

Les structures architecturales plissées en panneaux de bois

Conception numérique et fabrication robotique

Julien Meyer
Laboratoire de recherche MAP – CRAI
École d'Architecture de Nancy
Nancy, France



Gilles Duchanois
Laboratoire de recherche MAP – CRAI
École d'Architecture de Nancy
Nancy, France



Jean-Claude Bignon
Laboratoire de recherche MAP – CRAI
École d'Architecture de Nancy
Nancy, France



Les structures architecturales plissées en panneaux de bois

Conception numérique et fabrication robotique

1. Introduction

Le plissage fait partie des nouveaux vocabulaires qui irriguent aujourd'hui le monde de l'architecture. Au-delà d'un simple formalisme, il apporte une véritable tectonique architecturale : il conduit à une évidence visuelle superposant, à la fois, la franchise d'un concept constructif et la clarté d'une forme plastique [1].

Le plissage est une géométrie « multidimensionnelle ». Il répond à de nombreuses thématiques qui peuvent émerger en situation de conception et de réalisation. Elles sont autant de l'ordre du sensoriel porté par une dimension spatiale ou plastique, que constructive regroupant notamment la dimension structurale et celle des ambiances (acoustique, thermique...).

Ainsi, le plissage doit être considéré comme un langage au vocabulaire riche et complexe [2]. Dans nos travaux de recherche et particulièrement dans l'expérience menée, nous avons souhaité comprendre les mécanismes du plissage pour en maîtriser l'expression afin de la retranscrire dans un processus de conception.

Les pratiques du numérique qui se développent aujourd'hui dans le champ de la conception architecturale et dans celui de la fabrication viennent instrumenter cette approche. La chaîne chronologique, de la conception à la fabrication, n'est plus linéaire, mais devient une série d'évolutions simultanées et de variations possibles où les divers enjeux du pli se fécondent [3].

On notera enfin que l'émergence de nouveaux matériaux ou de nouveaux composants comme les panneaux contrecollés ou lamifiés en bois, et les technicités qui leur sont liées, rendent désormais possible ce continuum de (dé)formation de la forme et de sa virtualisation en le confrontant également aux variabilités potentielles des outils de production grâce à la productique [4].

C'est dans ce contexte général de mutation des pratiques et d'évolution des concepts architecturaux et productifs que nous avons développé notre travail. Celui-ci s'attache à aborder de manière limitée le pli dans sa dimension morpho-géométrique en apportant un regard particulier sur l'intégration de la dimension structurale comme facteur de modulation.

Nous abordons également le pli dans sa dimension numérique par une approche paramétrique qui permet une modélisation adaptative dans le continuum conception-fabrication. Nous rendons compte enfin, d'une expérience qui a conduit à la production d'une enveloppe structurale plissée en panneaux de bois lamifié.

2. Le pli

2.1. Le pli : un système morphologique structural

D'une manière générale, le pli d'une surface matérielle apporte de la rigidité en minimisant la matière employée. On retrouve cette logique de résistance de la matière par la forme à l'œuvre dans le domaine des technologies par exemple, celle de la tôle emboutie, principe utilisé dans de nombreux secteurs d'activité, comme l'automobile, le mobilier urbain ou encore l'aéronautique.

Dans le domaine de l'architecture, le pli offre de nombreuses possibilités morphologiques, mais aussi structurales. Il apporte une raideur et une inertie nécessaires à la stabilité structurale des ouvrages qui l'utilisent. De plus, par son principe, le pli présente un rapport efficient entre la surface projetée et la quantité de matière requise pour sa réalisation.

2.2. La matière pliée

D'un point de vue physique, chaque matériau peut théoriquement être plié. Mais du comportement visqueux (introduisant la notion de temps) au comportement plastique du matériau, le pliage entraîne des contraintes propres à chaque matériau. On peut classer un pli par continuité ou discontinuité de la matière.

La matière continue. Le pli est communément associé à la déformation d'une surface matérielle de faible épaisseur avec un rayon de courbure de petite dimension au regard de l'épaisseur de la matière (feuilles métalliques, de papier, tissu...), mais il peut être également obtenu par moulage dont la particularité est marquée par l'absence de sollicitations extérieures sur la matière. Contrairement au moulage, l'action de plier qui consiste à rabattre la matière suivant un angle déterminé, crée des tensions internes de traction/compression et entraîne une diminution de l'épaisseur de la matière.

Mathématiquement, on estime que les tangentes en un point de la surface sont continues dans toutes les directions (Image 1, a). Dans ce cas, on peut définir un rayon de courbure minimum acceptable avant rupture de la matière. Les matériaux à la dimension plastique disposent d'un degré de déformation maximal. Cette déformation plastique donne des limites aux rayons de cintrage. Cependant, l'inconvénient de cette technique réside dans la difficulté à produire des structures de grandes dimensions.

La matière discontinue. Un pli peut être accepté comme l'union de différentes surfaces. Mathématiquement, il se définit par la discontinuité des tangentes en un point d'une surface et dans une direction donnée. Ce changement ponctuel de direction traduit physiquement une interruption de la matière, d'où la notion d'assemblage (Image 2, a).

Une classification des types d'assemblages doit être alors adaptée au matériau utilisé pour assurer la continuité des efforts internes. Cette deuxième méthode nous intéresse dans l'utilisation de panneaux de bois industrialisés.

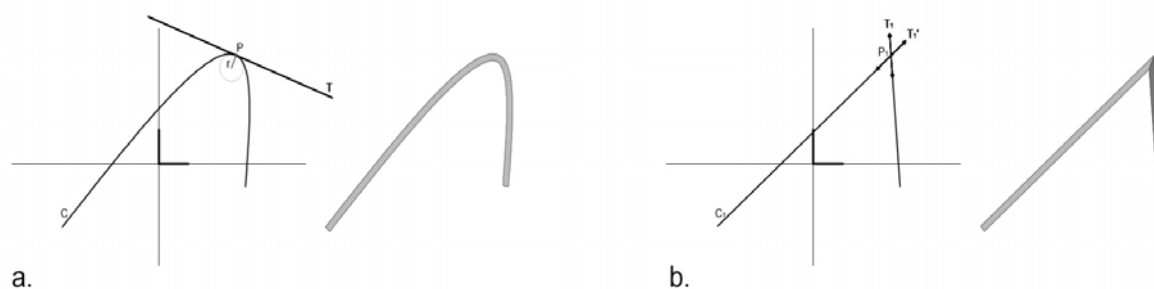


Image 1: a. Tangente continue (rayon de courbure minimum) – b. Tangente discontinue (assemblage)

3. Pli et Plissage

Notre recherche s'est tournée vers l'utilisation de panneaux industriels plans pour le développement de structures plissées en bois. Actuellement, une maîtrise insuffisante des lois de comportement du matériau bois pour rendre les panneaux déformables et les contraintes industrielles de la fabrication ne permettent pas encore une production et une utilisation aisée de panneaux « gauches ». Nous avons donc orienté nos travaux vers une technologie de plis constitués de panneaux plans assemblés.

En nous appuyant sur l'analyse d'une vingtaine de bâtiments plissés (des années 1950 à aujourd'hui), nous avons proposé un modèle du pli et du plissage.

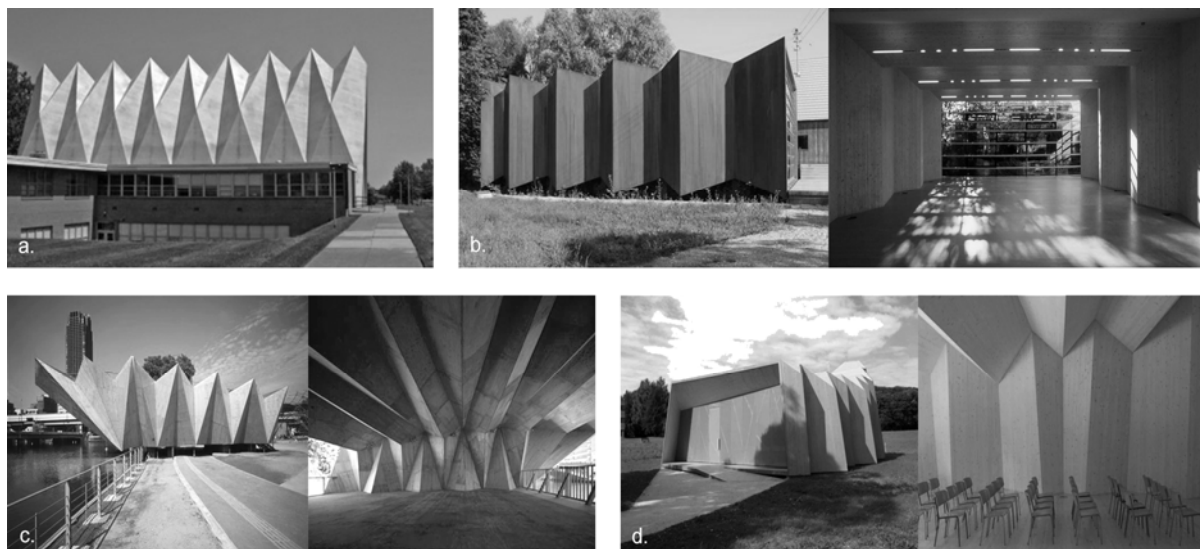


Image 2: a. Independent Congregational Church, Florissant, États-Unis (Panneaux contreplaqués) [5] ; b. Salle de musique, Thannhausen, Allemagne (Panneaux contrecollés) [6] ; c. Pavillon temporaire de l'eau, Osaka, Japon (Panneaux contreplaqués) [7] ; d. Chapelle St Loup, Pompaples, Suisse (Panneaux contrecollés) [8].

3.1. Le modèle du pli

Le pli constitue l'élément unitaire du plissage. Dans le sens transversal, nous distinguons le « profil » du pli. Il est composé de deux éléments articulés selon un angle non plat. Ce point d'inflexion du profil est appelé extremum ou sommet. Le pli se caractérise par la notion d'amplitude (hauteur du pli définissant son inertie) et la notion de période (base du pli composée de deux intervalles).

Dans le sens longitudinal, le pli est défini par son orientation. La génération d'un pli peut être considérée comme une « extrusion » de son profil selon une direction rectiligne ou courbe appartenant à la surface de référence. Ainsi, l'extrusion de l'extremum engendre l'« arête » du pli et celle des éléments définit les « facettes ». D'une manière générale, on caractérise la direction de l'extrusion par une « ligne directrice » concordante avec la projection de l'arête du pli sur la surface de référence.

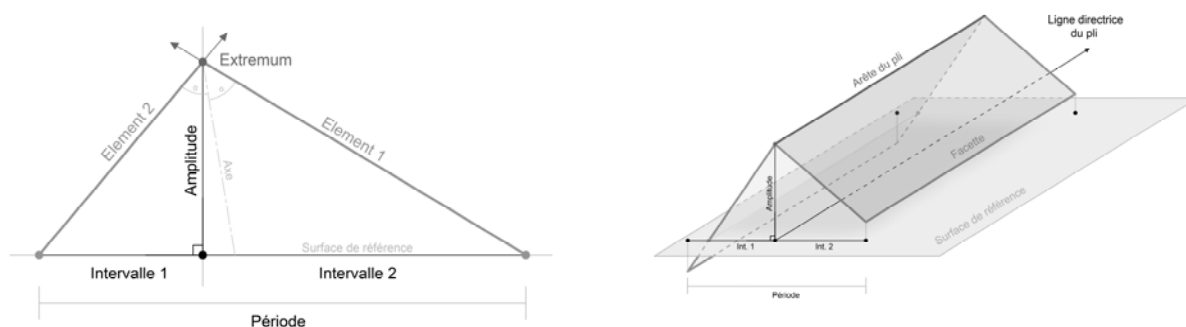


Image 3: Modèle du pli

3.2. Le modèle du plissage

Le plissage doit être considéré comme un ensemble de plis organisé dont la description hérite des mêmes spécifications que l'élément qui le compose : le plissage se réfère toujours à une surface de référence quelconque et sa description reprend la notion de profil transversal ou « propagation » et de direction longitudinale ou « orientation ». Il se caractérise selon quatre aspects :

- le sens de lecture. Le sens de lecture du plissage se définit par rapport à la surface de référence en identifiant la face positive de la face négative. En créant cette distinction, on peut caractériser le rapport entre « l'intérieur et l'extérieur » ou encore entre « le dessus et le dessous » du plissage.

- L'orientation. Elle doit permettre de définir la direction principale du plissage par rapport à la surface de référence.
- Le profil. Il caractérise la nature des plis qui compose le plissage : leur nombre, leur amplitude et leur période.
- Le brisis. Il permet le changement d'orientation du plissage. Ce changement correspond à la jonction de deux plissages.

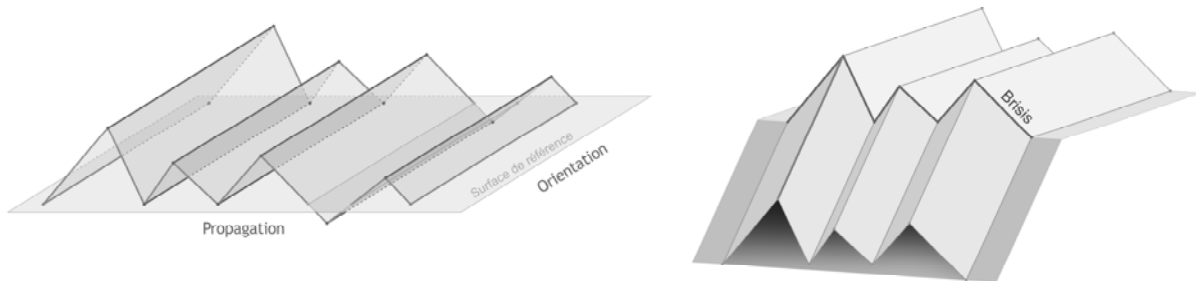


Image 4: Modèle du plissage

La méthode de plissage choisie définit les règles de disposition des arêtes de sommets et de vallées selon la normale de la face. À ces paramètres s'associent des critères pilotes issus du matériau, du comportement structural et de la fabrication. Le choix du matériau interagit sur la rigidité sur les épaisseurs des panneaux (modifie la nature de l'assemblage, agit sur le poids) et sur la géométrie du brut (modifie le calepinage et la taille des panneaux).

La validité structurale est générée par un outil de calcul qui influe sur la raideur, l'inertie du plissage (gestion de l'amplitude et de la fréquence) et la stabilité (modification de la ligne de brisis, des raideurs d'assemblage). La fabrication impose des contraintes géométriques, issues des paramètres outils tels que les coupes angulaires, la cinématique du robot et la taille maximum des panneaux (gestion du poids et des dimensions). Enfin, la gestion d'une cinématique de montage permet de vérifier la faisabilité et la justesse des paramètres d'assemblage d'un point de vue technologique. La validation architecturale est, quant à elle, établie par le concepteur.

4. Le plissage numérique

Nous souhaitons montrer la dimension dynamique de notre méthode en exprimant les relations qui existent entre les éléments ainsi que leurs ordres de dépendance. Dans le cadre d'un continuum numérique, nous avons recherché les interactions possibles entre la phase de conception et la phase de fabrication. Cette dernière a été intégrée à notre méthode sous la forme d'une évaluation permettant, au travers de paramètres définis, d'assurer la faisabilité de la structure architecturale plissée qui a été modélisée.

Notre méthode se décrit donc sous la forme de deux phases séquentielles couplées à un système d'évaluations qui offrent au concepteur une aide continue depuis la déclaration des intentions jusqu'aux données nécessaires à la fabrication. Les deux phases — le modelage et la matérialisation — présentent un cheminement d'activité analogue. Chaque phase se décompose en trois étapes nommées sur le diagramme A, B et C pour la première et D, E et F pour la seconde. À chaque étape, le concepteur définit les données nécessaires aux traitements correspondants. Cela permet de générer progressivement la géométrie de l'enveloppe plissée pendant de la première phase, puis la géométrie des éléments du plissage lors de la seconde.

4.1. La phase de modelage

Cette première phase est destinée à la recherche de solutions morfo-géométriques en fonction d'un contexte de création employant des panneaux industriels plans. Elle consiste à offrir, au concepteur, un maximum de liberté créative tant sur la forme que sur les caractéristiques spatiales du plissage.

A. MODELAGE DE LA SURFACE DE RÉFÉRENCE. Dans cette méthode, une surface de référence est définie par quatre arêtes. Sa caractérisation dans son espace référentiel théorique permet de spécifier deux directions : la propagation du profil de plissage et l'orientation du plissage correspondant à la diffusion de son profil. Par ailleurs, une distinction de la normale de la surface donne lieu au sens de lecture du plissage (identification de la face supérieure).

B. MODELAGE DU PLISSAGE. Un plissage correspond à l'association d'un profil avec une surface de référence. Il correspond à la diffusion linéaire de ce profil entre deux arêtes sélectionnées lors du modelage de la surface. Le profil est défini selon une table de données ; elle comprend une liste de triplet de valeurs (intervalle, amplitude et décalage) caractérisant chaque sommet de ce profil. La somme de ces valeurs détermine respectivement trois grandeurs : la fréquence, l'ondulation et le balancement. Ce dernier offre une troisième dimension au profil permettant la jonction de deux plissages appelés brisis. Ensuite, la géométrie du plissage doit être rapportée à des facettes planes aux arêtes rectilignes. Cette opération est réalisée par un opérateur capable de déterminer la planéité d'une surface, avec un degré de précision variable. Cette précision dépend du rayon de courbure acceptable par le matériau. Ainsi, la structure s'ajuste à la capacité de déformation du matériau.

C. MODELAGE DES ÉLÉMENTS SINGULIERS. Une fois la géométrie de l'enveloppe plissée définie, le concepteur peut y entreprendre des modifications comme la création de baies. Il est donc libre de supprimer ou modifier des éléments du plissage, voire de rajouter des éléments connexes (plancher, renforts...).

4.2. La phase de matérialisation

Elle consiste à «embrayer» une forme «abstraite» définie géométriquement avec une forme «concrète» intégrant les caractéristiques nécessaires à sa construction. Ces données sont issues principalement des caractéristiques du matériau et de la nature des assemblages. Cette étape de caractérisation intègre une notion d'échelle nécessaire à une validation du projet dans l'espace réel.

D. MATÉRIALISATION DE L'ÉPAISSEUR. L'étape du traitement de l'épaisseur commence par le choix du matériau-produit. Ensuite, le concepteur doit choisir la direction de la mise en épaisseur : vers «l'intérieur», vers «l'extérieur» ou un rapport des deux.

E. MATÉRIALISATION DES ASSEMBLAGES. Le choix de la famille et du type d'assemblage se définit selon trois critères. Tout d'abord, la nature de l'assemblage doit assurer la stabilité de la structure et le transfert des efforts d'un élément à l'autre. Ensuite, la fabrication : l'assemblage dépend de la nature du matériau utilisé ainsi que des capacités de l'outil d'usinage employé. Enfin, le montage : l'assemblage doit satisfaire les critères de la cinématique de montage. D'autres considérations peuvent intervenir comme des critères architecturaux (qualité visuelle de l'assemblage...).

F. MATÉRIALISATION DES NŒUDS. Le nœud représente le regroupement ponctuel des divers sommets des facettes du plissage; il correspond donc à l'intersection des arêtes du plissage. La création d'une enveloppe à épaisseur constante génère, dans la plupart des cas, une dispersion des sommets qui composent le nœud. La solution actuellement employée consiste à soustraire de la matière au niveau de cette zone.

4.3. L'évaluation

Tout au long du processus des évaluations sont menées. Elles sont réalisées par des moteurs d'évaluations analysant la géométrie du plissage à des thématiques précises. Par exemple, le moteur d'évaluation structurale valide la stabilité de la structure et son dimensionnement ou encore l'évaluateur du processus de fabrication ; il vérifie la géométrie des éléments en fonction de la méthode d'usinage. Cette méthode d'usinage dépend directement des caractéristiques des outils employés (taille des panneaux admissibles, valeur de coupe angulaire maximale, taille des outils de coupe, méthodologie du système d'ablocage...) et du matériau (nature du matériau, taille initiale des panneaux bruts...).

Ainsi, un ensemble d'évaluateurs peuvent être pensés (moteur d'évaluation thermique, acoustique...). En fonction des rapports d'évaluations, l'utilisateur peut intervenir sur les différentes données d'entrées (feed-back) afin d'adapter la géométrie du plissage. Il est important de noter que l'évaluation de la géométrie conçue durant la phase de matérialisation peut engendrer des modifications de données relatives aux étapes des deux phases.

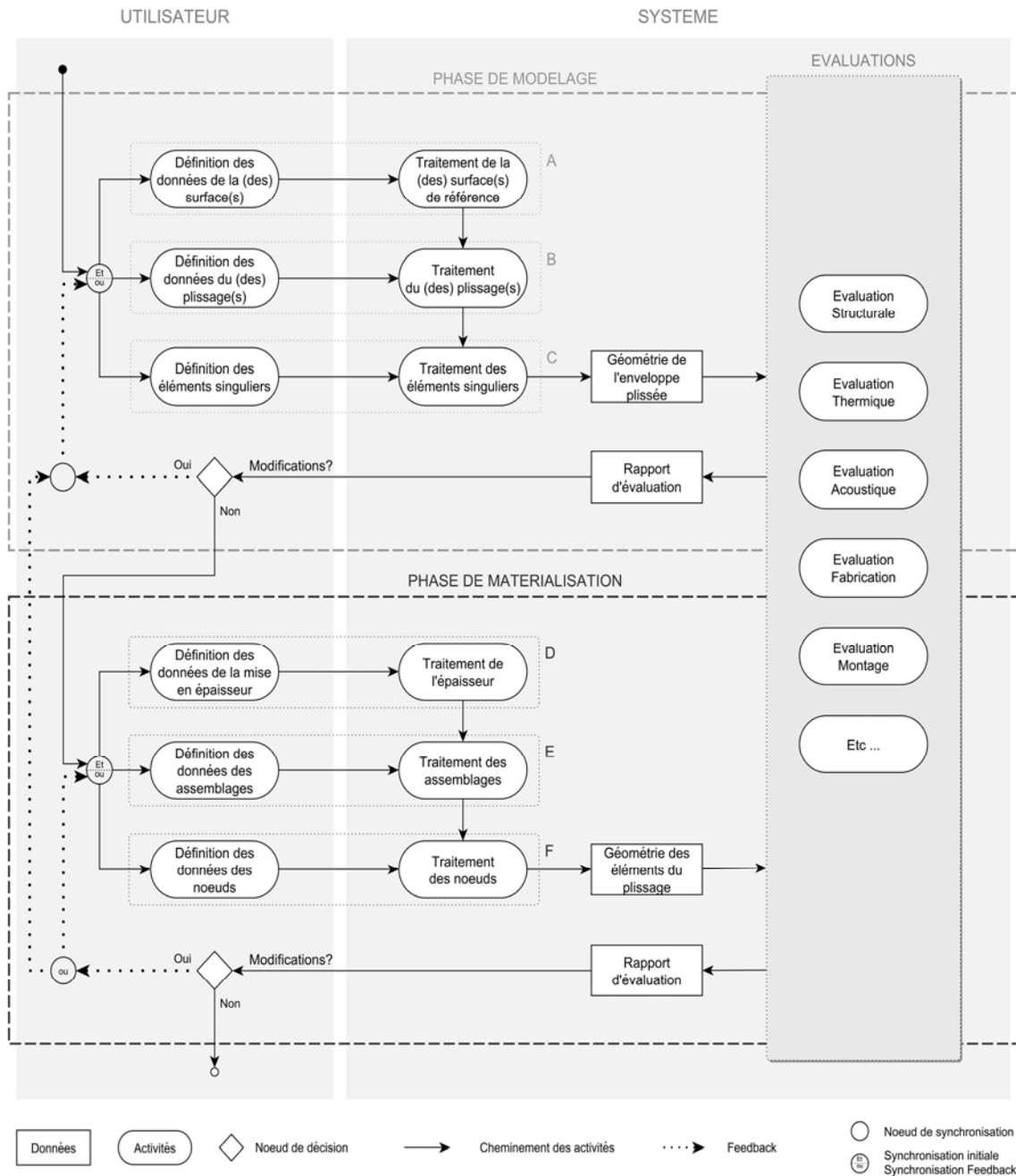


Image 5: Diagramme d'activité représentant les deux phases principales de la méthode reliées au dispositif d'évaluation

5. Le plissage expérimental

Nous avons mené une expérience de conception-réalisation d'une structure plissée dans le cadre d'une manifestation étudiante, les défis du bois, démontrant les capacités inventives du bois pour répondre aux enjeux architecturaux, techniques, économiques et environnementaux. La structure plissée réalisée fait figure de pavillon d'accueil. Cette expérience nous a permis de valider un premier modèle ainsi que la justesse des paramètres pris en compte en phase de conception et de mise en œuvre.

5.1. La proposition

La surface de référence a été modélisée selon des critères architecturaux. Ces critères ont été définis par le lieu d'implantation (une intersection de chemins) et le cahier des charges correspondant à la manifestation (un pavillon d'exposition temporaire). Cette surface a été ensuite plissée en fonction des critères morphologiques voulus par le concepteur et des paramètres du matériau (panneau de lamibois 10500mm x 1800 mm x 40 mm) et de l'outil numérique (CN Güdel 5 axes) mise à disposition, ainsi qu'aux paramètres issus de l'analyse structurale. Un système d'assemblage à enture a été retenu pour les arêtes de plissage et un système de rainures et fausses languettes pour la jonction des panneaux sur la ligne de brisis. Pour augmenter la stabilité du pavillon, un anneau de compression a été rajouté. Le perçage d'un oculus en son centre permet un apport de lumière et accroît la légèreté du panneau. Ce type de pièce est modélisé dans l'environnement de conception.

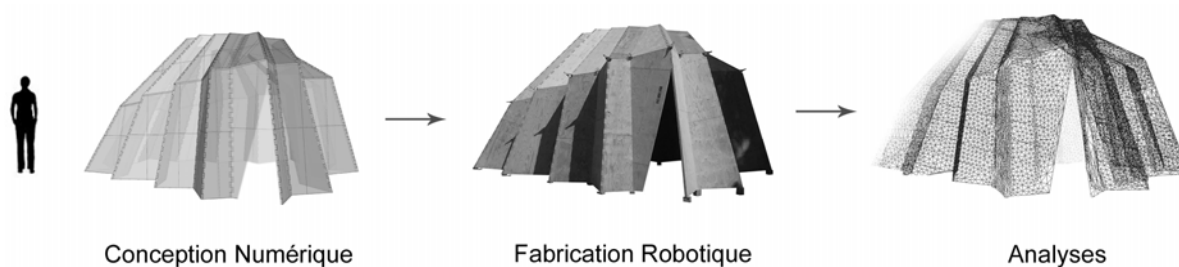


Image 6: Étapes de l'expérimentation

L'environnement numérique de fabrication, mise à disposition pour cette expérimentation, a nécessité trois changements de format de fichier afin d'assurer une continuité des données entre le processus de conception et celui de la fabrication. Ces divers formats d'échange de données (.STEP ; .BTL ; .ISO) sont autant de risques de ruptures dans la continuité de la chaîne numérique. La fabrication a comporté le débit et l'usinage de 57 pièces de bois. Le dispositif d'ablocage a été décomposé en deux étapes. Premièrement, des perçages de positionnement ont été effectués dans le panneau brut. Leurs dispositions ont été coordonnées lors du calepinage, de manière à pouvoir repositionner, dans le bon référentiel, les pièces dégrossies après le pré-débit. Un pré-montage en atelier a permis de valider la cinématique de montage et le jeu conféré aux assemblages.

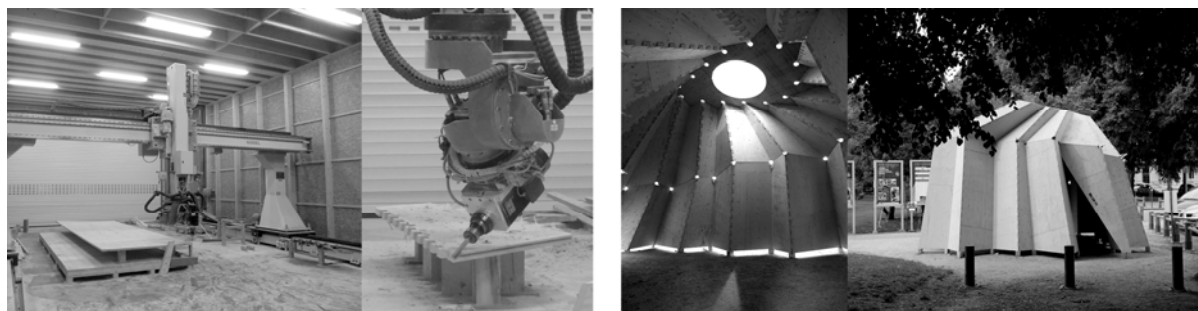


Image 7: Phase d'usinage et pavillon assemblé

5.2. Validation morphologique et structurale

L'analyse morphologique s'effectue en deux étapes. Premièrement, l'analyse morphologique consiste à valider la méthode d'usinage. La lasergrammétrie d'une pièce après usinage permet de connaître le pourcentage d'erreurs dimensionnelles entre le modèle numérique de la pièce et le panneau usiné (5 %). Cela provient essentiellement d'un manque de précision dans le déplacement du robot et dans le positionnement du porte-outil. Deuxièmement, l'analyse consiste à valider la méthodologie de montage par lasergrammétrie complète de la structure assemblée, afin d'analyser l'impact morpho-structural des écarts dimensionnels de chaque élément assemblé (précision moyenne de 1/1000). Ces erreurs sont issues probablement d'une image incomplète liée au scanner, du nettoyage manuel des points parasites, de la précision du scanner et du comportement hygrométrique du matériau employé. En examinant les tolérances dans la construction en bois traditionnelle, c'est une valeur exceptionnellement faible. Cette précision est une condition nécessaire et suffisante pour valider la précision d'usinage et confirmer le protocole de montage.

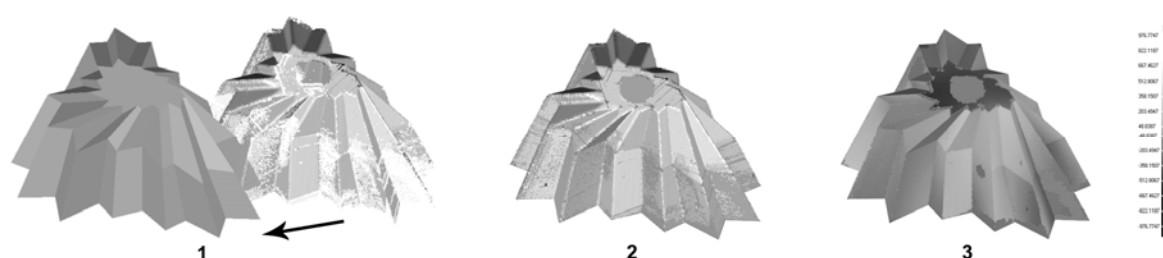


Image 8: Analyse morphologique par lasergrammétrie

La vérification structurale permet, par un raisonnement inverse, de valider les hypothèses de calculs implémentées dans le logiciel Castem. Les paramètres introduits concernent les propriétés élastiques du matériau (modules de Young pour le bois sec) et les raideurs des assemblages. Ces derniers définissent une relaxation des degrés de liberté ainsi que le glissement interne des assemblages (mouvements relatifs entre deux pièces assemblées). Afin d'attester la justesse des paramètres, nous avons comparé le comportement numérique global de la structure avec les résultats expérimentaux. Le comportement élastique est obtenu lors de la phase de chargement issu d'un cycle d'accommodation de la structure. L'analyse de l'expérimentation se cale donc sur la raideur obtenue lors du déchargement, qui traduit un comportement purement élastique. En parallèle, ce chargement expérimental a été simulé sur le logiciel de calcul d'éléments finis de manière à définir une raideur élastique numérique de la structure (K_s) dépendante des glissements d'assemblages où la liaison est définie par une raideur d'assemblage (K_a) comprise entre 0 et +l'infini (graphique 9). Confronté aux données issues du logiciel de calcul, le modèle numérique d'un assemblage parfait est quant à lui dix fois supérieur à la valeur expérimentale trouvée. Il est donc nécessaire de prendre en compte le glissement des assemblages. On constate que les assemblages correspondent à un pivot linéique couplé à une raideur [9]. La raideur structurale obtenue par déchargement (pente de la droite traduisant le comportement linéaire) est reportée sur la courbe du graphique 2 de manière à définir la raideur d'assemblage de la structure plissée. La valeur de la raideur obtenue est relativement faible. Ceci est lié au taux d'humidité important présent dans les panneaux de bois. Un travail important sur les assemblages reste à faire ; en jouant sur les différentes typologies et technologies d'assemblages (connecteurs, collage, etc.), on peut accroître la raideur des structures.

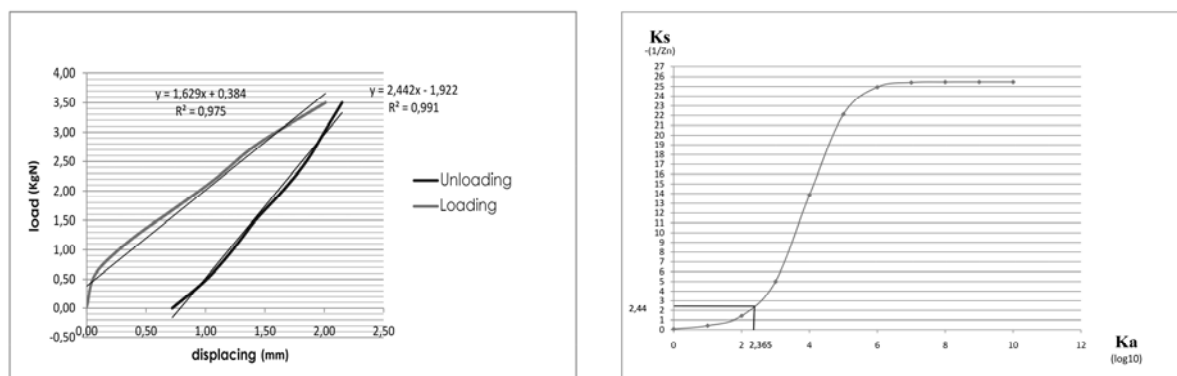


Image 9: Analyse expérimentale de la raideur des assemblages

6. Conclusion

Le pli fait partie des nouveaux langages de conception en architecture. La dimension numérique participe activement à cette quête morphologique et constitue, aujourd'hui, une base de recherche en architecture et ingénierie.

Notre recherche sur la thématique du pli et de sa dérivée vers le plissage, se présente comme une solution possible à une production architecturale par le numérique, telle qu'elle émerge aujourd'hui. L'intérêt du flux dynamique de la genèse morphologique, littéralement conféré à des structures complexes, réside autant dans la forme obtenue et ses qualités plastiques et structurales, que dans le processus technologique d'édification. Cette démarche du numérique, entraînant de nouvelles pratiques, nécessite un apprentissage particulier afin de ne pas perdre le champ des compétences de chacun des acteurs.

Dans notre travail, nous avons tenté d'esquisser un premier outil numérique de conception, où les structures plissées expérimentées sont considérées comme des objectiles architecturaux [10]. Les variables techniques (structure, fabrication montage et matériologie) intègrent la genèse de conception architecturale.

Dans le contexte du pli comme processus de formalisation, ces variables entraînent une (re)configuration du pli physique de manière à atteindre une forme plissée acceptable. Cependant, le continuum numérique est incomplet. Plusieurs actions nécessitent une intervention manuelle, notamment dans le retour des résultats de l'analyse structurale, la gestion des données de l'outillage et la phase de montage.

L'expérience menée a permis de valider un premier modèle et un premier état de notre outil numérique de conception et fabrication de structures plissées en panneaux de bois massif. Cela nous pousse à poursuivre notre travail dans l'automatisation des correcteurs géométriques et dans l'optimisation de la chaîne numérique.

Une des perspectives plausibles se tourne vers le montage assisté par robot. Son utilité réside dans le développement de techniques de construction alternatives assurant une transposition des technologies de fabrication industrielle en combinant les avantages de la préfabrication et de la production [11].

Remerciements :

L'expérience décrite dans cet article n'a pu être possible que grâce à la compétence en architecture et ingénierie du Laboratoire MAP-CRAI, le support technologique et humain de l'ENSTIB (Université de Lorraine), les compétences en ingénierie du bois et en robotique du LERMAB et de toute l'équipe des « défis du bois ». Julien Meyer (doctorant en sciences de l'architecture) a conduit le travail de conception, fabrication et installation du pavillon d'accueil avec les conseils constants des Professeurs Jean-Claude Bignon et Gilles Duchanois de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.

Un remerciement spécial à Anis Bouali (programmation CNC), Julien Lallemand (opérations de robotique), Marie Claude Plourde, Esmael Moussavi et Oskar Gamez (Montage et démontage) pour leur engagement et soutien.

Références :

1. Frampton, K.: *Studies in Tectonic Culture: The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*, MIT Press, Cambridge (1995)
2. Moussavi, F.: *The fonction of form*, Editions Actar et Harvard graduate school of design, Barcelone, 45 (2009)
3. CACHE, Bernard, 1997. *Subjectiles et objectiles, vers un mode de production non-standard*. In : *Les cahiers de la recherche architecturale*. S.l. : Parenthèses. 1997. p. 114-122.
4. ZELLNER, Peter, 1999. *Hybrid space: new forms in digital architecture*. New York : Rizzoli. 1999.
5. W HAMILTON, Esley et MYERS, Catie, 2010. *MID-CENTURY MODERN CHURCH SURVEY, Religious Structures 1940 – 1970 in St. Louis County* [en ligne]. 2010. pp13 Disponible à l'adresse : <https://dnr.mo.gov/shpo/survey/SLAS043-R.pdf>. [Consulté le 7 janvier 2017].
6. Schineis, R.: *La salle de répétition, Thannhausen, Bavière (Allemagne)*, in *Architecture d'Aujourd'hui*, 347, 88-90 (2003)
7. Ashizawa, R.: *Gefaltete Hütte*, in *Baumeister*, n° B3, 73 (2010)
8. Localarchitecture and Mondada, D.: *A temporary Chapel for the Deaconesses of St-Loup-Pompaples, Vaud, Switzerland, 2007-2008*, in *A+U*, n°479, 56-59 (2010)
9. Bléron L., Bocquet J.F., Duchanois G., and Triboulot P.: *Contribution to the optimization of wood assemblies performances in timber structure. Analysis of the embedment strength in assemblies of dowel type*, 3rd International Rilem Symposium, Stuttgart, Germany (2001)
10. Cache, B. and Beauce, P.: *Vers un mode de production non-standard*, in *Fastwood: Un Brouillon Project, Consequence book series on fresh architecture*, vol. 6, Institute for Cultural Policy, 6-8 (2003)
11. Gramazio, F. and Kohler, M.: *Digital Materiality in Architecture*, Lars Müller Publishers, Zürich (2008)