque le projet développédans ce mémoire couvre l'ensemble de la réflexion, de la conception jusqu'à la fabrication en passant par la mise en œuvre et l'occupation, il nous importe de considérer chacune de ces étapes selon nos trois facteurs de conception. En effectuant une analyse de ces étapes du point de nos trois facteurs, il nous est possible de développer une combinaison système constructif-assemblage adéquate et pertinente avec laquelle aborder le projet.

Finalement, il nous a semblé judicieux de trouver un moyen d'aider le concepteur à faire cette analyse et à définir les critères de projet qui auront une influence sur le choix de la combinaison à venir. La grille développée est relativement simple et a pour but de définir les objectifs à atteindre dans le développement du projet. **(Erreur ! Source du renvoi introuvable.)** Durant la conception elle aura en quelque sorte un rôle d'aide-mémoire. En conclusion, elle sera un outil d'analyse qui permettra d'évaluer l'objet architectural retenu.

Tableau 1 Grille d'objectifs à définir pour un projet d'architecture à géométrie complexe en CLT

	Esthétique	Économie	Efficacité
Conception			
Fabrication/ Mise en œuvre			
Occupation			

Les facteurs dans le contexte numérique

Afin de bien saisir dans quel esprit le processus de création se déroulera, il est nécessaire de prendre un instant pour contextualiser les trois facteurs de conception: l'esthétique, l'efficacité et l'économie. Considérant le contexte numérique de notre recherche, nous les aborderons de ce point de vue plus particulier.

Les origines de l'esthétique numérique viennent principalement de l'enthousiasme créé par la publication de l'ouvrage « Le pli », en 1988, consacré à la métaphysique de Leibniz, philosophe, scientifique et mathématicien du XVII^e siècle, par le philosophe français Gilles Deleuze. (Deleuze, 1988). Un des thèmes qui y est exploré est « La possibilité d'envisager la complexité autrement que sous les espèces de la discontinuité et du conflit frontal. » (Picon, 2010). Le principe inspire Greg Lynn, un des premiers théoriciens et praticiens de l'architecture numérique, qui édite sur le sujet un numéro d'*Architectural Design* (Lynn, 1993), maintenant une référence pour qui s'intéresse à l'architecture numérique. Dans ce numéro, Lynn y explore une alternative à la déconstruction

que suggère « Le pli » en s'inspirant du fait que « Le pli » renvoi à une « Une transformation en douceur permettant une intégration intensive des différences au sein d'un système à la fois continu et hétérogène. » (Lynn, 1993)

Si ce numéro d'*Architectural Design* est davantage une réflexion sur le sujet, Lynn propose peu de temps après une nouvelle classe de formes se caractérisant par la continuité et les transitions douces : le blob. Figure emblématique du début du numérique, ce dernier répond plus aux premières explorations formelles permises par le numérique qu'à une complexité réelle. On constate par ailleurs que l'utilisation du NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Splines*) comme méthode de représentation de la qui permis les explorations formelles menant aux Blobs ont d'abord été utilisé dans le milieu de l'ingénierie aéronautique. Frank Gehry sera l'un des premiers architectes, en 1992, à employer l'un des logiciels utilisés dans l'industrie aéronautique, CATIA (*Computer-Aided Threedimensional Interactive Application*). Gehry, travaille alors exclusivement en maquette et CATIA sert à entreprendre la phase de construction de l'Olympic Fish à Barcelone. Ces outils de dessin, avant de servir à la conception, ont donc servi à la transcription de maquette ou du concept en structure par l'équipe d'ingénieurs.

Ainsi, comme le remarque Antoine Picon (2010), professeur d'histoire de l'architecture et des technologies à Harvard, « L'épisode du pli préfigure ainsi les recherches formelles de l'architecture numérique tout en restant relativement étranger aux premières expérimentations de l'ordinateur dans le domaine de conception architecturale. » Mario Carpo (1993) professeur à la Bartlett School of Architecture, s'intéressant à la relation entre la théorie de l'architecture, l'histoire culturelle et l'histoire des médias et de la technologie de l'information, souligne d'ailleurs que les ordinateurs ne renvoient pas nécessairement à des préférences esthétiques et que l'on pourrait autant les utiliser pour faire des boîtes.

De ce fait, l'apparition des outils paramétriques sera encore plus déterminante que les NURBS dans l'évolution de la réflexion sur le numérique en architecture. Schumacher, architecte praticien associé chez Zaha Hadid Architects et cofondateur de l'Architectural Association Design Research Lab à Londres,

décrit d'ailleurs l'approche paramétrique (angl. Parametricism) (Schumacher, 2009) comme « un nouveau style qui exploite et exalte, interprète et donne une forme visible à une logique technique des nouveaux outils numériques de design et de fabrication. » (Carpo, 2016)^{28 29}

Le paramétrique semble ainsi créer une infinité de possibilités, mais si les paramètres utilisés par un architecte peuvent mener à une esthétique particulière, souvent curviligne, ils peuvent mener aussi à une esthétique minimaliste et rectiligne. En fait, l'utilisation du paramétrique ne mène pas nécessairement à un style particulier, c'est plutôt un moyen efficace et flexible de décrire une géométrie, comme le souligne, à l'instar de Carpo, Mark Burry, architecte praticien s'étant principalement intéressé à la vie et au travail d'Antonio Gaudi. (Burry, 2011)

L'utilisation rigoureuse de la géométrie par l'architecte catalan dans « une fusion de paraboloïdes hyperboliques croisés avec des hyperboloïdes de révolution » est d'ailleurs pour Mark Burry la définition même d'une conception architecturale flexible et paramétrable.³⁰ C'est d'ailleurs ce qui l'amenera à qualifier Gaudi et l'architecte-ingénieur Frei Otto de proto-paramétricien. Le langage formel inspiré de l'étude de la nature par ce dernier dans le développement de structure en tension a permis d'extraire la logique d'organisation matérielle des formes qui nous entourent afin de les reproduire en architecture. Mais surtout « les deux nous donnent leur compréhension et leur engagement à l'égard de la matrice riche que la structure et les matériaux établissent avec les fondements physiques et biotechnologiques du monde naturel - aux niveaux macro et microscopique. »³¹ En d'autres mots, les expérimentations proto-paramétriques des deux architectes mettent en relation la richesse des explorations formelles entre structure, matériau et paramètres physiques de la nature. Ils introduisent

²⁸ Schumacher a réintégré le terme paramétrique dans le langage de l'architecture. Le terme, son « Parametricism », est vite devenu synonyme d'architecture numérique en général. (Carpo, 2016) Aussi la distinction entre architecture numérique et paramétrique se confond souvent, l'une faisant souvent référence à l'autre ou aux deux à la fois.

²⁹ Angl. « a new style that exploits and extols, interprets and gives visible form to the technical logic of the new digital tools for design and fabrication » (Carpo, 2016, p.26) Traduction libre de l'auteure.

³⁰ « Angl. « – a fusion of intersecting hyperbolic paraboloids with hyperboloids of revolution » (Burry, 2016, p 32) Traduction libre de l'auteure.

³¹ « Angl. « Both gift us their deep understanding of and commitment to the rich matrix that structure and materials make together with the physical and biotechnical foundations of the natural world – at both macro- and microscopic levels » (Burry, 2016, p 32) Traduction libre de l'auteure.

les premières notions de complexité dans l'élaboration de la forme et les façons dont la nature et les matériaux peuvent influencer le développement paramétriquement de formes architecturales structurelles.

Comment peut-on donc caractériser l'esthétique des formes architecturales paramétrées ? La réponse est en partie dans cette complexité et dans la logique technique mentionnée par Schumacher. Cette complexité fait écho aux « objectiles » de Deleuze (Deleuze, 1988), introduits dans « Le pli » et repris par la suite par l'architecte et philosophe Bernard Cache, élève de Deleuze, qui désignent la capacité du calcul différentiel et intégral à générer un nombre infini d'objets éléments d'une série continue. Pour Bernard Cache cela nous permet « [...] (d')envisager des systèmes de deuxième génération dans lesquels les objets ne sont plus dessinés, mais calculés. [...] Visualisée sur l'écran, la variation des paramètres de ces surfaces et de ces volumes génère une séquence vidéo, dont chaque arrêt sur image peut donner lieu à la production d'un objet. » (Cache, 1997)

Cette géométrie en mouvement peut aussi être perçue comme un moment dans un flux de forme architecturale généré par les paramètres de cette géométrie. La nature de ce flux s'enracine dans des concepts plus larges que l'architecture, tels que la biologie, l'auto-organisation ou la croissance, pour ne nommer que ceux-là, c'est-à-dire les fondements physiques et biotechnologiques du monde nature mentionné plus haut. On remarque une nette relation avec les mécanismes naturels dans les différentes approches de génération de l'objet par les concepteurs numériques, à l'instar de Gaudi et Frei Otto à leur époque. On constate en général que les concepteurs numériques contemporains :

[...] s'efforcent de générer leurs projets en cohérence avec cette nouvelle réalité et ses champs de forces continus qui génèrent du mouvement. Dans cette perspective, la forme ne doit plus apparaître comme déterminée de l'extérieur, à la façon d'une figurine moulée. Elle doit plutôt se développer sous l'effet de champs de forces souvent invisibles qui constituent le véritable contexte du projet et se caractérisent par leur complexité. (Picon, 2010)

Ainsi, les formes et les géométries générées par les concepteurs numériques tendent à être modelés et déterminés en partie par ces champs de forces. Sous le rapport de l'esthétique, cette architecture numérique a, paradoxalement, engendré plus souvent une architecture de surface, parce que naturellement plus apte à incarner les variations et le travail paramétrique que les volumes. Picon (2010) se demande « du même coup si la quête de la complexité qui caractérise l'architecture numérique est appelée à durer. [...] un minimalisme numérique pourrait bien succéder aux expérimentations actuelles avec leurs connotations baroquisantes. »

Par ailleurs, les détracteurs du numérique ont beaucoup critiqué la recherche de la forme et du système complexe aux dépens de l'aspect social de l'architecture. (Schumacher, 2016). Loin d'exclure cet aspect dans la pratique du numérique, ces critiques ont toutefois amené les praticiens à faire une critique rétrospective du mouvement et à redéfinir l'architecture numérique actuelle. Cette discussion s'amorce entre autres dans *Emphatic Space* (Architectural Design, 2014) et *Computation Works* (Architectural Design, 2013) et culmine dans le numéro *Parametricism 2.0* publié par Schumacher (2016). Comme il le souligne dans ce numéro, il y a un retour à la raison d'être du paramétrique qui, par sa complexité, cherche « à adapter de façon innovante et à améliorer l'environnement bâti en réponse aux défis et opportunités de la société contemporaine. »³² (Schumacher, 2016)

Dans notre recherche, c'est donc cette complexité, cette idée d'émergence et cet intérêt à améliorer plus que le milieu bâti qui seront au cœur des réflexions reliées à l'esthétique au sens large du projet.

Jusqu'à maintenant, on s'est attardé davantage aux géométries et aux formes issues d'un processus de création numérique, soit l'aspect plus esthétique des objets. L'efficacité et l'économie des systèmes consistent à ajouter une dimension physique à cette réflexion. Aux systèmes émergents inspirés de la nature, ou d'un flux de paramètres, se greffe un désir d'optimisation qui, encore

³² Angl. « to innovatively adapt and upgrade the built environment in response to the challenges and opportunities of contemporary civilization » (Schumacher, 2016, p.10) Traduction libre de l'auteure.

une fois, passe par la complexification du système en intégrant, par exemple, la matière au processus de recherche de la forme.

C'est ce qui nous amène à l'intégration de l'analyse de structure au processus itératif de conception évoqué plus tôt (Conception intégrée – l'architecture numérique solution intégrative). L'idée c'est que l'interface numérique de conception devient le lieu où les forces physiques viennent générer des formes matérielles. (Kostas Terzidis dans Bernier-Lavigne, 2014) afin de produire des modèles physiquement performants.

Plus encore, il y a un désir de réduire l'écart entre les explorations numériques et la fabrication. La création de modèles numériques performants inspirés de la nature et la relation étroite entre forme, matière et structure ont fait émerger une nouvelle industrie introduisant de nouveaux matériaux de haute performance. (Weinstock, 2010). Ces nouveaux matériaux ont un impact sur l'industrie et celle-ci devra s'adapter, surtout dans le milieu de l'architecture, pour devenir vraiment performante et économique. C'est d'ailleurs l'idée défendue par les praticiens et professeurs Kieran et Timberlake (2004) qui dirigent un atelier de recherche explorant l'interface émergente entre l'architecture comme « high art » et l'intégration de technologie émergente du génie des matériaux et des produits d'ingénierie. Kieran et Timberlake prennent en exemple les industries automobiles, aéroportées et navales. La synergie entre la conception, le développement de nouveaux matériaux et la fabrication dans ces milieux génèrent de la qualité en optimisant coûts de conception et de fabrication. Toujours selon Kieran et Timberlake, le modèle devrait être largement intégré dans le milieu de la construction.

Ils évoquent aussi la capacité de ces industries à fabriquer à la chaîne des objets uniques, un concept jusqu'à très récemment inconcevable en architecture sans nécessiter des coûts supplémentaires. Les premières notions de sur-mesure à la chaîne datent de 1987. Stanley M. Davis, auteur et conférencier sur l'innovation en entreprise, est le premier à utiliser le terme « fabrication de masse sur mesure » (angl. mass customization) dans *Future Perfect* (1987). Il y voyait une capacité latente de conception et fabrication assistée par ordinateur (Willis et Woodward, 2010). En 1995, Bernard Cache, théoricien des géométries et de l'ontologie

numérique (computational), voyait dans l'essor du numérique les bases d'une production non standard en architecture par l'écriture automatique des programmes d'usinage intégrés au processus de conception (Cache, 1997). Mais l'industrie évolue vite et, déjà en 2003, Branko Kolarevic, un des premiers chroniqueurs de l'état de l'architecture numérique et spécialiste des techniques numériques en architecture, évoquait une « corrélation directe entre ce qui peut être conçu et ce qui peut être construit. » (Kolarevic, *Architecture in Digital Age: Design and Manufacturing*, 2003)

Il est toutefois réducteur que d'affirmer que la fabrication de masse sur mesure est un moyen entièrement économique de fabriquer du non-standard, puisqu'il faut aussi prendre en compte le contexte social, culturel et politique. Kieran et Timberlake (2004) et Willis et Woodward (2010), architectes praticiens et professeurs respectivement à l'Université d'état de Pennsylvanie et à la Temple University, démontrent bien la complexité de la question dans *Diminishing Difficulty* (Willis et Woodward, 2010). Cependant, il va sans dire que notre recherche tentera justement de contextualiser cette production sur mesure avec l'industrie québécoise. Notre recherche s'appuiera toutefois amplement sur les potentiels et avantages de cette production de masse pour la production de la proposition finale.

5 Le projet

Afin d'appliquer les principes de conception de structure à géométrie complexe en bois au contexte québécois, il importe d'abord de définir le projet auquel seront rattachées nos expérimentations. Puisque notre recherche a été développée en collaboration avec la Chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois de l'Université Laval, il était naturel de se tourner vers l'un de ses partenaires dans le choix du projet à développer. C'est donc une collaboration avec la firme d'architecture montréalaise Provencher_Roy architectes associés (Provencher Roy Associés Architectes, 2016) qui s'est mise en place. Après quelques mois de familiarisation avec les outils et logiciels présentés dans le chapitre précédent, une période de conception de trois mois dans les bureaux de la firme, pour profiter des installations et baigner littéralement dans l'activité du projet, a permis d'effectuer une grande partie des expérimentations et de proposer deux concepts architecturaux au terme du séjour.

Le projet retenu pour développement avec la firme est la toiture-terrasse de la nouvelle gare maritime du Port de Montréal sur la Jetée Alexandra. Ce choix résulte d'une longue discussion avec la firme et ses intervenants clés afin de satisfaire aux besoins de toutes les parties. En effet, il fallait que le projet apporte des retombées au partenaire tout en convenant aux expérimentations. Sous le rapport de la recherche, le projet ne pouvait se faire dans un contexte trop déterminé quant au programme ou à la forme, mais devait être assez gros pour mettre en valeur le potentiel du matériau. Quant à la firme, la recherche devait lui procurer une plus-value et l'approche architecturale « originale » devait s'accorder à l'ensemble du programme de la Jetée.

La toiture-terrasse s'est révélé l'environnement idéal pour effectuer les recherches exploratoires, grâce à la grande liberté de conception accordée, assortie d'un certain nombre de contraintes pour définir les limites du projet et stimuler la création. Le projet offrait des possibilités de grandes portées, sans imposer un programme intérieur complexe. Le travail produit est une proposition alternative à la proposition finale de la firme.

La Jetée Alexandra – Port de Montréal

Face aux coûts annuels de maintien en état de la Jetée Alexandra, au nombre croissant de passagers et à l'essor continu du marché des croisières à Montréal, le Port de Montréal (l'Administration portuaire de Montréal - APM) a entrepris le développement de la nouvelle gare maritime Iberville, en remplacement des installations actuelles datant de 1967.³³ (Figure 24) Le 6 novembre 2014, la proposition du cabinet d'architectes Provencher_Roy était rendue publique (Radio-Canada, 2014), assortie d'un budget estimatif de 78 millions de dollars.³⁴

La proposition visant la jetée devait, en plus d'assurer l'efficacité et le bon fonctionnement de la nouvelle gare maritime, rendre la jetée plus accessible à la communauté qui réclame depuis plusieurs années un accès au fleuve. Son emplacement privilégié au cœur du Vieux-Montréal rend le projet exceptionnel, restructurant, et rehausse le patrimoine portuaire du secteur. (Figure 25)



Figure 24 Volume de croisières à Montréal (<http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/692660/quai-alexandra-revitalisation-investissements-projet-port-de-montreal>)

³³ «L'Administration portuaire de Montréal (APM) est une agence fédérale autonome créée en vertu de la Loi maritime du Canada. Le conseil d'administration de l'entreprise est formé de sept membres, tous des gens d'affaires de la région de Montréal. Les trois paliers de gouvernement – fédéral, provincial et municipal – nomment chacun un administrateur. Les quatre autres administrateurs sont nommés par le ministre fédéral des Transports à partir des recommandations des utilisateurs du port. Autonome, le conseil d'administration élit son propre président. » (<http://www.port-montreal.com/fr/l-administration-portuaire.html>)

³⁴ 78 millions \$ (payable à 20 % par le municipal, 20 % par le Port de Montréal, 60 % à déterminer lors de l'annonce) (Laferrière, 2014)



- Limite Vieux Montréal
- Jetée Alexandra

Figure 25 Carte des limites du Vieux Montréal et site du projet

En 2005, une analyse de valeur historique produite pour le Port de Montréal (ARCHEMI, 2005) avait formulé plusieurs recommandations afin de guider les transformations futures de la jetée.³⁵ Ce rapport soulignait l'importance des installations de la jetée comme rappel d'une époque marquante dans l'histoire du transport des personnes et des biens. La forme des hangars donne encore aujourd'hui une échelle spatiale authentique à l'occupation de la jetée jusqu'en 1983, d'où l'importance patrimoniale du site.

Ce rapport favorisait les options de conservation des hangars mettant en valeur la structure d'acier, laquelle devait toutefois être consolidée ou renforcée. Les architectes du projet se sont conformés à ces recommandations en conservant la structure et en la protégeant par une nouvelle enveloppe :

³⁵ Document à consultation restreinte, accès par Provencher_Roy

La restauration des hangars et la construction de la nouvelle gare maritime d'Iberville s'inscrivent dans une optique de mise en valeur des structures existantes. En effet, la structure d'acier des hangars étant un témoin de leur époque industrielle et des nouvelles techniques de construction, leur conservation est un objectif principal du projet. (Provencher_Roy, 2015)³⁶

Par contre, l'aménagement a été revu afin d'ouvrir les vues et l'accès à tous, entre autres par « une promenade aérienne dirigeant les visiteurs vers le fleuve sans interférer avec les opérations de la gare. » (Provencher_Roy, 2015) (Figure 26). Cette vision deviendra un fondement dans l'élaboration du projet de recherche-crédation proposé dans ce mémoire.

Ce mémoire donnait une occasion de faire valoir le savoir-faire québécois par une oeuvre exceptionnelle attestant de l'expertise de calibre mondial de nos professionnels en matière de conception architecturale à la fois innovante, écoresponsable et sensible, et cela, en mettant en valeur une installation qui a marqué historiquement le développement industriel de la ville et de la province.

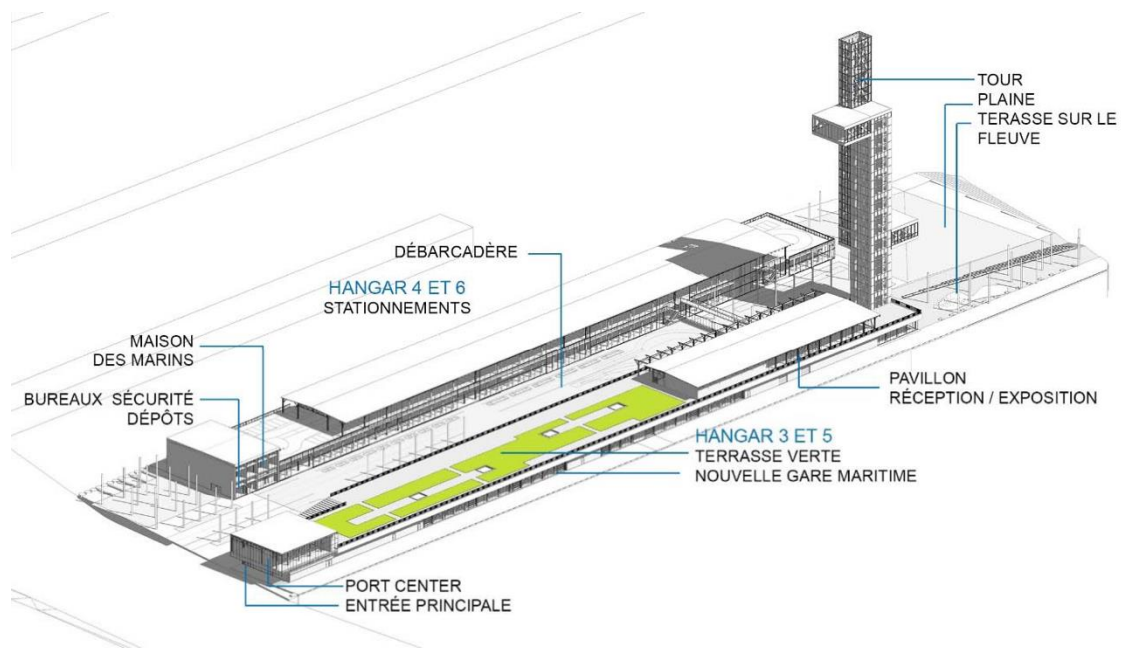


Figure 26 Aménagement projeté du nouveau terminal de croisière (Provencher_Roy)

³⁶ Document à consultation restreinte, accès par Provencher_Roy

La toiture-terrasse du terminal de croisière

Le réaménagement proposé des hangars numéros 3 et 5 déplace la gare maritime du premier étage vers le rez-de-chaussée du hangar choisi (encore indéterminé au moment de rédiger ces lignes). Le Port Center (centre d'interprétation des activités portuaires) prend la place de la maison des marins, et l'ancienne Gare maritime Iberville se transforme en pavillon de réception et d'exposition. Le stationnement situé au premier étage, à côté de la gare actuelle, devient une nouvelle toiture-terrasse. Inspirée des grandes promenades de bord de mer en bois, la proposition originale de NIP paysage, propose un parcours mi-végétalisé, mi-aménagé, agrémenté de longs bancs en bois, où les circulations en platelage bois rappellent ces promenades. (Figure 28 et Figure 29). Ces circulations sillonnent la terrasse et le quai et culminent sur une aire de détente aménagée en surplomb du fleuve au bout de la jetée. Dans la proposition de NIP, la structure existante est conservée telle quelle, à savoir la structure en acier du rez-de-chaussée et la chape de béton formant la toiture. Seul l'enrobé bitumineux est retiré afin d'effectuer les travaux nécessaires au nouvel aménagement. À l'étage de la gare maritime, qui peut aussi servir de grande salle de réception, seule la structure historique en acier est visible; la finition au plafond varie selon le design intérieur désiré. (Figure 27). Aucun lien n'est créé entre l'aménagement extérieur de la promenade-terrasse et l'aménagement intérieur, que ce soit dans la configuration des espaces ou le rappel de la structure.



Figure 27 Design intérieur proposé pour le projet (Provencher_Roy)



Figure 28 Aménagement paysage extérieur (NIP - Provencher_Roy)



Figure 29 Rendu extérieur de la toiture-terrasse tel qu'imaginé par NIP (NIP Provencher_Roy)

L'intérêt de la toiture-terrasse comme objet d'étude pour ce mémoire tient principalement aux vastes possibilités qu'elle ouvre. Travailler sur un élément distinct d'un bâtiment permet, entre autres, de s'affranchir de certaines contraintes architecturales et techniques (i.e. l'intégration des notions d'accessibilité universelle, de toilettes, des issues, des parcours, des aménagements intérieurs, du cloisonnement des espaces en conformité avec le code national du bâtiment, etc.). Le cœur de la recherche s'articule sur l'aménagement d'une place publique extérieure et la création d'une ambiance intérieure aux expériences et espaces variés pour les usagers.

Malgré ce programme plus libre, certains objectifs définis lors des rencontres préparatoires et au fil des rencontres de projet subséquentes doivent être considérés tout au long du processus de conception, nommément :

- Mise en valeur de la structure en acier existante
- Intégration de puits de lumière
- Intégration de l'étude des vues effectuée par l'équipe de projet (Figure 30)
- Aménagement d'espaces de protection habitables (vent, soleil, intempéries)
- Possibilité d'intégrer de la verdure
- Respecter les accès (rue, pavillon, bâtiment, escalier)

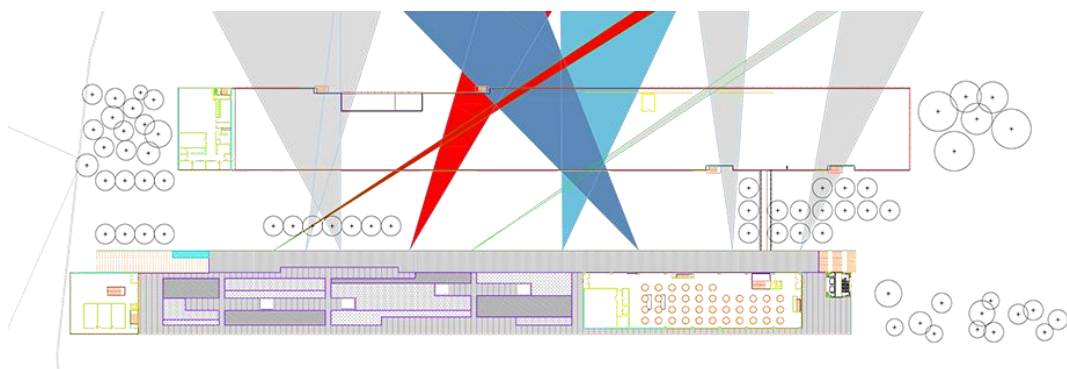


Figure 30 Étude des vues (Provencher_Roy)

Le travail effectué a beaucoup attiré l'attention des collaborateurs de la firme qui venaient régulièrement en observer l'avancement. Le dialogue enclenché et les discussions autour des potentialités des outils de conception numérique peuvent, d'une certaine façon, être considérés comme les premières retombées de cette recherche. Il va sans dire que les formes proposées étaient pour le moins non conventionnelles, et les gens se sont montrés très ouverts.

Par ailleurs, le milieu professionnel a fourni un cadre de conception très concret. S'il y avait certaines libertés dans la conception, les contraintes physiques et techniques ont imposé des limites aux expérimentations et à l'étendue de l'intervention finale. Ces contraintes étaient d'autant plus intéressantes que la commande visait une architecture non standard; une idée ambitieuse dans un contexte très concret.

Paradoxalement, considérant les projets numériques qui alimentent l'imaginaire collectif en architecture, nos propositions pourraient sembler bien sages. Par rapport au contexte québécois, nous sommes pourtant sans conteste dans l'innovation et l'insérité.

6 Critères de conception

Puisque la proposition s'inscrit naturellement dans le contexte présenté précédemment, le premier choix conceptuel a été de mettre en valeur les constructions existantes et de renforcer les liens physiques avec celles-ci. La nouvelle structure en CLT (panneau massif de bois lamellé-croisé) vient donc se poser directement sur la structure d'acier existante à la place de la dalle de béton et de l'enrobé bitumineux qui sera retiré. La nouvelle structure en bois, visible de l'intérieur, contribuera au décor de la nouvelle gare en créant une dualité entre la structure historique existante rectiligne et celle de bois plus fluide et contemporaine. En effet, la structure en bois se dissociera épisodiquement de la structure d'acier de sorte à façonner les puits de lumière et les aménagements extérieurs.

Connaissant le contexte, la définition des besoins et l'échelle de site, on est déjà en mesure de définir les objectifs de notre structure en bois. Nous avons repris notre grille d'objectifs (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) et y avons intégré les critères auxquels devra satisfaire la structure pour répondre aux besoins du projet. Ces critères, croisés aux facteurs décisionnels, nous permettront de restreindre nos choix de systèmes, de définir les principaux enjeux qui seront toujours présents à l'esprit dans la conception de nos propositions et qui guideront intrinsèquement certains choix conceptuels. (Tableau 2)

Tableau 2 Grille d'objectifs pour la toiture-terrasse de la Jetée Alexandra

	Esthétique	Économie	Efficacité
Conception	Intégration de motifs/ornements Qualité architecturale du système Liberté de la forme Contrôle de la forme Variété des types d'espaces Qualité des espaces	Temps de conception Contrôle sur la quantité de matériau	Intégration des compétences Efficacité de la structure / système constructif Vérifiabilité du système constructif et des assemblages
Fabrication/ Mise en œuvre	Intégration des assemblages Finition/ qualité intérieure de la structure Visibilité ou non du système	Temps de construction Temps de découpe Assemblages sur mesure	Facilité de mise en œuvre Facilité de fabrication Facilité de générer et fabriquer le sur-mesure
Occupation	Qualité des ambiances intérieures Qualité formelle extérieure, sa contribution au paysage	Moins de finitions intérieures si la qualité architecturale est manifeste Économie d'énergie	Lumière naturelle Efficacité énergétique/ Stratégies passives Confort ambiance

Choix du système à l'aide de nos trois facteurs décisionnels

Esthétique

Occupation

Du point de vue de l'occupation, le facteur esthétique a un impact sur la façon dont sera vécue l'expérience architecturale, que ce soit la perception intérieure de la structure ou la perception extérieure qui aura une influence sur l'aménagement urbain de la jetée.

Si on réfère à l'esthétique numérique décrit plus tôt (l'Esthétique dans le contexte numérique), l'approche valorisée dans le mémoire est celle du nouveau minimalisme numérique où l'on vise l'élégance plutôt qu'une beauté subjective. Cette élégance faite de continuité et de complexité est qualifiée par Ali Rhahim et Hina Jamelle (2007) comme allant :

Au-delà des austérités des techniques numériques, l'élégance concerne le raffinement, la précision et l'opulence formelle. [...] Le concept d'élégance a la capacité de faire avancer le discours de l'architecture contemporaine en acceptant que les compositions architecturales complexes exigent une esthétique visuelle accompagnée aussi sophistiquée que les techniques actuelles utilisées pour générer la forme.³⁷

L'architecture n'est pas seulement exhibée, mais performative; l'élégance vient mêler esthétique et efficacité avec, pour cible prioritaire, l'expérience vécue par l'occupant.³⁸ Cet aspect sensoriel, assimilable à l'affect, va au-delà de l'effet déconcertant des géométries innovantes produites par ordinateur.³⁹ On approche dès lors la proposition architecturale comme une seconde peau du bâtiment pour en faire un élément enveloppant pour l'occupant, ce qui nous ramène à l'importance qu'occupe la sphère des sens.

³⁷ Angl. « Beyond the austerities of digital techniques, elegance concerns refinement, precision and formal opulence. [...] The concept of elegance has the ability to push forward the discourse of contemporary architecture by accepting that complex architectural compositions require an accompanying visual aesthetic as sophisticated as the current techniques used to generate form. Elegance mediates and enables complexity. » (Ali Rhahim et Hina Jamelle, 2007, p.6) Traduction libre de l'auteur.

³⁸ L'architecture performative est une approche émergente où les performances du bâtiment servent de base de conception. Elle utilise des technologies numériques de simulation basée sur les performances quantitatives et qualitatives pour offrir une nouvelle approche à la conception de l'environnement bâti. (Kolarevic & M. Malkawi, 2005)

³⁹ Affect : Sensation qui agit sur un être soumis à une émotion ou à une saute d'humeur (Grand Dictionnaire terminologique)

Cette architecture de « surface », comme aime la décrire Picon (2010) sera traitée à la façon d'une ornementation. Cet ornement contemporain est interprété par Picon comme « une condition générale qui le rend plus proche d'un motif souvent répété à l'infini que d'une décoration localisée et sculptée », au sens traditionnel de l'ornement.

Moussavi et Kuba relient cette ornementation contemporaine à la sensation et à l'affect en rappelant l'importance des matériaux et des textures comme dimensions déterminantes de l'expérience architecturale. Amplifié à l'échelle de la structure, l'ornement prend la place de la tectonique du bâtiment, ainsi que l'illustrent le stade olympique de Pékin, par Herzog et de Meuron, ou le Centre Pompidou de Metz, par Shigeru Ban. De notre structure en tant qu'ornement contemporain, nous chercherons donc à générer sensations et affect chez l'occupant.

Fabrication/mise en œuvre

Le lien qui s'est fait jour entre ornementation et matérialité permet de comprendre pourquoi l'ornement paraît souvent plus fondamental que la tectonique traditionnelle. (Picon, 2010)

Dans cette veine, l'assemblage visible contribue lui aussi à l'harmonie, à l'aspect général et à l'affect de la structure. En conséquence, il ne saurait être négligé comme pourrait l'être un assemblage devant être masqué. Un certain nombre de critères sont proposés, entre autres par Charleson, A.W. (1994) dans Calderon et al. (2011), pour définir l'esthétique des assemblages. Ces critères sont : le raffinement, l'innovation, la qualité sculpturale, la relation avec la forme du bâtiment, la relation avec la fonction du bâtiment et l'expression de l'action structurale. Ces critères peuvent par ailleurs aisément s'appliquer à l'ensemble de la structure. Cela nous convainc que le système d'assemblage a intérêt à être minimaliste ou invisible afin de s'intégrer au concept et de mettre la structure à l'avant-plan.

Conception

La notion de structure « ornementale » est intéressante en termes de conception, car elle encourage l'exploration des formes pour créer des ambiances et des effets. Les travaux de Stavric, Hirschberg et Wiltsch (2010) sur la tessellation en sont d'ailleurs des exemples; ils utilisent des géométries ornementales pour subdiviser et construire leurs surfaces à double courbure. (Figure 31)

Dans une optique plus large, on a besoin d'un système offrant, certes, une certaine liberté dans les explorations formelles, mais surtout, un certain contrôle sur ces dernières, afin d'arriver à une qualité sensorielle/esthétique intrinsèque. Dans le cas d'un système émergeant par itération, un travail préalable s'impose en vue de définir les limites évolutives et l'esthétique formelle qui guideront l'architecte-programmeur dans le développement de ce système.

Pour les assemblages, la polyvalence et l'inclusion dans la conception de la structure sont les critères critiques dans le cas d'un système visible comme le sewing timber ou le queue d'aronde.

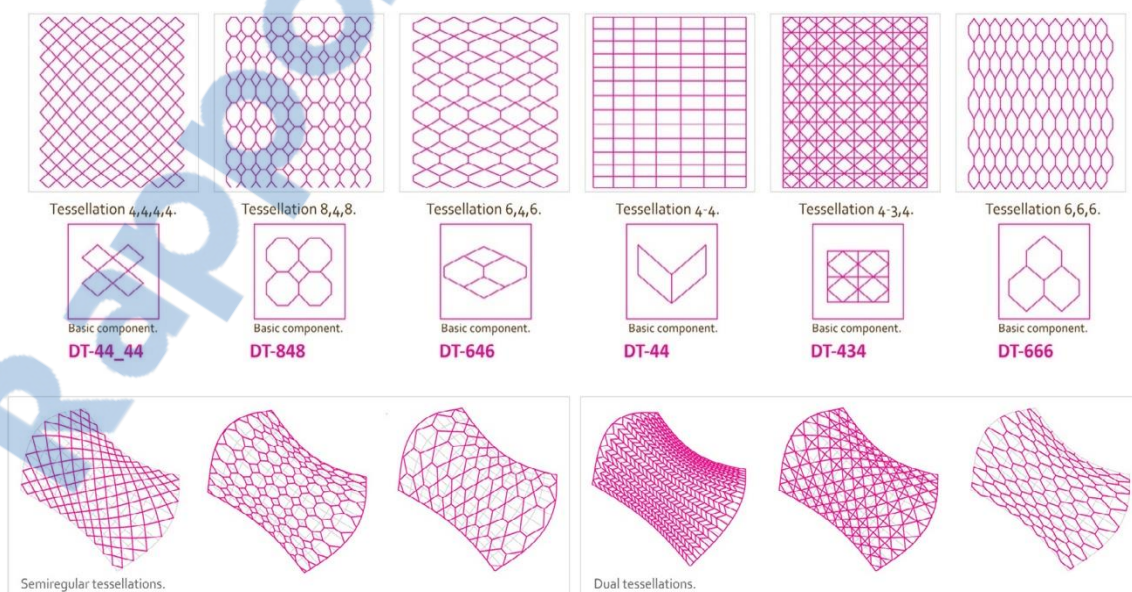


Figure 31 Exemple de subdivision d'une surface à l'aide d'une stratégie ornementale (Stavric, Hirschberg et Wiltsch, 2010)

Économie

Occupation

Si l'on combine le critère d'esthétique décrit précédemment avec l'objectif de la recherche visant à rendre le processus de conception assez efficace pour favoriser l'économie dans la conception et la fabrication, on voudra que la solution limite la quantité de finitions intérieures. Par conséquent, la qualité architecturale des systèmes choisis réduira les coûts liés aux finitions intérieures tout en contribuant à la valorisation de la structure comme « ornement ».

En outre, délaissier les directives, codes et règles de l'art au profit de l'expérimentation de conception passive fondées sur la forme du bâtiment pourrait conduire à des économies directes d'énergie tout au long de la vie utile du bâtiment

Fabrication/mise en œuvre

L'économie du système d'assemblage est fonction du système constructif retenu. Prenons pour exemple le système de grille; il est relativement logique de supposer qu'adopter ce système occasionnera des coûts supplémentaires de conception et de fabrication des assemblages qui devront être sur mesure, même s'ils sont simplifiés et intégrés au maximum. L'objet de notre recherche étant une grande structure, sans budget illimité, le système de grille paraît beaucoup moins intéressant comme solution.

La simplicité et la rapidité de montage ont aussi une incidence importante sur l'économie du projet. Un projet exigeant des ouvrages temporaires complexes sera toujours moins économique que celui n'y ayant pas recours. (Figure 32). Consacrer beaucoup d'effort à l'étape de la conception amènera des économies au moment de la fabrication. Dans certains contextes la préfabrication (prédécoupe, préperçage) peut aussi diminuer les coûts de fabrication en réduisant le travail en chantier.

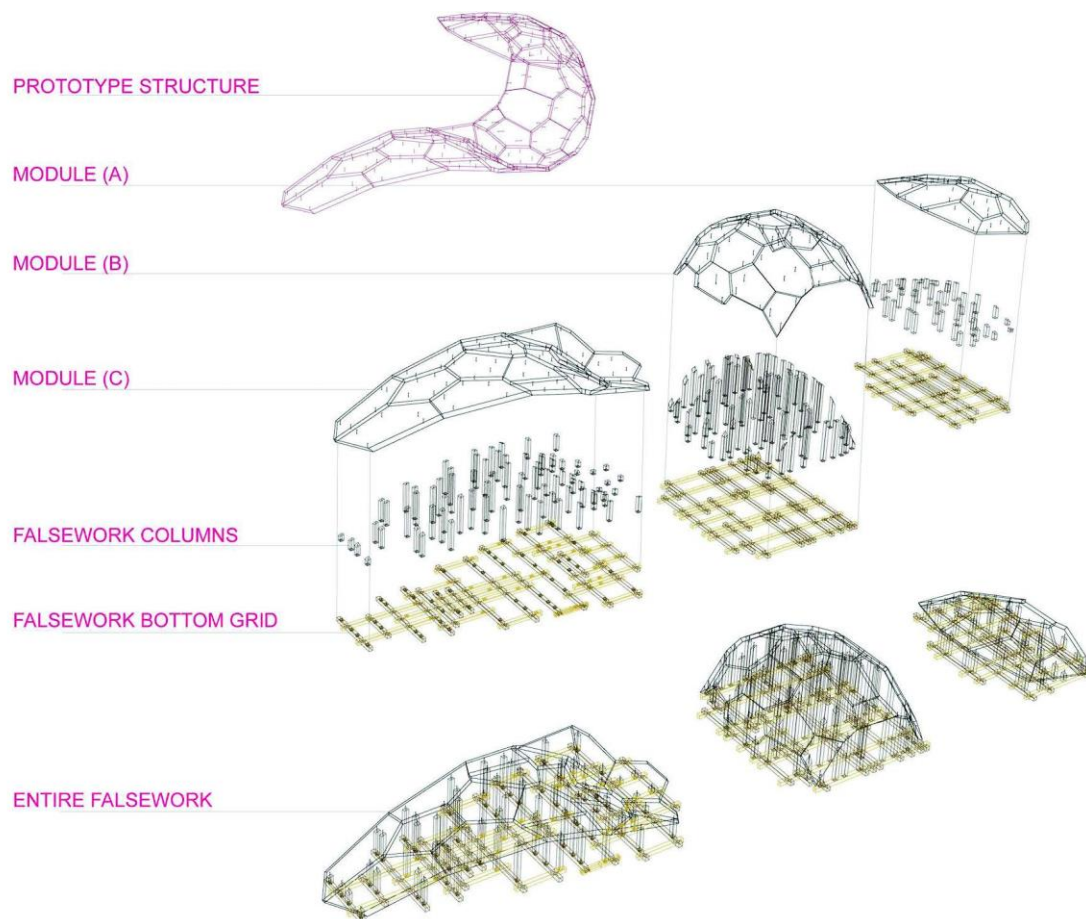


Figure 32 Exemple d'un ouvrage temporaire (échafaudage) nécessaire à la mise en œuvre d'une structure complexe en CLT (Schimek, Wiltsche et Pfaller)

Conception

Le temps de conception et le contrôle du volume de matériau utilisé peuvent affecter grandement l'économie du projet au moment de la conception. Le temps de conception est directement lié à la complexité inhérente du système et à l'intégration des assemblages. Plus un système est complexe à concevoir et à mettre en place, plus il prendra de temps et moins il sera économique. L'économie liée au contrôle de la quantité de matériau utilisé consiste à produire plus d'affect, d'espace et de fonctions, avec le moins de matériau possible. De fait, il est difficile de prévoir le nombre de mètres carrés de bois utilisés sans avoir en tête un concept précis, car l'échelle des études de projet des différents systèmes examinées ne permet pas de faire une comparaison valable entre la matière et l'apport au projet.



Efficacité

Occupation

À l'instar du facteur d'économie en occupation, les explorations formelles nous permettent d'explorer des stratégies passives reposant sur la forme du bâtiment. Le système constructif doit pouvoir optimiser la lumière naturelle, le confort des ambiances et l'efficacité énergétique.

Fabrication/mise en œuvre

Il s'agit ici d'optimiser le processus de fabrication et de mise en œuvre. Pour y arriver, le système et les assemblages doivent être les plus simples et les plus adaptables possibles. Compte tenu de la nature irrégulière et complexe du résultat souhaité, il est convenu que nous devrons pouvoir fabriquer efficacement du sur-mesure à la chaîne. C'est en diminuant aussi le nombre d'étapes de fabrication et de détails que nous pourrions faciliter et optimiser la fabrication (Willis et Woodward, 2010). Par exemple, le sewing timber qui demande de la découpe, la fabrication d'un ouvrage temporaire, du collage et finalement du temps de montage considérable paraît un processus peut-être trop complexe étant donné l'échelle de notre projet.

Conception

Au moment de la conception, l'efficacité du système fera ses preuves dans sa capacité à faciliter l'optimisation de notre structure. Pour cela, le système doit être adaptable dans une boucle itérative incluant une analyse de structure, afin de sorte à converger vers une structure de plus en plus stable. Le système doit aussi être suffisamment performant pour utiliser le matériau dans le contexte structurel où il travaille le mieux, en employant le moins d'éléments possibles, afin de limiter la quantité de bois utilisé et les pertes de matériau. Il en va de même pour le système d'assemblage qui doit pouvoir s'adapter et s'intégrer à la structure et répondre adéquatement aux efforts générés.

Nous avons maintenant tout en main pour entamer le processus de conception de notre structure non standard en CLT. Cependant, le processus de conception, comme on l'explique dans la présentation sur la recherche-création, n'est pas linéaire et une partie des idées sont intuitives et s'appuient sur des décisions de conception. Il est de ce fait complexe de décrire en détails toutes les étapes parcourues durant le développement de la proposition architecturale. Nous pouvons dans un premier temps présenter la conclusion de l'analyse des facteurs et des critères du projet pour le choix de notre système constructif. Cette conclusion, en plus des principes théoriques rencontrés et étudiés en parallèle de la conception, nous a permis de résoudre certains défis conceptuels et seront présentés dans le chapitre qui suit, dans une simplification du processus conception qui a mené aux deux propositions finales.

Chapitre 3 – Conception

Considérant tout ce qui précède, force de constater qu'aucun système existant ne répond entièrement à nos besoins. La grille ne nous paraît pas une solution envisageable étant donné que la structure a principalement le rôle d'enveloppe. En effet, ce système convient mal à la fonction en plus d'exiger une structure supplémentaire pour soutenir ladite enveloppe, ce qui entraîne une augmentation des coûts. En outre, ce système oblige à développer un assemblage sur mesure en acier qui entraîne un surcroît de coûts et de poids et exige de ce fait des études sur la structure des assemblages trop importantes par rapport au cadre du projet et de la recherche. Pour une surface habitable, la tessellation semble plus pertinente.

La tessellation a toutefois ses limites aussi. Le principe qui la sous-tend consiste à partir d'une surface et à la subdiviser en plusieurs éléments plans. Comment se fera la définition de cette surface? Une première option serait de la définir arbitrairement selon des critères esthétiques seulement. Une seconde serait qu'elle émerge de nos différents paramètres de conception et de programme. Cette seconde option nous semble plus cohérente et en continuité avec notre approche de conception intégrée. Si notre surface doit se générer par la combinaison de paramètres de programme, développer un algorithme génératif nous paraît la meilleure approche. C'est pourquoi nous appliquerons certains principes de forme par système.

En ce qui a trait aux systèmes d'assemblage, deux choses importantes sont à considérer : le grand nombre de panneaux qui seront nécessaires pour une toiture de 3000 m² et l'empreinte écologique. Il nous faut un système simple à mettre en œuvre et économique. Nous éliminons d'office la solution préconisée par l'industrie, à savoir les plaques d'acier externes en raison de leur poids et de l'empreinte écologique liée à la transformation de l'acier. Il y a plusieurs assemblages différents qui se compteront sûrement par milliers, au mieux par centaines. Devoir fabriquer autant d'éléments sur mesure nous semble contre-productif, coûteux et compliqué à mettre en œuvre. De même, les solutions Bois-Bois nous semblent peu appropriées, quoique plus écologiques, principalement à cause du nombre d'étapes et de la complexité de mise en œuvre qu'elles impliquent pour un projet à cette échelle.

La solution retenue est le joint en queue d'aronde (dovetail joint) pour son intégration facile au processus de conception, sa préfabrication paramétrée (détails générés de façon associative donc capables d'adaptation) et sa simplicité de mise en œuvre. Les précédents montrent qu'associé aux vis structurelles, ce système d'assemblage semble répondre aux besoins techniques et structuraux du projet. De plus, comme les joints en queue d'aronde sont intégrés à la conception et à la modélisation, et qu'ils n'ajoutent aucun élément à la structure, ils se trouvent pleinement intégrés à l'expérience architecturale en introduisant raffinement, innovation, qualité sculpturale et expression de l'action structurale (soit les critères évoqués plus haut par Charleson, A.W. (1994) dans Calderon et al., (2011).

Ce système s'intègre aussi très bien dans la chaîne de fabrication des panneaux, puisque les assemblages sont découpés en usine en même temps que les panneaux eux-mêmes. Sur le chantier, la mise en œuvre est simple puisque les panneaux s'assemblent comme un casse-tête avec comme principale intervention l'ajout des vis structurelles. Ainsi ce système réduit au maximum les déchets sur chantier en favorisant la préfabrication.

1 Composantes et limites du système

Pour faire suite à la description ci-dessus du principe global de la tessellation (voir section La Tessellation page 25), nous verrons plus en profondeur les contraintes et caractéristiques liées à sa conception et sa mise en œuvre.

Sur le plan de la conception, il y a deux grandes façons de modéliser la tessellation : l'approche ascendante et l'approche descendante (angl. Top-Down, Bottom-Up). L'approche ascendante de la discrétisation d'une surface consiste à analyser la surface localement et à tisser ses liaisons au fur et à mesure de cette analyse. Bref, on part du local pour bâtir le général. La méthode inverse, l'approche descendante, la plus souvent utilisée vu sa simplicité, considère la description générale de la surface représentée sous forme d'une collection de points qui deviendront les « nœuds » de la structure; les propriétés locales ne sont pas prises en compte.

Tsigkari (2006) démontre que l'approche ascendante offre des résultats finaux plus probants lorsque la topologie des nœuds est difficile à définir, particulièrement lorsque le concepteur souhaite appliquer une déviation maximale à un nœud sans diminuer la taille des panneaux et les multiplier. La grille se condense là où elle en a le plus besoin, sans intervenir sur l'ensemble de la surface. Cependant, lorsque la prédéfinition d'une topologie est un aspect crucial du projet, la méthode descendante est aussi tout-à-fait acceptable et plus rapide.

Décider d'adopter une approche descendante ou ascendante est un choix délicat. L'approche descendante n'est pas facile à mettre en place à moins de travailler en triangulation. L'approche ascendante introduit le mode agent (angl. Walking Agent ou Agent-based systems) (Tsigkari, 2006; Schwinn, Olivier et Menges, 2014) qui, bien que plus précis, est difficile à générer en tant qu'algorithme génératif où les boucles d'itération sont essentielles.⁴⁰ Au moment

⁴⁰ Mode agent, Walking Agent ou Agent-based systems en anglais, est une traduction proposée par l'auteure. Mode agent est l'équivalent trouvé dans Termium Plus pour « agent-based » en informatique. De plus « agent » est un terme couramment utilisé dans le milieu informatique et fait référence à un « petit programme autonome qui circule dans un ordinateur, ou d'ordinateur en ordinateur, via des réseaux, pour effectuer une tâche qui lui a été confiée. » (TERMIUM Plus, gouvernement du Canada)

de faire les expérimentations, Grasshopper n'offrait pas encore de plug-ins d'itération et le seul moyen de générer des itérations était par programmation avec Python. Générer un tel code était peu envisageable sur le moment, en termes de temps, même pour quelqu'un relativement à l'aise en programmation. Puisque la recherche vise à mettre en valeur les outils à la portée des architectes du Québec, il nous a semblé contre-productif de pousser trop loin cette approche et nous avons plutôt opté pour la valorisation des outils disponibles. L'approche descendante s'est donc imposée et il a fallu travailler nos formes initiales en conséquence.

Pour subdiviser une surface courbe en plusieurs éléments plans, la triangulation est la méthode la plus simple pour arriver à une approximation relativement exacte de la surface. Elle s'avère cependant moins efficace dans le cas d'une structure en panneaux puisque les joints deviennent plus complexes à gérer lorsque plus de quatre panneaux se rencontrent en un point (nœud). Pour cette raison les auteurs Pavlíček et Kaftan (2012), Stavic, Hirschberg et Wiltsche (2010) et Tsigkari (2006) s'entendent pour favoriser des éléments à quatre côtés ou plus. Il y a aussi moins de perte matérielle à la découpe de panneaux de quatre côtés ou plus (Figure 33). En outre, plus le nombre de panneaux se rencontrant à un nœud est élevé, plus les angles des coins des panneaux seront aigus, et plus ils seront susceptibles de briser durant la fabrication, le transport et l'entreposage. Nous allons donc éviter le plus possible les panneaux triangulaires et prioriser les panneaux de quatre côtés et plus. Appliquer une approche descendante à des panneaux d'au moins quatre côtés entraîne toutefois son lot de défis dans la modélisation et, par extension, dans la fabrication.

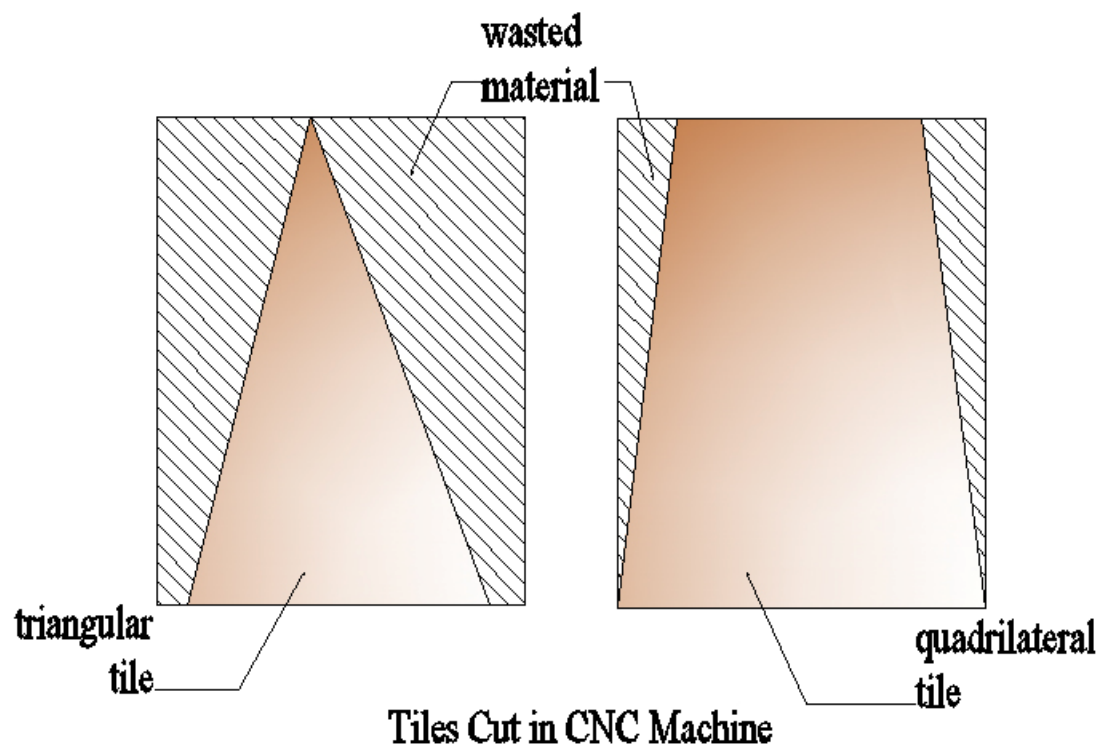


Figure 33 Découpe et perte de matériau – triangle vs quadrilatère (Tsigkari, 2006)

2 Planarisation des motifs

Nous avons utilisé tous les outils Grasshopper à notre disposition pour générer nos motifs de panneau. Le plug-in LunchBox (PROVING GROUND, 2015), donne accès facilement à une plus grande variété de motifs pouvant être générés automatiquement, à moins qu'on décide de dessiner nous-mêmes notre motif. À noter toutefois que les outils LunchBox permettent uniquement de « dessiner » un ornement sur une surface courbe. Les ornements qui résultent de la « découpe » de la surface selon ces motifs sont donc aussi courbés et, en général, présentent même une double courbure. Le grand défi consiste donc à aplanir ces surfaces. Il est certain que l'ornement original ne sera jamais restitué à l'identique, même si on conserve l'esprit du motif initial. (Figure 34)

C'est là où l'approche descendante a ses limites. En appliquant un algorithme de planarisation généré avec Kangaroo, Grasshopper déplace les points, estime leur nouvelle position et peut déformer grandement nos motifs. Une approche ascendante aurait été plus appropriée, car le panneau aurait été généré sur mesure en fonction de sa position sur la surface ainsi que de la nature de la surface et des panneaux voisins. De fait, la solution de ce problème a fait spécifiquement l'objet de recherches (Schwinn, Olivier et Menges, 2014; Stavric, Hirschberg et Wiltsche, 2010; Wang et Liu, 2009; Wang, et al., 2008; Tsigkari, 2006; Suryo, 2011).

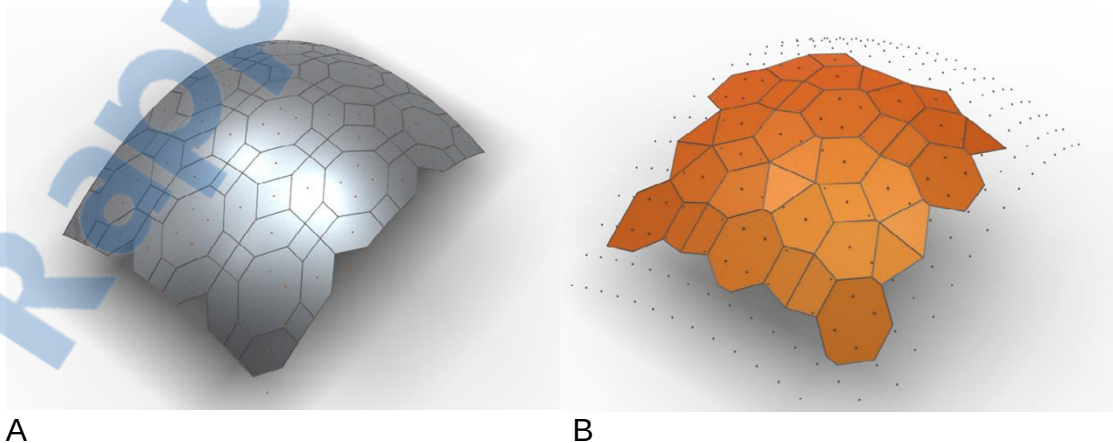


Figure 34 Processus de planarisation exploré par UTGRAZ. A. choix de l'ornementation et disposition sur une surface; B. Planarisation des ornements et déformation de ceux-ci

3 Les formes mathématiques

Il est essentiel de mentionner que, peu importe que la démarche soit ascendante ou descendante, aplanir les surfaces en panneaux rectangulaires ou hexagonaux est toujours un défi. À ce jour, il n'existe aucune solution universelle permettant de tesseller n'importe quelle surface libre. Plusieurs des recherches évoquées précédemment se sont intéressées exclusivement à la question, afin de trouver une méthode de modélisation infaillible. Les premières surfaces ayant pu être tessellées sont extraites de formes géométriques de base : sections de sphère, cylindres et cônes (e.g. Opéra de Sydney, Figure 35). Dans un premier temps, la tessellation génère un nombre uniforme et une multiplicité de panneaux identiques (Suryo, 2011). Ces surfaces ont la particularité de présenter un degré de courbure de Gauss supérieure à 1, soit $g > 1$. Ce degré de courbure prendra tout son sens un peu plus loin.

Wenping Wang, Yang Liu, et al. de l'Université d'Hong Kong (Wang, et al., 2008), Henry Suryo (2011) et Wang et Liu (2009) sont les derniers chercheurs en date à avoir élaboré des méthodes plus efficaces pour développer ce qu'ils appellent le P-Hex mesh (une tessellation hexagonale) sur une gamme plus large de surfaces.

Cependant, même eux reconnaissent les limites formelles de leurs algorithmes et admettent que toutes les surfaces ne peuvent être divisées en P-Hex meshes. « Seule une surface fermée du genre 1 (par exemple un tore) peut-être tessellé avec un maillage P-Hex. Sur une surface fermée du genre 0, des faces autres que des hexagones doivent être utilisées, à condition que tous les sommets soient de degré 3. »⁴¹ (Wang et Liu, 2009)

⁴¹ Angl. « Only a closed surface of genus 1 (e.g. a torus) may be tiled with a P-Hex mesh. On a closed surface of genus 0, faces other than hexagons must be used, provided that all the vertices are of degree 3. » (Wang & Liu, 2009, p.2) Traduction libre de l'auteure.

Ces algorithmes permettent de tesseller par hexagones des formes plus complexes, telles que des tores ou des surfaces hyperboliques. Cette tessellation est possible en jouant sur la concavité des pièces en fonction du degré de courbure. En effet, dans ces géométries, le panneau doit pouvoir se transformer, se déformer en éléments concaves lorsque le degré de courbure atteint 0 ou est inférieur à 1. (Figure 36). Dans un script ascendant, le mode agent analysera le degré de courbure et agira en conséquence, permettant la transformation locale du panneau selon $g > 0$, $g = 0$ ou $g < 0$.

Comment est-il possible d'obtenir ces pièces concaves sans devoir exécuter des scripts complexes ? Il semble qu'il n'y ait aucun moyen simple d'atteindre cet objectif à partir de Grasshopper, du moins au moment des explorations formelles pour notre projet.

Les outils comme Kangaroo (Piker, Kangaroo3d, s.d.), un simulateur de forces physiques, permettent de rationaliser les surfaces et d'optimiser l'algorithme de tessellation au moyen du « Laplacian smoothing » (algorithme pour lisser un maillage polygonal), mais seulement en présence d'un degré de courbure de Gauss positif. La résistance de la flexion dans les angles intérieurs empêche de générer des pièces concaves, ce qui est nécessaire pour les degrés de courbure de Gauss négatifs. Finalement, l'ajout de panneaux pentagonaux ou heptagonaux pourrait éventuellement permettre de tesseller des surfaces réellement libres. Toutefois, la présence d'éléments concaves en cas de courbure négative rend le principe encore plus complexe (Piker, 2012). Les études de Wang, Liu et al. et Syryo font d'ailleurs abstraction de ces surfaces et se concentrent sur les plans, tubes et tores. (Figure 37)

Au final, il n'y a pas de réponse universelle. Chaque étude a développé des solutions propres à ses besoins en se limitant à certaines formes (i.e. $g > 1$, tores, surfaces hyperboliques) ou en intégrant différents types de panneaux (hepta, hexa). Au moment de nos explorations, aucun outil n'existant pour résoudre facilement n'importe quelle surface libre, il était donc logique de travailler la génération de notre surface pour qu'elle présente des degrés de courbure de Gauss > 0 .

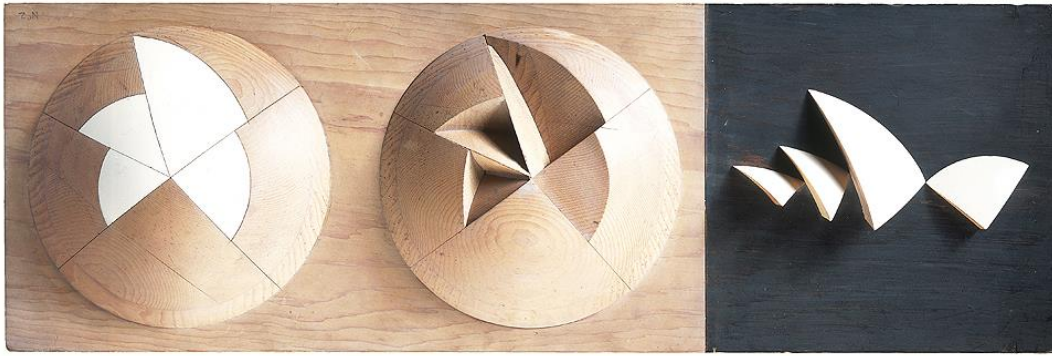


Figure 35 Opera sydney - composante géométrique - Victoria and Albert Museum image

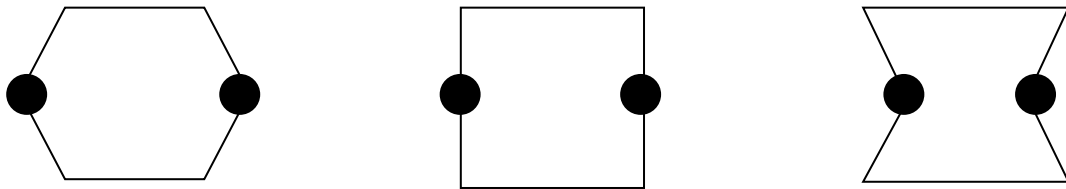


Figure 36 Transformation de l'hexagone de concave à convexe

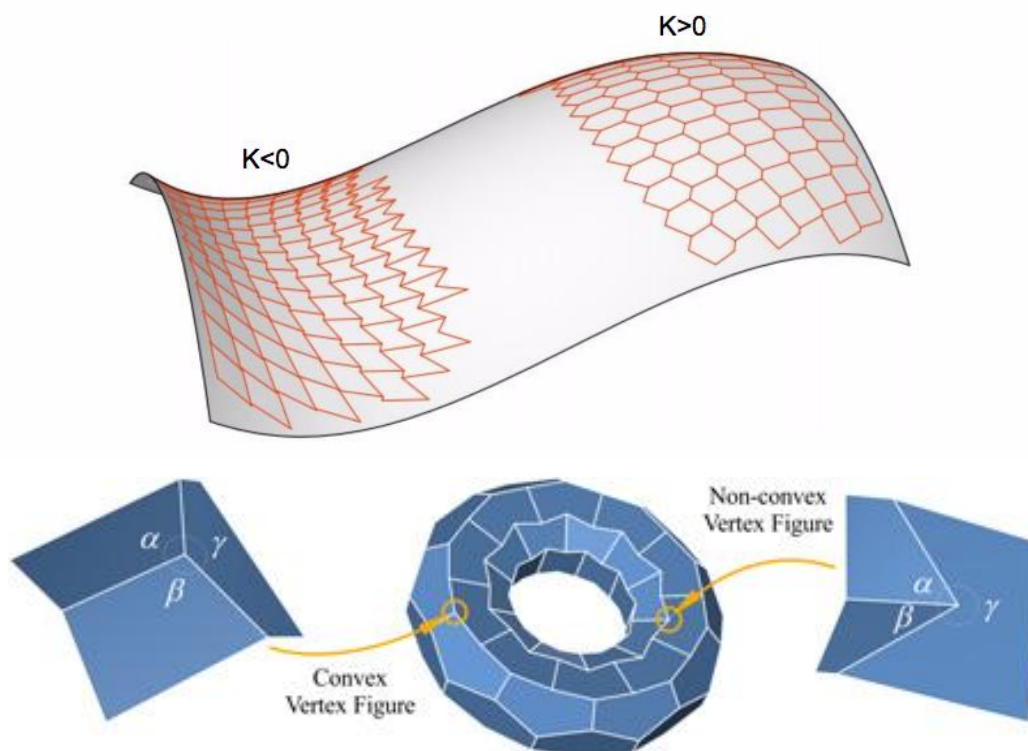


Figure 37 “Planar hexagons on a surface. The hexagons are convex where the Gaussian curvature is positive, and concave at negative Gaussian curvature.” (Henriksson & Hult, 2016)

4 Épaisseur et matériau

Un des premiers exercices effectués pour cette recherche fut de trouver un moyen efficace de générer l'épaisseur du matériau dans le modèle. De façon préliminaire au projet de la jetée, les explorations furent faites dans la modélisation de la Chapelle Saint-Loup (Buri H. U., 2010) où les murs sont constitués de panneaux de CLT de 40 mm d'épaisseur et la toiture de panneaux de 60 mm. La méthode « logique » à employer est d'appliquer la fonction « offset » à toutes les surfaces selon l'épaisseur désirée.

Offset

Lorsqu'on applique l'offset à toutes les surfaces, on se heurte rapidement la limite de cette fonction. D'abord, ainsi que Buri (2010) l'a lui aussi constaté dans son mémoire, comme les éléments soumis à l'offset ne sont pas parfaitement symétriques, des décalages importants s'opèrent aux intersections entre murs et toiture. Ces décalages sont progressifs; plus il y a d'asymétrie, plus le décalage est grand. Malheureusement, peu importe la méthode employée, ce décalage sera toujours présent lorsqu'on ajoute de l'épaisseur. (Figure 38). Les fonctions automatiques de base tel que « trim » ne fonctionneront pas et les surfaces devront être raccourcies ou rallongées manuellement pour pouvoir s'entrecroiser. Ce problème ne disparaît que lorsque seulement trois panneaux se rencontrent. Le principal problème associé à l'offset c'est que la fonction est difficilement paramétrable à cause de cette asymétrie.

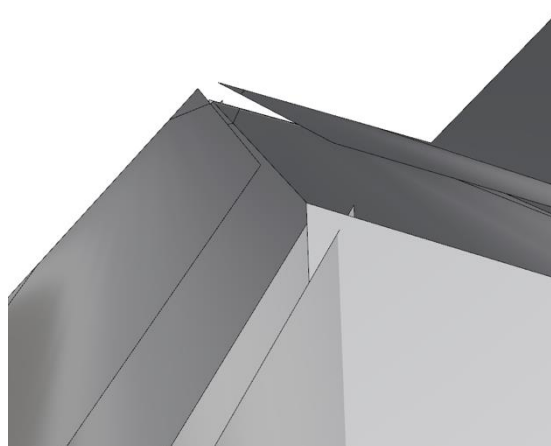


Figure 38 Dans cette illustration les surfaces des murs ne sont pas alignées en haut et en bas.

C'est d'ailleurs pour cette raison que, dans le cas du projet de la Chapelle Saint-Loup, l'équipe de conception a jugé qu'il était plus simple et plus rapide d'ajouter manuellement la matérialité dans le logiciel de modélisation. Dans la mesure où la structure est relativement simple et le nombre de pièces limité, c'est une approche assez logique. Cependant, le nombre de pièces étant considérablement plus élevé dans notre projet, il est apparu essentiel de trouver une solution paramétrable afin de ne pas refaire la matérialité manuellement à chaque changement, ce qui demande beaucoup de temps de modélisation. En effet, pour chaque offset, les surfaces se croisent ou ne se touchent pas systématiquement. De plus, à cause de la non-symétrie de la structure, les fonctions « trim » et « fillet » ne suffisent souvent pas et nécessitent plusieurs actions préalables. Chaque intersection est traitée au cas par cas; c'est pourquoi le codage est si difficile.

L'« offset » doit donc s'effectuer autrement qu'avec la fonction automatique « offset ». La méthode de Stotz (2009) a été testée à cette fin. Elle consiste essentiellement à récupérer la moyenne des normales, en prenant les quatre coins, les points v , de la surface de base et, à l'aide d'une analyse vectorielle et des surfaces adjacentes, à calculer le vecteur de déplacement de ces points v pour définir le point v' . (Figure 39)

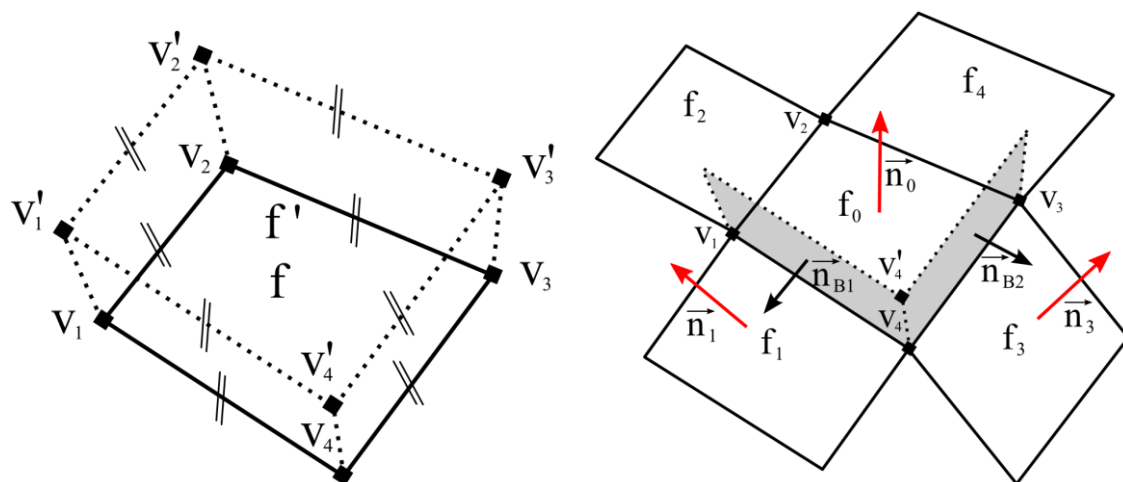


Figure 39 Méthode d'offset de Stotz (Stotz, 2009)

$$\vec{v_4} \equiv \frac{\vec{v_4 v_4}}{\|\vec{v_4 v_4}\|} \equiv \frac{\vec{n_{B1}} \times \vec{n_{B2}}}{\|\vec{n_{B1}} \times \vec{n_{B2}}\|}$$

Figure 40 Obtention du vecteur de transition du point v_4

Par exemple, pour obtenir le vecteur de translation du point v_i' , il faut effectuer le produit croisé des normales des plans bissecteurs, lesquelles s'obtiennent en faisant le produit croisé de l'addition des vecteurs avec le vecteur d'intersection des deux surfaces (exemples : $\vec{n_{B1}} = (\widehat{n_1} + \widehat{n_0}) \times \vec{v_1 v_4}$ et $\vec{n_{B2}} = (\widehat{n_3} + \widehat{n_0}) \times \vec{v_4 v_3}$). (Figure 40). La translation de v_i se fait, elle, selon la formule générale $\vec{v_i'} = v_i + t_i \vec{v_i}$ où $t_i = \frac{d}{\vec{v_0} \times \vec{v_i}}$. (Stotz, 2009)

Cependant, la surface « offset » générée avec les points v_i' issus de la méthode de Stotz appliquée à notre projet présente systématiquement une double courbure. C'est le calcul des quatre t_i qui produit des facteurs de translation non uniformes. Il n'a malheureusement pas été possible d'établir la cause de ce décalage. Afin de contrer ce problème, nous avons développé une méthode personnelle s'inspirant de la méthode de Stotz.

La méthode de Stotz (2009), consiste, en résumé, à trouver la ligne d'intersection des deux plans bissecteurs. Les points v_i et v_i' se trouvent chacun sur cette ligne, v_i' étant le déplacement t_i sur cette ligne d'intersection. L'autre moyen de trouver l'emplacement v_i' est donc logiquement de faire intersecter un troisième plan, en l'occurrence le plan perpendiculaire à la normale de notre surface, déplacé selon la normale d'une distance correspondant à l'épaisseur de notre panneau. (Figure 41)

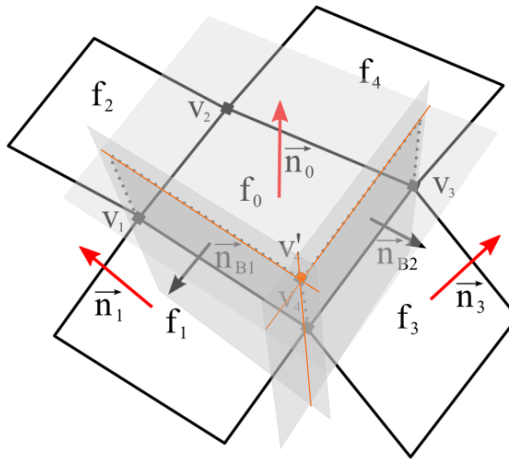


Figure 41 Mon adaptation du système de Stotz

En termes de code (Annexe 4), la stratégie expliquée précédemment reste relativement facile à mettre en place avec des fonctions de base mises en œuvre en boucle avec Python. Il faut toutefois noter que, pour trouver les quatre points qui permettront de créer la nouvelle surface, cette méthode exige d'avoir obligatoirement quatre surfaces adjacentes pour calculer les nouveaux points. Cela pose problème pour les panneaux situés en bordure de la structure et pour tous les panneaux de mur. Pour remédier à cette situation, on utilise pour le calcul des panneaux fictifs résultant de la symétrie de la normale de la surface à traiter, selon un plan YZ pour les panneaux de bout, et selon un plan XY pour les murs. Finalement, afin de faciliter le traitement de ces exceptions, la notion de fonction a été introduite dans le bloc de code. Il y a donc une fonction traitant les panneaux de toiture et une fonction traitant les panneaux muraux. Des fonctions secondaires ont aussi été créées pour récupérer la normale, les coins et les bordures des surfaces, afin d'alléger les autres fonctions et pour concevoir les surfaces représentant les champs des panneaux.

Cette méthode a produit de bons résultats et sera réutilisée pour la suite du projet de recherche. (Figure 42). Elle est logique et polyvalente pour les cas de non-symétrie entre panneaux. Notons que, dans l'ensemble, l'intersection des panneaux se fait suivant une méthode de connexion champ/champ, approche qu'a privilégiée l'équipe de conception. Les connecteurs structuraux sont de longues plaques en acier plié posées sur les arrêtes extérieures de la surface. Néanmoins, ce n'est pas le type d'assemblage utilisé pour le projet développé.

La méthode ne change cependant pas pour les joints en queue d'aronde, seules des étapes sont ajoutées pour « dessiner » les joints et en « automatiser » le dessin. (Annexe 4) Une fois l'offset résolu, le dessin du joint ne représentait pas un défi insurmontable.

Intersections

Comme mentionné plus tôt, peu importe la méthode employée pour ajouter l'épaisseur des panneaux, qu'elle soit manuelle ou paramétrée, le problème de l'intersection subsiste à cause de la non-symétrie des plis. (Figure 43) La solution employée pour le projet de la Chapelle n'est pas dévoilée. S'il est vrai que l'intervention manuelle permettrait d'obtenir une solution semblable à l'image, en pratique, elle ne serait pas rentable pour la fabrication, car les découpes qu'elle impose ne sont ni efficaces ni optimisées.

Dans la littérature, le problème reste entier; seuls pis-allers sont possibles. Stotz (2009) propose de « couper » les coins, littéralement. (Figure 44). En effet, puisque le transfert de charge se fait principalement par les champs, les coins peuvent être simplifiés vu, qu'en théorie, ils n'ont pas autant d'importance en ce qui concerne la résistance et la rigidité :

Statiquement, les sommets ne sont pas pertinents pour la stabilité du système dans une structure en coque de panneaux ayant des sommets à trois arrêtes; la stabilité du système est basée sur la distribution des forces dans le plan des faces, forces qui sont transférées le long des bords de ces faces. Cela signifie que la géométrie d'une structure de coque est organisée de telle sorte que les facettes constituent la structure de support des charges principales. Cela élimine la nécessité de composants structurels autres que les faces elles-mêmes.⁴² (Bagger, 2010)

⁴² Angl. « Statically, the three-way vertices in a plate shell structure has the consequence that the vertices are irrelevant for the stability of the system; the stability of the system is based on distributed in-plane forces in the facets, which are transferred along the facet edges. This means that the geometry of a plate shell structure is organized so that the facets constitute the primary load bearing structure. This eliminates the need for structural components other than the facets themselves. » (Bagger, 2010,p.4) Traduction libre de l'auteur.

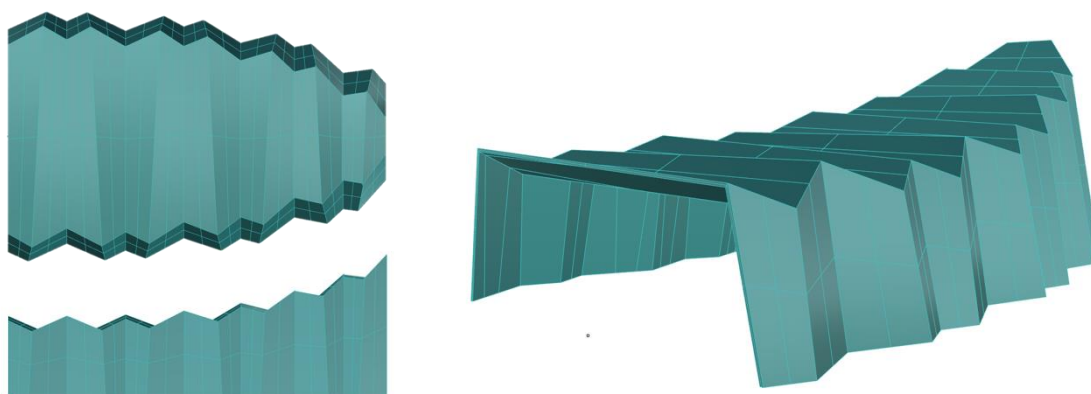


Figure 42 Une fois la matérialité ajoutée

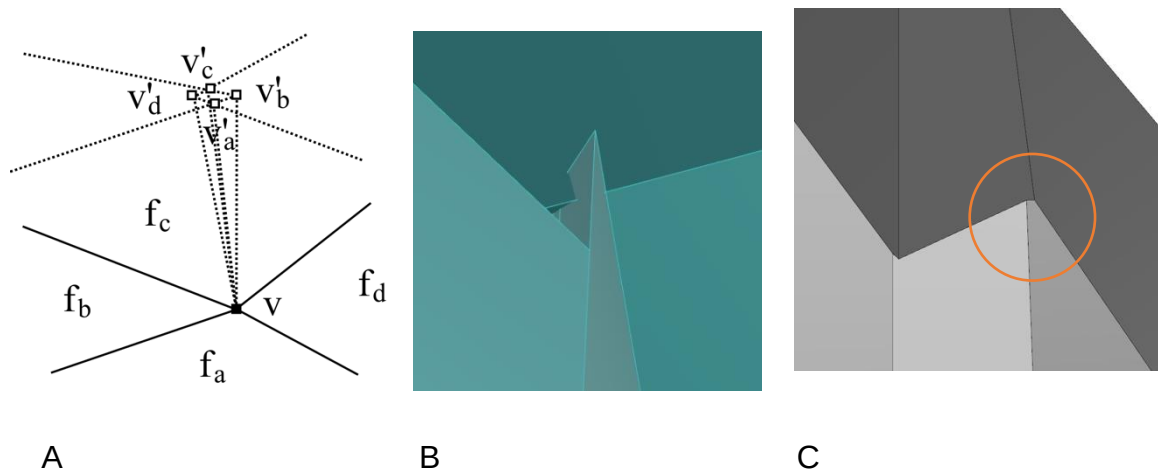


Figure 43 A. Superposition des vecteurs de déplacement; B. Panneaux issus de l'ajout d'épaisseur; C. Intervention manuelle pour éliminer la superposition

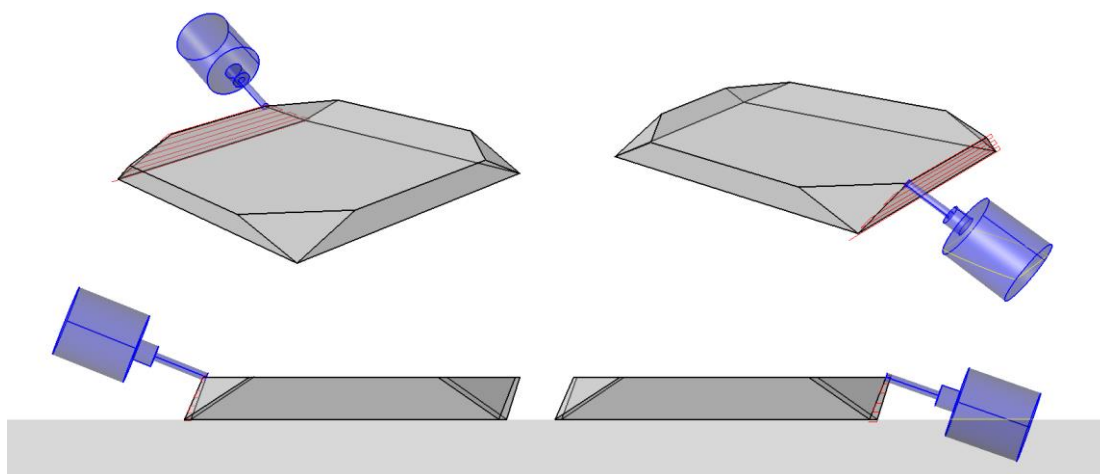


Figure 44 Résoudre les intersections en éliminant les coins, Stotz, 2009

5 *Form finding*

Il est important de préciser que, dans un contexte de boucle itérative de création oscillant entre conception et recherches appliquées, les toutes premières explorations ont été faites exclusivement selon les besoins du projet, et relativement peu selon les limites et principes évoqués jusqu'à maintenant.

Le but était de tester, d'imaginer certaines configurations et certains usages qui pourraient ensuite être développés selon la logique émergente d'un algorithme génératif. Afin de guider cet algorithme, il importait d'avoir une idée de ses limites évolutives et de son esthétique formelle.

Les premiers concepts envisagés étaient beaucoup plus tentaculaires, s'étendant au-delà de la toiture-terrasse, et proposaient des configurations géométriques assez complexes. (Figure 45). Si les expérimentations ont permis d'identifier certaines fonctions qui ont été intégrées dans les concepts finaux, peu des explorations formelles faites à ce moment trouvent écho dans les propositions finales.

Parmi les principales raisons pour cela figurent : des défis techniques trop complexes pour la structure en panneaux de bois, conséquences majeures compromettant l'étanchéité de l'enveloppe.

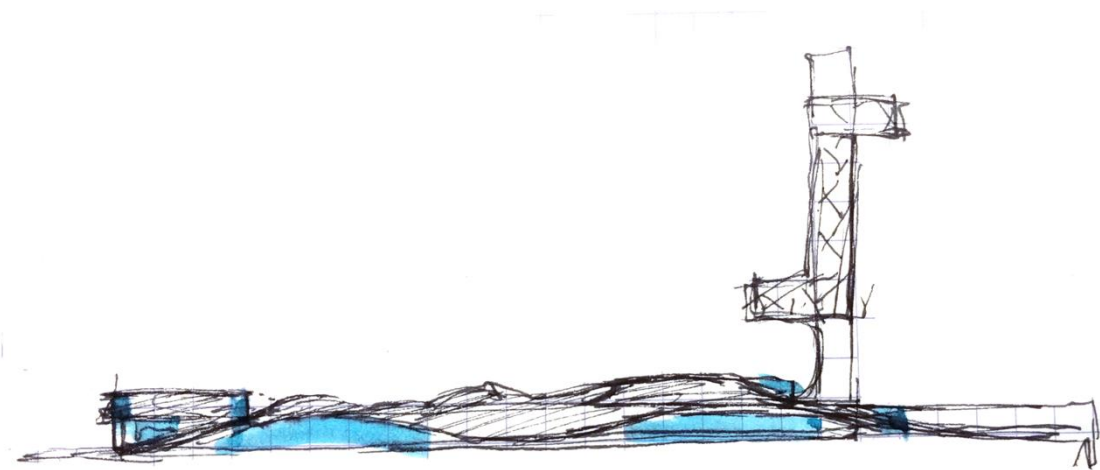
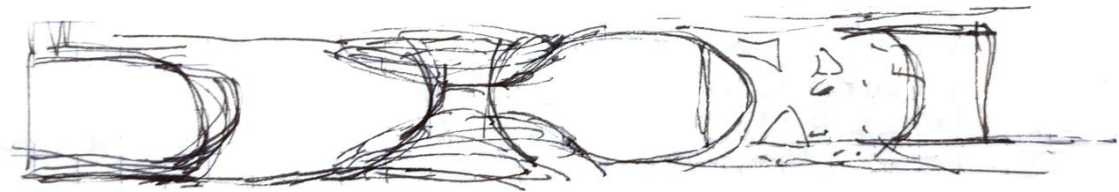
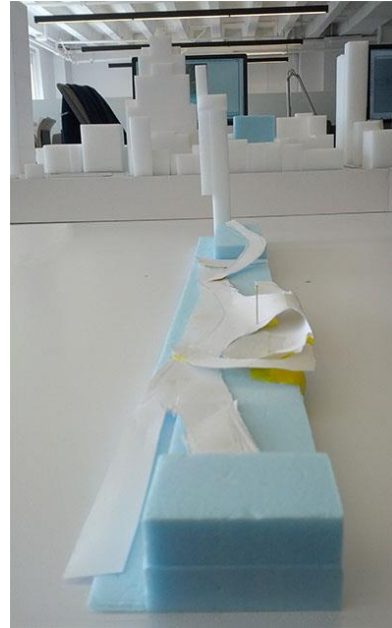


Figure 45 Maquettes et esquisses de formes

Il a donc fallu se tourner vers un design simplifié et restreint à la toiture, afin de bien contrôler notre l'algorithme génératif de sorte qu'il réponde adéquatement aux besoins du projet et n'entre pas en conflit avec les règles de conception du projet de la jetée.

Ces premières explorations ne présentaient aucune efficacité en termes d'optimisation de la matière et de la structure. Il fallait simplement ancrer nos explorations avec des processus génératifs logiques en vue de générer une surface optimale.

Un dernier aspect important dont il faut tenir compte dans l'exploration de concepts, est la présence de la structure d'acier existante. Celle-ci est omniprésente, avec sa trame serrée de quatre mètres d'espacement sur la longueur. La nouvelle structure est astreinte à toujours se trouver « au-dessus » d'elle sans possibilité de descendre vers le sol, par exemple. De plus, contrairement à la plupart des pavillons utilisant la tessellation comme système, la toiture sert à la fois, non seulement de « couverture » comportant des ouvertures (puits de lumière), mais aussi de sol et même de socle pour une seconde toiture (abri).

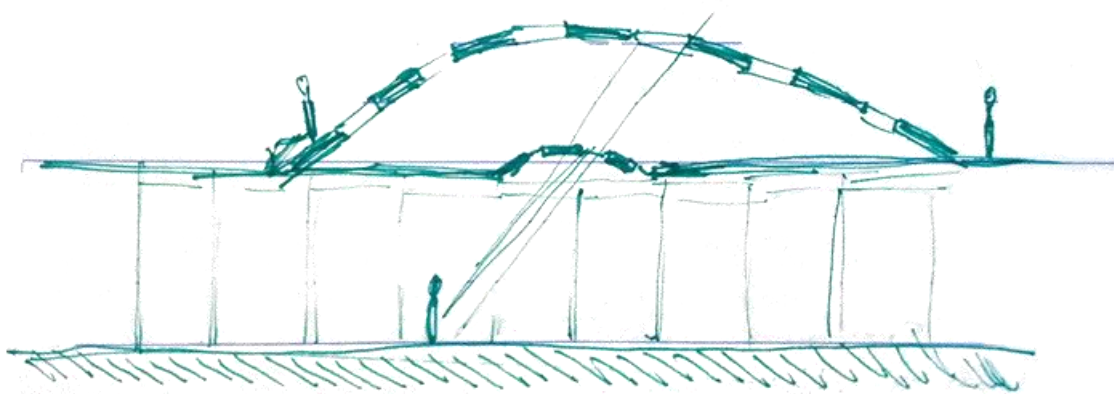


Figure 46 Coupe de concept - niveau et fonction

Jusqu'ici, les explorations ont été davantage dans l'esprit des « blobs » que d'une réelle logique constructive. À partir de maintenant, on s'intéressera au principe de la coque qui, quoique moins libre, offre une meilleure utilisation de la matière. (Bechtold)

On s'inspirera d'un principe élémentaire, mais absolument logique pour obtenir des formes optimales : les caténaires. Pensons aux travaux d'Antonio Gaudi (1900-1914), Frei Otto (1960-1970) et Heinz Isler (1950-2000) qui ont utilisé la gravité comme « [...] l'ultime apport paramétrique de la nature, pour informer plutôt que planifier la forme architecturale en tant que déterminant physique essentiel dans le processus de conception. »⁴³ (Burry, 2016)



Figure 47 Reconstruction du modèle suspendu de Gaudi pour la Colonia Güell Chapel

⁴³ Angl. « [...] nature's ultimate parametric design inputs, to inform rather than plan architectural form as an essential physical determinant within the design process. » (Burry, 2016, p.34) Traduction libre de l'auteur.

Le principe consiste à générer une forme architecturale issue de la force gravitaire et d'y inclure le comportement de la matière. La forme ainsi créée offre naturellement un meilleur comportement structurel.

Nous sommes donc partis de l'hypothèse de générer nos surfaces par une trame de base à laquelle on appliquerait des forces virtuelles, à l'image des maquettes de Gaudi, pour générer nos espaces. (Figure 47). Pour ces explorations de motifs, nous avons autant que possible priorisé des trames rectangulaires, en losange, en parallélogramme (les angles aigus ne sont pas tous éliminés par contre), puis introduit des pentagones et des octogones. (Figure 48). L'intention était d'optimiser le nombre de nœuds à trois panneaux et d'évaluer le potentiel de déformation des motifs.

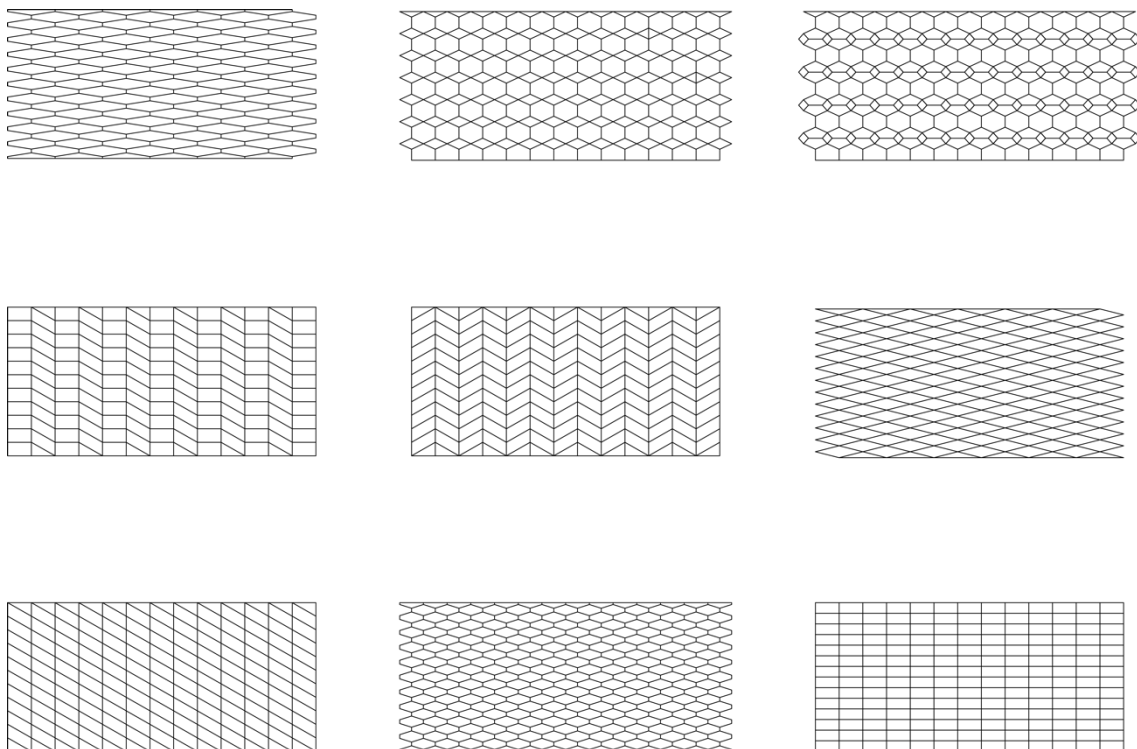


Figure 48 Exploration de différents motifs de trame de base

Il a finalement été décidé d'employer l'hexagone comme élément de base. Une trame de définition plus complexe aurait allongé passablement le temps de calcul pour l'algorithme, dans la mesure où aucune trame de ce genre ne pouvait être générée automatiquement par un plug-in existant et qu'elle nécessitait un codage Python ou un code Grasshopper appréciable. En début de processus cela a peu d'impact, mais plus le code évolue et plus le nombre d'actions s'additionne, de même plus le temps de calcul devient proportionnellement plus long. Mieux valait choisir des fonctions de base plus rapides à exécuter pour le logiciel. Après avoir éliminé les trames nécessitant du codage, générées par nos plug-ins, l'hexagone présente davantage de potentiel de déformation que le rectangle, le losange ou le parallélogramme. Il offre aussi une plus grande facilité de subdivision pour explorer d'autres possibilités de déformation afin de créer des aménagements extérieurs variés. (Figure 49)

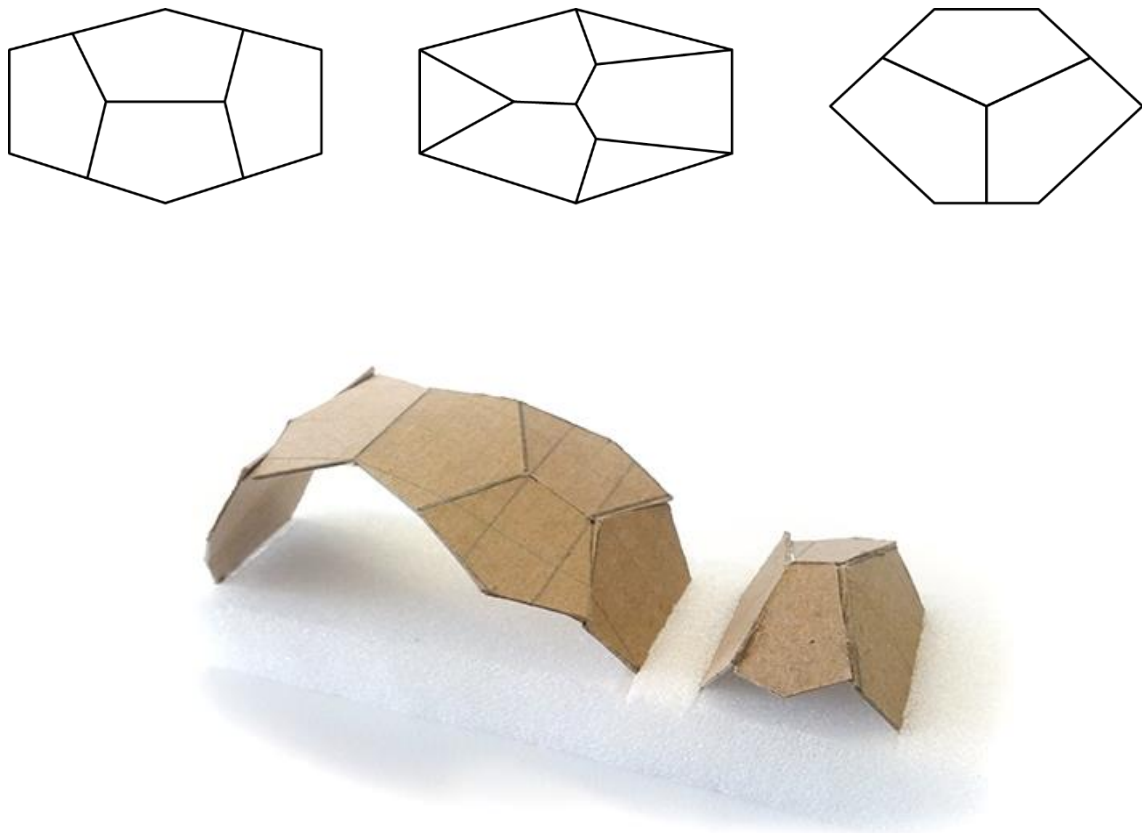
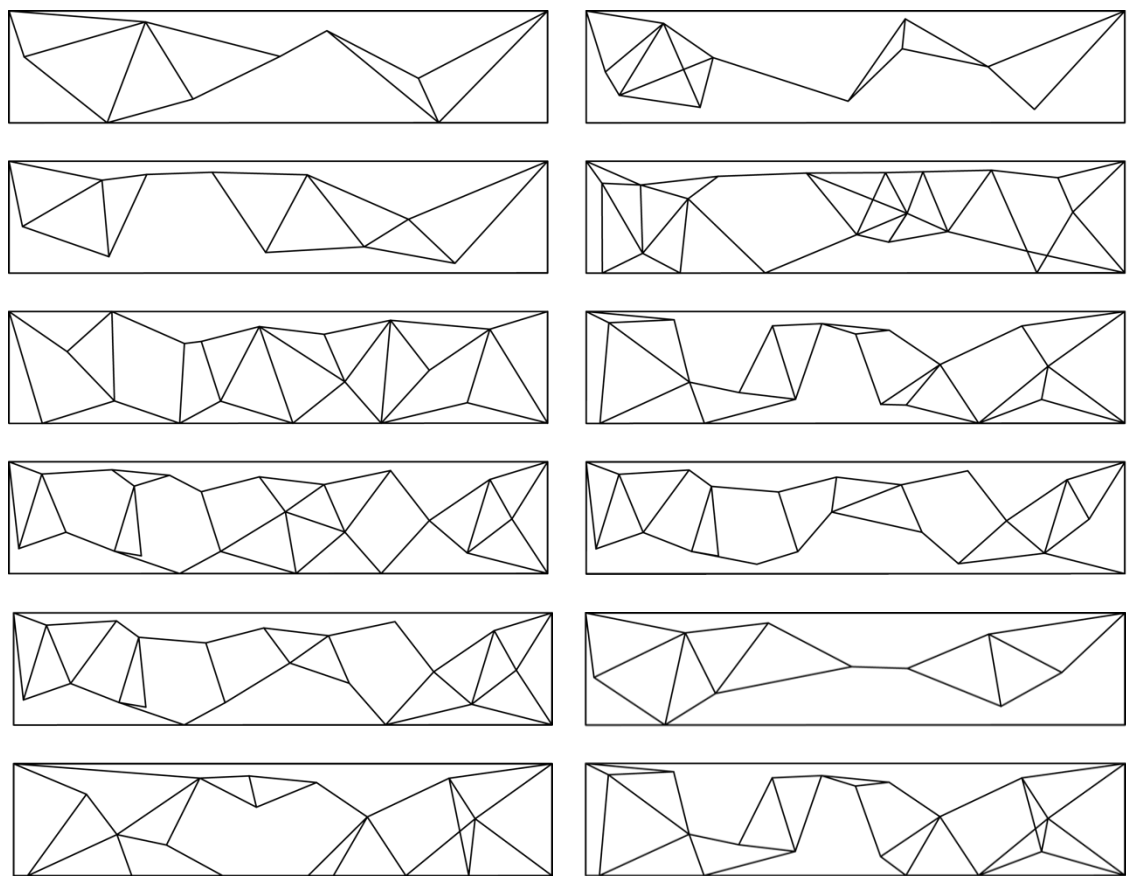


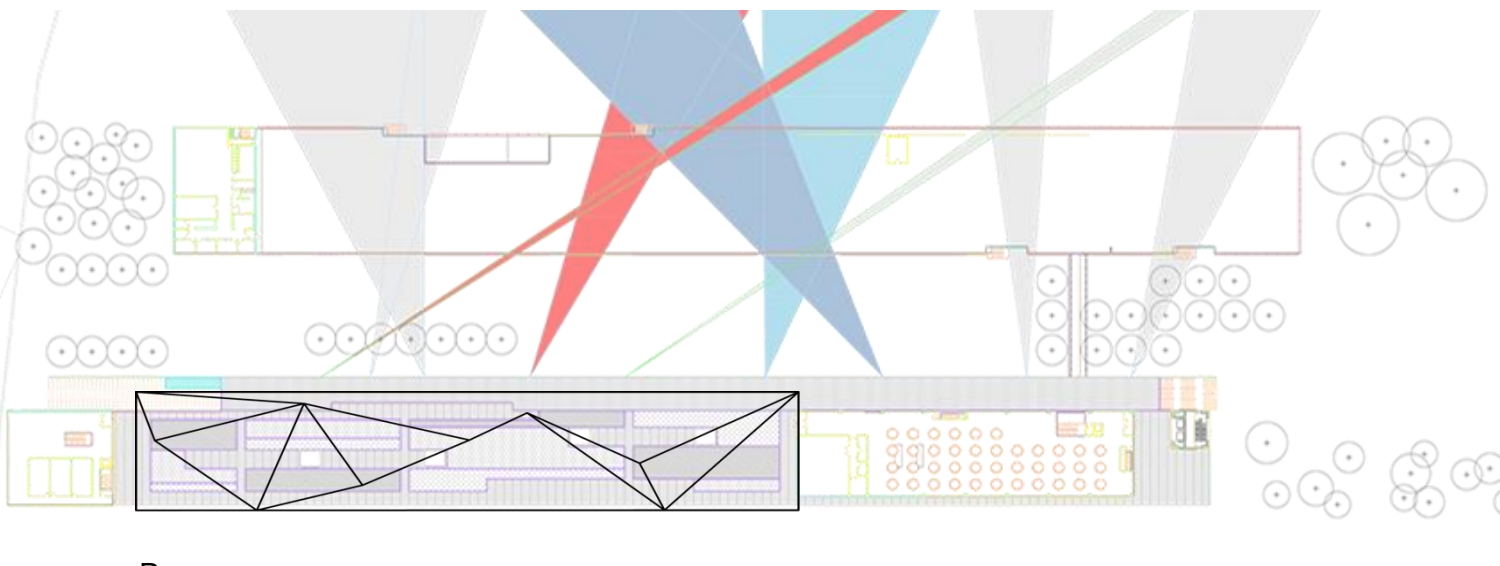
Figure 49 Exploration de subdivision du panneau hexagonal

En parallèle, puisque la circulation de la toiture est au cœur du projet, il a semblé important de lui développer son propre algorithme génératif afin de proposer une multitude de possibilités respectant tous les besoins du projet, à savoir la gestion des différents accès. Nous y avons intégré aussi l'étude des vues effectuée par Provencher_Roy comme point d'intérêt. Cet algorithme a ensuite été intégré à celui transformant la trame.

Pour ce faire, nous avons défini une zone d'intervention (les limites rectangulaires de la toiture), en excluant une bande de circulation desservant directement les deux escaliers d'accès pour faciliter la circulation de petits véhicules d'entretien. Dans cette zone d'intervention, nous avons déterminé par des points les principaux accès de la toiture, soit les escaliers et les entrées des pavillons. Des points de vue ont aussi été ajoutés à cette collection de points ; nous leur avons attribué un axe de circulation afin que les parcours les croisant soient orientés, avec un certain degré de tolérance, vers les vues qui leur correspondent. À cette collection de points définissant les besoins du projet nous ajoutons des points complémentaires afin de créer de la diversité dans les parcours générés. Le nombre de points ajoutés est à la discrétion du concepteur pour lui permettre de générer différents types de parcours allant du parcours dense, favorisant les circulations et les rassemblements, au parcours plus sommaire favorisant les aménagements urbains. L'algorithme crée ensuite les liens entre les points. Un certain nombre de paramètres permettent de modifier et de varier les propositions en positionnant, par exemple, les points supplémentaires aléatoirement ou en réduisant le nombre de liens générés entre les points selon des critères aléatoires ou précis (e.g. longueur des lignes, nombres de lignes convergeant en un point, etc.). (Figure 50) Cet algorithme est finalement intégré à celui transformant la trame.



A



B

Figure 50 A. 12 Aménagement de parcours issus de notre algorithme génératif; B. Le parcours est généré pour s'orienter vers les vues qu'offre la Jetée Alexandra.

6 Propositions finales

À partir de ces éléments, plusieurs esquisses de système ont été envisagées; quelques-unes seulement ont été mises à l'épreuve dans notre environnement de conception numérique. Pour la plupart, les résultats furent peu concluants, si bien qu'il n'a même pas valu la peine d'en garder une trace digne de mention dans ce mémoire. De ces esquisses, deux sont toutefois apparues convaincantes et ont pu se concrétiser en un système constructif complet et adaptable.

Proposition A – L'organique

De nature très organique, cette proposition est générée par une trame hexagonale de base à laquelle on a appliqué des forces sur certains panneaux afin d'y générer une structure tridimensionnelle. Le résultat de l'algorithme générant nos parcours permet de différencier les panneaux sur lesquels seront appliqués les forces de déformation et ceux qui serviront de circulation ou de place publique.

Les petits îlots de panneaux transformés pourront ainsi servir d'assises pour les visiteurs, de puits de lumière ou encore d'aménagement végétal. Un agglomérat plus considérable de panneaux génère des îlots plus spacieux pouvant être habités. Ces structures peuvent faire fonction d'abris contre les intempéries ou de protection contre le soleil d'été.

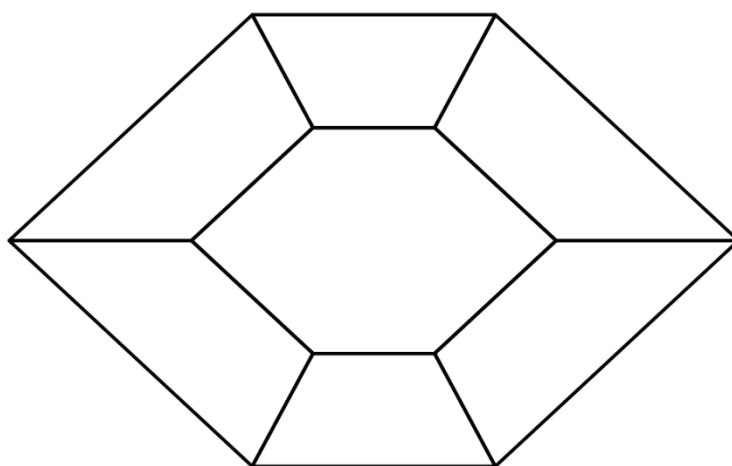
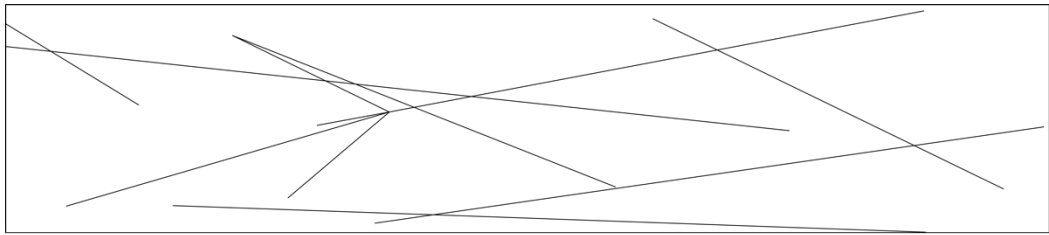
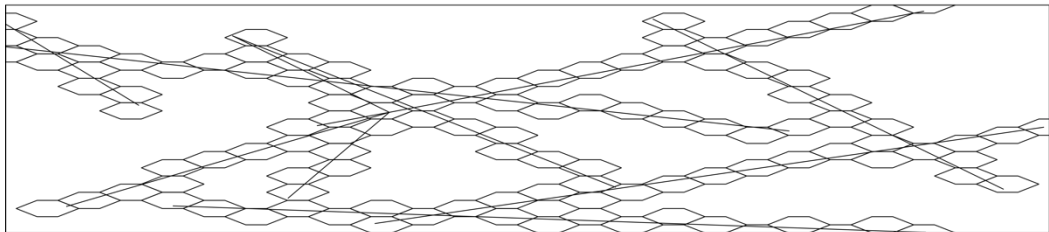


Figure 51 Subdivision adopté pour le panneau hexagonal lorsque non subordonné au parcours

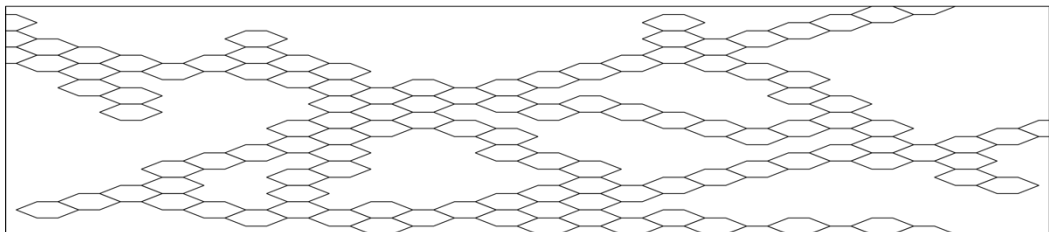
A



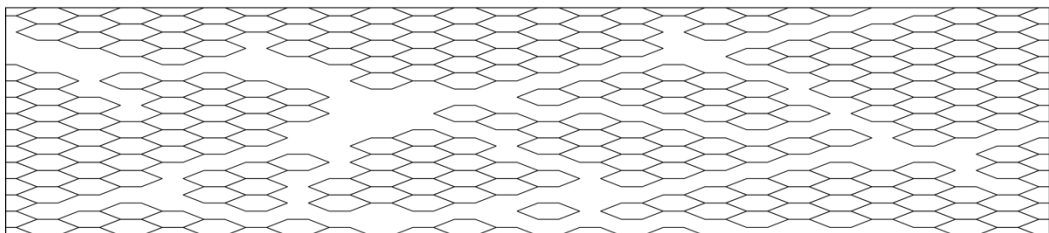
B



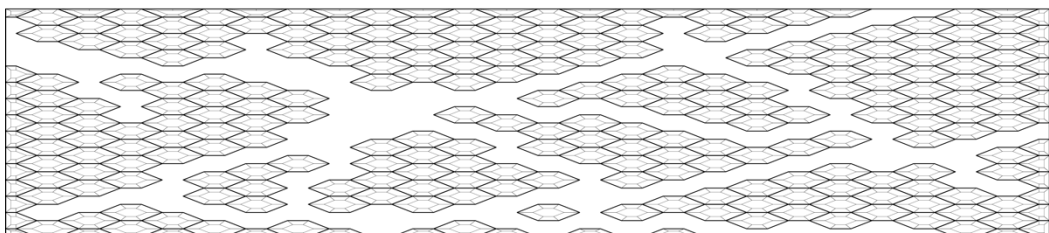
C



D



E



F

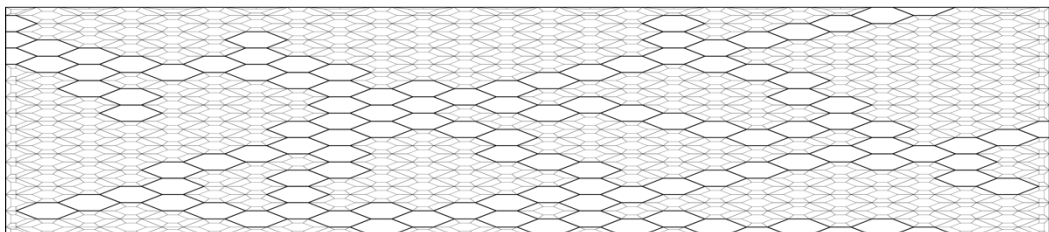


Figure 52 Les lignes générés (A) par l'algorithme de parcours permettent d'identifier les panneaux qui serviront à la circulation (B et C). Les panneaux restant (D) sont subdivisés en sous-panneaux auxquels ont appliquera nos forces de déformation.

Une première étude a permis d'identifier certains agencements de panneaux types que notre algorithme peut générer. Ils sont présentés dans le Tableau 3. Ces aménagements sont étroitement liés au le nombre de panneaux constituant ce que nous appellerons nos îlots ; soit les groupements de panneaux déformés. Par la densité et le nombre de chacun de ces agencements, nous avons pu identifier trois types d'aménagement que ces agencements peuvent générer (Tableau 4). Ces deux tableaux peuvent être considérés comme un catalogue au moment de choisir l'aménagement qui correspond le mieux aux préférences de l'architecte ou aux désirs du client. L'algorithme de déformation, mais surtout de planarisation, étant assez lourd, il est utile de pouvoir anticiper le type d'aménagement que notre parcours va générer.

Tableau 3 Agencement type d'îlot

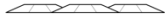
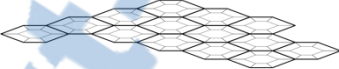
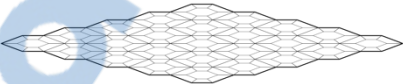
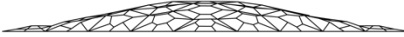
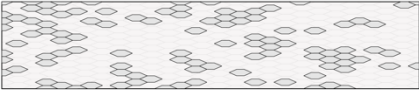
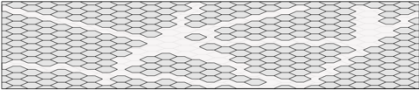
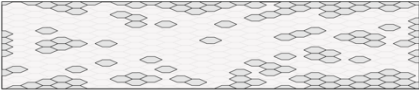
	Vue plan	Vue élévation
Simple		
Multiple		
Multiple asymétrique		 
Complexe		

Tableau 4 Aménagement urbain par parcours

	Vue plan	Vue élévation
Objets urbain		
Pavillon		
Place		

Pour la proposition finalement présentée à Provencher_Roy et pour y appliquer les premières analyses de structure, nous avons opté pour un aménagement équilibré, offrant surtout des pavillons de moyenne grosseur, quelques îlots simples ou multiples et des aménagements de place permettant des rassemblements et des jeux.

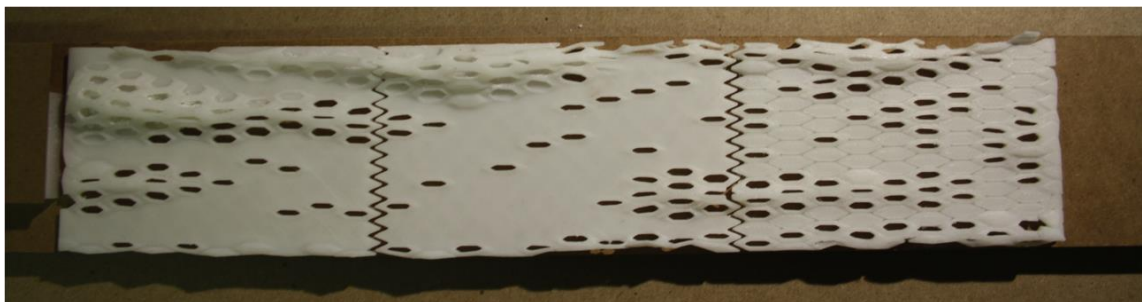
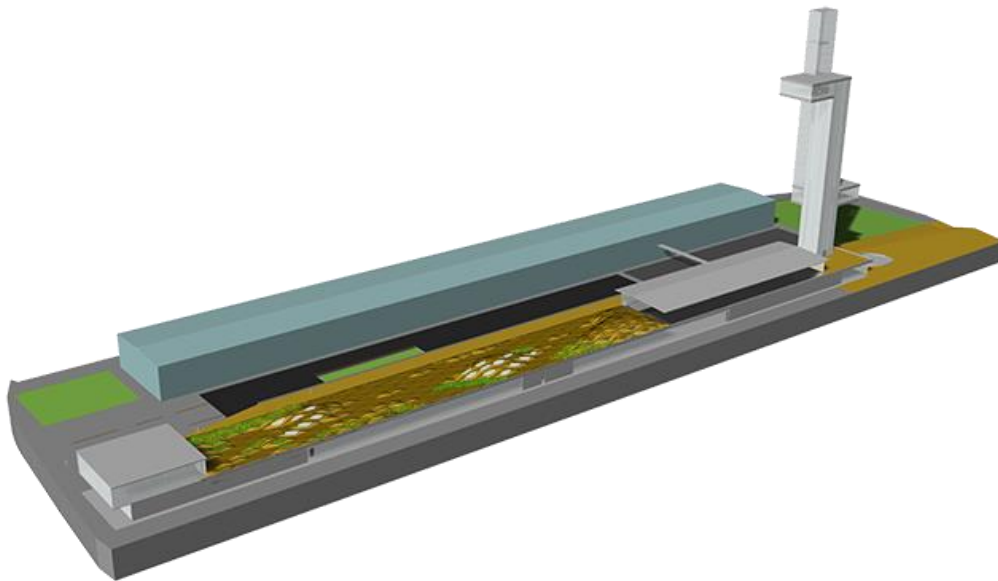
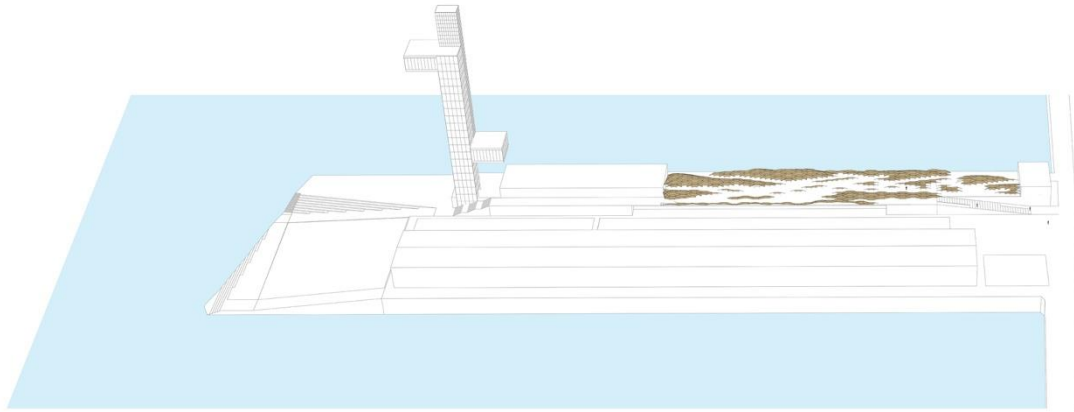


Figure 53 Aménagement proposé à Provencher Roy

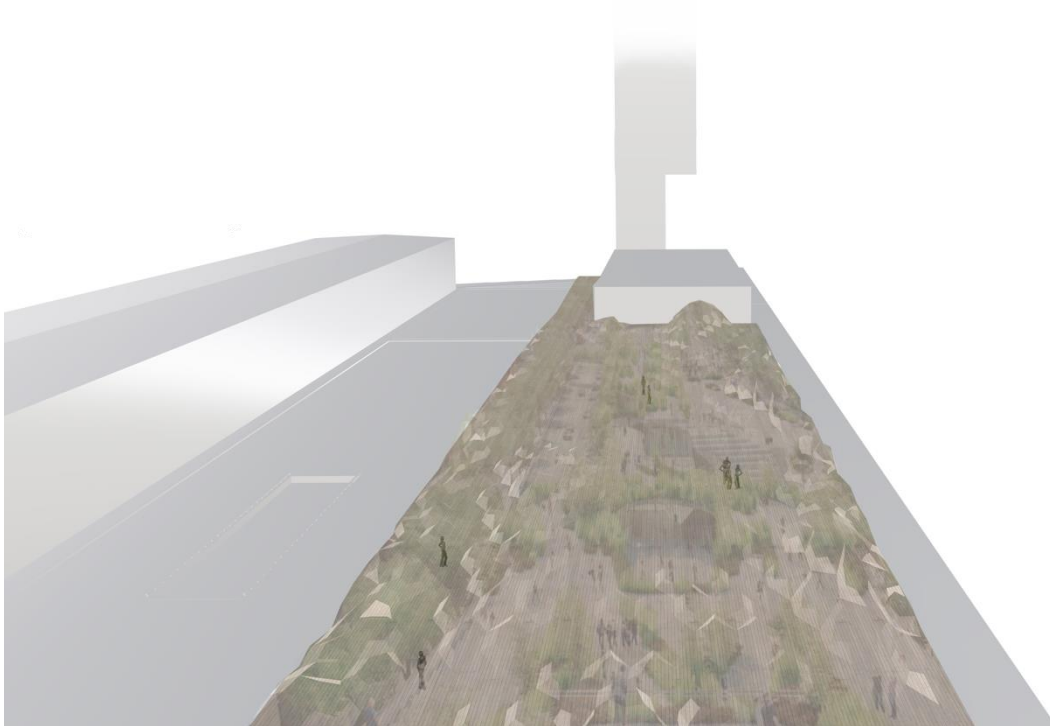


Figure 54 Perspective habité de la proposition

Proposition B – Les collines

Dans cette seconde proposition, le parcours est priorisé et les sous-espaces environnants sont transformés en « collines ». Ces collines peuvent se décliner sous plusieurs variantes et en tailles variées. Les plus petites peuvent être pleines ou percées pour générer les puits de lumière. Les plus grandes ont, quant à elles, le potentiel d'être habitées. Ces collines habitables pourraient accueillir des stands ambulants, des rassemblements et même de petits marchés publics. Les collines pleines permettent elles aussi une grande variété d'aménagements. Recouvertes de verdure, elles offrent des zones de repos; un platelage de bois et voilà un nouveau terrain de jeux pour les amateurs de planches ou de patins à roulettes. En hiver, ces mêmes collines deviennent des zones de jeux de neige pour les jeunes familles.

Ces nouveaux aménagements polyvalents et ludiques permettent d'offrir un lieu attrayant non seulement pour les visiteurs, mais aussi pour les Montréalais.

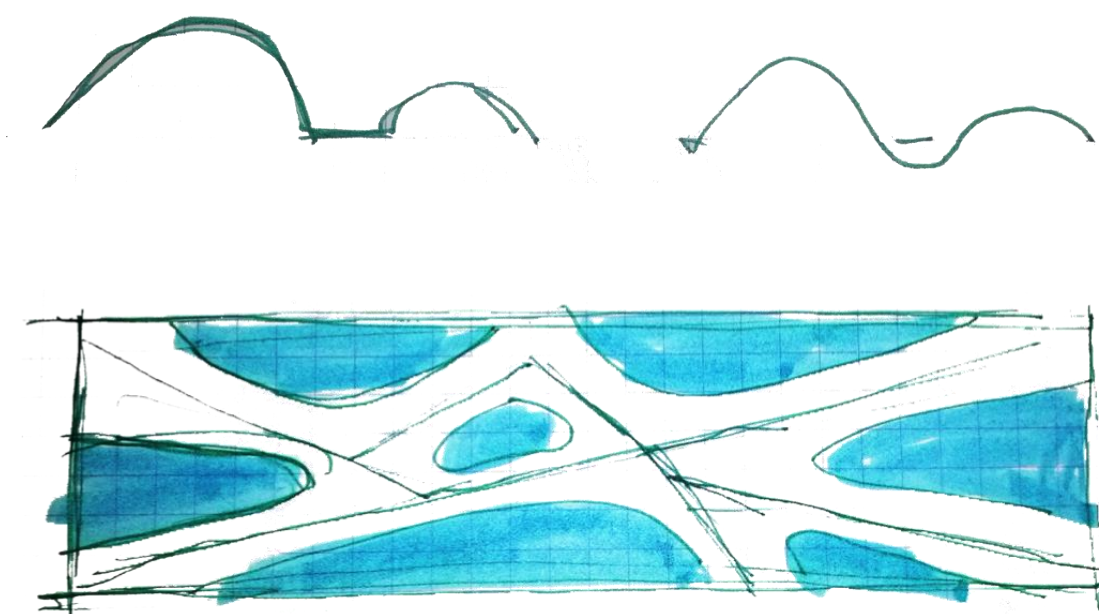
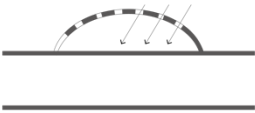
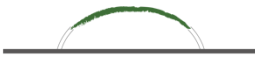
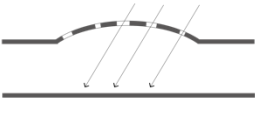
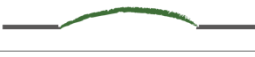


Figure 55 Esquisse d'exploration pour la proposition des collines

Ici encore, nous avons classifié les possibilités de ce système (Tableau 5). Plus sommaire, on y trouve les deux grandes classes possibles : le pavillon et la colline. Pour chacune de ces classes, on offre l'option ajouré ou non, et le type d'aménagement possible en couverture.

Par ailleurs, comme dans la proposition A, les parcours nous permettent de générer une variété d'aménagements. (Figure 56). Cette fois, le choix du parcours va nous permettre de générer ou nous des places, le choix du type d'aménagement pour chacune des collines est toutefois entièrement laissé à la discrétion de conception et ne dépend pas de l'algorithme.

Tableau 5 Aménagement possible des collines

	Ajouré	Plein
 Pavillon		Verdure 
		Platelage bois 
		Neige 
 Colline		Verdure 
		Platelage bois 
		Neige 

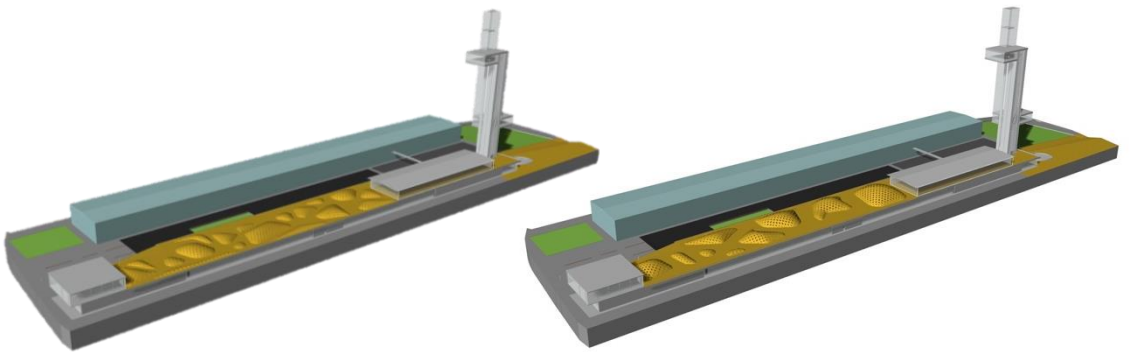


Figure 56 Deux exemples d'aménagement issus de deux parcours

La proposition présentée à Provencher_Roy comporte deux grands pavillons et une série de collines de plus petite taille. Aucun espace public exposé n'a été conservé.

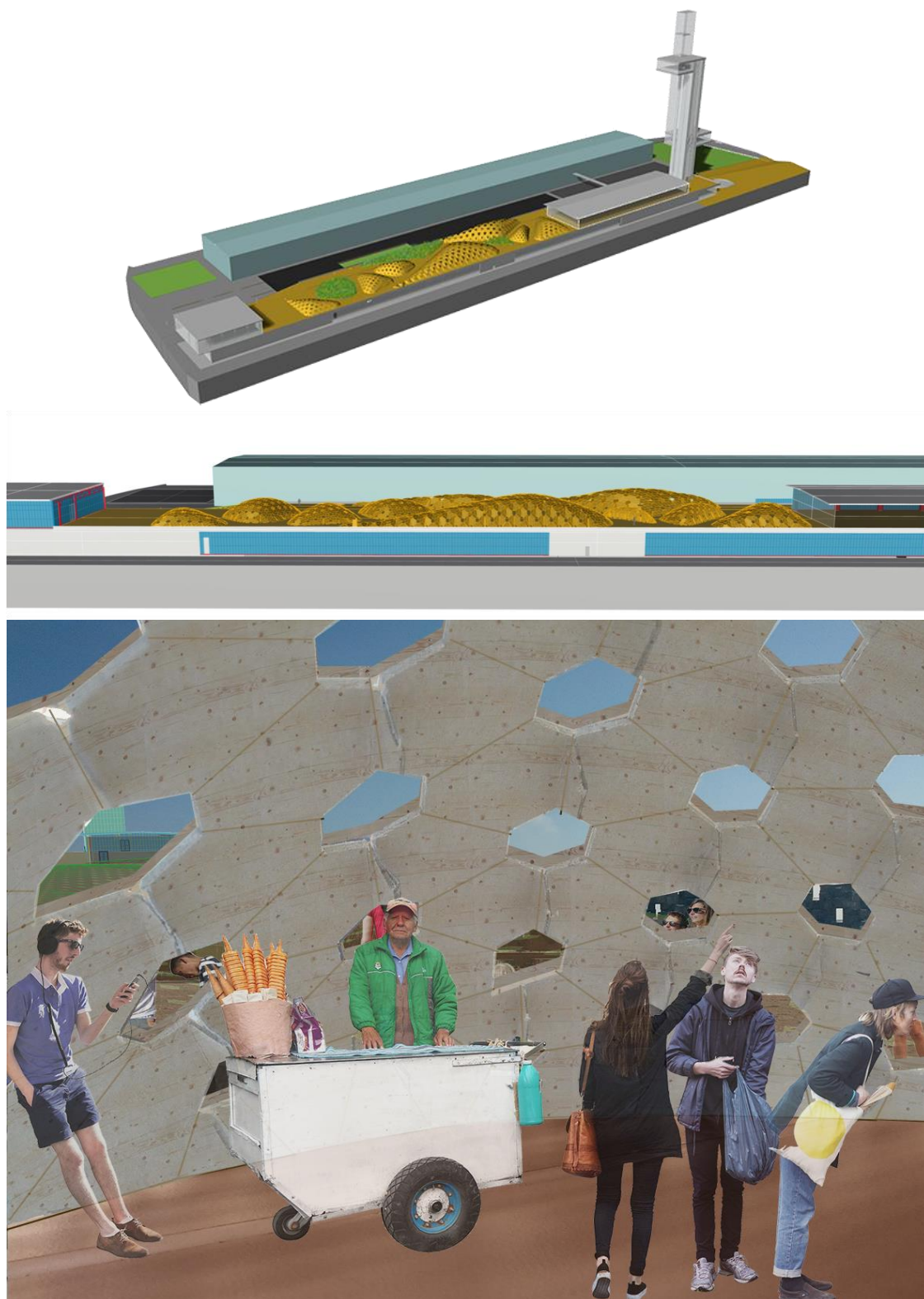


Figure 57 Aménagement des collines proposé à Provencher Roy

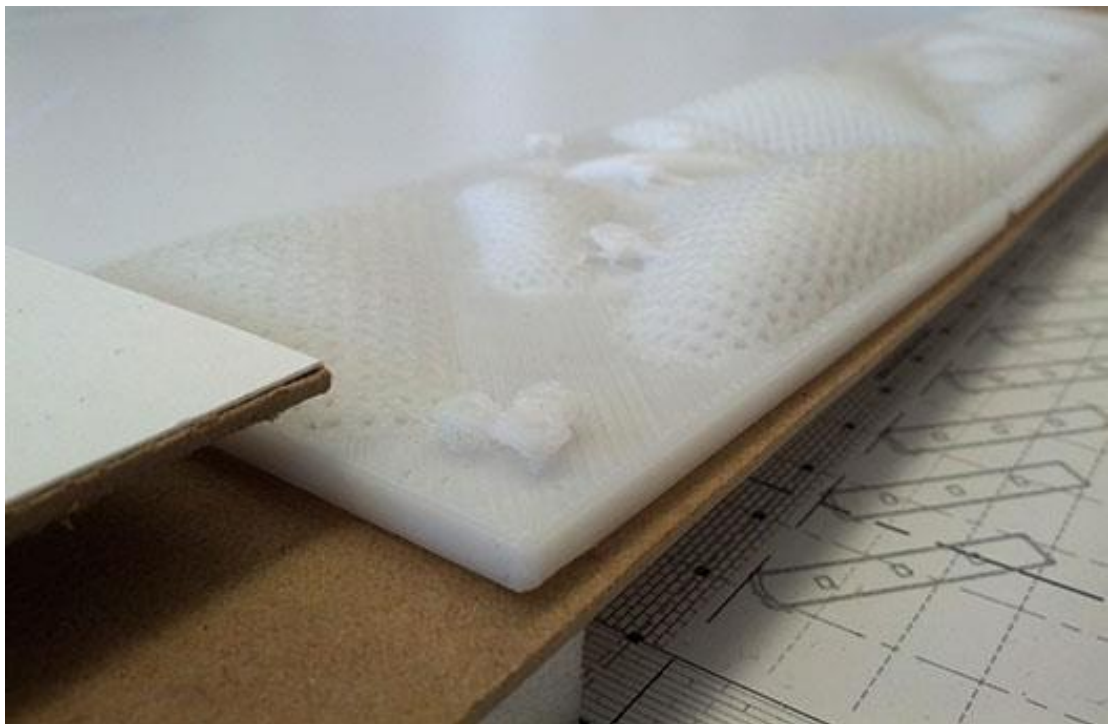
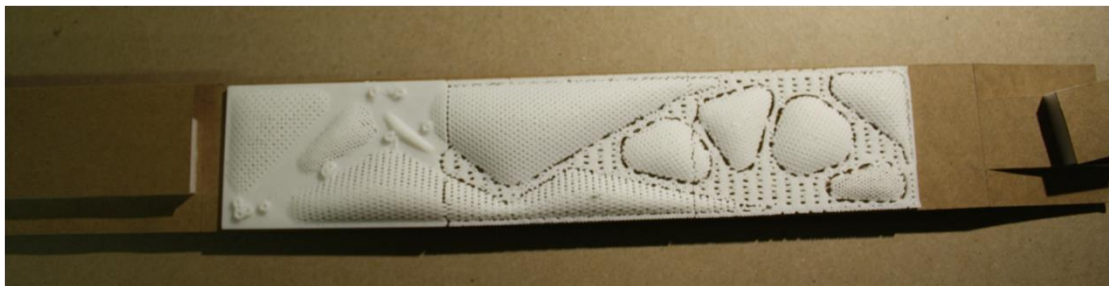
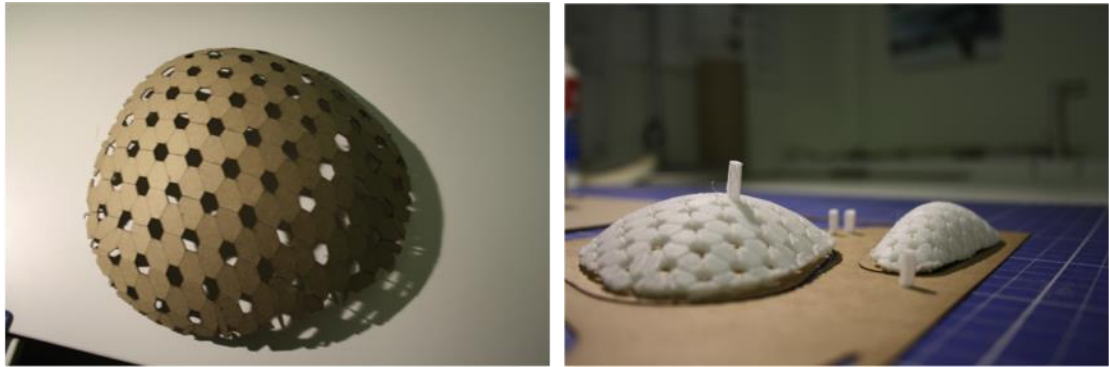


Figure 58 Exploration en maquette de la proposition

Les aménagements des propositions A et B soumises à Provencher_Roy ne résultent cependant pas seulement des explorations formelles et pratiques évoquées dans leur description. Comme le processus de conception est intégré, la structure des différents aménagements qui ont pu être développés par nos algorithmes ont été testés au cours du processus d'exploration et d'expérimentation. Toutes ces analyses structurelles ne seront évidemment pas présentées; le prochain chapitre décrit celles qui ont été effectuées sur les deux propositions soumises à Provencher_Roy. Le prochain chapitre est donc la suite directe de celui-ci et traite spécifiquement de l'aspect structurel et constructif de nos expérimentations.

Chapitre 4 — Validation de la structure et fabrication

AVANT-PROPOS

Bien qu'il s'agisse d'un nouveau chapitre, le contenu qui suit doit être considéré comme une suite directe du chapitre 3, car il présente l'intégration des aspects structurels dans le processus de conception. Pour alléger la lecture, nous vous encourageons fortement à passer directement à la page 115 de ce mémoire. Notez toutefois que le présente chapitre consiste en un article rédigé en anglais.

Cet article a été soumis au *Journal for Engineering Design*, une revue internationale s'intéressant aux théories et méthodologies de conception dans tous les champs de l'ingénierie : mécanique, civil, architectural et fabrication. Les co-auteurs en sont le directeur et les codirecteurs de ce mémoire, Samuel Bernier-Lavigne, Alexander Salenikovitch et André Potvin. Les sections 1 et 2 résument essentiellement le contenu des chapitres 1 et 2 de ce mémoire. Elles établissent le contexte pour la suite de l'article. La section 3 est en continuité directe avec la dernière partie du chapitre 3, On y présente plus en détail les propriétés du système d'assemblage dont la sélection est décrite au chapitre 3. La section 4 expose l'analyse de structure réalisée durant le processus de conception, et la section 5, le processus de validation et d'optimisation du design mené à la suite des premières explorations conceptuelles. Cette étape visait à la fois à consolider la faisabilité du concept sélectionné et à valider le processus intégré d'analyse de structure de notre démarche.

Statut – Soumis

VALIDATION STUDY OF AN INTEGRATED STRUCTURAL ANALYSIS IN AN ITERATIVE DESIGN PROCESS FOR THE FABRICATION OF MASSIVE TIMBER PANELS STRUCTURE FOR A COMPLEX GEOMETRY ARCHITECTURAL PROJECT

Zoé Tolszczuk-Leclerc, Alexander Salenikovich, Samuel Bernier-Lavigne, André Potvin

Résumé

Cet article aborde l'aspect ingénierie d'une recherche traitant du processus de conception de systèmes constructifs à géométrie complexe en panneaux massifs de bois. Cet article a donc pour but de consolider le modèle itératif de conception développé dans la recherche afin de générer une structure architecturale viable et de déterminer les détails d'assemblages appropriés.

Pour ce faire, les résultats de l'analyse de structure du modèle itératif de conception sont évalués et comparés à ceux d'un logiciel FEM (Finite element method) utilisé dans la pratique par les ingénieurs en structure et intégrant les propriétés du bois. Si l'analyse de structure du modèle produit des résultats utilisables pour optimiser et raffiner la structure, les limites du modèle entraînent un manque de précision important pour ces mêmes résultats. En conclusion, le modèle peut être utilisé comme outil de conception, mais ne peut servir à l'heure actuel à valider la viabilité de la structure.

Abstract

This paper addresses the engineering of the structural design as part of research on the design process of an architectural free-form structure made of massive wood panels. The general purpose of this research is to demonstrate the benefits of integrating structural analysis and manufacturing considerations into the architectural design process in order to create a custom constructive system. The main goal is to develop an iterative model to design a feasible architectural structure as well as to determine the appropriate details for the joinery system.

The results of the model are then evaluated and compared with those of FEM software-generated models, used by structural engineers, taking wood properties into account. This comparison will help define the limits of the integrated structural analysis in the iterative design process. The choice of the constructive system design and of the joinery system configuration is then evaluated. The integration of the fabrication details at this stage of the design process also allows us to clarify the constructive viability of the proposed project. Finally, the integrated structural analysis provides usable results for an iterative design process of optimization and refinement of the structure. However, because of limitations of the structural analysis iterative model, the results of the analysis lack accuracy and, therefore, the model can only be used as a precursor to the detailed structural analysis and validation of the architectural system.

1 Introduction

Building complex form structures with massive timber panels led us to redefine the way of designing and developing an architectural project. The earlier structure and manufacturing principles are integrated into the process, the more efficient and economical the project will be. When implemented in the early stage of the project, the integrated design process has historically been proven to improve the architectural outcome while making the structure an integral part of the design signature. The overall purpose of the research is to do so by integrating structural and manufacturing notions within the embryonic field of the design process of complex massive timber panel structures.

The overall project in which this research is conducted demonstrates that an integrated design process combined with the precision of digital fabrication enables the designer to explore complex forms using wood timber panels. In this context, multidisciplinary teams of complementary competencies are indispensable, but likely complicated because each sector of competence uses its own tools and software. For the integrated design process to be optimal, a simple way of including these varied working tools must be found, mostly because transfers between different software generate time-consuming problems when an initial design is developed collectively. As there cannot be only one main common interface, because of the specificities of every single competence, a solution based on the file type and transfer from one interface to another must be found.

This paper will first explore how structural analysis and manufacturing will be integrated in the design process. The design work flow environment will be presented alongside the iterative integrated structural analysis model. We will then address the validation process leading to the structural acceptance of the architectural proposition of the project and the constructive system. More specifically, we will compare the results to those of an external structural analysis software.

2 Context and Previous Work

To stimulate innovative uses of massive timber panels, design structure and fabrication methods need to be adapted. New digital design tools allow us to do so, but given the multiplicity of software and stakeholders, there is a need to facilitate the design team's work through an integrated design process which, though proven valuable in the design and construction of innovative buildings, still poses many difficulties. A first step is to optimize and simplify the design process of the architect by using a single tool for integrating structural and manufacturing notions into the architectural design process. Specifically, we use the 3D software *Rhinoceros* (2017) and its parametric modelling plug-in *Grasshopper* (2017) in a perpetual iterative feedback process. (Figure 59)

Thus, while working with her own software, the architect can, through the Grasshopper plug-in, integrate and obtain a wide variety of information on the structure under development: total volume of materials, building dimensions, panel sizes, structural analysis, joinery details, all of this without having to navigate from software to software to “test” early sketches or to wait for a colleague to go over formal hypotheses. Everything is done rapidly and simultaneously. Better yet, this plug-in can generate results comparable and compatible with those generated by software in the engineering and manufacturing fields at the time when the advanced design will require more refined data.

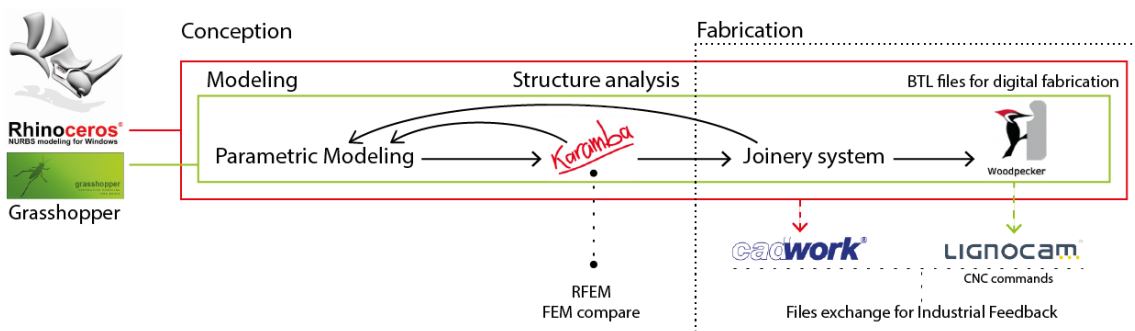


Figure 59 Design process software workflow

For the structural analysis, we use the *Karamba* (2016) plug-in in the Grasshopper interface, a tool of parametric engineering using a finite element method (FEM). Developed by a multidisciplinary team of architects and structural engineers, *Karamba* is widely used worldwide for the creation of experimental research structures. In our case, it provides a primary structural analysis at the early formal exploratory stages. Moreover, it provides quantifiable and comparable results when used with software like RFEM (Dlubal Software Inc., 2016) which takes more precise wood characteristics into account in the finite element structure analysis.

The need to readily communicate and share with the manufacturer of the major structural components (massive timber panels) to validate the structural and fabrication hypotheses, leads us to also consider the manufacturing constraint early in the design process. The Rhinoceros interface allows exportation of files in a format compatible with *Cadwork* (Cadwork Group, 2016), leading 3D-CAD/CAM software for timber construction.

A final fabrication plug-in, *Woodpecker* (LIGNOCAM SA, 2016), developed by LIGNOCAM (LIGNOCAM SA, s.d.) — software for the import and interpretation of machining data from files in BTL format for transfer to CNC machines and to the manufacturing stage — allows us to complete the digital design-fabrication cycle by generating the BTL cutting files.

The research result of this integrated design process is a 3000 m² free-form inhabited roof. The design process led to a feasible structure by including structural principles into the form generation parametric model.

In the field of non-standard wood construction, there are only a few examples of architectural projects where massive timber panels have been used in an innovative way. For our purposes, we needed to select a relatively simple system that would allow reasonable freedom of implementation to accommodate the programming needs of the project. Tessellation systems, obtained by subdividing a free-form surface into multiple planar elements, are more relevant to this end, and they also allow some opportunities for a simple generative system.

The simple application of the constructive system to an arbitrary free-form surface cannot fulfil the architectural need of the project, nor assure a feasible structure. Since we are not working with a simple roof structure but with a multifunctional surface, we use the constructive system principles to develop an adapted form-finding generative algorithm. Hence, our approach differs from the traditional one where a surface is chosen and then divided into panels. Rather, we combine the surface “design” with the tessellation process to streamline and increase the efficiency of the structure generation in order to fulfil many architectural needs. This represents progress in the types of structures possible with the generative system. The customized constructive system resulting from our unique adapted form-generative process produced the architectural proposition.

There is also an intent to ease the work of architects by limiting as much as possible the use of complex mathematical form notions (Wang et Liu, 2009). We therefore use all the *Grasshopper* “form generation” plug-ins that include these principles in their code. The two propositions developed with this algorithm use the same generative process idea. (Figure 60). We generate a basic pattern for the panel design and then apply loads on them to deform the planar pattern into a catenary 3D structure. Physical algorithms are then applied to achieve the flatness of panels. Except for a small amount of basic *Python* (Robert McNeel et Associates, 2017) programming in *Grasshopper*, the entire algorithm is executed with the *Grasshopper* plug-in.

At the first stage, design proposition, we apply the structural analysis to validate the structural architectural form. These initial analyses allow us to quickly identify the major structural deformations and stress distributions associated with them. They make it possible to readily discard some concepts and to identify those offering the structural response satisfactory enough to warrant further development. At the second stage, the validation, we work on the elements of the model to develop a more precise structural analysis and we include the parametric modelling details of the joinery system for each panel.

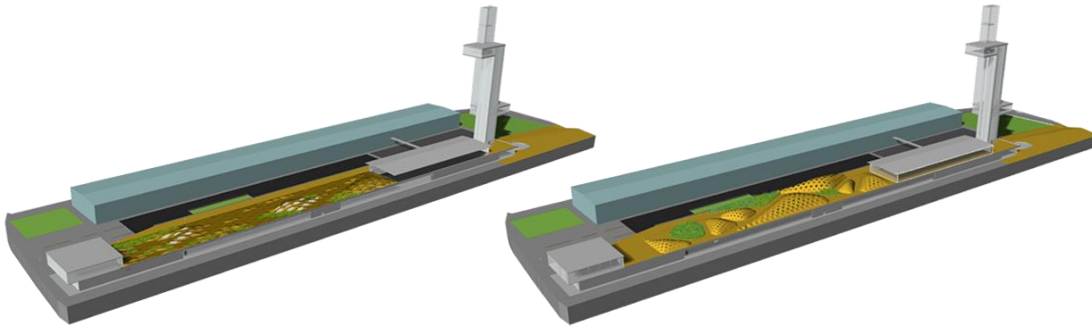


Figure 60 The two final architectural propositions

3 Joinery System and Manufacturing

Before performing the structural analysis, there is a need to review and define parameters of the joinery system. The joinery system is a critical part in non-standard massive wood panel structures, because it can easily become costly and time consuming even when planned from the start of the project. The traditional and commercial joinery system is not applicable in a non-orthogonal configuration. Therefore, a new joinery system is needed and should be adaptive, economical and sustain all the structural needs.

The highly engineered joinery system between the panels will eventually transfer positive and negative axial forces, lateral forces and bending moments (Schimek, Meisel et Bogenperger, 2010). For small projects, custom-made metal plates are often used for connections between panels (Buri H. U., 2010). Their small number and simplicity make them a reasonable and economic choice. However, for structures with a large number of panels, this solution becomes irrelevant as the number of custom-made plates makes it prohibitive.

Two alternative solutions have been found. The first, developed by TU Graz (Schimek, Meisel ete Bogenperger, 2010), is the “sewed” joint, which connects cross-laminated timber (CLT) panels with glued-in laminated veneer lumber (LVL) cleats inserted into CNC-milled slots. While the CNC milling time is limited, the gluing time is considerable and requires high precision, controlled environment and complex falsework. Even if this all-wood joinery system, by its efficiency and aesthetic, is compelling for our structure, it seems inappropriate if we consider the final on-site assembly of the project.

The second solution is a dovetail joint, which in this case was considered more appropriate even if it implies more CNC time. This joinery system, as shown in Figure 61, has been used successfully to connect the panels of various research pavilions. Examples include using common plywood in an origami structure (Robeller, Stitic, Mayencourt et Weinand, 2014), LVL in the Laga Exhibition Hall (Schwinn, Olivier et Menges, 2014) and CLT in an IBOIS research pavilion (Robeller, Nabaej et Weinand, 2014). This system is easy to assemble on-site and it requires limited falsework as seen in the Laga Exhibition Hall construction process. As mentioned, the time-consuming part is manufacturing as many dovetail joints require multiple machining operations.

However, the number of dovetail joints could be significantly reduced without compromising the structure integrity and stability using the subsequent structural analysis to optimize the joint distribution in the parametric model.

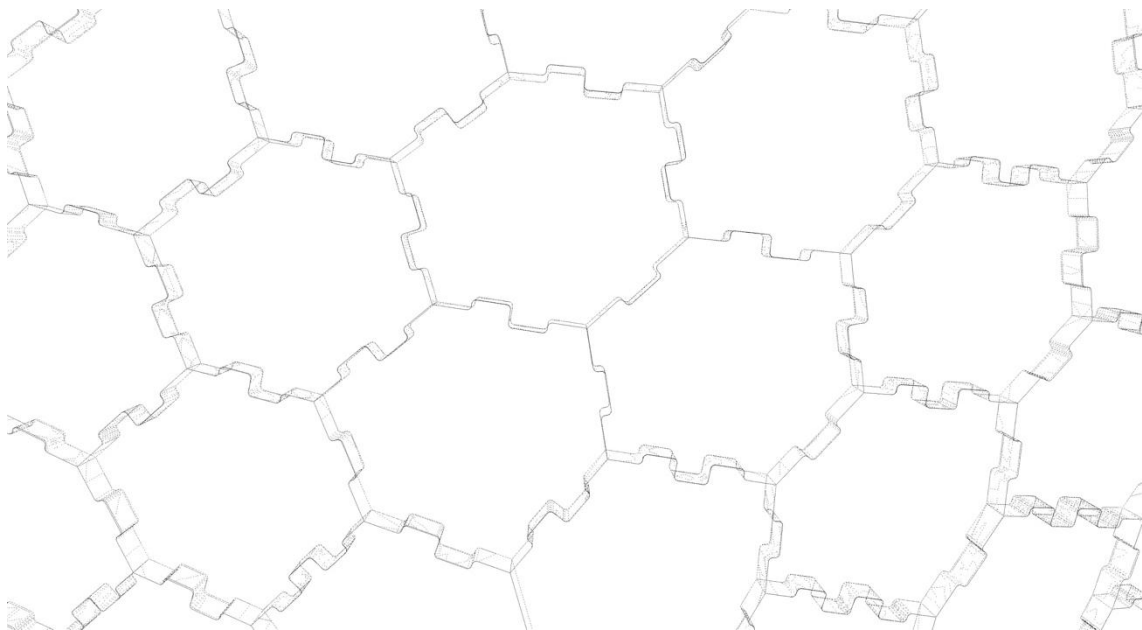


Figure 61 Dovetail detail model - Rendering in Rhinoceros

To enhance the efficiency of the design process up to manufacture it is logical to automatically generate the joinery system and to integrate it into the iterative design process. First, we need to generate the thickness of the panels, because our basic generative script produces a surface without thickness. This step, although seems easy, is not so, because each side of the panel needs to be “extruded” in relation to its adjacent panel, so that the panels do not overlay. (Figure 62). We need to offset (p_i') the planes of the panels (p_i) to obtain the intersection lines and generate the intersection planes between the adjacent panels ($P_{i,j}$) defining the cutting angles of the dovetail joint.

We have chosen to work with a basic design for the dovetail joint. Our major concern was to control the CNC machine time by controlling the robot’s number of “movements”. The basic design suggests that we obtain a joint geometry that meets the Three-Degree-of-Freedom (3DOF) criterion (Robeller, Stitic, Mayencourt et Weinand, 2014), which means that the joined parts can move in three directions. (Figure 63). In practice, the design of the project and the fact that the panels will always be clamped between other panels means that sophisticated 1DOF joints would not be necessary. Moreover, 1DOF geometry would have necessitated more movements from the machine and verification of the tensile resistance of the tails in addition to necessitating one direction of insertion, which would have been difficult to accomplish on-site.

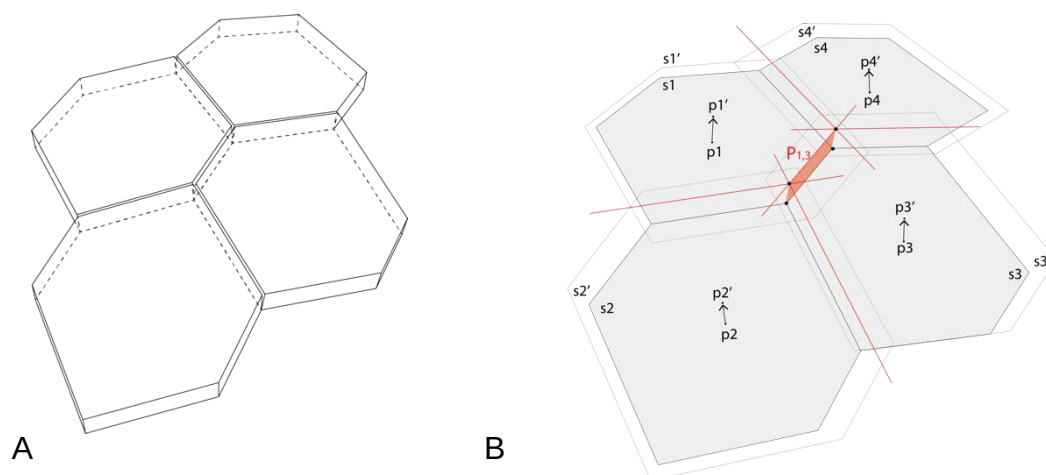


Figure 62 A. gap in a standard offset panel; B. Intersection plane ($P_{1,3}$) obtained by the intersection of the offsets (p_3') of the sub-surface panels' (s_1 and s_3) plane (p_1 and p_3).

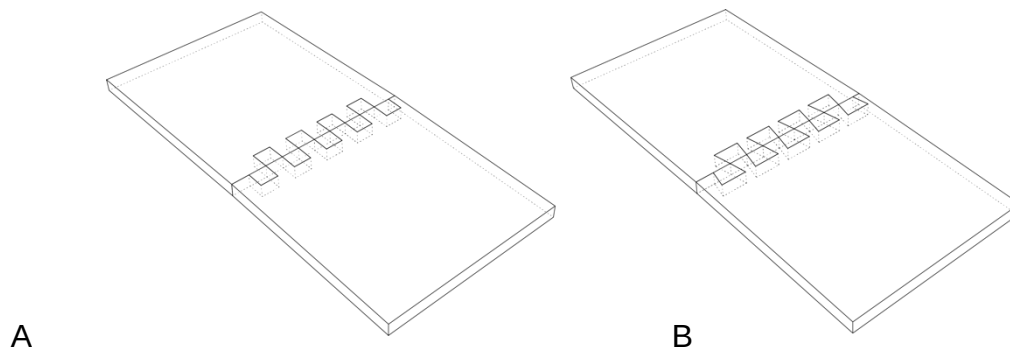


Figure 63 A. 3DOF (basic design); B.1DOF

Therefore, to limit the movement and increase the rigidity of the system, we have added structural screws like the ones used in the Laga Exhibition Hall. The joinery system would take the in-plane shear forces parallel to the edges (Robeller, Stitic, Mayencourt et Weinand, 2014) and the in-plane compressive forces (Robeller, Stitic, Mayencourt et Weinand, 2014), while the fasteners would take the out-of-plane shear forces. Fortunately, the structural stability of our model is mostly based on the distributed in-plane shear forces along the panel edges (Bagger, 2010).

Our basic model of dovetail joints, in contrast with the Laga Exhibition Hall, is not as smooth on the outside where no cuts were planned to obtain a flush-fitting edge, considering that an envelope would be installed to make the roof finish. The inside finish would be assumed by the structure as it is. (Figure 64)

To ensure a proper manufacturing process, we have to work closely with the panel manufacturer. Once the design is approved by the manufacturer, we complete and enhance the design of the dovetail joint according to the specifications of the milling cutter. For example, one of the possible problems could have been the angle of cut: if it is too large, the cutting machine can be jammed by the material itself. Rounded corners of 5-mm diameter were included in the dovetail joint parameter. We also added a 1-mm gap between the panels at the joints and engraved the number of the panel and the arrow of the strong axis direction to facilitate the assembly. Due to the small size of the panels, we also use the trimming waste from other projects and add a nesting algorithm to save the material.

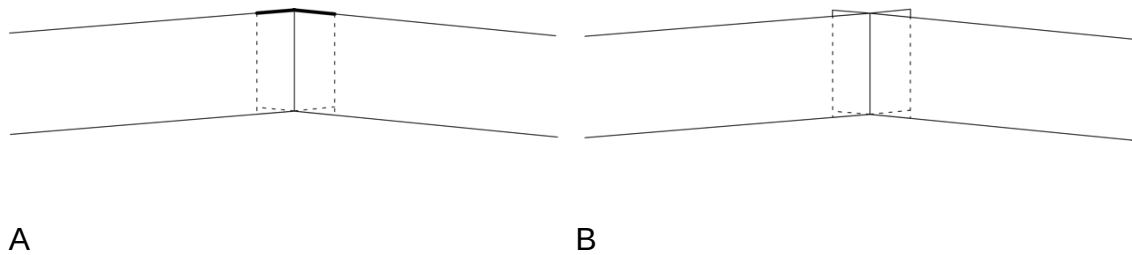


Figure 64 A. with finishing milling; B.with no milling

4 Preliminary Analysis

The objective for the first form exploration is to identify relevant constructive systems and configurations for the architectural project. To this end, a quick preview of the structure's efficiency is needed. To expedite this process, the structural analysis algorithms should meet the following criteria: rapidity, freedom of the input parameters and easy reading of the output.

In this context, the magnitude and the location of the deformations are the results which matter the most. They enable us to validate the concept of the structure while showing us the weak points of the global proposition and give us the possibility to test and optimize more configurations. The purpose is to find a balance between the architectural quality and the structural efficiency, i.e. minimal deformation for maximum effect.

The plug-in used in this iterative process, *Karamba*, is, as mentioned earlier, a FEM software developed to be used with ease by non-experts. It performs the analysis of post-and-beam and shell-like structures. Like other FEM software, *Karamba* works by assembling a model with parameters corresponding to the analyzed elements: the cross-section, the material properties, the loads (it is possible to do load combinations) and the supports. Once the algorithms and the parameters are set, the software offers various tools for visualizing the results and uses the numerical ones as feedback parameters to optimize the model. Although similar to other FEM software, its particularity resides in this last characteristic of directly using the results to re-input them in the iterative design process.

To meet the rapidity criterion of this preliminary analysis, we use the basic definition algorithm of an uniform shell structure. This way, the material properties and the calculation hypothesis can be easily changed and adapted while the needs of the project are still in development. Doing so helps us to define the product used in the next step of the project. Finally, to launch a more precise analysis would slow down the form finding algorithm, which should be very interactive at this stage.

Configurations and limitations

Loads

We use the load combinations prescribed by NBC 2015 (National Research Council Canada (NRCC), 2015) as shown in Table 6 (Tableau 6) for a building with the normal risk category. The gravity and wind loads are uniformly applied to all surfaces in vertical direction. We do not consider the internal pressure exerted by the wind as the structure is considered exempt of openings. No detailed lateral load structural analysis is performed at this stage of research, except for some simple checks to evaluate the global reaction of the structure to the wind load.

Tableau 6 Load combinations

1	$1.25D + 1.5L + 1.0S$
2	$1.25D + 1.5L + 0.4W$
3	$1.25D + 1.5S + 1L$
4	$1.25D + 1.5S + 0.4W$
5	$1.25D + 1.4W + 0.5L$
6	$1.25D + 1.4W + 0.5S$

where,

D = 0.67 kPa, dead load (5-layer CLT, 131-mm thick);

L = 4.8 kPa, live load (green roof, pedestrian circulation and light maintenance vehicles)

S = 1.64 kPa, snow load (Montreal, City Hall);

W = 0.37 kPa, wind load.

The results presented in this paper are based on the most critical load combination #1.

Support

Since the under-structure of the timber roof consists of steel beams, and we cannot define the linear support, we subdivide those beam lines into multiple points. These points, when intercepting with the timber structure, become the support points. All the supports are considered hinged, and unblocked in rotation, but blocked in translation.

Cross Section

As mentioned earlier, the cross-section of the manufactured wood panel is not predefined and is considered as an open parameter. We modify it depending on the configuration, the form and the clear span of our structure to help us define the definitive product. Having a partnership with the manufacturer, we select the CLT products of certain thickness. Although the analysis suggested that we could use a 3-layer 78-mm thick panel, we eventually selected the 5-layer 131-mm thick panel, because of the nature of the planned assembly system using the dovetail joints and the manufacturing process specific to the manufacturer of the CLT.

Mesh to shell

The surfaces are converted to shells to perform the analysis and here we meet the first limit of the software. The common practice assumes hinged-in wood structure connections, but the software in the shell mode assumes only rigid ones, because it is mostly used for concrete and steel structures. We have here two choices: perform the analysis of a rigid shell, or insert hinged elements. The latter would imply multiplying by almost 4 (980 vs 260) the number of elements considered in the algorithm, which would considerably slow down the calculation. One of the criteria of this preliminary analysis being rapidity, we deliberately have worked with the rigid shell.

Material properties

There are two ways of setting material properties in *Karamba*. The first one consists in selecting a material from the libraries provided in the software. The second one requires manually setting the material properties by defining the Young's modulus, the shear modulus, the specific weight, the coefficient of thermal expansion and the yield stress. In the first case, the 98-material library unfortunately proposes only 4 wood materials. In the second case, the software generates an isotropic material which does not consider the anisotropic nature of wood, even less the laminated characteristics of the CLT. Thus, we have encountered the second major limitation of the software and, again, for the sake of the rapidity criterion, we have chosen a default material in the *Karamba* library. (Figure 65)

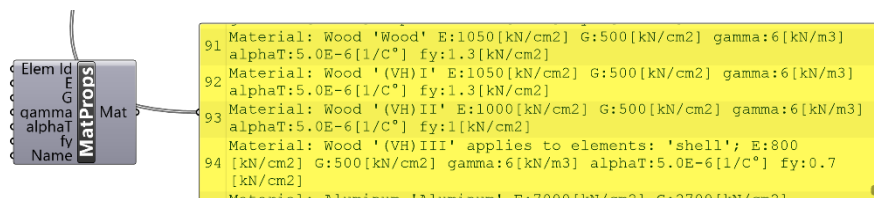


Figure 65 Basic material definitions for wood

Analysis and results

The analysis is performed using von Mises stress theory. The plug-in provides the following results: deformations, von Mises stress, principal stress 1, principal stress 2, moments, and utilization (i.e., the ratio between von Mises stress and the yield stress in each element of the shell).

The purpose of the analysis is to obtain a visual representation of the deformations of the conceptual structure, while recognizing the limitations of this simplified model. We will only use the deformation ratio as output to validate or refine our constructive system design. The values of the deformations are of the order of 6.4 mm to 71.4 mm for the first proposition (Figure 66 A) and from 0.02 mm to 2.5 mm for the second proposition (Figure 66 B). The high maximum values of the first proposition can be associate in retrospective to a lack of support in one section of the structure, the general deformation being more of the order of 6.4 mm. These low values are therefore suspicious and may be attributed to the fact that the model does not account for the nature of the material and the hinged connection usually assumed in timber structures.

With this limitation in mind we are still able to develop and test our generative algorithm in different configurations of the structure. We subsequently isolate two concepts, two distinct constructive systems that use the same physics principles of the form generation. For each one we define a configuration that responds well structurally and offers an aesthetic solution to the architectural program.

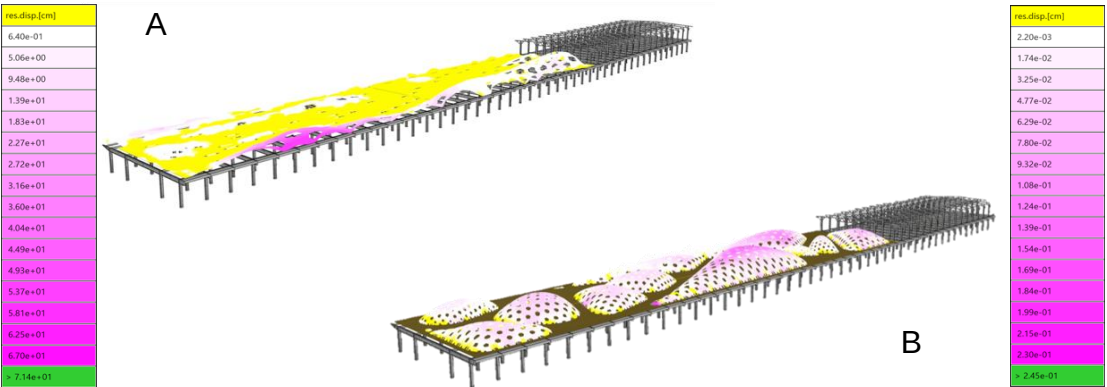


Figure 66 Deformation studies of the initial analysis for the two concepts. The importance of the deformation goes from yellow to pink, pink being the biggest deformation

5 Validation

Based on the preliminary analysis, we choose the dome generated in the second proposition and develop a model to validate and consolidate the main hypothesis of the structure and of the joinery system. This enables us to include more details into the model without having to deal with a large file which would be too slow to work with. With this consolidation process, we should be able to work locally on the model, rationalize the form of the dome, optimize the size of the panels or control more adequately the distribution of the dovetail joints. To obtain a more accurate result we must first address the problem caused by the two main limitations of the preliminary analysis.

Material properties, connections and configurations

The first issue to be addressed is that wood is an anisotropic material whereas *Karamba* only works with isotropic ones. Moreover, the characteristics of the default wood material in the software library are inappropriate to accurately model a CLT panel. To overcome this problem, we create a hypothetical virtual isotropic material equivalent to a 5-layer (131-mm-thick) CLT panel (Figure 67) to obtain the von Mises stress value of the structure using the following equations to define equivalent E and G values. (Gagnon et Pirvu, 2011)

(1)

$$E = k_1 \cdot E_0$$

Where

(2)

$$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_0}{E_1}\right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$$

$E_0 = 11,700 \text{ MPa}$ – the longitudinal Youngs modulus

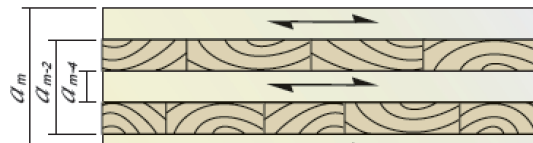


Figure 67 Cross section of a 5-ply CLT panel

$E_{90} = 300 \text{ MPa}$ – 1/30 of the transversal Young modulus

For E = 9360 MPa

(3)

$$G = \frac{1}{t_{tot}} \cdot \left[\sum_{i=1,3,\dots,n} G_{Li} \cdot t_i + \sum_{j=2,4,\dots,n} G_{Lj} \cdot t_j \right]$$

For the shear modulus calculation, i for the odd layer and j for the even layer where;

G_{Li} = 730 MPa – longitudinal shear modulus

G_{Lj} = 560 MPa – transversal shear modulus

t being layer length;

t_i = 26 mm

t_j = 27mm

t_{tot} = 132mm

For G = 775 MPa

The Poisson's ratio used is $m = 0.314$, which is determined in collaboration with the manufacturer. This approach has been used in the past (Robeller, Nabaej, et Weinand, 2014) in a simpler structure. We are aware that, in this specific complex structure, it may not give perfectly accurate results. Therefore, to minimize the effect of the limits of this approach, we manage to align the strong axis of the panels parallel with the direction of the force transfer.

The second issue we face is that the default setting for connections between panels in the shell structural analysis is considered rigid in *Karamba*, whereas the joinery techniques used with wood structures are generally pinned or semi-rigid joints. Therefore, we create a virtual spring connection, as proposed by the developer of the plug-in (Grasshopper3d, 2017). In our 3D model, thin strips of shell elements of a stiff material ($E=210,000$ MPa, $G=80760$ MPa and $f_y=23.5$ MPa) were inserted between the panels. The effectiveness of this approach was confirmed by observing that the bending moments calculated in those elements were less than $0.01e-10$ kN-m.

The rigid and the hinged models are analyzed using the newly determined material properties and the same configurations as for the preliminary analysis since the load system, support type and cross-section of the panels are considered the same

Results

The first results of the hinged model seem dubious as the deformations in the order of 6.89e-4mm to 1.50e-3mm only appear within the panels and do not result in a global deformation of the structure. (Figure 68). The von Mises stresses are in the order of 3.1e-2 MPa to 6.69e-1 MPa. Since the values are low and the stress distribution does not seem to affect the structure in a whole, we perform the analysis of the rigid model to compare the deformations and stresses distribution in order to determine if there is a problem in the proposed hinged model.

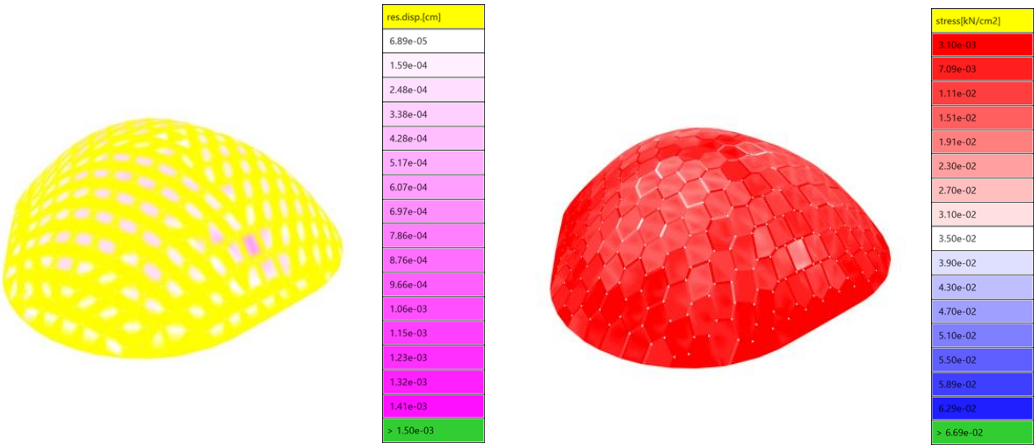


Figure 68 Hinge Model A. deformation; B. von Mises stress distribution

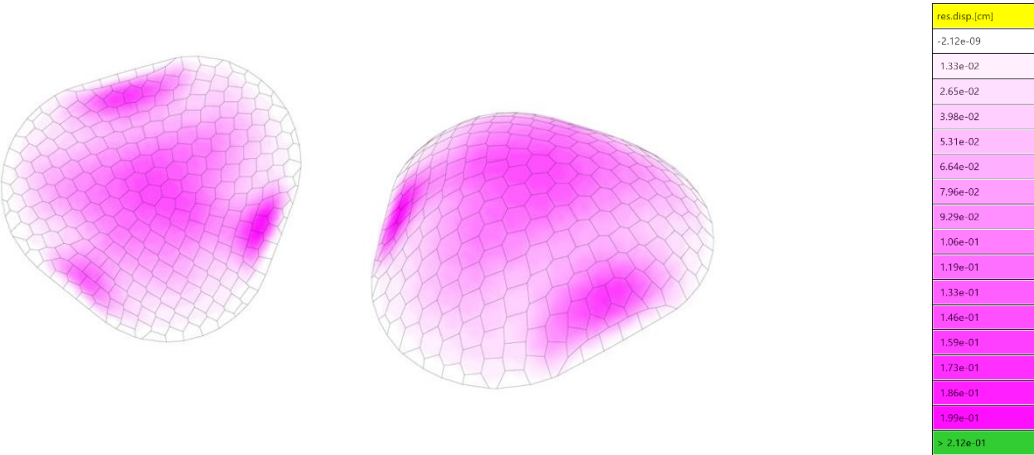


Figure 69 Rigid Model - Deformation

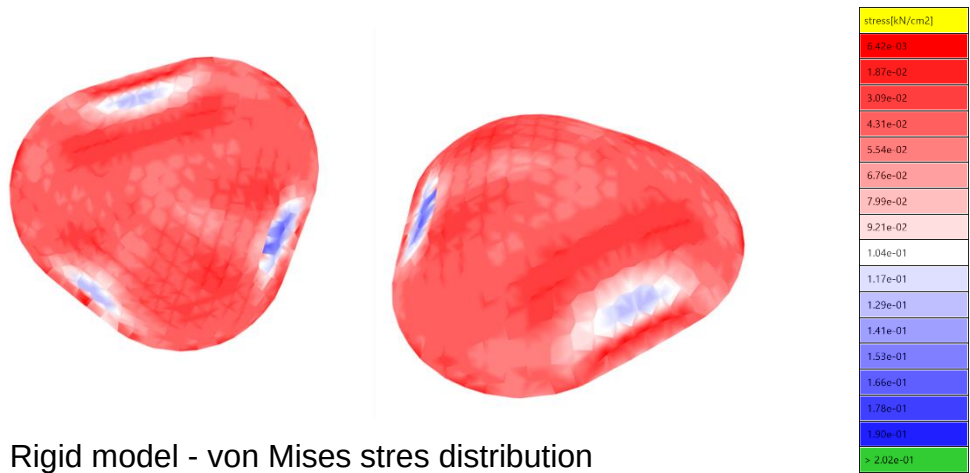


Figure 70 Rigid model - von Mises stress distribution

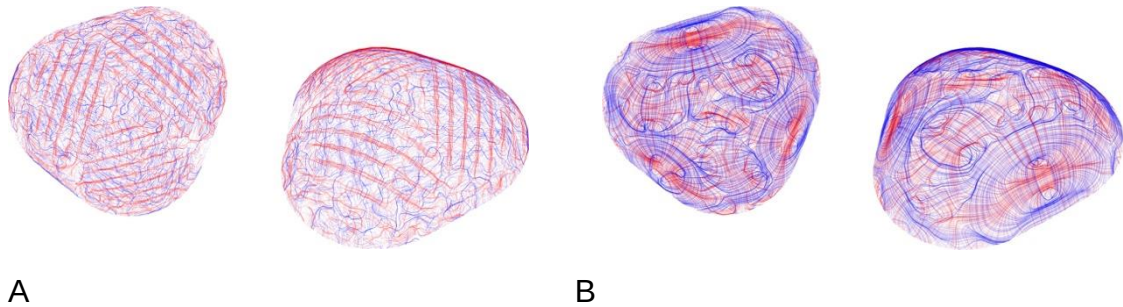


Figure 71 Principal moments — A. Hinged Model; B. Rigid Model on the right

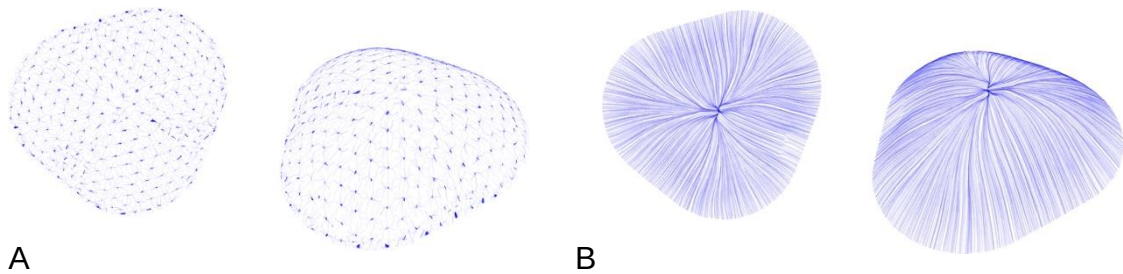


Figure 72 Force Flow — A. Hinged Model; B. Rigid Model

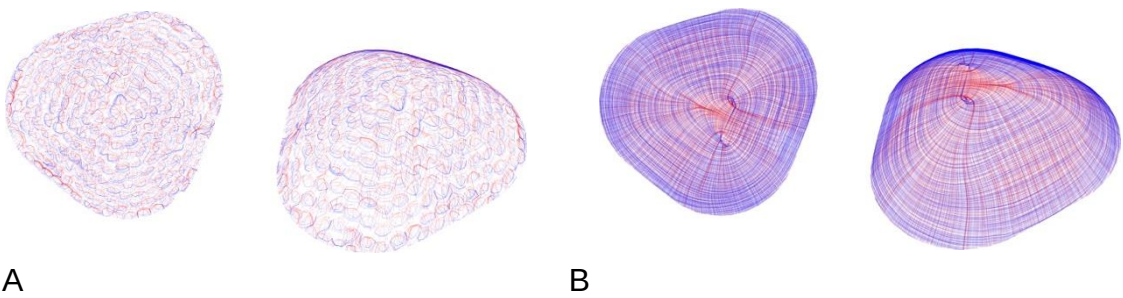


Figure 73 Stress lines — A. Hinged Model; B. Rigid Model

Results of the rigid model show the deformations in the order of -2.12×10^{-8} mm to 2.12 mm (Figure 69) and von Mises stresses in the order of 6.42×10^{-2} MPa to 2.02×10^{-1} MPa (Figure 70). It is noted that the values are still very low, yet this time higher than those of the hinged model, which is inconsistent.

Looking at the load distribution within the structure (Figure 72), a clear difference between the two models is evident. The same is true for stress distribution (red for compression, blue for tension, Figure 73). The distribution of these forces in the hinged model seems indeed limited to the panels rather than the full structure. The adjustment of the material properties and introduction of hinges appear therefore inadequate, the higher values showed by the rigid model prevent us from accepting it without further revision.

We need a reference model which could serve as a validation tool. If the reference model validates the rigid model, the algorithm would be faster and more accurate since the use of hinges seems to not be fully integrated with the function of the plug-in. But if we consider the rigid model to be more accurate, we must then ensure that the joinery system is still suitable for the structure and that it provides the rigidity assumed in the rigid model.

RFEM analysis

For validation purposes, and to obtain the reference model, we set aside our design interface in favour of an engineering software used by the industry to calculate CLT structures. In this case, we use the RFEM software (Dlubal Software Inc., 2016), which has an add-on for laminated materials.

While *Karamba* uses the von Mises stress to evaluate the shell structure, RFEM uses the plate bending theory of Mindling (Dlubal Software Inc., 2016). Knowing this, we can anticipate that the result will be different. We focus on the similarities as we mainly try to:

- Validate the deformations and the stress distribution in the model and
- Compare the global deformations of the structure.

First, the rigid model is analyzed by exporting the 3D model from *Karamba* in RFEM using the same configuration, except for the definition of the material properties, which are defined for each layer of the 5-layer CLT panel provided by the manufacturer.

The distribution of the deformations (Figure 75) is similar to the rigid model in *Karamba*, but the values are quite different being less than 0.8 mm in *Karamba* and 16 mm in the RFEM. It is still not clear what could explain the difference between the two tools. It may be the material properties, the algorithms, or a mix of both.

A hinged model was also generated in RFEM to observe deformation values and distribution and compare with the deformation of the rigid model to determine if the difference is important enough to require a hinged model in the design process.

To build the hinged model, a line release for each panel intersection is introduced into the RFEM model. We set it as a rotational release, in x, y and z axes (Figure 74) and perform a sensibility study varying the value of the spring constant between 0.001 kNm/rad/m to 15,000 kNm/rad/m.

The distribution of deformation is shown in Figure 76. The results presented in Tableau 7 and Figure 77 show that the deformation at the top approaches asymptotically to the deformation of 16 mm determined for the rigid model (note that at the value of 0.001 kNm/rad/m, the analysis did not converge). When the spring constant is 5,000 kNm/rad/m, the deformation of 19 mm is registered at the top, which is 3 mm (15%) greater than the deformation calculated for the rigid model.

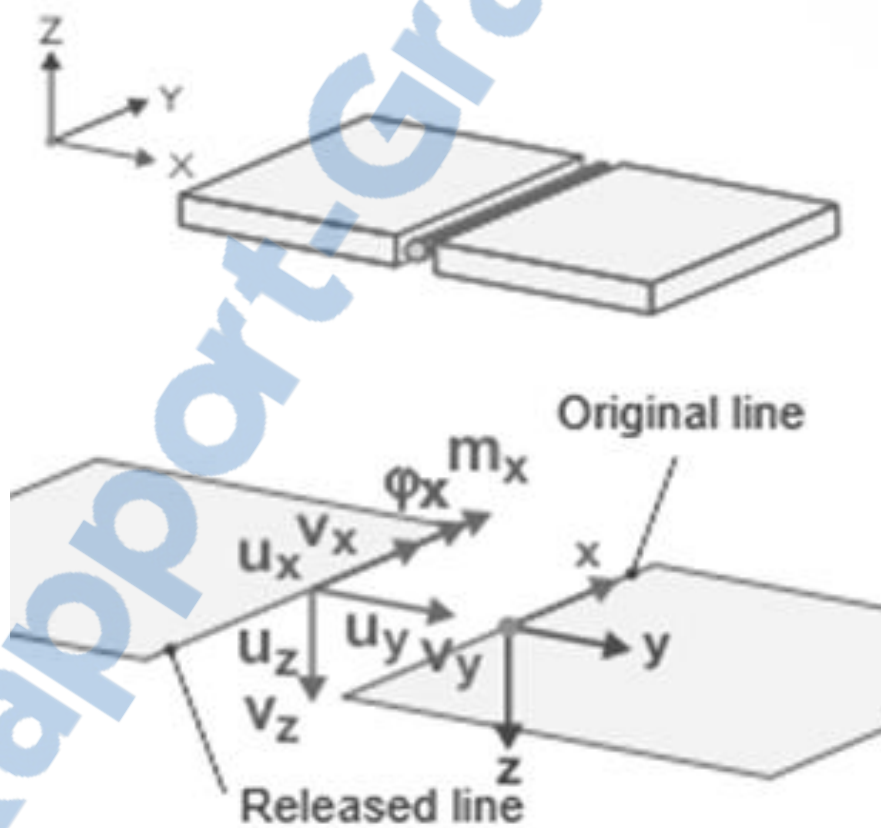
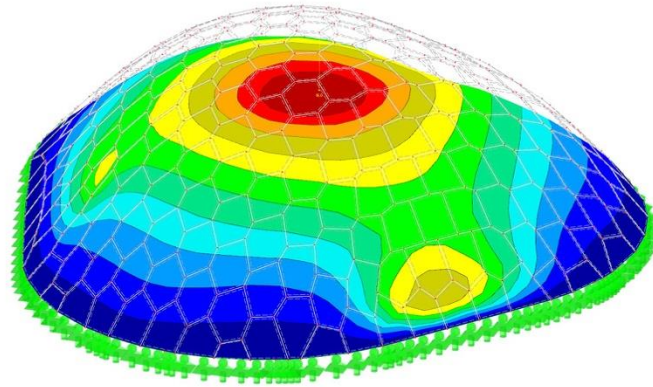
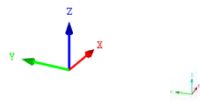
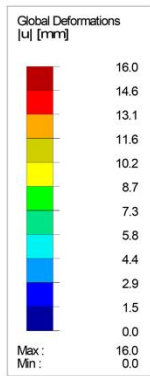


Figure 74 Line release configuration in RFEM (source RFEM)

CO1: 1.25D+1.5L+1S
Global Deformations u

Isometric

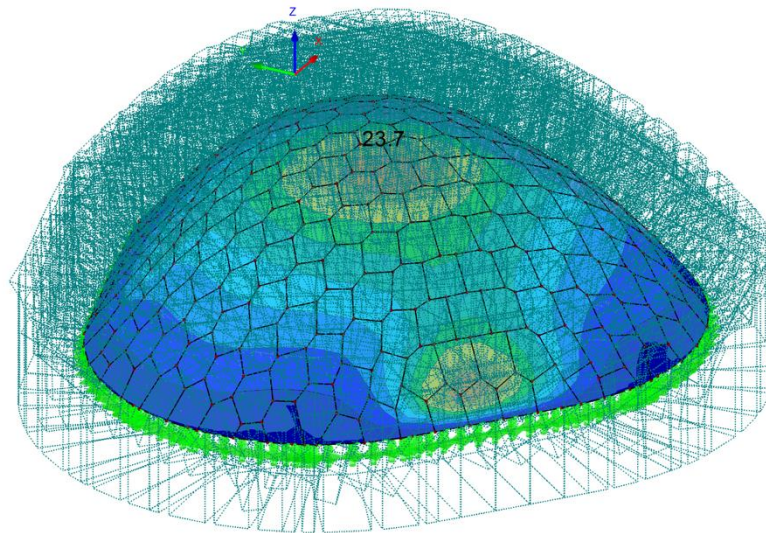
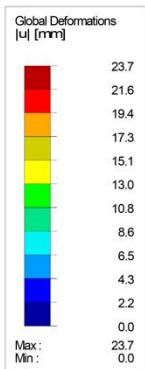


Max u: 16.0, Min u: 0.0 mm
Factor of deformations: 100.00

Figure 75 Rigid model in RFEM

CO1: 1.25D+1.5L+1S
Global Deformations u

Isometric



Max u: 23.7, Min u: 0.0 mm
Factor of deformations: 69.00

Figure 76 Hinged model in RFEM

Tableau 7 Sensibility test values for the spring constant

Spring Constant (kNm/rad/m)	Deformation at the top (mm)
0,001	Error
0,01	23,8
0,1	23,7
1	23,7
5	23,7
10	23,7
100	23,2
250	22,6
500	21,8
1000	20,9
5000	19,0
10000	18,5
15000	18,4

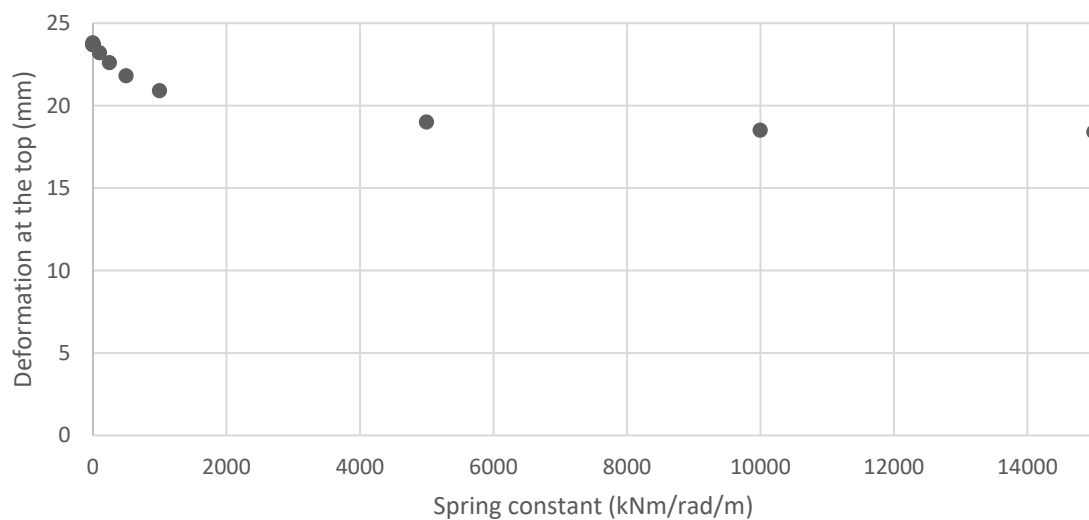


Figure 77 Sensibility of the structure ot the Spring Constant

The next step is to check if the joinery system can provide the required rigidity to the model. Considering the dome shape of the structure and the geometry of the joinery system, we can assume certain rigidity due to the friction between the panels in compression. To estimate the value of the spring constant we modelled a 3D section of our joinery system and looked at the deformation under a force of 1 kN/m² (Figure 78). To simplify the analysis, we do not include structural screws that can contribute to the global rigidity. Eq. 4 is used to calculate the spring constant of the joinery.

$$(4) \quad \text{Spring constant (kNm/rad/m)} = \frac{\text{Moment (kNm)}}{\theta \text{ (rad)}} \times \frac{1\text{m}}{b\text{(m)}}$$

We use a RFEM model to obtain the deformation needed for the calculation of the moment. Using a 3D model is considered at this point, for the precision of the model, but it would imply using a relative isotropic or orthotropic composition for our CLT, like we do in *Karamba*. However, we find more important to keep the real proprieties of the laminated material; therefore, we used a 2D model to define the point of friction between two finger-joined sections of the panels. However, we experience various ways to generate such a model and the results we obtain are inconsistent.

For example, the model generating the worst-case (Figure 79) has a deformation (Δ) of 1 mm for a Spring constant of 110 kNm/rad/m, which is a lot given the angle and dimension of the model. Alternatively, our best result (least deformation) has a Spring constant of 163 kNm/rad/m. Either case is far from the 5000 kNm/rad/m needed to validate the rigid model. At this point we may assume that the friction is not enough to provide the performance equivalent to the rigid model.

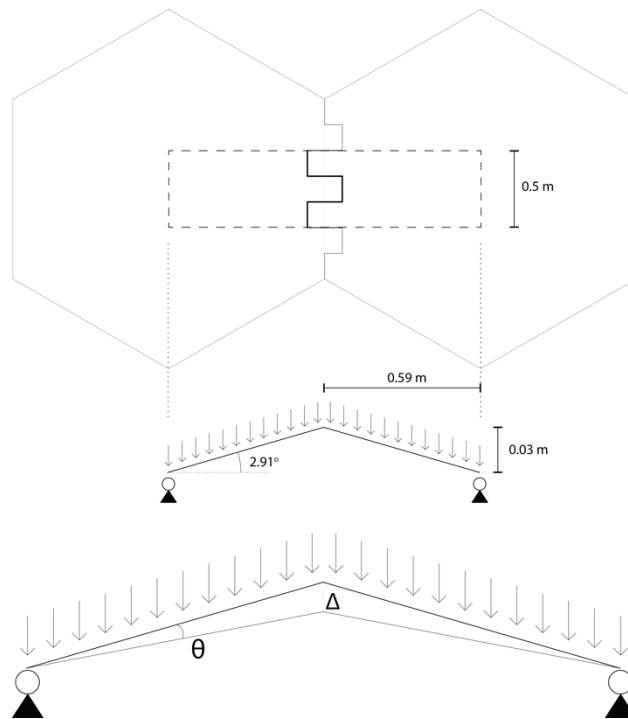


Figure 78 Dovetail section model

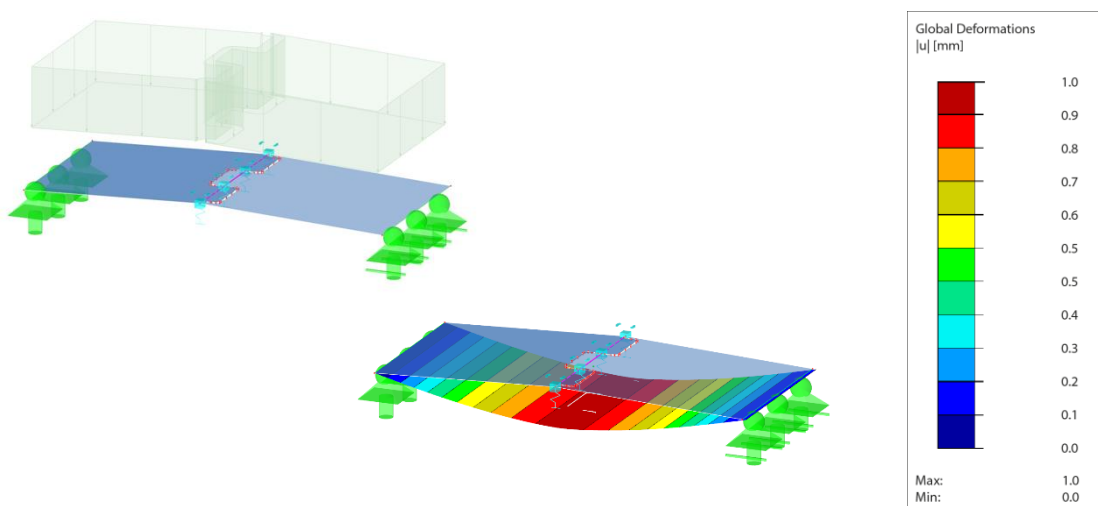


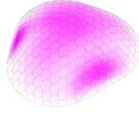
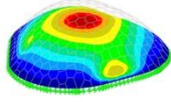
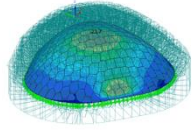
Figure 79 Dovetail simulation to determine the spring constant

Analysis of the results

The values obtained for the spring constant of the dovetail joint suggest that the rigid model cannot be used with adequate accuracy. We then have no results allowing us to consider rigid model as adequate for modeling. The hinged model in the iterative design interface is also not relevant. Thus, the deformation pattern and the stress distributions obtained from the rigid model in *Karamba* are better aligned with the models of RFEM except for the values. (Tableau 8). Unfortunately, it is not possible to use a *Karamba* hinged model because it differs significantly from the reference model. Still, considering the main goal of the research and the design process of the architect, it is not feasible to use a more accurate hinged model from an external tool at the preliminary stage, as it is too time-intensive and breaks the iterative design process. Furthermore, even the hinged model in RFEM needs more research since the spring constant cannot be easily defined without a more elaborated model of the dovetail joint. It would also imply some laboratory testing to determine the rigidity of the joints. Therefore, until we find a more relevant way to integrate hinges in the *Karamba* model, despite the important discrepancies between the results obtained, using the rigid model by *Karamba*, it seems more appropriate for the design purpose at the preliminary stage.

Since all our structures are generated from the same principle of catenary shells and dome, we are not in a situation where the values are significant enough to discard a model ;the maximum deformation for a clear span of 18 m of 5 m-height is 23.2 mm. We are mostly trying to identify the weakest points and reinforce them immediately. For this reason, we work with the rigid model, being aware of its limitations.

Tableau 8 Summary of the deformations of the different models tested

	Karamba Rigid Model	RFEM Rigid Model	Karamba Hinged Model	RFEM Hinged Model
Minimum values	-1.3e-8 mm	0 mm	6.89e-4mm	0 mm
Maximum values	1.3 mm	16 mm	1.50e-2mm	±23.7 mm
				

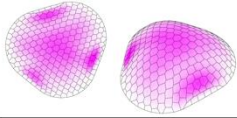
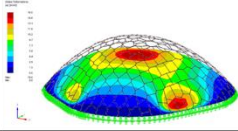
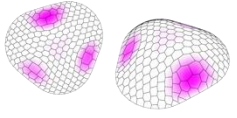
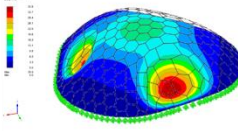
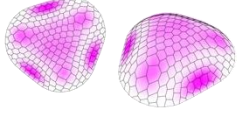
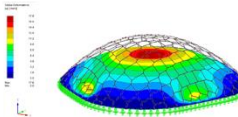
6 Practical implications

Since the main purpose of this research was to explore and upgrade the design process for wood structures with complex geometry, it was essential to define the limits of the proposed design process. These are the limits in which the structural analysis can be used as a design tool and the different types of validation that can be performed during the process with their specific precision requirements.

The preliminary analysis, even with basic settings, gives appropriate feedback to adequately define the system and configuration by being easily integrated in the form finding algorithm.

The second analysis shows that, for a wood dome/shell base form, panels don't need to be hinged to generate a deformation and stress distribution patterns via the structural analysis plug in. Using the distribution patterns observed in the model that we call M0, we reorganize the tessellation pattern of our dome, and relaunch the rigid model analysis in *Karamba* generating M1 and M2 propositions with various sizes and number of panels.

Tableau 9 Deformations of alternative tessellation pattern – Rigid Model

	Karamba	Max deformation	RFEM	Max deformation
M0 Reference model		2.1 mm		16 mm
M1		7.4 mm		35.9 mm
M2		1.9 mm		17.6 mm

As we see, even if the numerical values obtained in *Karamba* cannot be considered accurate since they diverge from the ones obtained using RFEM, they can be used in an iterative process of refinement of the pattern of structure as seen in Table 9 (Tableau 9). The first alternative tessellation pattern, M1, generates more deformation, reaching 7.4 mm in *Karamba* and up to 35.9 mm in RFEM. It decreases the deformation on top of the dome to be transferred to the side of the structure. Increasing the size of the panels on the weak parts of the structure is not the solution in this case.

It is, however, not possible to simply make the pattern smaller in those parts since the optimization of the structure is not only structural, but economical too. Downsizing the panel will increase the number of components; consequently, the number of cutting files, machine time and erection time. In model M2, we tried to improve the distribution of deformations while decreasing the number of panels in the dome. We meet the limits of the software with this second model. The deformation is less in the *Karamba* model, whereas the RFEM model indicates an increase in the deformation in comparison with the M0 model.

Karamba should therefore be used sparingly. In a design context, it still allowed us to rationalize the initial pattern. Even if the RFEM model shows a 10% increase of the deformation the model remains interesting unlike the M1 which can be quickly discarded or the M0, which requires more manufacturing time. The goal is concretely to find the least distorting structure with as little material as possible; to find a balance between the number of panels and the structural efficiency while respecting the limits of the building code.

7 Conclusions

The research presented in this paper describes how structural analysis can fit in an integrated design process for the use with massive wood panels in a wide range of architectural structures.

By integrating the architectural design with structural and manufacturing notions, the digital design process, combined with the precision of digital fabrication, enables the architect to propose innovative buildable solutions while managing numerous factors and constraints in the process. Because of the resulting ability to communicate and work closely with other fields of expertise, the design team has a distinct influence on the efficiency, costs and aesthetics of the project.

The limitations of *Karamba* model restrain its usage to the preliminary design stage. In the integrated process, they don't allow precise modelling of the characteristics of a massive timber panel structure. Yet, increasingly, under certain conditions it is deemed acceptable in practice to define an "isotropic" material out of a timber panel like CLT thus minimizing this problem. Unless it is proven that the joinery system has sufficient rigidity, the lack of software support for hinged shells will need to be resolved.

The most important obstacle is the structural definition of the joinery system. Even if it is fully integrated with the fabrication process, we have not yet been able to demonstrate, beyond a reasonable doubt, that the joinery system will be adequate considering the material used. Although we know that it could work with LVL, there's no significant use of CLT dovetail joints in a geometry close to ours that could be used as a reference.

In closing, there is yet very little research in the Province of Quebec on the integrated digital architecture and even less on digital manufacturing. We have thus been able not only to demonstrate to professional architects, engineers and manufacturers in the wood construction industry what can be done with this material and what constructive opportunities are within reach, but also to streamline the digital design tools and processes while integrating all the trade competencies under a single modelling and design interface. (Figure 80)

Applying these integrated design principles to a real-life project has overcome some of the barriers that existed between the fields of expertise. Multiple players of the industry could witness the benefits of using a collaborative approach for exploring and executing complex customized wood-based projects.

Acknowledgment

This research was sponsored by the Canadian Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) and the Industrial Research Chair on Ecoresponsible Wood Construction (CIRCERB) at Laval University in Quebec City, in the province of Quebec, Canada, and was done in collaboration with wood industry partners. The Chair's mandate is to develop wood-based ecoresponsible alternatives to reduce the environmental footprint of buildings. The project for the case study was proposed and designed in collaboration with Provencher Roy Associés Architectes.

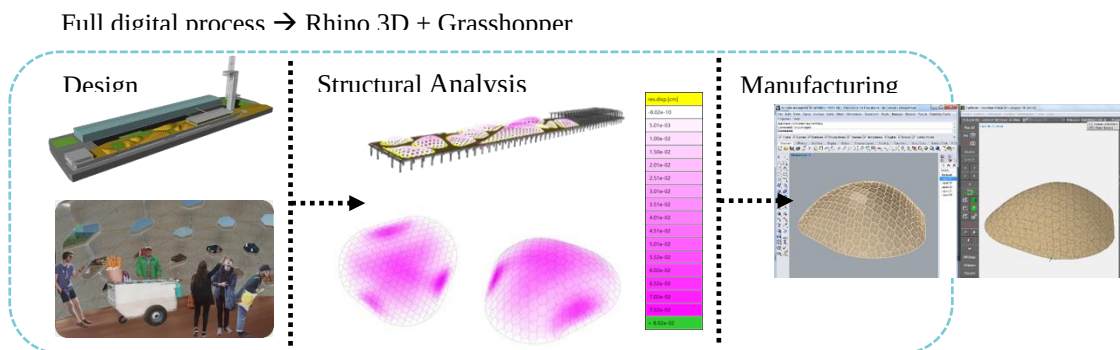


Figure 80 Graphic summary of the design integrated process of the structure

Conclusion

Au terme de tout ce travail, pouvons-nous dire que le système proposé répond à tous les objectifs du projet? Répondre à cette question nous aidera à évaluer l'efficacité de notre processus de conception.

Au stade de la conception, le système constructif développé dans le cadre de cette recherche offre de grands potentiels, dont une part seulement a été explorée. Avec l'apparition de plug-ins supplémentaires, nous sommes convaincus qu'il sera facile d'explorer encore plus de formes et de motifs de tessellation. Bien que nous ayons laissé une part de hasard dans la configuration de parcours desquels découlent nos formes architecturales, il y a encore place pour un contrôle plus minutieux du type de déformation que nous pourrions souhaiter réaliser. S'il a fallu un certain temps pour mettre le script en place, son application a ensuite été mise en œuvre rapidement, offrant au final une multitude de solutions. Dans l'ensemble les différentes compétences se sont bien intégrées au processus de conception; même si l'analyse de structures, telle que décrite au chapitre 3, nécessite des améliorations. L'intégration d'un processus de comparaison pour évaluer la quantité de matériel utilisé pourrait achever d'optimiser le concept final.

Nous sommes aussi satisfaits de l'intégration esthétique des assemblages pour l'étape de fabrication et de mise en œuvre. Le choix du joint en queue d'aronde, à bien des égards, était la solution la plus appropriée pour la structure. Si certains ont encore quelques réticences face au nombre de panneaux distincts, nous pourrions éventuellement penser à un moyen d'uniformiser davantage les panneaux. Cela aiderait à mieux évaluer le temps de découpe et la difficulté de fabrication. Cependant, le système d'assemblage est efficacement intégré et automatisé. La rationalisation des joints en queue d'aronde réduira passablement le temps de découpe, ce qui aura un effet des plus favorables sur l'économie du projet. En outre, la préfabrication des assemblages permettra certainement des économies sur le chantier, bien que ce soit un objectif toujours difficile à évaluer.

Le facteur le plus complexe à mesurer fut probablement l'occupation. L'ampleur de la recherche nous a obligés à nous concentrer sur la conception et la fabrication. La qualité des propositions pour les aménagements extérieurs a cependant eu une réception positive et nous pouvons considérer cet objectif atteint. Le confort intérieur, la qualité des finis dans l'espace intérieur ainsi que l'intégration d'analyses d'efficacité énergétique sont pour l'instant des objectifs soit difficiles à évaluer ou simplement mis de côté lors des expérimentations.

Finalement, à la lumière du Tableau 10, on peut conclure que, dans l'ensemble, le système répond favorablement à la plupart des objectifs du projet de la Jetée Alexandra.

Tableau 10 Évaluation de notre système constructif

	Esthétique		Économie		Efficacité	
Conception	Intégration de motifs/ornements	✓	Temps de conception	✓	Intégration des compétences	✓
	Qualité architecturale du système	✓	Contrôle sur la quantité du matériau	○	Efficacité de la structure / système constructif	✓
	Liberté de la forme	✓			Vérifiabilité du système constructif et des assemblages	○
	Contrôle de la forme	✓				
Fabrication/ Mise en œuvre	Intégration des assemblages	✓	Temps de construction	–	Facilité de mise en œuvre	✓
	Finition/ qualité intérieure de la structure	✓	Temps de découpe	–	Facilité de fabrication	–
			Assemblages sur mesure	✓	Facilité de générer et fabriquer le sur-mesure	✓
Occupation	Qualité des ambiances intérieures	–	Moins de finitions intérieures si qualité architecturale est manifeste	○	Lumière naturelle	✓
	Qualité formelle extérieur, sa contribution au paysage	✓			Efficacité énergétique/ Stratégies passives	–
			Économie d'énergie	–	Confort ambiance	○

✓ = Objectif atteint
○ = Objectif partiellement atteint/ difficile à évaluer
– = Objectif impossible à évaluer pour le moment

Ainsi qu'on l'a mentionné, certaines limites persistent : vérifiabilité du système constructif, temps de construction, temps de découpe, facilité de fabrication.

Pour ce qui est de notre capacité à valider la viabilité de notre système constructif, les conclusions du chapitre 3 donnent un bon aperçu des obstacles que nous avons rencontrés à cet égard, en l'occurrence : l'imprécision actuelle des outils d'analyse de structure dans Grasshopper et la performance des joints en queue d'aronde en CLT dans une structure en coque qui reste encore à déterminer. Une recherche en laboratoire semble incontournable à ce stade pour réellement prouver la viabilité du système constructif proposé.

Pour ce qui est de la faisabilité en général (temps de construction, temps de découpe, facilité de fabrication), la construction d'un prototype à petite échelle pourrait fournir quelques hypothèses de réponses. Malheureusement, cette recherche n'a pas pu inclure cette étape. Elle pourrait toutefois aisément être reprise ultérieurement à partir de la documentation de projet.

De plus, avec l'ajout d'un plug-in d'itération dans Grasshopper, ainsi que les moyens et le temps de développer une approche ascendante plutôt que descendante, nous pourrions voir une amélioration significative de la qualité des résolutions à l'étape de planarisation des panneaux.

En conclusion, la recherche a amplement démontré le potentiel constructif du CLT dans du non-standard. Une attention particulière a été portée au contexte québécois et les propositions de projet retenues dans le cadre de cette recherche ont été présentées parce qu'elles pouvaient être réalisées ici avec-le savoir-faire d'ici.

La réflexion amorcée dans le projet a déjà certains échos dans le milieu de la conception en bois. Lors de l'école d'été du CIRCERB en 2015, dans un amusant exercice visant à imaginer des icônes architecturales en bois, plusieurs y voyaient déjà des applications! Plus sérieusement, l'industrie du bois s'est montrée impressionnée et ouverte à ce genre d'approche et de conception. Finalement, avec l'apprentissage des outils numériques de plus en plus tôt dans la formation des futurs architectes, nous sommes confiants que cette approche de conception sera très bientôt à la portée de tous les futurs architectes

Bibliographie

- ANSI-APA PRG 320-2011. (2011). Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber. Tacoma: APA-Engineered Wood Association.
- ARCHEMI. (2005). *Le Quai Alexandra et ses hangars - Évaluation patrimoniale Rapport final*. Port de Montréal, Montréal.
- Architectural Design. (2014). *Empathic Space The Computation of human-centric architecture*. (C. Derix, A. Izaki, & H. Castle, Éd.s.) London: John Wiley & Sons.
- Autodesk. (2015). Revit.
- Bagger, A. (2010). Plate shell structures of glass - Studies leading to guidelines for structural design. (D. C. Engineering, Éd.) Technical University of Denmark.
- Bechtold, M. (s.d.). On shells and blobs: Structural surfaces in the digital age. Dans R. Corser (Éd.), *Fabricating Architecture Selected readings in digital design and manufacturing* (pp. 168-177). New York: Princeton Architectural Press.
- Bernasconi, A. (2013). La construction de la Via Cinni à Milan - 4 bâtiments en bois avec 9 étages. *3ème Forum International Bois Construction à Beaune*. Beaune: Forum-holzbau.
- Bernier-Lavigne, S. (2014). Pour une architecture de l'écume. Québec, Quebec: Université Laval.
- Boucher-Côté, M. (2013). Exploration des caractéristiques du panneau X-LAM en contexte canadien. Québec: Université Laval.
- Buri, H. U. (2010). Origami - Folded Plate Structures. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Buri, H., & Weinand, Y. (2008). ORIGAMI - Folded Plate Structure, Architecture. *10th World Conference on Timber Engineering*.
- Buri, H., Stotz, I., & Weinand, Y. (2011). Curved Folded Plate Timber Structures. *IABSE-IASS Symposium*. Londre: IABSE-IASS.
- Burroughs, M. (2011). *Scripting cultures*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Burroughs, M. (2016). Antonio Gaudi and Frei Otto Essential Precursors to the Parametricism Manifesto. Dans P. Schumacher (Éd.), *Parametricism 2.0* (pp. 30-35). London: John Wiley & Sons.
- Cache, B. (1997). *Terre meuble*. Orléans: HYX.
- Cadwork Group. (2016). *Cadwork v.22*. Récupéré sur Cadwork: <http://www.cadwork.com/cwen/Home>
- Calderon, E., Schimek, H., & Wiltsche, A. (2011). Seeking Performative Beauty. *Integration through Computation: Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 300-307). ACADIA.
- Campo, M. (1993). Ten Years of Folding. Dans G. Lynn, *Folding in Architecture* (pp. 14-19). Architectural Design.
- Campo, M. (2016). Parametric Notations - The birth of the non-standard. Dans *Architectural Design - Parametricism 2.0* (pp. 24-29). London: John Wiley & Sons.

- Cecobois. (2016). *Écologique*. Récupéré sur Cecobois - Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois: <http://www.cecobois.com/ecologique>
- Cecobois. (2016). *Le matériau bois et l'analyse du cycle de vie*. Récupéré sur Cecobois: <http://www.cecobois.com/materiau-bois-et-analyse-cycle-de-vie>
- Chantiers Chibougama. (2016). *Chantiers Chibougama*. Récupéré sur Chantiers Chibougama: <http://chibou.com/>
- Conseil canadien du bois. (2017). *Bois d'oeuvre stratifié croisé*. Récupéré sur Conseil canadien du bois: <http://cwc.ca/fr/produits-du-bois/bois-doeuvre-stratifie-croise/>
- DeLanda, M. (2016). Parametrising the social. Dans P. Schumacher, & H. Castle (Éds.), *Architectural Design Parametricism 2.0* (pp. 124-127). London: John Wiley & Sons.
- Deleuze, G. (1988). *Le Pli - Leibniz et le baroque*. Les éditions de minuit.
- Dlubal Software Inc. (2016). *Dlubal Software Inc. RFEM - FEM Structural Analysis Software*. Récupéré sur Dlubal Software Inc. RFEM - FEM Structural Analysis Software: <http://www.dlubal.com/en>
- G. studio. (2016). *G100*. Récupéré sur G. studio: <http://www.gstudioarchitecture.com/>
- Gagnon, S., & Pirvu, C. (2011). *Manuel CLT - Édition canadienne*. Quebec: FPInnovation.
- Gosselin, P., & LeCoquie, E. (2006). *La recherche création: Pour une compréhension de la recherche en pratique artistique*. Québec: Les Presses de l'Université du Québec.
- Gouaty, G. (2010). *Modélisation géométrique itérative sous contraintes*. Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne.
- Gouvernement du Canada. (2016). *Définitions*. Récupéré sur Conseil de recherches en sciences humaines: <http://www.sshrc-crsh.gc.ca/funding-financement/programmes-programmes/definitions-fra.aspx#a25>
- Gouvernement du Canada. (2017). *Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada*. Récupéré sur Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada: http://www.nserc-crsng.gc.ca/Index_fra.asp
- Gouvernement du Québec. (2015). *Europe – Marquage CE*. Récupéré sur Économie, science et innovation Québec: <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/conformite/normalisation/normes-europeennes/europe-marquage-ce/>
- Gouvernement du Québec. (2016). *La Charte du bois*. (G. d. Québec, Éditeur) Récupéré sur Ministère Forêts, Faune et Parcs Québec: <https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/entreprises/entreprises-transformation-charte.jsp>
- Gouvernement du Québec. (2017). *Appui à la recherche-crédation, concours automne 2016*. Récupéré sur Fonds de recherche société et culture: <http://www.frqsc.gouv.qc.ca/fr/bourses-et-subventions/consulter-les-programmes-remplir-une-demande/bourse/appui-a-la-recherche-creation-rc-concours-automne-2016-5aeb9wba1466537413107>

- Grasshopper3d. (2017). *Mesh joints for wood material*. Récupéré sur Grasshopper3d: http://www.grasshopper3d.com/group/karamba/forum/topics/mesh-joints-for-wood-material?xg_source=activity
- Haasis, M., & Weinand, Y. (2008). Origami - Folded plate structures, Engineering. *10th World Conference in Timber Engineering*. Miyazaki.
- Henriksson, V., & Hult, M. (2016). Rationalizing freeform architecture - Surface discretization and multi-objective optimization. Gothenburg: Chalmers University of Technology.
- Hensel, M., Weinstock, M., & Menges, A. (2010). *Emergent technologies and design : towards a biological paradigm for architecture*. New York: N.Y.: Routledge.
- IBOIS. (2015). *Generative Woodworking joints*. Récupéré sur IBOIS Laboratory for Timber Construction: <http://ibois.epfl.ch/page-102318-en.html>
- IBOIS. (2017). *Laboratory for timber constructions IBOIS*. Récupéré sur EPFL - École polytechnique fédérale de Lausanne: <http://ibois.epfl.ch/>
- JRC European Commission. (2004). *Eurocode 5 - EN 1995: Design of timber structures*. Récupéré sur <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=135>
- Kanasaki, K., & Tanaka, H. (2011). Traditional Wood Joint System in Digital Fabrication. *31st eCAADe Conference* (pp. 711-218). Delft: eCAADe.
- Kieran, S., & Timberlake, J. (2004). *Refabricating Architecture - How Manufacturing Technologies Are Poised to Transform Building Construction*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Kloft, H. (2010). Engineering of freeform architecture. Dans R. Corser (Éd.), *Fabricating architecture - Selected reading in digital design and manufacturing* (pp. 110-127). New York: Princeton Architectural Press.
- Kolarevic, B. (2003). *Architecture in Digital Age: Design and Manufacturing*. New York: Spon Press.
- Kolarevic, B., & M. Malkawi, A. (2005). *Performative Architecture - Beyond instrumentality*. New York: Spon Press.
- Kolb, J. (2011). *Bois - systèmes constructifs, deuxième édition actualisée*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Laferrière, J. (2014). *Terminal de croisières de la Jetée Alexandra*. Récupéré sur Architecture du Québec: <http://www.architectureduquebec.com/blogue/terminal-de-croisieres-de-la-jetee-alexandra>
- LIGNOCAM SA. (2016). *woodpecker*. Récupéré sur Lignocam: <http://www.lignocam.com/fr/wood-pecker>
- LIGNOCAM SA. (s.d.). *LIGNOCAM*. Récupéré sur LIGNOCAM: <http://lignocam.com/index.php/fr/>
- Lynn, G. (1993). Architectural Curvilinearity : The Folded, the Pluant and the Supple. Dans G. Lynn, *Folding in Architecture* (pp. p.24-31). Londre: Architectural Design.
- Lyon, F. (2013). CLT: Les grandes lignes de la normalisation Européenne. *3ème Forum International Bois Construction*. Beaune: Forum-holzbau.
- MAP-CRAI. (2016). *Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie*. Récupéré sur MAP CRAI: meurthe.crai.archi.fr

- Meyer, J. (2013). *Le pli, un outil de conception d'espaces architecturaux : développement d'un langage structurel et formel dans le matériau bois*. Nancy: École nationale supérieure d'architecture de Nancy.
- Meyer, J., Duchanois, G., & Bignon, J.-C. (2014). *The fold, a tool of design architectural structures : Development of a structural and formal language in wood material*. *Global Civil Engineering & Applied Science Conference*.
- Mohammad, M. (2011, février 8-9). *Connections in CLT Assemblies*. *Cross Laminated Timber Symposium*. Vancouver.
- National Research Council Canada (NRCC). (2015). *National Building Code of Canada*.
- Nordic Structures bois. (2016). *Note technique S21 - Calcul aux états limites (CAN)*. Récupéré sur Nordic Structures bois: http://nordic.ca/data/files/datasheet/file/T-S21_fProprietsNordicX-Lam.pdf
- Nordic Structures Bois. (2016). *Note technique S22 - Calcul aux états limites*. Récupéré sur Nordic Structures Bois: http://nordic.ca/data/files/datasheet/file/T-S22_fDonnestechiques2015-05-15.pdf
- Pavlíček, J., & Kaftan, M. (2012). *Parametric Design System for Passive Houses*. *Digital Physicality - Proceedings of the 30th eCAADe and CVUT*. Prague.
- Picon, A. (2010). *Culture numérique en architecture*. Bâles, Suisse: Birkhauser GmbH.
- Piker, D. (2012). *Planar hexagons on double curved surface definition*. Récupéré sur Grasshopper: <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/planar-hexagons-on-double-curved-surface-definition?id=2985220%3ABlogPost%3A586556&page=2#comments>
- Piker, D. (s.d.). *Kangaroo3d*. Récupéré sur Kangaroo3d: <http://kangaroo3d.com/>
- Plasma Studio. (2017). *Paramount - Alma residence*. Récupéré sur Plasma Studio: http://www.plasmastudio.com/work/Paramount_Residence.html
- Preisinger, C. (2016). *Karamba*. Récupéré sur Karamba: <http://www.karamba3d.com>
- Provencher Roy Associés Architectes. (2016). *Provencher_Roy*. Récupéré sur Provencher_Roy: <http://provencherroy.ca/fr/>
- Provencher_Roy. (2004). *Jetée Alexandra - Rapport d'analyse financière et technique*. Provencher Roy Associés Architectes.
- Provencher_Roy. (2015). *Gare maritime internationale d'Iberville et Jetée Alexandra - Rapport d'étude concept*. Provencher Roy Associés Architectes, Port de Québec.
- PROVING GROUND. (2015). *Lunchbox for Grasshopper*. Récupéré sur proving ground: <https://provingground.io/tools/lunchbox/download-lunchbox-for-grasshopper/>
- Radio-Canada. (2014, novembre 6). *Le terminal au port de Montréal aura un nouveau visage*. (Radio-Canada, Producteur) Consulté le 2015, sur Radio-Canada: <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/692660/quai-alexandra-revitalisation-investissements-projet-port-de-montreal>
- Rahim, A., & Jamelle, H. (2007). *Elegance in the Age of Digital Technique*. Dans A. Rahim, H. Jamelle, & H. Castle (Éds.), *Architectural Design - Elegance*. London: John Wiley & Sons.

- Reiser, J., & Umemoto, N. (2006). *Atlas of Novel Tectonics*. Princeton Architectural Press.
- Richard, M. (2012). Un composant structurel innovant : Les panneaux contrecollés. Épinal.
- Robeller, C., Mayencourt, P., & Weinand, Y. (2014). Snap-fit - CNC fabricated, Integrated Mechanical Attachment for Structural Timber Panels. Dans D. Gerber, A. Huang, & J. Sanchez (Éd.), *34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 189-198). ACADIA 2014.
- Robeller, C., Nabaej, S. S., & Weinand, Y. (2014). Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT. Dans W. McGee, & M. Ponce e Leon (Éds.), *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*. Vienna/New York: Springer International Publishing.
- Robeller, C., Stitic, A., Mayencourt, P., & Weinand, Y. (2014). Interlocking Folded Plate - Integrated Mechanical Attachment for Structural Timber Panels. Dans Springer (Éd.), *Advances in Architectural Geometry 2014* (pp. 281-294). London: Advances in Architectural Geometry.
- Robert McNeel & Associates. (2017). *GhPython*. Récupéré sur Food4Rhino: <http://www.food4rhino.com/project/ghpython?ufh>
- Robert McNeel & Associates. (2017). *Grasshopper 0.9.0076*. Récupéré sur Grasshopper: <http://www.grasshopper3d.com>
- Robert McNeel & Associates. (2017). *Rhinoceros 5*. Récupéré sur Rhinoceros 5: <http://www.rhino3d.com/>
- Rombach Holzbau. (2016). *Produit - La vis à bois brut - des moyens de connexion uniques*. Récupéré sur NUR-HOLZ: <http://www.nur-holz.com/text/687/fr/produit.html>
- Rothoblaas. (2015). *UV Concealed Hook Connector*. Récupéré sur Rothoblaas: <http://www.rothoblaas.com/>
- Sass, L. (2009). A wood frame grammar: A generative system for digital fabrication. *International Journal of Architectural Computing*, 4, pp. 51-67.
- Schimek, H., Dominguez, E., Wiltsche, A., & Manahl, M. (2012). Sewing timber panels: An innovative digitally supported joint system for self-supported timber plate structures. *17th International Conference on Computer Aided Architectural Design Research in Asia*, (pp. 213-222). Chennai.
- Schimek, H., Meisel, A., & Bogenperger, T. (2010). On connecting panels of freeform building envelopes. *CAAD - Cities - Sustainability - 5th international conference proceeding of the arab society* (pp. 171-178). Fez: Computer Aided Architectural Design.
- Schimek, H., Wiltsche, A., Manahl, M., & Pfaller, C. (2013). Full scale prototyping. *Open Systems: Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2013)* (pp. 653-662). Hong Kong: The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).

- Schmid, V., Koppitz, J.-P., & Thurik, A. (2011). Neue Konzepte im Holzbau mit Furnierschichtholz - Die Holztragkonstruktion des Metropol Parasol in Sevilla. *Bautechnik*, 88(10), 707-714.
- Schumacher, P. (2009). Parametricis : A new Global Style for Architecture and Urban Design. Dans *Architectural Design Digital Cities* (pp. 14-23). Neil Leach.
- Schumacher, P. (2016). Gearing Up to Impact the Global Built Environment. Dans P. Schumacher, & H. Castle (Éds.), *Parametricism Rethinking Architecture's agenda for the 21st century* (pp. 8-17). London: John Wiley & Sons.
- Schwinn, T., Olivier, K., & Menges, A. (2014). Behavioral Strategies : Synthesizing Design Computation and Robotic Fabrication of Lightweight Timber Plate Structures. *34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 177-188). ACADIA.
- Stavric, M., Hirschberg, U., & Wilsche, A. (2010). Spatializing Planar Ornaments: Towards esthetic control in segmenting and building curved surfaces. *FUTURE CITITES - 28th eCAADe Conference Proceedings* (pp. 437-443). eCAADe.
- Stotz, I. (2009). Iterative geometric design for architecture. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Stotz, I., Gouaty, G., & Weinand, Y. (2009). Iterative Geometric Design for Architecture. *Journal of the International ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES*, 11-20.
- Surjo, H. (2011). Planar quadrilateral tessellation for free-form architectural design. London: University College London.
- Tsigkari, M. (2006). Tessellation of arbitrarily shaped objects. London: University of London.
- Université Laval. (2016). *Chaire industrielle de recherche en bâtiment écoresponsable en bois*. Récupéré sur CIRCERB - Chaire industrielle de recherche en bâtiment écoresponsable en bois: <http://cercerb.chaire.ulaval.ca>
- Verderber, S. (2005). *Thesis - Interdisciplinism, Competency, and the Thesis Experience*. Récupéré sur ArchVoices: <http://www.archvoices.org/thesis/>
- Wang, W., & Liu, Y. (2009). A Note on Planar Hexagonal Meshes. Dans I. Emiris, F. Sottile, & T. Theobald (Éds.), *Nonlinear Computational Geometry* (pp. 221-233). Springer.
- Wang, W., Liu, Y., Yan, D., Chan, B., Ling, R., & Sun, F. (2008). *Hexagonal Meshes with Planar Faces*. Department of Computer Science. Hong Kong: The University of Hong Kong.
- Weinstock, M. (2010). Self organization and material constructions. Dans R. Corser (Éd.), *Fabricating Architecture - Selected readings in digital design and manufacturing*. New York: Princeton Architectural Press.
- Willis, D., & Woodward, T. (2010). Diminishing difficulty - Mass customization and the digital production of architecture. Dans R. Corser (Éd.), *Fabricating architecture - Selected reading in digital design and manufacturing* (pp. 178-213). New York: Princeton Architectural Press.
- Zeisel, J. (1984). *Inquiry by design : tools for environment-behaviour research*. Cambridge: Cambridge University Press.

Annexes

Annexe 1 – Tableau récapitulatif des principales combinaisons systèmes constructifs

À partir des systèmes constructifs et assemblages évoqués dans ce mémoire, nous avons compilé les combinaisons qui ont pu être observés lors de l'analyse de précédents pour la construction en panneaux de bois (CLT, LVL, Contre-plaqué).

Annexe 2 – Article soumis au WCTE 2016

L'article du WCTE 2016 présente les résultats de la recherche dans son ensemble, à être vu comme un résumé. Y est cependant inclus dans la section « joinery » plus de détails qui n'ont pas été repris dans l'article du Journal of engineering design ou évoqué dans le mémoire.

Annexe 3 – Propriétés Nordic X-Lam

Propriétés physiques du CLT, produit par Chantier Chibougamau, qui ont été utilisés pour l'analyse de structure

Annexe 4 – Code Python Épaisseur et des joints en queue d'aronde

Annexe 1 – Tableau récapitulatif des principales combinaisons systèmes constructifs – assemblages recensés

SYSTÈMES CONSTRUCTIFS - CLT								
Forme Prédéfinie				Forme Libre				
Règle de l'art		Non-standard						
Plate forme		Claire voie		Pli	Tessellation	Grille	Modèle iteratif	
Interne					C3			Assemblages Bois-Bois
Externe	C1	C2			C4			
Interne								Assemblages Mixte
Externe					C6			
Interne	C7	C9	C11				C14	Assemblages Connecteurs
Externe	C8	C10	C12			C13	C15	

ASSEMBLAGES

Annexe 2 — Article soumis pour le WCTE

DESIGN PROCESS OF A FREE-FORM STRUCTURE USING CLT PANELS - ANALYSIS OF AN ARCHITECTURAL LARGE SCALE STRUCTURE

Zoé Tolszczuk-Leclerc¹, Samuel Bernier-Lavigne², Alexander Salenikovitch³, André Potvin⁴

ABSTRACT: This research is about the design process, development and fabrication of a free-form structure in cross-laminated timber (CLT) panels. Since sustainability, ecology and structural design are now relevant in any building project, the purpose of this research is to demonstrate that CLT panels can be used as an ecoresponsive strategy based on a building form. This paper presents the use of a tessellation construction system for designing and producing a free-form surface in CLT for a specific regional and industrial context. The research/creation process and the retroactive simulation generated by the parametric modelling software enabled the development of a singular architectural project where the structural aspect and the manufacturing are the inherent part of the integrated design process. Finally, the cutting files can be generated automatically for an easy transfer to CNC machine tools.

KEYWORDS: CLT, Free Form Structure, Integrated Design, Structure Analysis, CNC Manufacturing

1 INTRODUCTION

Sustainability, ecology and building efficiency have become, in the past decades, major parts of any architectural design process. This enhanced awareness of the built-up environment encouraged us to revisit some concerns about the materials we use. Current digital tools allow us to advance building innovation and to exert increasingly better performance from materials with a minimal carbon footprint. In this context, cross laminated timber (CLT), along with other engineered wood materials, has intrinsic characteristics suitable for such sustainable construction and innovation.

However, CLT buildings that aim to offer high energy efficiency are constrained by existing construction directives, codes and good engineering practices that prevent formal experimentations, which in turn inhibit the alternative exploration of bioclimatic design strategies based on more complex building shapes. In order to stimulate innovative uses of this material, design and fabrication methods need to be adapted. New digital design tools allow us to do so, but given the multiplicity of software and stakeholders, there is a need to facilitate everyone's work in this integrated design process which has been tried and proven in the design and construction of innovative buildings. The objective of this project is to demonstrate that an integrated design process combined

with the precision of digital fabrication enables the designer to explore complex forms using CLT.

To this end we have developed a customized design process for specifically CLT oriented project. The conventional method, based on having a concept and a form to which a wood structure is applied, or forced upon at extra costs if needed, is decomposed to develop a concept, which is itself a customized construction system designed specifically for the project. In developing the construction system at the initial design stage, structural and fabrication considerations specific to the material and its implementation are integrated with architectural, aesthetic and software considerations right from the start.

2 NON-STANDARD CONSTRUCTIVE SYSTEMS IN CLT

In the field of non-standard wood construction, there are only a few examples of architectural projects where wood panels were used in an innovative way, and even fewer using CLT. For the purpose of the particular design approach, it seems adequate to have a look at recent precedents in this field.

We divide the different constructive systems in CLT into two distinct categories: the predetermined typology or form and the non-predetermined one. By these, we mean that some systems set a particular kind of typology where

¹ Zoé Tolszczuk-Leclerc, Université Laval, Canada, zoe.tolszczuk-leclerc.1@ulaval.ca

² Samuel Bernier-Lavigne, Université Laval, Canada, samuel.bernier-lavigne@arc.ulaval.ca

³ Alexander Salenikovitch, Université Laval, Canada, alexander.salenikovitch@sbf.ulaval.ca

⁴ André Potvin, Université Laval, Canada, andre.potvin@arc.ulaval.ca

others allow a larger range of form possibilities. In the predetermined structure we include the traditional systems regulated by the construction directives, codes and good engineering practices; e.g., balloon vs platform type. Few projects use them in a more or less free-form structure, usually in small or medium housing. But this concept is not adequate for a large-scale structure without a structural grid. The second most classical, but non-standard system, is the better-known “origami” system approach studied in depth mostly by the IBOIS laboratory [1] and more recently by the MAP-CRAI [2], but we considered that such systems also have some limitations in the formal application. Essentially, this approach consists of a series of arches. The framework is therefore an open space capable of accommodating long spans but almost exclusively linear.

To produce a non-standard shape or form not defined under conventional typology, other approaches must be sought. Two approaches are available in this case: from basic geometry and from generative process systems. The grid structure is the preferred choice when using a complex volume to develop a structure. The most prominent example is undoubtedly the now well-known *Metropol Parasol* in Seville, Spain [3]. This is however an ambitious and costly option with respect to the quantity of material used as well as assembling issues and general structural analyses. Tessellation on the other hand starts with a geometrical surface and is obtained by subdividing a free-form surface into multiple planar elements.

The second approach applies a digital generative process to wood panel structures. Research is still minimal for now and only the work of the IBOIS laboratory will be referred to in this paper. IBOIS explored the programming and development of an iterative process to generate architectural surfaces/objects from wood panels [4]. However, it seems to require a high level of programming know-how that might limit some designer’s access to this approach.

Obviously, this overview does not represent an exhaustive list of research works on wood panel structures, but it covers the important recent innovations and an adequate base to understand the state of the art. We believe that studies not specifically mentioned in this paper are relevant to one or both of the above-mentioned approaches.

For the purposes of this project, there was a need to select a relatively simple system that would allow reasonable freedom of implementation to accommodate the programming needs of the project. Tessellation systems were deemed more relevant to this end, and they also allow some opportunities for a simple generative system.

Tessellation, a design method that enables the fabrication of double curvature surfaces, has been vastly explored in numerous forms and materials, but to a much lesser extent in wood. Researchers have studied its design approaches, bottom-up and top-down, defined the benefits and drawbacks of these for increasing the efficiency of the

method [5]. They also examined its implementation with glass, metal and numerous other materials, but what about wood? What major constructive limits does this material impose?

The most relevant result involving the use of wood in tessellation is the Cobra-Sculpture Pavilion [6] and the LaGa Exhibition Hall [7]. Since the results of these two projects were pavilions, we are trying to push the experimentation to a larger scale. In this research, we have therefore relied partly on the conclusions of these studies, as a matter of course, to define our own conceptual approach to the material.

While triangulation is the most efficient and accurate way to subdivide a reverse sweep surface, it is also the one with the most unusable material residues [8]. Moreover, this type of subdivision entails major assembly problems when six panels meet at each node. The thicker the panel, the more difficult it will become to manage these nodes. One of the first constructive limits will thus be to work with wood panels with a minimum of four sides. This type of panels opens up enormous design potential as the structure becomes ornamentation [9]. However, this study is limited to the honeycomb structure, a natural shape with the advantage of being malleable and adaptable to different degrees of curvature, and thus to the complexity of the form.

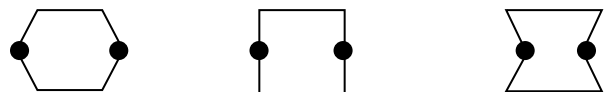


Figure 1: Adaptability of the honeycomb base panel forms

3 DESIGN TOOLS

Multidisciplinary teams of complementary competencies elaborated the above-mentioned projects. Collaboration was indispensable but likely complicated because each sector of competence used its own tools and software.

For an integrated design process to be optimal, a simple way of including all of these working tools must be found. As there cannot be only one main common interface because of the specificities of every single competence, a solution based on the file type and transfer for one interface to another must be found. Still, when developing collectively an initial design, the transfers between different software generates time consuming problems.

Some consider BIM (Building Information Modeling) software as the key and tool for assembling all building trades in one location. However, these tools lack the design flexibility necessary for use in the early steps of design without limiting formal explorations. Thus, it is only once the design is well advanced the BIM software becomes truly worthwhile, in our opinion.

Given that the architect controls the induction of a project, it seems only natural to question ourselves more specifically on the versatility of his/her design tools and on how it would be possible to complement them with the other trades. We tried here to optimize and simplify the design process of the architect through the use of a single tool for integrating structural and manufacturing notions into the research design process. For that we used the 3D software *Rhinoceros* [10] and its parametric modelling plug-in *Grasshopper* [11] in a perpetual iterative feedback process.

While working on his own software, the architect can, through the *Grasshopper* plug-in, integrate and obtain a wide variety of information on the structure under development: total volume of materials, building dimensions, panel sizes, structural analysis, joinery details, all of this without having to navigate from software to software to “test” early sketches or to wait for a colleague to go over formal hypotheses. Everything is done rapidly and simultaneously. Better yet, this plug-in can generate results comparable and compatible with those generated by software in other fields at the time when the advanced design will require more refined data.

As shown in Figure 2, the full design process is performed using the *Rhinoceros* 3D modelling software, which is the overall graphic interface and, in our case, the space from where the parametrically generated 3D model of the structure will be able to be exported to external software.

The 3D model is developed within the *Grasshopper* plug-in (editor of graphic algorithm for parametric geometric data management) using a wide array of functions and parameters. The additional plug-ins available in *Grasshopper* will make it possible to generate our panel generative algorithm and to integrate in it structural analysis and joinery specifications.

Developed by a multidisciplinary team of architects and structural engineers, *Karamba* is widely used world-wide for the creation of experimental research structures. In our case, it provided a primary structural analysis at the early formal exploratory stages. In the more advanced stages, it provides quantifiable and comparable results when used with software like RFEM [14] which takes the CLT into account in the finite element structure analyses.

The manufacturing component was also duly considered. There was a need to readily communicate and share with one of the major project collaborators, the *Chantiers Chibougamau*, in order to validate with them the structural and fabrication hypotheses taking into account available panels and manufacturing plant limitations. The *Rhinoceros* interface allowed exportation of files in a format compatible with *Cadwork* [15], leading 3D-CAD/CAM software for all fields of timber construction, often used by this company.

A final fabrication plug-in, *Woodpecker* [16], developed by *LIGNOCAM* [17], software for the import and interpretation of machining data from files in BTL format for transfer to CNC machines and to the manufacturing stage, allows us to complete the digital design-fabrication cycle by generating the BTL cutting files. In a research and development context, even though detailed plans are not available for the building as a whole, there is the capability to readily and promptly manufacture test components or small-scale models for structural or quality control assessments.

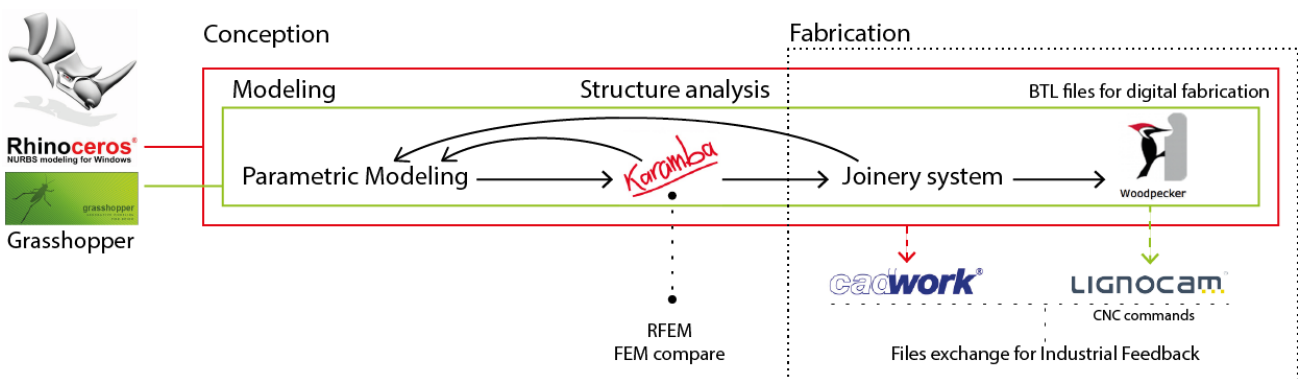


Figure 2: Design process software workflow

For the structural analysis, we used the *Karamba* [12] plug-in in the *Grasshopper* interface, a tool of parametric engineering using a finite element method (FEM). Since the plug-in is not intended for wood panels, we had to create a virtual material equivalent of a five-layer (11-mm thick) CLT panels produced by the Canadian CLT manufacturer *Chantiers Chibougamau* [13], to obtain the Von Mises stress value of the structure.

4 INTEGRATED DESIGN PROCESS

4.1 Design development

From the early stage of the digital design process, it was necessary to develop a basic concept that was structurally accurate and compatible with the manufacturing process. The “form finding” stage is therefore critical in the design of a complex geometrical structure. Because panel-suitable surfaces to be used as a roof shell have been studied the most, they can be more readily generated, with some limitations. The challenge is greater when trying to create a multifunctional surface, which is our purpose in this project exploring the concept of panelization in a large-scale assembly. Unfortunately, not all surfaces are appropriate for panelization.

The research result is a free-form inhabited roof of 3000 m². The design process led to a feasible structure by including structural principles into the form generation parametric model. We generated a basic pattern for the panel design and then applied loads on them to deform the planar pattern into a catenary 3D structure. Our approach thus differs from the traditional one where a surface is chosen and then divided into panels. We combined the surface “design” with the tessellation process to streamline and increase the efficiency of the structure generated. This represents a progress in the types of structures possible with a generative system. There was also an intent to ease the work of architects by limiting as much as possible the use of complex mathematical form notions [18]; we therefore used all the *Grasshopper* “form generation” plug-ins that include these principles in their code.

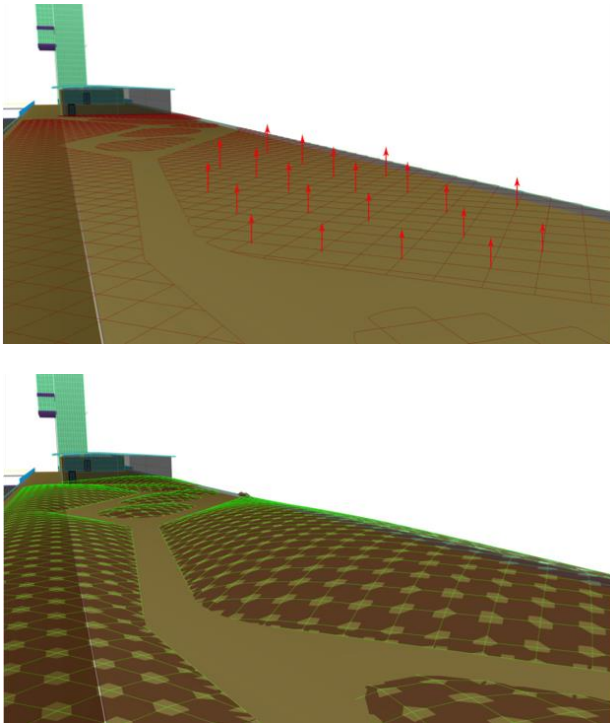


Figure 3: Force applied to a basic pattern to generate the surface to be panelized

Physical algorithms were then applied to achieve the flatness of panels. Except for a small amount of basic *Python* [19] programming in *Grasshopper*, the entire algorithm is executed with the *Grasshopper*’s plug-in. Following our experiments with the tools, we proved that anyone slightly familiar with them could generate a plausible free-form structure with CLT panels and thus met our goal of keeping the design of such structures as accessible as possible. Obviously, some knowledge of the software is needed and several formal enquiries have been made to achieve the results. The details and results of those enquiries will not be developed further here as we prefer, rather, to highlight the integrated structural and fabrication solutions and results.

For the first stage design proposition, we applied the structural analysis to validate the architectural structural form. These initial analyses allowed us to quickly identify the major structural deformations and stress distribution associated with them. They made it possible to readily discard some concepts and to identify two that offered a structural response satisfactory enough to warrant further development. The two propositions were made using design principles similar to those described earlier.

For the second stage, we worked on smaller parts of the model to develop a more precise structure analysis of the structure and we included the parametric modelling details of the joinery system for each panel.

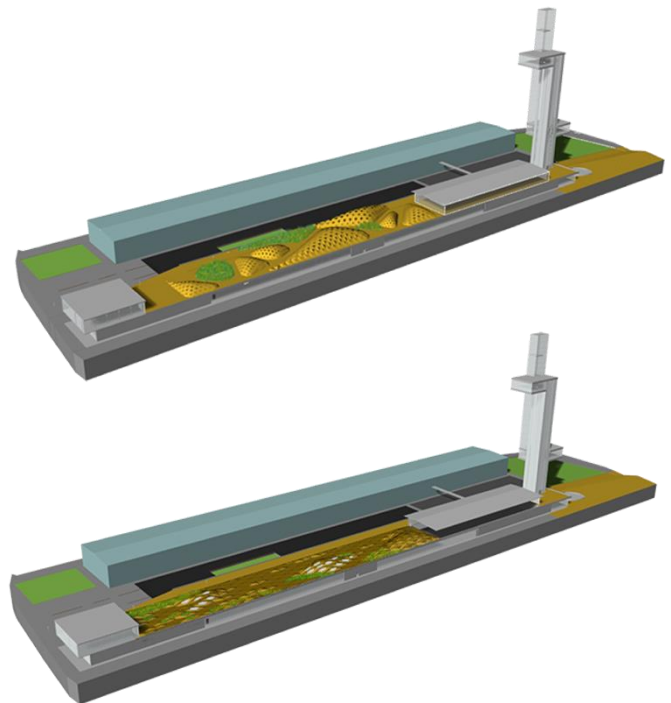


Figure 4: The two propositions offering the best preliminary structural performance

4.2 Structural Analysis

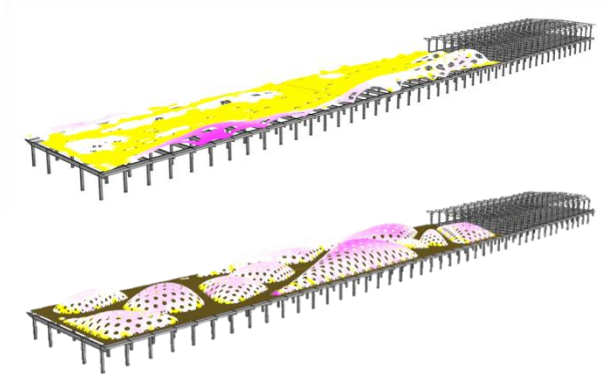


Figure 5: Deformation studies of the initial analysis for the two concepts. The importance of the deformation goes to yellow to pink, pink being the biggest deformation.

As mentioned previously, we started with an initial structural analysis of our first draft structures. For that analysis, we used the basic definition algorithm of a uniform shell structure, as supported by *Karamba* FEM software. The purpose was to obtain a visual representation of the deformations (see Figure 5) of the conceptual structure, while recognizing the limitations of this simplified model. To launch a more precise analysis would have slowed down the design process, which should be very interactive at this stage.

The correction of these limitations and a more precise structural analysis were executed after the two constructive design propositions were selected. This second analysis allowed to generate more accurate data to be used in the algorithm of the design of the joinery system and to optimise the number and the pattern of the panels.

The first issue to be addressed was that wood is an anisotropic material whereas *Karamba* only supports isotropic ones. Also, the characteristics of the default wood material in the software were inappropriate to accurately model a CLT panel. To overcome this problem, we created an hypothetical virtual isotropic material equivalent to five-layer (131-mm thick) CLT panels produced by the *Chantiers Chibougama*, to obtain the Von Mises stress value of the structure. We used the values of the Young's modulus $E = 7.800 \text{ MPa}$ [20] and the Poisson's ratio $\nu = 0.314$, which were determined in collaboration with the manufacturer. This approach has been used in the past [20] in a simpler structure. We were aware that in this specific complex structure it may not give perfectly accurate results. Therefore, to minimize the effect of the limits of this approach, we managed to align the strong axis of the panels parallel with the direction of the force transfer.

The second issue we faced was that the default setting for connections between panels in the shell structural analysis were considered rigid in *Karamba*, whereas the joinery techniques used with wood structures are generally pinned joints. Therefore, we created a virtual spring connection, as proposed by the developer of the plug-in

[21]. In our 3D model, we introduced thin strips of shell elements of a stiff material with a very small cross-section inserted between the panels. The effectiveness of this approach was confirmed by observing that the bending moments calculated in panels were less than $0.01\text{e-}10 \text{ kN-m}$ and no illogical deformations were observed.

Finally, the forces considered in the analysis were the self-weight load case and a combined dead and live loads of 4.8 kPa , which would allow accommodating a green-roof, pedestrian circulation and light maintenance vehicles. No detailed lateral load structural analysis was performed at this stage of the research, except for some simple checks to evaluate the global reaction of the structure, which produced satisfactory results.

Because of the workarounds applied in the modelling, we do not consider our analysis to be totally accurate, but it was sufficiently meaningful (see Figure 6) to allow us using the data to optimize the size, number and orientation of the panels, and as input to our joinery system algorithm.

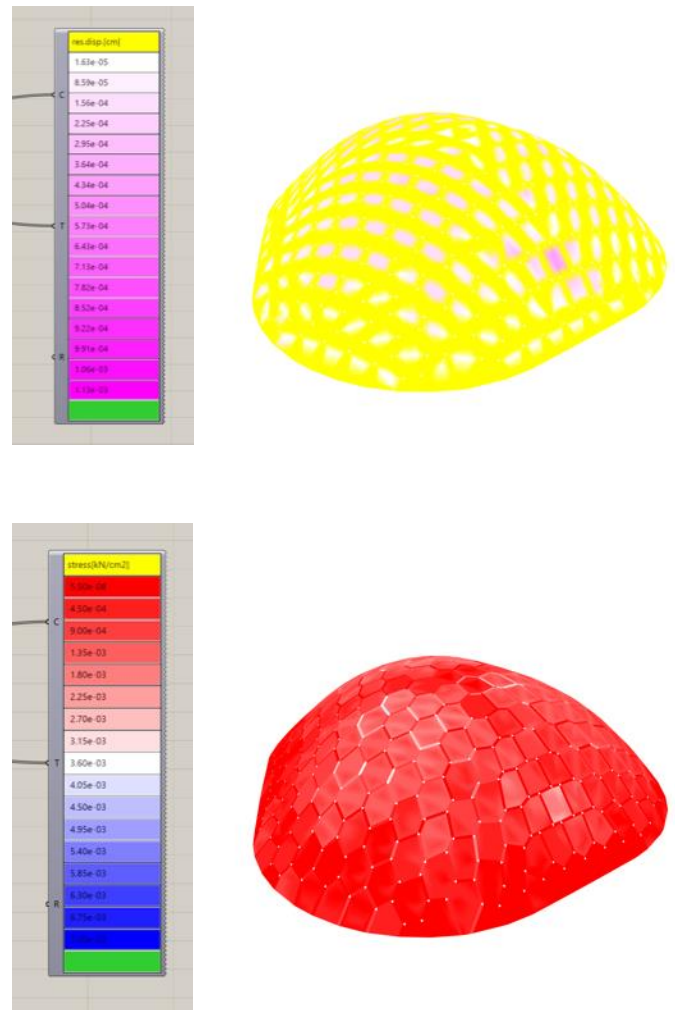


Figure 6: Top; deformation, Bottom; Von-Mises stress distribution.

4.3 Joinery System and Manufacturing

The joinery system is a critical part in non-standard CLT structures because it can easily become costly and time consuming even if it is planned from the beginning of the project. In CLT construction, the traditional and commercial joinery system could not work in a non-orthogonal configuration.

For a customized form, we need a customized solution. The highly engineered joinery system between the panels will eventually transfer positive and negative axial forces, lateral forces and bending moments [6]. For a small project, custom-made metal plates are often used for connections between panels [22]. Their small number and simplicity make them a reasonable and economic choice. However, for the structures with a large number of panels, this solution becomes irrelevant as the number of custom-made plates makes it prohibitive.

Two alternative solutions have been found. The first, developed by TU Graz [6], is the “sewed” joint, which connects CLT panels with glued-in laminated veneer lumber (LVL) cleats inserted into CNC-milled slots. If the CNC milling time is limited, the gluing time is considerable and requires high precision, controlled environment and complex falsework. Even if this all wood joinery system by its efficiency and aesthetic is compelling for our structure, it seems inappropriate if we consider the final on-site assembly of the project.



Figure 7: Dovetail detail model – Rendering in Rhinoceros

The second solution is a dovetail joint, which in this case was considered more appropriate even if it implies more CNC time. This joinery system, as shown in Figure 7, has been used successfully to connect the panels of various research pavilions. Looking at the examples using common plywood in an origami structure [23], LVL in the Laga Exhibition Hall [7] and CLT in a IBOIS research pavilion [20], we were now more aware of the possibilities and limitations of this joinery system. This system is easy to assemble on-site and it requires limited falsework as seen in the Laga Exhibition Hall construction process. The time consuming part is, as mentioned, the manufacturing where many dovetail joints necessitate multiple machining operations. However, test iterations conducted with the results of the structural analysis can guide the joint distribution to control the positioning and the density of the dovetail joints in the parametric model. This allows us to optimize the number of panels,

significantly reducing the number of dovetail joints and increasing the structural efficiency of the model.

To enhance the efficiency of the design process up to manufacture it was logical to automatically generate the joinery system and to integrate it into the iterative design process. First, we needed to generate the thickness of the panels, because our basic generative script produced a surface without thickness. This step, although seemingly easy, was not so, since each side of the panel needed to be “extruded” in relation to its adjacent panel, so that the panels never overlay (see Figure 8). We offset (p') the planes of the panels (p) to obtain the intersection lines and generate the intersection plane between two side panels (P). This plane will define the angle cut of the dovetail joint.

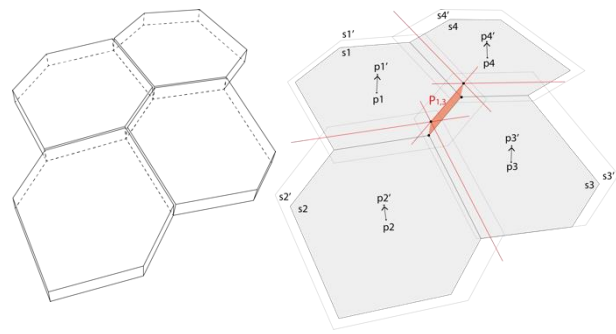


Figure 8: Left: gap in a standard offset panel. Right: Intersection plane ($P_{1,3}$) obtained by the intersection of the offsets (p') of the sub-surface panels' (s) plane (p)

We chose to work with a basic design for the dovetail joint. Our most important concern was to control the CNC machine time by controlling the robot's number of “movements”. The basic design suggests that we obtain a joint geometry, that meets Three-Degree-of-Freedom (3DOF) criterion [23], which means that joined parts can move in three directions. In practice, the design of the project and the fact that the panels will always be clamped between other panels, meant that sophisticated 1DOF joints would not be necessary. Moreover, a 1DOF geometry would have necessitated more movements from the machine. We would have needed to calculate the traction resistance of the tails and the assembly would have necessitated one direction of insertion, which would have been a complication in the final assembly of the project.

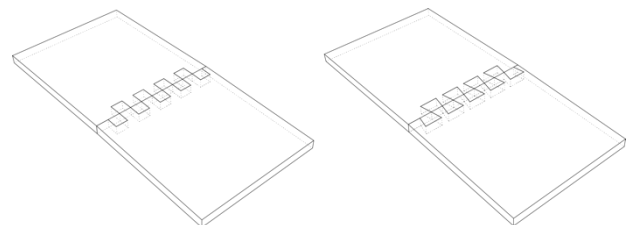


Figure 9: Left; 3DOF (basic design), right; 1DOF

Therefore, to limit the movement, and increase the rigidity of the system we added structural screws similar to the

ones used in the Laga Exhibition Hall. The joinery system would take the in-plane shear forces parallel to the edges [23] and the in-plane compressive forces [23], while the fasteners would be taken the out-of-plane shear forces. Fortunately, the structural stability of our model is mostly based on the distributed in-plane shear forces along the panel edges [24-bagger 2010]

Our basic model of dovetail joint, in contrast with the Laga Exhibition Hall, is not as smooth on the outside where no cuts were planned to obtain a flush fitting edge, considering that an envelope would be installed to make roof finish. The inside finish would be assumed by the structure as it is.



Figure 10: Left; with finishing milling, right; with no milling

To ensure a proper manufacturing process, we worked closely with *Chantiers Chibougama*. Once the design was approved by the manufacturer, we completed and enhanced the design of the dovetail joint according to the specifications of the milling cutter. For example, one of the possible problems could have been the angle of cut: if it is too large, the cutting machine can be jammed by the material itself. Rounded corners of 5-mm diameter were included in the dovetail joint parameter. We also added a 1-mm gap between the panels at the joints and engraved the number of the panel and the arrow of the strong axis direction as good assembly practices. Due to the small size of the panels, we also decided to use trimming waste from other projects and added a nesting algorithm to save material.

Finally, we had all the necessary elements to generate the BTL files with the previously mentioned *Woodpecker* plug-in that would serve as input to the CNC machine for the manufacturing of each panel, making possible the easy mass customization of our structure.

5 PRACTICAL IMPLICATIONS

There is yet very little research in the Province of Quebec on integrated digital architecture and even less on digital manufacturing. Thus to ease the introduction and deployment of these techniques, we wanted to approach the design cycle in the simplest fashion possible with the means available.

We have thus been able not only to demonstrate to professional architects, engineers and manufacturers in the wood construction field of Quebec what can be done with this material and what constructive opportunities are within reach, but also to streamline the digital design tools and processes while integrating all the trade competencies under a single modelling and design interface and working collectively on the pre-proposal for the project.

We also demonstrated that custom designs can be easily accessible. In fact, when the manufacturer received the first models, he was surprised that it was possible to modify the model and automatically regenerate the associated joinery specifications. All this was in addition to the capacity to readily export a model to different software for a full structural analysis and manufacture.

The next steps to reinforce the modeling process before considering a future construction will be to compare the structural analysis results yielded by our iterative cycle with the results of the analysis from software integrating the multilayer characteristics of CLT. Even more interesting will be the comparison of these results to those from experimental tests on small-scale prototypes. Furthermore, more research will be needed on the joinery system, to ensure compliance with building codes and gain wide acceptance in the CLT builders' community.

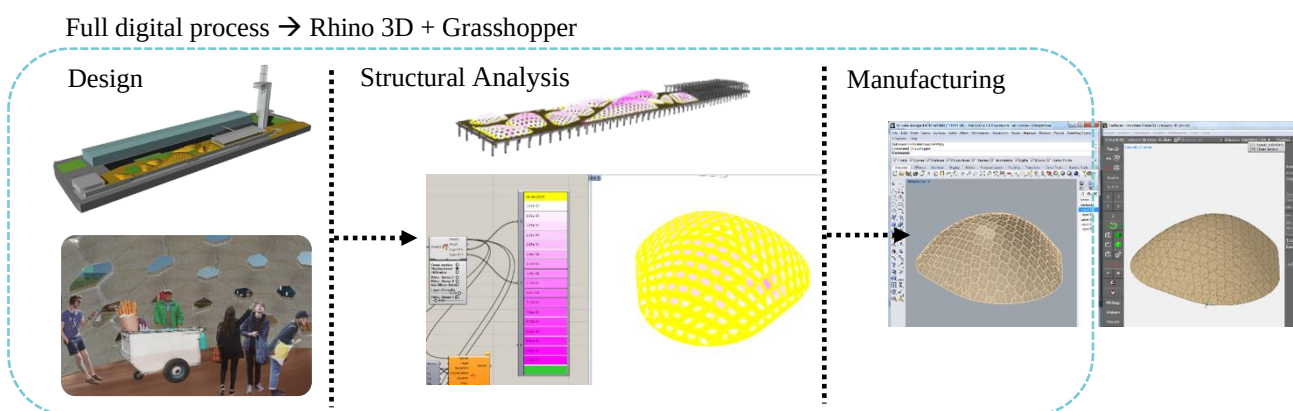


Figure11 :Graphic summary of the design integrated process of the structure

6 CONCLUSIONS

The research presented in this paper describes how an integrated design process promotes the use of CLT in a wide range of projects, using, as an example, tessellation as an architectural and structural design approach.

By informing the design with structural and manufacturing notions, the digital design process combined with the precision of digital fabrication enables the architect to propose innovative buildable solutions while managing numerous factors and constraints in the process. The resulting ability to communicate and closely work with other fields enables the design team to have a distinct influence on the efficiency, cost and esthetics of the project.

Applying these integrated design principles to a concrete project has crumbled some of the barriers that existed between fields. Multiple players of the industry were able to witness the benefits of using a collaborative approach for exploring and executing complex customized wood-based projects in Québec.

7 ACKNOWLEDGEMENT

This research was sponsored by the Canadian Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) industrial research chair on ecoresponsible construction in wood (CIRCERB) [25] at Laval University in Quebec City, in the province of Quebec and was done in collaboration with the wood industry partners. The mandate of the Chair is to develop wood-based ecoresponsible alternatives to reduce the environmental footprint of buildings. The project for the case study was proposed and designed in collaboration with Provencher Roy Associés Architectes.

REFERENCES

- [1] H. Buri and Y. Weinand. ORIGAMI - Folded Plate Structures, Architecture. In *10th World Conference on Timber Engineering*, 2008.
- [2] J.Meyer, G. Duchanois and J-C Bignon. The fold, a tool of design architectural structures: Development of a structural and formal language in wood material. In *Global Civil Engineering & Applied Science Conference*, 2014.
- [3] Schmid, J.-P. Koppitz and A.Thurik. Neue Konzepte im Holzbau mit Furnierschichtholz – Die Holztragkonstruktion des Metropol Parasol in Sevilla. *Bautechnik* 88(10):707-714, 2011.
- [4] I. Stotz, G. Gouaty and Y.Weinand. Iterative Geometric Design for Architecture. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 50(1):11-20, 2009.
- [5] M. Tsigkari. Tessellation of arbitrarily shaped objects. M.S. Thesis of science in Adaptive Architecture and Computation. University of London, 2006.
- [6] H. Schimek, A. Meisel and T. Bogenperger. On Connecting Panels of Freeform Building Envelopes. In *5th International Conference Proceedings of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design*, 171-178, 2010.
- [7] T. Schwinn, O. Krieg, A. Menges. Behavioral Strategies: Synthesizing Design Computation and Robotic Fabrication of Lightweight Timber Plate Structures. In *34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 177-188, 2014.
- [8] M. Stavric, U. Hirschberg and A. Wiltsche. Spatializing Planar Ornaments: Towards esthetic control in segmenting and building curved surfaces. In *FUTURE CITIES - 28th eCAADe Conference Proceedings*, 437-443, 2010.
- [9] E. Calderon, H.Schimek and A. Wiltsche. Seeking Performative Beauty. In *Integration through Computation: Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)*, 300-307, 2011.
- [10] Robert McNeel & Associates. Rhinoceros 5. <http://www.rhino3d.com/>
- [11] Robert McNeel & Associates. Grasshopper 0.9.0076. <http://www.grasshopper3d.com/>
- [12] C. Preisinger. Karamba. <http://www.karamba3d.com>
- [13] Chantiers Chibougama, <http://chibou.com/en>.
- [14] Dlubal Software Inc. RFEM – FEM Structural Analysis Software. <https://www.dlubal.com/en>
- [15] Cadwork Group. Cadwork v.22. <http://www.cadwork.com/cwen/Home>
- [16] J. Roulier. Lignocam. <http://www.lignocam.com/>
- [17] Lignocam. Woodpecker. <http://www.lignocam.com/fr/wood-pecker>
- [18] W. Wang and Y Liu. A Note on Planar Hexagonal Meshes. *Nonlinear Computational Geometry*, 151:221-233,2009.
- [19] Robert McNeel & Associates. GhPython. <http://www.food4rhino.com/project/ghpython?ufh>
- [20] C. Robeller, S. S. Nabaei, and Y. Weinand. Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT. In W.McGee and M. Ponce de Leon D. B, editors, *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*, pages 67–81. Springer International Publishing, Vienna/New York, 2014.
- [21] Grasshopper3d. Mesh joints for wood material. http://www.grasshopper3d.com/group/karamba/forum/topics/mesh-joints-for-wood-material?xg_source=activity
- [22] H.U. Buri. Origami – Folded Plate Structures. PhD diss, École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL:261-273. 2010
- [23] C. Robeller, A. Stitic, P. Mayencourt and Y. Weinand. Interlocking Folded Plate – Integrated Mechanical Attachment for Structural Timber Panels. In *Advances in Architectural Geometry 2014*, 281-294, 2015.
- [24] A. Bagger. Plate Shell Structures of Glass Studies Leading to Guidelines for Structural Design. PhD diss., Technical University of Denmark, 2010
- [25] Université Laval, Chaire Industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois. <https://circeb.chaire.ulaval.ca/>

Annexe 3 – Propriétés Nordic X-Lam

Nordic Structure Bois, Note technique S21 - Calcul aux états limites (CAN) (2016)

CARACTÉRISTIQUES

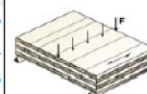
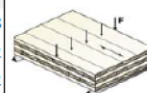
Propriétés des matériaux

Classe de contraintes	E1	
Orientation	Longitudinal	Transversal
Groupe d'essences	É-P-S	É-P-S
Classe de résistances	1950F _b MSR	No. 3/Stud
Flexion à la fibre extrême, f_b (MPa)	28,2	7,0
Cisaillement longitudinal, f_v (MPa)	1,5	1,5
Cisaillement rotatif, f_r (MPa)	0,5	0,5
Compression parallèle au fil, f_c (MPa)	19,3	9,0
Compression perp. au fil, f_{cp} (MPa)	5,3	5,3
Traction parallèle au fil, f_t (MPa)	15,4	3,2
Module d'élasticité, E_0 (MPa)	11 700	9 000
Module de cisaillement, G_0 (MPa)	731	563
Module de cisaillement rotatif, G_s (MPa)	73,1	56,3

Propriétés, Nordic X-Lam

RÉSISTANCES PONDÉRÉES ET RIGIDITÉS - dalles de plancher/toit

Produit	Nordic X-Lam							
Utilisation	Dalles de plancher et de toit							
Classes d'aspect	Industriel ou architectural							
Classe de contraintes	E1 (L 1950F _b et T No. 3/Stud)							
Combinaisons	78-3s	105-3s	131-5s	175-5s	220-7s	244-7s	244-7l	314-9l
Flexion selon l'axe longitudinal								
Moment de flexion, $M_{r,0}$ (10 ⁶ N-mm/m)	21	38	49	87	134	154	199	308
Cisaillement, $V_{r,0}$ (10 ³ N/m)	23	30	31	42	51	53	68	82
Rigidité en flexion, $EI_{eff,0}$ (10 ⁹ N-mm ² /m)	452	1081	1735	4140	8019	10240	13194	26272
Rigidité au cisaillement, $GA_{eff,0}$ (10 ⁶ N/m)	5,4	7,3	11	15	22	22	31	37
Flexion selon l'axe transversal								
Moment de flexion, $M_{r,90}$ (10 ⁶ N-mm/m)	0,76	1,3	6,4	11	18	42	11	25
Cisaillement, $V_{r,90}$ (10 ³ N/m)	8,0	10	23	30	33	115	30	41
Rigidité en flexion, $EI_{eff,90}$ (10 ⁹ N-mm ² /m)	14	32	363	831	1884	3163	831	3163
Rigidité au cisaillement, $GA_{eff,90}$ (10 ⁶ N/m)	6,9	9,0	14	18	22	28	28	37



(1) Les valeurs de ce tableau sont basées sur une condition d'utilisation en milieu sec et une durée d'application de la charge normale. Les valeurs de résistance pondérée, M_r et V_r , incluent le coefficient de résistance, ϕ .

(2) Les éléments de flexion Nordic X-Lam sont symétriques selon l'épaisseur de la membrure (combinaisons balancées).

(3) Les valeurs de compression perpendiculaire au fil doivent être basées sur le bois E-P-S No. 3/Stud ($f_{cp} = 5,3$ MPa).

(4) Les propriétés tabulées ont été calculées analytiquement en utilisant le modèle d'analogie de cisaillement* et validées par des essais (la résistance au moment de flexion selon l'axe fort a de plus été réduite par un facteur de 0,85). Le calcul des produits en bois lamellé-croisé doit être conforme à la norme CSA O86-09 et le Manuel sur le bois lamellé-croisé.

(5) La densité moyenne pour le calcul des attaches, G , est de 0,42. Le poids des membrures doit être basé sur une masse volumique de 515 kg/m³ (5,1 kN/m³).

* Les produits Nordic X-Lam sont certifiés par l'APA (rapport de produit PR-L306C), selon la norme ANSI/APA PRG 320.

COMPOSITION DES PANNEAUX

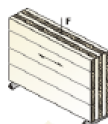
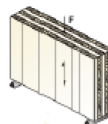
Produit	Composition (L = longitudinale, T = transversale)	Nombre de plis	Épaisseur		Poids (kPa)
			(mm)	(po)	
78-3s	26L - 27T - 26L	3	78	3 1/8	0,40
105-3s	35L - 35T - 35L	3	104	4 1/8	0,53
131-5s	26L - 27T - 26L - 27T - 26L	5	131	5 1/8	0,67
175-5s	35L - 35T - 35L - 35T - 35L	5	175	6 7/8	0,89
220-7s	35L - 27T - 35L - 27T - 35L - 27T - 35L	7	220	8 5/8	1,12
244-7l	35L - 35L - 35T - 35L - 35T - 35L - 35L	7	244	9 5/8	1,24
314-9l	35L - 35L - 35T - 35L - 35T - 35L - 35T - 35L - 35L	9	314	12 3/8	1,60

Note : La désignation réfère à l'épaisseur du panneau (en mm), au nombre de plis et à la combinaison ("s" pour les plis perpendiculaires standard, et "l" pour les plis extérieurs parallèles doubles).

Propriétés, Nordic X-Lam (suite)

RÉSISTANCES PONDÉRÉES ET RIGIDITÉS - murs et linteaux

Produit	Nordic X-Lam							
Utilisation	Murs et linteaux							
Classes d'aspect	Industriel ou architectural							
Classe de contraintes	E1 (L 1950F ₀ et T No. 3/Stud)							
Combinaisons	78-3s	105-3s	131-5s	175-5s	220-7s	244-7s	244-7l	314-9l
Charges selon l'axe fort								
Compression, $P_{r,0}$ (10^3 N/m)	797	1078	1195	1618	2157	2157	2696	3235
Traction, $T_{r,0}$ (10^3 N/m)	715	968	1073	1452	1936	1936	2420	2904
Aire effective, A_{eff} (10^3 mm ² /m)	52	70	77	105	140	140	175	210
Inertie effective, I_{eff} (10^6 mm ⁴ /m)	39	92	147	351	680	866	1125	2236
Rayon de giration, r_{eff} (mm/m)	27	36	44	58	70	79	80	103
Cisaillement en plan, $V_{r,0}$ (10^3 N/m)	86	95	168	190	257	284	284	379
Charges selon l'axe faible								
Compression, $P_{r,90}$ (10^3 N/m)	193	251	386	503	579	754	503	754
Traction, $T_{r,90}$ (10^3 N/m)	77	101	154	201	232	302	201	302
Aire effective, A_{eff} (10^3 mm ² /m)	27	35	54	70	80	105	70	105
Inertie effective, I_{eff} (10^6 mm ⁴ /m)	1,6	3,5	40	92	209	351	92	351
Rayon de giration, r_{eff} (mm/m)	7,7	10	27	36	51	58	36	58
Cisaillement en plan, $V_{r,90}$ (10^3 N/m)	86	95	168	190	257	284	284	379



- (1) Les valeurs de ce tableau sont basées sur une condition d'utilisation en milieu sec et une durée d'application de la charge normale. Les valeurs de résistance pondérée, P_r , T_r et V_r , incluent le coefficient de résistance, ϕ .
- (2) Les éléments de flexion Nordic X-Lam sont symétriques selon l'épaisseur de la membrure (combinaisons balancées).
- (3) Les valeurs de résistance en compression parallèle au fil, P_r , doivent être ajustées par les coefficients de dimensions et d'élancement, K_{2c} et K_c , respectivement, tels que définis dans la norme CSA O86-09.
- (4) Les valeurs de compression perpendiculaire au fil sont basées sur le bois E-P-S No. 3/Stud ($f_{cp} = 5,3$ MPa).
- (5) La résistance et la rigidité au moment de flexion doivent être basées sur le bois É-P-S No. 3/Stud ($f_b = 7,0$ MPa, $E = 9000$ MPa) ou É-P-S MSR 1950Fb ($f_b = 28,2$ MPa, $E = 11\,700$ MPa), pour un panneau vertical ou horizontal, respectivement, avec une section effective basée sur les lamelles perpendiculaires à la charge.
- (6) Les résistances au cisaillement en plan, V_r , sont indiquées en kN/m de hauteur de l'élément. Ces valeurs sont basées sur l'étude de TUGraz et les résistances spécifiées $f_{v,CLT-X} = 5,0$ MPa et $f_{t,CLT-X} = 2,5$ MPa, ajustées avec les facteurs suivants: $k_{mod} = 0,8$ et $\gamma_M = 1,25$. (Réf. B5Phandbuch, TUGraz)
- (7) Le calcul des produits en bois lamellé-croisé doit être conforme à la norme CSA O86-09 et au Manuel sur le bois lamellé-croisé.
- (8) La densité moyenne pour le calcul des attaches, G, est de 0,42. Le poids des membrures doit être basé sur une masse volumique de 515 kg/m³ (5,1 kN/m³).

* Les produits Nordic X-Lam sont certifiés par l'APA (rapport de produit PR-L306C), selon la norme ANSI/APA PRG 320.

Nordic Structures Bois, Note technique S22 - Calcul aux états limites (2016)

Données techniques, Nordic X-Lam

PRODUITS NORDIC X-LAM

Construction	plis croisés; classe de contraintes « E1 » 3, 5, 7 et 9 plis
Dimensions	largeur maximale de 2440 mm (8 pieds), incluant les joints à mi-bois de 64 mm longueurs jusqu'à 19,5 mètres (64 pieds) épaisseurs de 78 à 381 mm (3 à 15 po.); standard 78 (3-1/8), 105 (4-1/8), 131 (5-1/8), 175 (6-7/8), 220 (8-5/8), 244 (9-5/8), and 314 mm (12-3/8 po.)
Profil du joint	joint à mi-bois de 64 mm (2-1/2 po.), des deux côtés
Classe d'aspect	industriel (architectural sur demande)
Certification	rapport de produit APA PR-L306C; produits certifiés FSC disponibles
Essences de bois	épinette-pin-sapin (É-P-S)
Lamelles	lamelles longitudinales 1950F ₀ MSR, transversales No. 3/Stud
Adhésifs	adhésifs résistants aux intempéries, sans formaldéhyde faible quantité de composés organiques volatils (COV)
Masse volumique	± 515 kg/m ³ , épinette-pin-sapin
Teneur en humidité	12 ± 2 %
Changements dimensionnels	longitudinal et transversal : 0,01% par % de changement de la teneur en humidité en épaisseur : 0,20% par % de changement de la teneur en humidité
Résistance thermique	RSI = 0,83 m ² °C/W, R = 4,7 pi ² h °F/BTU par 100 mm
Résistance acoustique	le matériau bois a d'excellentes propriétés d'atténuation du son; les indices de transmission du son (ITS) et d'isolation d'impact (IIC) pour des compositions types sont montrés ci-dessous - plus d'information disponible sur demande
Sécurité incendie	- la fonction de séparation au feu des assemblages avec panneaux CLT peut facilement être atteinte si les panneaux et les joints entre les panneaux sont efficacement scellés pour empêcher l'air ou les gaz chauds de pénétrer l'assemblage pendant l'exposition au feu - taux de combustion 0,65 mm / min.; voir les degrés de résistances au feu (DRF) - les indices de propagation de la flamme et de dégagement des fumées sont de 35 et 40, respectivement (rapport d'essais disponible sur demande).
Performance environnementale	- disponible fabriqué à partir de bois certifié provenant de forêts gérées durablement - séquestration à long terme du carbone absorbé par les arbres cultivés de façon durable - émissions de gaz à effet de serre beaucoup moins que plusieurs autres matériaux non ligneux - caractéristiques équivalentes ou meilleures que des systèmes équivalents en béton et en acier pour d'autres aspects de la performance environnementale tels que la performance thermique

Annexe 4 – Code Python Épaisseur et Joint en queue d'aronde

Code pour créer la surface en offset

```
import rhinoscriptsyntax as rs
import math as ma
import clr

"""
Création fonction de création du vecteur normal d'une surface selon
l'épaisseur désiré
Points = Liste des 6 points d'une surface
PointsI = Index des Point en P

Nrm = Normal des surfaces
NrmL = Normal en liste
Points = liste points par surface
PointsI= liste de l'index en P des points par surface
P = Liste Points
ISpP = Index des surfaces par Point
z = épaisseur murs
srf = surface en branche
srfl= surface en une seule liste
"""

def normadj(Nrm,NrmL,ISpP,PointsI,cnt):
    normadj = []
    isrf = ISpP.Branch(PointsI[cnt])
    if len(isrf) == 1:
        pass
    elif len(isrf) == 2:
        normadj.append(NrmL[isrf[0]])
        normadj.append(NrmL[isrf[1]])
    else:
        normadj.append(NrmL[isrf[0]])
        normadj.append(NrmL[isrf[1]])
        normadj.append(NrmL[isrf[2]])
    return normadj

def inormadj(ISpP,PointsI,cnt,x):
    isrf = []
    isrfx = ISpP.Branch(PointsI[cnt])
    for i in isrfx:
        isrf.append(i)
    isrf.remove(x)
    return isrf

cnt = 0
off = []
srfs = []
crv = []
plane = []
equal = []
equal2 =[]
for i in Points:
    test = (inormadj(ISpP,PointsI,cnt,x))
    if len(test)==2:
        N1=Nrm
        N2=NrmL[test[0]]
        N3=NrmL[test[1]]
```

Rapport-gratuit.com

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



```

        pln1 =
rs.PlaneFromNormal(rs.CopyObject(rs.AddPoint(i),rs.VectorScale(N1[0],z
)),N1[0])
        pln2 =
rs.PlaneFromNormal(rs.CopyObject(rs.AddPoint(i),rs.VectorScale(N2,z)),
N2)
        pln3 =
rs.PlaneFromNormal(rs.CopyObject(rs.AddPoint(i),rs.VectorScale(N3,z)),
N3)
        off.append(rs.IntersectPlanes(pln1,pln2,pln3))
    elif len(test) == 1:
        N1=Nrm
        N2=NrmL[test[0]]
        pln1 =
rs.PlaneFromNormal(rs.CopyObject(rs.AddPoint(i),rs.VectorScale(N1[0],z
)),N1[0])
        pln2 =
rs.PlaneFromNormal(rs.CopyObject(rs.AddPoint(i),rs.VectorScale(N2,z)),
N2)
        pln3 =
rs.PlaneFromPoints(i,rs.MoveObject(rs.AddPoint(i),[1,0,0]),rs.MoveObje
ct(rs.AddPoint(i),[0,1,0]))
        off.append(rs.IntersectPlanes(pln1,pln2,pln3))
    else:
        pass
    cnt=cnt+1

```

Code préparation des lignes guides pour le dessin des assemblages

```

import rhinoscriptsyntax as rs
import math as ma
import clr
#y = list des index des surfaces pour offset
((index1,index2),(index1,index2))
#x = list des courbes (list)
#z = liste des surfaces (list)

#rs.OffsetCurveOnSurface(curve id,srfce id,distance ou parameter)

a = []
b = []
c= []
#print y[0]
#a.append(len(y))
#a.append(y[0])
#try:
#    a.append(y[1])
#except:
#    a.append("oups")
#a.append(x[0])

try:
    a.append(rs.OffsetCurveOnSurface(x[0],y[0],u)[0])
except IndexError:
    pass
except:
    a.append("oups")
#a.append(rs.OffsetCurveOnSurface(x[0],y[0],u)[0])
print a
try:

```

```

        b.append(rs.OffsetCurveOnSurface(x[0],y[1],-u)[0])
except:
    pass

#a.append(rs.OffsetCurveOnSurface(x[0],y[0],u)[0])
"""
try:
    print y[1]
    b.append(rs.OffsetCurveOnSurface(x[0],y[1],u)[0])
except:
    print "oups"
    b.append("oups")
"""

```

Code de création des joints en queue d'aronde

```

import rhinoscriptsyntax as rs
import math as ma
import clr

#w = list lignes milieu pour end/start
#x = list des points lignes milieux
#y = list des points lignes cotes 1
#z = list des points lignes cotes 2

a = []
b = []
c = []
c.append(len(x))

if len(x)==2 or len(x) == 3:
    pass
elif len(z) == 0:
    pass
else:
    try:
        for i in range(0,len(x)):
            if i==0:
                a.append(x[i])
            elif i==1:
                a.append(x[i])
                a.append(y[i])
            elif i==len(x)-2 and i%2 == 0: #paire
                a.append(y[i])
                a.append(x[i])
            elif i==len(x)-2 and i%2 != 0: #impaire
                a.append(z[i])
                a.append(x[i])
            elif i == len(x)-1:
                c.append(len(x)-1)
                a.append(rs.AddPoint(rs.CurveEndPoint(w)))
            elif i%2 == 0:
                a.append(y[i])
                a.append(x[i])
                a.append(z[i])
            elif i%2 != 0:
                a.append(z[i])

```

```

        a.append(x[i])
        a.append(y[i])
    else:
        pass
except:
    pass
try:
    b.append(rs.AddPolyline(a))
except:
    b.append(rs.AddLine(rs.CurveStartPoint(w), rs.CurveEndPoint(w)))

```