Proposition d'un modèle numérique pour la conception architecturale d'enveloppes structurales plissées : application à l'architecture en panneaux de bois

Julien Meyer

▶ **To cite this version:**

Julien Meyer. Proposition d'un modèle numérique pour la conception architecturale d'enveloppes structurales plissées : application à l'architecture en panneaux de bois. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0099 . tel-01615887

HAL Id: tel-01615887

https://theses.hal.science/tel-01615887

Submitted on 12 Oct 2017

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

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

AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Proposition d'un modèle numérique pour la conception architecturale d'enveloppes structurales plissées

Application à l'architecture en panneaux de bois

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 6 septembre 2017

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

Discipline : Science de l'architecture

par

Julien MEYER

Rapporteurs :	M. Philippe POTIÉ *Professeur, HDR*	*ENS d'Architecture de Versailles* *Chercheur au LéaV*
	M. Denis ZASTAVNI *Professeur, Architecte-Ingénieur*	*Université Catholique de Louvain - LOCI* *Président ILOC*
Examinateurs :	Mme. Catherine ELSEN *Professeur associé, Architecte-Ingénieur*	*Université de Liège* *Chercheur au LUCID*
	M. Laurent BLÉRON *Professeur, HDR*	*Université de Lorraine - ENSTIB* *Chercheur au LERMAB*
Directeur :	M. Jean-Claude BIGNON *Professeur, HDR*	*ENS d'Architecture de Nancy* *Chercheur au CRAI*
Co-Directeur :	M. Gilles DUCHANOIS *Professeur*	*ENS d'Architecture de Nancy* *Chercheur au CRAI*

École doctorale IAEM Lorraine
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (CRAI)— UMR MAP n° 3495 (CNRS/MCC)
École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

Résumé

L'objectif de notre recherche consiste à caractériser le concept de plissage afin de proposer un modèle numérique permettant de concevoir des structures architecturales plissées en bois.

Trois raisons ont motivé notre travail. Tout d'abord, le plissage fait partie des nouveaux vocabulaires architecturaux. Au-delà d'un simple formalisme, il apporte une véritable tectonique architecturale : il conduit à une évidence visuelle associant la franchise d'un concept constructif à la clarté d'une forme plastique. Le plissage apparaît comme le vecteur d'une démarche à la fois matérielle, intellectuelle et artistique.

Par ailleurs, l'intégration du « numérique » dans la conception, dans les méthodes de calcul pour la simulation et dans la fabrication robotique, élargit les possibilités de construction. La chaîne chronologique, de la conception à la fabrication, n'est plus linéaire, mais devient une série d'évolutions simultanées et de variations possibles. Le numérique rend désormais possible ce continuum de (dé)formation de la forme ainsi que sa virtualisation. Nous sommes face à de nouveaux questionnements sur l'architecture numérique, dont l'enjeu n'est plus la production de masse, mais la production de pièces uniques et complexes.

Enfin, le bois est un matériau de construction traditionnel qui a su trouver un nouveau souffle dans les pratiques constructives contemporaines. Ce renouveau a été favorisé par une évolution des théories et des pratiques architecturales critiques envers la modernité architecturale et sensibles aux enjeux environnementaux. Il est également fortement lié à l'évolution des connaissances sur le matériau, ainsi qu'aux développements de nouvelles techniques industrielles. Les panneaux de bois, liés à des approches de type « chaîne numérique », étendent aujourd'hui l'éventail des solutions constructives et deviennent des vecteurs pour la conception de formes architecturales plus libres.

Dans ce contexte, nous portons une attention particulière à l'intégration de la dimension morpho-structurale comme facteur de modulation de l'architecture. Nous abordons également le plis-

sage dans sa dimension numérique par une approche paramétrique. Cette dernière permet une modélisation adaptative dans le continuum conception-fabrication.

Notre méthode, implémentée dans l'outil CARA(s)PACE (Conception of Architectural Research Algorithm for Structural Pleated Approaches and Creative Envelopes), s'appuie sur les connaissances issues de l'expérience de conception, de fabrication et de mise en œuvre d'une structure architecturale plissée en bois que nous avons menée dans le cadre de ce travail de recherche. Elle se déroule en trois phases :

– le « modelage » ou la recherche de solutions par une déclaration des intentions du concepteur,

– la « matérialisation » ou le dimensionnement lié à la réalité constructive,

– l'« évaluation » ou l'analyse de la conformité des solutions.

Cette méthode et cet outil permettent de générer une géométrie de plissage à partir d'une surface de référence. Il est composé d'un modeleur géométrique paramétrique couplé à des moteurs d'évaluation. Il guide le concepteur dans la recherche de formes fondées sur le plissage, sécurise les propositions et fournit les données numériques nécessaires pour une fabrication robotisée.

Mots Clés : Architecture, Structure plissée, Modélisation paramétrique, Fabrication robotique, Panneaux de bois.

Abstract

The purpose of this research is to characterise the concept of pleating in order to give a numerical model allowing the design of wooden pleated architectural structures.

Three reasons shaped this work of characterisation. First, the notion of pleating is new to the architectural vocabulary. Beyond mere formalism, it brings a true architectural tectonic: it provides visual evidence, associating the truthfulness of a constructive concept and the clarity of a plastic form. Creasing appears as the vector of a material, intellectual and artistic process.

Furthermore, integrating digital technology to the design, both in the methods of calculation, for simulation, and the robotic manufacturing, widens the potential of the construction field. The chronological chain, from design to manufacturing, is no longer linear but becomes a series of simultaneous evolutions and possible variations. Digital technology makes this continuum of "(de)formation of form" possible, as well as its virtualisation. We are facing new questionings regarding digital architecture. The issue is no longer mass production but the manufacturing of complex and unique pieces.

Finally, wood is a traditional construction material that managed to reinvent itself in the contemporary constructive practices. This renewal was favoured by an evolution of architectural theories and practices that criticise modern architecture and which are responsive to environmental issues. It is also strongly linked to the evolution of the knowledge of this material, as well as to the developments of new industrial processes. Wooden panels, linked to 'digital chain' types of approaches, now widen the spectre of wooden constructive solutions and become vectors for the design of freer architectural forms.

In this context, we are bringing a singular perspective to the integration of the morpho-structural dimension as a modulating factor of architecture. We also deal with creasing in its digital dimension by adopting a parametric approach which allows an adaptive modelling within the 'design-manufacturing' continuum.

Our method, implemented in the CARA(s)PACE (Conception of Architectural Research Algorithm for Structural Pleated Approaches and Creative Envelopes) tool, is based on the knowledge we have gained from the experiment of designing, manufacturing and implementing a wooden creased architectural structure that we carried out in relation to this research work. This experiment followed a three-step process :

– the 'modelling' or the search for solutions based on a statement of the designer's intent,

– the 'materialisation' or the size calculation linked to the constructive reality,

– the 'evaluation' or the analysis of the solutions' compliance with the former statement.

This method and this tool generate a geometry of pleating from a reference surface. The CARA(s)PACE tool is composed of a parametric and geometric modeller coupled with evaluation engines. It guides the designer in the research of forms based on creasing, secures the suggestions and provides the numerical data needed for a robotic manufacturing.

Keywords: Architecture, Pleated structure, Parametric modelling, Robotic manufacturing, Wooden panels.

À mes parents,

Remerciements

Je souhaite simplement, à travers ces quelques lignes, remercier les personnes qui m'ont accompagné dans ce travail de thèse.

Merci à Jean-Claude Bignon, directeur de cette recherche, qui m'a donné l'opportunité de travailler sur ce projet ; les conseils qu'il m'a prodigués, la patience et la confiance témoignée ont été déterminantes pour mener à bien ce mémoire.

Merci à Gilles Duchanois, codirecteur de ce mémoire, pour son accompagnement dans le domaine de l'ingénierie et son humour infaillible tout au long du développement de cette thèse.

Merci à Gilles Halin, Directeur scientifique du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, pour l'accueil et la mise à disposition du matériel nécessaire à l'activité de recherche.

Merci à l'ensemble des membres du laboratoire, notamment Grégory Stocky, Franck Besançon, Vincent Marchal et Benjamin Loillier pour leurs aides techniques diverses, ainsi que Pascal Humbert pour les moments de détente opportuns.

Merci à Anis Bouali et Julien Lallemand ainsi que toutes les personnes de l'École Nationale supérieure des Technologies et Industrie du Bois qui ont contribué de prêt ou de loin à l'élaboration de la New-Yourte.

Merci à Alice Labeye pour sa participation active au développement de ces recherches.

Merci aux membres de l'école Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy pour leurs services.

Merci aux personnes de l'école doctorale IAEM.

Merci à Kévin, Anis et Oskar pour leur implication au quotidien.

Merci à Martine pour la relecture du mémoire.

Merci à David et Nelly pour leur plume de Shakespeare.

Merci à Maxime et mes amis pour leur patience.

Et enfin, Merci à Léa.

Sommaire

Résumé **III**

Abstract **V**

Remerciements **XI**

Introduction **XVII**

Partie A
Présentation du contexte d'étude **27**

Chapitre 1
L'attrait des structures plissées 29

1.1. Le plissage dans la nature 30
1.2. Le plissage et ses applications constructives 37
1.3. Le plissage dans la science 57

Chapitre 2
La construction par panneaux de bois 75

2.1. Le bois, une ressource 75
2.2. Le bois, un matériau « dérivable » 81
2.3. Les assemblages de panneaux 92
2.4. Le numérique et l'architecture en panneaux 100
2.5. L'architecture plissée en panneau de bois 109

Chapitre 3
Cas d'application : la New-Yourte 115

3.1. Le contexte 115
3.2. Investigations 117

Partie B
Proposition d'un modèle numérique **135**

Chapitre 4
Présentation du modèle théorique 137

4.1. Présentation préliminaire 138
4.2. Organigrammes de la méthode 144

Chapitre 5
La modélisation géométrique 153

5.1. Traitement de la surface de référence 155
5.2. Les tables de plissage 159
5.3. La visualisation géométrique 167
5.4. La jonction du plissage 174
5.5. Les éléments singuliers 178

Chapitre 6
La matérialisation 181

6.1. La mise en épaisseur 182
6.2. La gestion des nœuds 192
6.3. Les assemblages 199
6.4. Mise à l'épreuve de l'outil CARA(s)PACE 211

Chapitre 7
Les moteurs d'évaluations 219

7.1. Le moteur d'évaluation structurale 220
7.2. Le moteur d'évaluation thermique 231

Conclusion 245

Bibliographie 253

Filmographie 261

Annexe 1
Références architecturales 263

Annexe 2
Les caractéristiques du bois 329

Annexe 3
Le cintrage du bois 353

Annexe 4
Azimut et hauteur solaires 357

Liste des illustrations 361

Liste des tableaux 369

Table des matières 371

Introduction

La recherche présentée dans ce mémoire se rapporte à la conception architecturale des enveloppes structurales plissées réalisées en panneaux de bois. Nous abordons ce sujet en structurant notre mémoire en deux parties : la première étaye nos choix et nos différentes pistes de recherche et la seconde présente le travail qui résulte de cette réflexion :

A. Présentation du contexte d'étude

Dans un premier temps, nous nous préoccupons du concept du plissage. L'intérêt du « plissage » et par la même occasion celui du « pli » peuvent se vérifier par le nombre grandissant de recherches qui sont menées sur cette thématique depuis quelques années. Des mathématiciens comme Humiaki Huzita, des architectes tels que John et Patricia Patkau ou Yves Weinand, voire des biologistes à l'image des travaux de Yvan Huc ou encore des astrophysiciens représentés par Mark Neyrinck, prêtent une attention particulière à l'univers des plis. Ces derniers semblent trouver une place dans les différents domaines des arts et de la science. En effet, les recherches évoquées présentent le pli comme une aide à la compréhension et au développement de chacune de ces disciplines. Par exemple, l'architecte Yves Weinand utilise pour ses travaux l'art de l'origami afin d'affirmer « *la simplicité, l'économie et l'homogénéité de la matière, la souplesse et la variété des formes, la génération de systèmes géométriques complexes à partir de principes simples* »[1] (Figure 1). Ces propos mettent en évidence la fréquente séduction exercée par les géométries cohérentes et fluides des plis. Cette attirance « instinctive » proviendrait du fait que nous sommes en permanence immergés dans un univers de plis. En effet, en explorant les systèmes de plis tout autour de nous, des chercheurs comme Jean-Marie Delarue et Jean-François Brossin s'aperçoivent que la nature elle-même se compose d'une multitude de structures plissées[2].

Figure 1 - Structure plissée en panneaux de bois reprenant le modèle de pliage «Miura Ori». D'après (Weinand, 2006, p. 16).

[1] (Weinand, 2006, p. 16).

[2] (Delarue, Brossin, 1981).

Les compétences scientifiques acquises jusqu'à ce jour, notamment dans le domaine de l'informatique et des mathématiques[3], permettent d'appréhender partiellement cet univers du pli.
Ainsi, l'analyse de la morphologie du plissage semble apporter des solutions diverses aux problématiques issues de différents champs de recherche comme celui de l'architecture. Dans le premier chapitre de notre mémoire, nous souhaitons montrer au lecteur la présence remarquable des morphologies plissées dans les « systèmes naturels » et les intérêts qui découlent de leurs études appliquées au domaine des sciences de l'architecture. Pour faciliter la compréhension de ce premier chapitre, nous convenons que tout ce qui engendre un pli peut, par extension, engendrer un plissage. En effet, en tant que déformation d'une surface plane, le pli génère un plissage dès lors qu'il se trouve démultiplié au sein de cette même surface[4]. Cette définition a pour vocation de qualifier le pli comme l'élément fondateur d'un plissage. Ainsi, nous cantonnons les notions de « pli » et de « plissage » à un même concept. Une caractérisation plus précise de ces deux notions est établie dans la dernière section de ce chapitre.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché un matériau adéquat pour la réalisation d'enveloppes structurales plissées. Bien que dans ce domaine le béton occupe une place intéressante, notre choix s'est tourné vers un matériau qui bénéficie aujourd'hui d'un grand renouveau : le bois. C'est l'objet du chapitre 2 que de présenter les avantages offerts par ce matériau sous la forme dérivée des « panneaux structuraux ». Notre choix se base sur le constat d'un développement considérable des constructions en bois ces dernières décennies en Europe[5]. Ce phénomène peut s'expliquer par différentes raisons. Les unes sont exogènes, externes à la filière construction bois et les autres sont plutôt endogènes, c'est à dire en lien avec les transformations du monde de la construction bois.

---

[3] (Delahaye, 2015).

[4] Affirmation fondée sur la définition du TLFi (le Trésor de la Langue Française informatisé) disponible à l'adresse : http://www.cnrtl.fr/definition/plissage [consulté le 23 juin 2016].

[5] Dans d'autres pays comme les États-Unis, le matériau en bois fait partie des matériaux dont l'usage est ancré dans l'histoire de la construction. Le secteur de l'habitation individuelle est certainement le plus représentatif avec près de 90 % des constructions réalisées en bois (source CNDB).

Parmi les raisons exogènes, on retient en particulier celles relevant du domaine de l'architecture, de l'évolution de ses théories et de ses pratiques.

La première raison résulte sans doute d'une critique de la modernité architecturale à la fin des années 60 et au début des années 70. Les principes modernistes comme la prépondérance des nouveaux matériaux tels que le béton, l'acier et le verre ou encore l'empreinte industrielle dans la production sérielle du bâti[6] ont été remis en question par une nouvelle génération d'architectes. Ces derniers condamnent une architecture aseptisée par l'omniprésence du fonctionnalisme, une unicité dans la forme et une abstraction des territoires. Ils prônent le retour à la diversité, un vocabulaire qui redonne une place à l'ornement, ainsi qu'au génie du lieu. L'« épuisement des idéaux modernistes »[7] favorise de nouveaux modèles architecturaux dotés d'un langage esthétique et symbolique moins abstrait. Tel est le message véhiculé par les réalisations de Robert Venturi telles que la maison édifiée pour sa mère Vanna à Chesnutt-Hill (1962), de Lucien Kroll comme la maison des étudiants en médecine de l'Université Catholique de Louvain (1972) (Figure 2) ou encore ceux de Peter Hubner à l'image de la résidence étudiante de l'Université Technique de Stuttgart (1982). Le rapport entre l'architecture et la technique redevient un enjeu où le mode de construction sert à nouveau de langage.

Figure 2 - Maison médicale des étudiants en médecine «La Mémé» conçue par Lucien Kroll entre 1970 et 1972; Université Catholique de Louvain.
D'après (Fèvre, 2013).

Dans le même temps naissent des pratiques alternatives. De nouvelles manières de faire constestant l'industrialisation dominante et alimentées par la redécouverte de l'habitat vernaculaire encouragé par Bernard Rudofsky[8], redonnent sens aux matériaux traditionnels (terre crue, brique, bois…). Les expériences d'auto-construction trouvent dans le bois matière à projet et matière à fabriquer. Les habitations « flottantes » de la ville de Sausalito, les dômes géodésiques de « Drop city » près de Trinidad (Figure 3), ou encore Sea

[6] Les architectes modernes comme Gropius ou Mies van der Rohe prônaient une architecture standardisée et modulaire rendue possible grâce à l'industrialisation du bâtiment (Hamburger, Vénard, 1977).

[7] Expression d'Antoine Picon, in « Architecture contemporaine - Construire aujourd'hui », Encyclopædia Universalis [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.universalis.fr/encyclopedie/architecture-contemporaine-construire-aujourd-hui/
[consulté le 18 août 2016]

[8] Voir « Architure Without Architects, livre et exposition présentée au MoMa de New York en 1964 (Rudofsky, 1977).

Figure 3 - Le dôme géodésique (cf. Buckminster Fuller et Steve Baer) permet de construire des structures peu coûteuses, notamment avec l'emploi de matériaux de recyclage; Drop City, 1965.
D'après (Grossman, 2012).

ranch en sont des exemples emblématiques. Les volontés d'autonomie, l'attention accordée à l'économie des ressources, le rapport attentionné au site apparaissent comme le début d'une conscience écologique. Cette prise de conscience apparaît comme une autre raison profonde du retour de l'architecture construite en bois.

À partir des années 90, les questions environnementales quittent le domaine de la marginalité et deviennent plus prégnantes socialement. Des enjeux comme ceux de l'énergie, de la pollution ou des limites de nos ressources prennent place dans les débats sociétaux. Avec le concept de « développement durable » apparu pour la première fois dans le rapport Brundtland (1987) et popularisé par le Sommet de la terre de Rio de Janeiro en 1992, la politique environnementale affirme sa dimension mondiale. En architecture, la notion de développement durable se traduit par une prise en compte de différents facteurs comme le bilan énergétique, l'impact du matériau et des ressources ou encore l'intégration des données du site. Dans sa thèse, Perysinaki souligne que la notion de développement durable définie mondialement n'a de sens que si elle est ramenée à une « gestion locale » basée sur quatre thématiques : « l'environnement, l'économie, la société et la culture »[9]. Ainsi chaque pays répond de manière personnalisée aux directives définies mondialement.

En France, les crises pétrolières des années 70 justifient les premières initiatives législatives avec l'apparition de la réglementation thermique. Dans les années 90, l'entrée en vigueur de la notion de développement durable est à l'origine de mesures environnementales et paysagères. En 2003, l'État français met en place une stratégie de développement durable incluant notamment un remaniement de la loi SRU. Cependant, il faudra attendre 2009-10 pour que les engagements issus du Grenelle de l'Environnement[10] fassent apparaître des directives (loi Grenelle 1 et 2) facilitant l'emploi du bois dans le domaine de la construction[11].

---

[9] (Perysinaki, 2014, p. 91).

[10] Loi du 3 août 2009, articles 34 et 48.
Disponible à l'adresse : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Bois, 13394.html [consulté le 23 mai 2016].

[11] Dans un contexte constructif associé à la notion de « durabilité », le bois se présente comme un matériau renouvelable et neutre en émission de carbone. Toutefois ces qualités ne peuvent pas être présentées sans prêter attention aux enjeux environnementaux attenants à l'industrie du bois (transformation, transport…).

En Suède, la révision du code de la construction nationale (Building Code of Boverket) a permis l'usage du matériau bois comme éléments structuraux dans la construction de bâtiments supérieurs à deux niveaux[12] dès 1994. De fait, ce pays scandinave a mis en place le programme « Träst ad 2012 » ou « ville en bois » visant à mutualiser la connaissance et les compétences des systèmes constructifs en bois[13] (Figure 4).

Figure 4 - Structure de protection amovible pour les constructions en bois.
D'après (Westerlund, 2012).

Les raisons endogènes au renouveau de la construction en bois apparaissent dans l'évolution des process de fabrication et des théories de l'industrialisation qui les accompagnent. L'émergence d'une industrialisation « ouverte » et « légère » dès les années 70, comme la fabrication non standard qui se profile au début des années 2000, en sont des témoignages. Cette avancée va de pair avec une transformation des outils de production, notamment avec le développement des machines à commande numérique.

Le thème de l'industrialisation ouverte qui se développe et structure largement la pensée technique et architecturale participe à cette remise en cause d'un mode de production dominant centré sur la préfabrication en béton. Parmi les réalisations expérimentales qui accompagnent ce mouvement, plusieurs opérations ont exploré les potentialités du bois. C'est le cas de la réalisation expérimentale de la Borne de l'Espoir dans le quartier du Triolo à Villeneuve-d'Ascq en 1982. Cette opération, conçue par l'atelier Watel, comprend 33 logements sociaux réalisés avec une structure légère à ossature bois nommée « plate-forme ». Ce système ouvert favorise une souplesse d'adaptation du système constructif, tout en offrant un support idéal à des revêtements variés tels que le bardage en bois, les plaques de fibrociment ou encore la brique. La diversité des produits employés assure un retour à l'ornement grâce au libre jeu de juxtaposition des composants[14].

---

[12] « Cette révision a été réalisée dans l'ensemble des pays scandinaves. La part de marché des constructions neuves de logements collectifs à ossature bois a progressé de 0 % à 10-15 % entre 1995 et 2007 ».
Disponible à l'adresse : http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_Etude_comparative_europeenne_bois_construction.pdf [consulté le 15 mars 2016]

[13] (Westerlund, 2012).

[14] (Bignon, Lausecker, 1983).

Les procédés de fabrication et les caractéristiques des composants[15] évoluent simultanément. Par exemple, l'amélioration des colles joue un rôle important dans le « renouveau » des produits dérivés du bois. L'accroissement de la production et la diversification des composants en bois ne sont pas seulement fondés sur l'invention, mais sur le perfectionnement et l'amélioration du produit en termes de qualité, de performance et de dimensions. La dimension possible des panneaux contrecollés a quasiment triplé en 60 ans ; le lamibois est produit aujourd'hui en un panneau continu contrairement aux modes de production du contreplaqué dans les années 30[16].
Dans ce contexte, le bois offre de nouvelles potentialités pour la construction. En effet, on peut observer l'élaboration d'opérations « pionnières » exploitant les capacités architecturales et structurales des produits manufacturés provenant du matériau bois tels que les panneaux. Dans un esprit audacieux, le bâtiment des ateliers municipaux de Hohenems (2000), conçu par l'architecte Reinhard Drexel, présente une toiture courbe suspendue réalisée en panneaux multiplis (Figure 5). Il renoue ainsi avec l'esprit pionnier des panneaux contrecollés, développés par Pierre Gauthier, et utilisés en 1954 par Jean Prouvé pour sa maison à Nancy. Le constructeur avait utilisé la rigidité du panneau pour la réalisation des cloisons et des portes alors que sa flexion naturelle servait à la définition du rayon de courbure de la toiture.

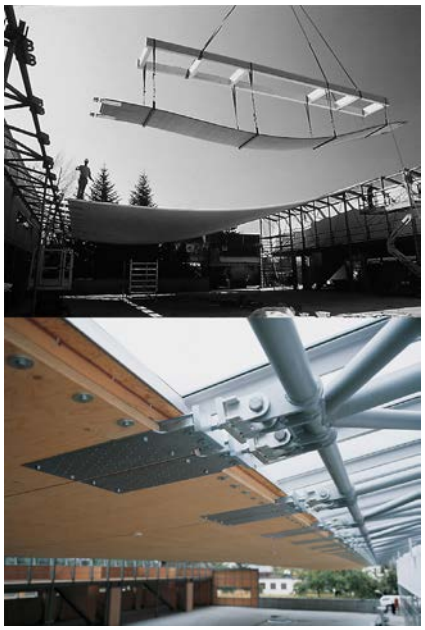


Figure 5 - Pose des panneaux de type «Querto Q» formant la couverture courbe des ateliers municipaux de Hohenems. D'après (Drexel, 2001).

On évoquera enfin le rôle important que vont jouer la recherche et l'enseignement dans ce « printemps » de l'architecture construite avec du bois.
À l'École Polytechnique de Lausanne, la première chaire européenne consacrée totalement au seul matériau bois dans la construction a été confiée à Julius Natterer en 1978. Il a organisé, à partir de 1988, une formation spécialisée « les constructions en bois – concevoir – projeter – réaliser » qui a formé de nombreux praticiens du bois. En 1992, l'école d'architecture de Nancy et l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du bois ont instauré en France la première formation spécialisée dans le bois de construc-

[15] La notion de composant appelle une réflexion sur l'ornement et la diversité nés d'une industrialisation ouverte. L'association de composants de natures différentes réintroduit des questions d'expression et d'écriture, notamment dans la mise en œuvre des assemblages.

[16] (Wood, Linn, 1942).

tion pour l'architecture. Cette formation permet aux architectes et aux ingénieurs d'acquérir une double compétence indispensable pour la mise en œuvre du bois.
Plus récemment, l'intégration de la conception numérique et des méthodes de calculs pour la simulation et la fabrication devient un nouvel enjeu de recherche et d'enseignement pour l'architecture construite en bois. C'est l'une des réflexions entreprises par l'ICD (Institute for Computational Design) en collaboration avec l'ITKE (Institute of Building Structures and Structural Design) de l'Université de Stuttgart, au travers des projets comme les annuelles « research Pavilion » depuis 2010. D'autres laboratoires comme l'IBOIS de l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) mènent leurs recherches notamment dans l'élaboration d'assemblages de panneaux de bois tels qu'« Interlocking folded Plate » présentée par Christopher Robeller. Il est également intéressant de mentionner le projet « ECO-FAB » mené par le MAP/CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie) où la perspective environnementale s'associe à une démarche de conception et de fabrication numérique[17] (Figure 6).

Figure 6 - . Projet ECO-CHUTE: structures fondées sur l'utilisation de composants en bois irréguliers peu ou pas transformés (branches, chutes d'industrie, bois de réutilisation...).
D'après (Monier, 2011).

Ce contexte numérique conforte notre intérêt à associer la morphologie du plissage à un matériau tel que le bois :

– d'une part, la modélisation numérique en phase d'esquisse d'un plissage permettrait d'intégrer les particularités architecturales issues des combinaisons tridimensionnelles de plis en garantissant la stabilité, la résistance et l'économie de matière des enveloppes structurales proposées.

– d'autre part, les panneaux de bois, nous rapportant à une « réalité constructive », sont adaptés à un processus de fabrication numérique tel qu'un environnement robotique.

Cette réflexion nous renvoie à la notion de continuum numérique où l'étape de modélisation est fortement liée à l'étape de fabrication. Cependant, le champ actuel des outils proposés ne garantit pas un dialogue aisé entre ces deux étapes, paralysant ainsi le développement des enveloppes structurales plissées.

[17] Informations supplémentaires disponibles à l'adresse : http://meurthe.crai.archi.fr/wordpressFr/?page_id=35&num_proj=47 [consulté le 19 août 2016].

L'objectif de la thèse consiste donc à proposer un moteur morphologique capable d'intégrer les données d'une réalité constructive. Pour cela, une définition et une quantification des besoins du réel, lié par exemple à la forme, à la structure ou encore au matériau, sont nécessaires. Ce travail prend la forme d'une expérience présentée au chapitre 3.

B. Proposition d'un modèle numèrique :

La mise en œuvre de l'expérience nous a permis de nous poser des questions relatives à notre sujet. En nous appuyant sur des propos d'Herbert Simon : « *Nous posons un problème en donnant une description d'état de sa solution* »[18], nous avons abordé cette expérimentation comme une solution temporaire nécessaire afin de voir émerger une solution généralisée ; cette solution qui est née d'une idée a permis de formaliser des problèmes qui ont fait apparaître de nouvelles solutions.

Ainsi, à partir des résultats de l'expérience, nous proposons de caractériser une méthode plus générique qui augmente, tout en offrant un continuum numérique de la conception à la fabrication, le champ des possibilités morphologiques du plissage. En effet, les besoins, inhérents à la réalisation d'une enveloppe structurale plissée en panneau de bois, sont traduits sous la forme de paramètres implémentés dans des « moteurs d'évaluations » afin d'optimiser le processus de conception.

L'ensemble des résultats a servi à la formalisation d'un modèle théorique décrit dans le chapitre 4. Les deux chapitres suivants sont consacrés à l'implémentation de ce modèle théorique. Ils se distinguent chacun par la présentation d'une phase spécifique du processus : le modelage du plissage (cf. Chapitre 5) et la matérialisation du plissage (cf. Chapitre 6). À la suite de ces chapitres, une mise à l'épreuve de la méthode implémentée dans l'outil CARA(s)PACE est présentée au travers de brèves expérimentations.
Un septième chapitre est consacré aux moteurs d'évaluation : dans l'esprit d'une conception architecturale libre, cet outil doit aider le concepteur à faire des choix ou à valider des solutions proposées.

[18] (Simon, Le Moigne, 1991, p. 133-134).

Cette hypothèse semble envisageable dans la mesure où l'outil sera capable de générer des « automatismes » en transformant les résultats d'une évaluation en paramètres de conception. Nous imaginons cela sous forme de moteurs d'évaluations susceptibles d'interagir avec l'ensemble des dimensions propres au plissage.

Enfin, la conclusion présente les enjeux et les limites de notre recherche. Ces résultats nous permettent de définir des perspectives de développement pour l'architecture d'enveloppes structurales plissées.

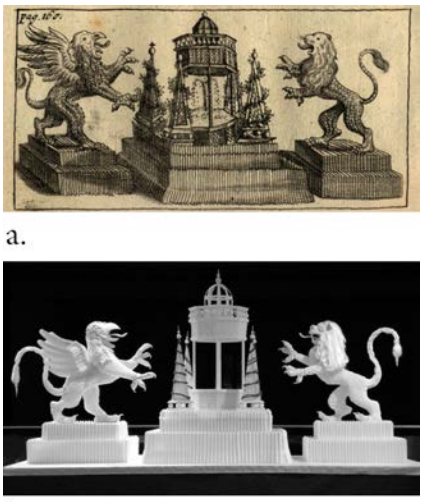
Partie A

Présentation du contexte d'étude

Chapitre 1

L'attrait des structures plissées

Pour appréhender les morphologies plissées, portons un premier regard sur l'art du pliage. Sa forme la plus connue est certainement « l'origami » ou l'art du pliage d'une feuille de papier[1] selon des règles précises. Cette pratique japonaise fait partie des nombreuses méthodes de pliage recensées dans l'histoire. Si l'on se réfère aux recherches des historiens comme Joan Sallas ou David Lister, le processus de pliage se serait développé conjointement à travers le monde. Bien que le Japon soit souvent mentionné comme le pays fondateur de cet art, Joan Sallas remet en cause cette thèse et propose, au travers de différents ouvrages, des exemples appuyant sa réflexion[2]. Il y mentionne notamment les décors de table appelés « triomphes », faits entièrement de serviettes de lin pliées (Figure 1.1). Ces créations issues de la Renaissance italienne représentent une étape importante dans l'évolution de l'art du pliage qui s'est développé en Europe centrale depuis l'antiquité. Même si David Lister émet quelques réserves quant à l'exactitude historique de l'art du pliage[3], il conforte les propos de Sallas dans un article consacré à une ancienne carte égyptienne[4]. Cette carte géologique des mines d'or du désert de Nubie, communément appelée « Papyrus minier de Turin », daterait du règne de Ramsès IV vers 1150 av. J.-C. Son intérêt réside dans les marques de pliage visibles similaires à celles d'une carte routière actuelle. Lister nous rappelle que ce papyrus est « le premier exemple de pliage connu, que ce soit à l'est ou à l'ouest ». Lister et Sallas mettent en évidence une évolution simultanée de cet art à divers endroits géographiques du globe, même si l'on identifie des caractéristiques différentes quant aux matériaux utilisés, à la forme engendrée et à la technique mise en œuvre. Cela semblerait montrer un intérêt universel pour le pli mais influencé par des pratiques culturelles distinctes, à l'image des tuniques en lin



a.

b.

Figure 1.1 - Modèle dit « Fontaine de printemps » pour la confection d'un décor de table par Andreas Klett en 1677.
a. Gravure, impression sur papier. D'après (Klett, 1724).
b. Réalisation de la « Fontaine de printemps » selon le modèle de Klett par Joan Sallas. D'après (Birnbaum, Sallas, 2012, p. 10).

[1] L'art de plier le papier est désigné dans le monde entier par le terme « origami » (des mots japonais ori, *plier* et *kami*, papier).

[2] (Birnbaum, Sallas, 2012).

[3] (Lister, 1997).

[4] (Lister, 2005).

Figure 1.2 - Tunique en lin plissée, Égypte, Meir, VIe - XIe Dynastie. Le lin humecté a alors été froncé, probablement à l'aide de planches en bois crantées.
D'après le catalogue de l'exposition « Ancient Egypt » à Taichung (Taïwan) en 2000, p125-126.

plissées de l'Égypte antique entre 2500 et 2000 av. J.-C. (Figure 1.2) ou encore des serpentins de papiers pliés en zig-zag de l'ère Heian (vers 795-1185) nommés Gohei et utilisés dans les rituels Shinto.

D'où provient l'attrait pour l'art du pliage suscité par diverses civilisations sans liens apparents entre elles ? Les propos de David Lister font apparaitre l'idée d'un geste instinctif : « *Si vous tenez un morceau de papier dans votre main, il est presque impossible de ne pas jouer avec lui* »[5]. Un geste inconscient associé à un matériau propice tel que le textile ou le papier ouvre certainement la voie à un pliage primitif. Par ailleurs, les travaux de Jean-Marie Delarue révèlent que le pli façonne une partie du monde animal, végétal et géologique[6].

L'observation de la nature associée à des expérimentations de pliages instinctifs, issus de pratiques culturelles variées, a probablement constitué au fil du temps les bases des arts du pliage et du plissage.

Dans un premier temps, il convient donc de poser un regard sur les différents plis présents dans la nature. La recherche des causes possibles de la présence des plis, mais aussi des conséquences induites par ces mêmes plis permettra d'en déterminer les caractéristiques.
À partir de ces caractéristiques, nous examinerons, dans un deuxième temps, le pli dans le domaine des structures architecturales.

1.1. Le plissage dans la nature

L'observation de la nature, en perpétuelle recherche d'un équilibre, révèle diverses raisons à l'existence de plis. Pour les examiner, nous nous appuierons sur les travaux de Jean-Marie Delarue. Dans un rapport de recherche relatif aux constructions plissées[7], l'auteur propose un volet sur l'étude des constructions plissées où les systèmes naturels sont présentés en tant que leçon structurelle et source d'inspiration. L'auteur décrit le plissage comme un résultat morphologique régi par des principes géométriques, mécaniques et structuraux ; le pli résulte de contraintes issues de son milieu.

[5] (Lister, 2003).

[6] (Delarue, Brossin, 1981).

[7] Ibidem.

Afin d'illustrer ce propos, il convient de présenter quelques exemples de plissages présents dans la nature sous la forme de trois thèmes : les « systèmes contenus », les « systèmes évolutifs » et les « systèmes structuraux ». Il est intéressant de noter qu'un même exemple peut appartenir à plusieurs thématiques. Toutefois, nous privilégions celle qui nous semble la plus pertinente.

1.1.a. Les systèmes contenus

Ce thème aborde les plissages issus de déformations irréversibles provoquées par les contraintes induites dans le matériau.
Les boursouflures sont un exemple de repli[8] de la matière sur elle-même. Elles se traduisent le plus souvent par une limitation de la « propension à l'expansion »[9] ; lorsque le volume d'un corps augmente de manière plus significative que son enveloppe, la pression interne occasionnée engendre des tensions superficielles. À l'inverse, les replis provenant du fanage ou du dessèchement des végétaux se traduisent par une dessiccation[10] du corps végétal entraînant un rétrécissement des tissus. Jean-Marie Delarue précise à ce sujet que les reliefs plissés suivent habituellement la direction des tensions superficielles induites par flexion ou par flambement de l'enveloppe, elles-mêmes dépendantes des lignes directrices des courbures principales. Les plis sont donc organisés de manière à relaxer les contraintes subsistantes dans la matière.

Figure 1.3 - Grotte d'Harpéa. Cette cavité naturelle s'est formée par l'effondrement partiel de strates rocheuses d'un pli anticlinal. Disponible à l'adresse : http://www.petit-patrimoine.com/fiche-petit-patri-moine.php?id_pp=64218_1 [Consulté le 21 décembre 2015].

En géologie, l'exercice de contraintes internes de l'écorce terrestre, caractérisé par l'orogenèse, se traduit également par des plis de la matière (Figure 1.3). Pour l'observateur, la question de l'échelle est primordiale dans ce cas. Les effets de la tectonique des plaques peuvent entraîner des plis de plusieurs kilomètres à quelques dizaines de millimètres. Les propriétés très diverses des éléments qui composent le sol comme l'anisotropie ou encore la densité variable des roches engendrent un plissage difficilement compréhensible en trois dimensions.

[8] Le repli est considéré comme un mouvement sinueux, voire un enroulement et par analogie, un creux ou un bourrelet. Disponible à l'adresse : http://www.cnrtl.fr/definition/repli/substantif [consulté le 27 juin 2016].

[9] (Delarue, Brossin, 1981, p. 27).

[10] Suppression naturelle ou artificielle de l'humidité contenue dans un corps. Disponible à l'adresse : http://www.cnrtl.fr/definition/dessication/substantif [consulter le 27 juin 2016]

Figure 1.4 - Origami instantané d'un cône de papier réalisé par Biruta Kresling.
Images extraites du film « Un monde en pli ; le code origami » réalisé par François-Xavier Vives et diffusé dans le programme « L'empire des sciences » sur France 5, le 29 août 2015 (Vives, 2015).

Toutefois, une simple observation en coupe permet d'apporter quelques éléments de clarification. D'après la définition géologique d'un pli[11], ce dernier n'existe que par la compression d'un matériau sédimentaire généralement composé de différentes strates. Ce « multicouche » apporte une souplesse nécessaire à la formation de plis grâce au glissement entre les strates. Une analogie avec la ramette de feuilles permet de dire que le processus de pliage agit sur des surfaces de faible épaisseur. Lorsque l'on comprime la ramette entre deux champs parallèles, le glissement des feuilles les unes sur les autres autorise leur flexion de manière à former un pli. Un collage de l'ensemble des feuilles modifie le rapport surface / épaisseur, abrogeant ainsi le phénomène de pliage.

1.1.b. Les systèmes évolutifs

Ce thème présente des mécanismes perfectionnés capables d'évoluer. Située au carrefour de la biologie et de la technique, la bionique nous aide à poser un regard nouveau sur notre environnement naturel et à réfléchir sur ce que nous pouvons apprendre de ses inventions. Les travaux de Biruta Kresling mettent à jour ce phénomène au travers des origamis instantanés, structures plissées qui reproduisent automatiquement un « *crease pattern* »[12] de l'origami sans intervention particulière[13]. Elle explique que la compression instantanée d'un cône de papier suit une spirale logarithmique. C'est une forme mathématique typique dans des phases de croissance d'éléments ayant la forme de tubes ou de cônes, comme la pomme de pin (Figure 1.4). Cet architecte et designer a mis en lumière plusieurs de ces origamis instantanés présents dans la nature où les analogies de forme et de texture sont troublantes. L'origami se présente alors comme un principe de pliage des formes évolutives.

[11] « Un pli est un accident de style souple développé dans un matériau sédimentaire par une tectogenèse en compression » (Coque, 1977, p. 20).

[12] Dans l'origami, le *crease pattern* correspond au schéma de pliage visible lorsque la feuille de papier est dépliée (Lang, 2016).

[13] (Kresling, 2012).

Le monde végétal en offre une variété d'exemples. Pour Jean-Marie Delarue : « *[…] la matière est sculptée par les contraintes en présence selon des diagrammes vivants d'équilibre des forces* »[14]. Le terme « vivants » fait allusion à la croissance des plantes et à leur adaptation constante à leur environnement. Le travail de Lakshminarayanan Mahadevan, sur l'organisation spatiale de la matière en milieu contraint, nous montre la complexité des géométries des structures plissées et froissées trouvées dans la nature (Figure 1.5), comme les feuilles des plantes[15].

Figure 1.5 - Déploiement d'une feuille de hêtre. Comme pour le charme, les plis permettent de contenir la feuille dans l'enveloppe du bourgeon avant son éclosion. Disponible à l'adresse : http://tyazz.over-blog.com/2015/04/hetre-commun-fagus-sylvatica-naissance-des-feuilles.html [Consulté le 7 avril 2016].

Si l'on regarde attentivement une feuille de charme enfermée dans son bourgeon, on constate que son plissage est comparable à un schéma de Miura Ori[16]. Ce plissage est la conséquence d'une contrainte de croissance entre la feuille de fine épaisseur et son substrat (tension exercée par une vitesse de croissance différente entre le support et la feuille). Ainsi, dans ce cas précis, le pliage résout le problème d'une contrainte spatiale devant permettre l'évolution d'une structure vivante.

Ce même principe est également visible dans les systèmes de ploiement / déploiement des ailes d'insectes. Afin d'assurer une surface nécessaire à la portance du corps de l'insecte[17], les ailes sont souvent plus importantes que les élytres qui servent à les abriter. Ainsi, l'aile doit pouvoir se replier sans amoindrir sa qualité structurale. Cela est rendu possible par un jeu de nervure et d'articulation permettant au forficule[18] de replier son aile sous la forme d'un plissage en accordéon (Figure 1.6). D'autres insectes, comme le scarabée de Thaïlande ou la guêpe, suivent un schéma de pliage présentant une succession de deux pliages afin de déployer plus rapidement leurs ailes[19].

Figure 1.6 - Forficule avec ses ailes déployées.
Disponible à l'adresse : http://hotelinsectbougain.revolublog.com/nichoir-a-perce-oreille-forficule-p981086 [Consulté le 19 mai 2017].

[14] (Delarue, Brossin, 1981).

[15] (Dudte et al., 2016).

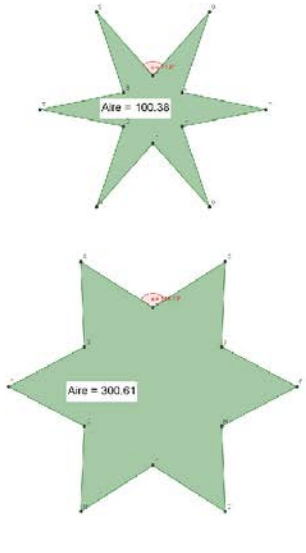
[16] Le Miura-Ori est une méthode de pliage inventée par l'astrophysicien Koryo Miura. Issu de la pratique de l'origami, ce pliage nécessite très peu d'énergie pour se ployer ou se déployer (Bain, 1981).

[17] Le changement d'échelle d'un corps tridimensionnel entraîne une augmentation au carré de sa surface et une augmentation au cube de son volume : « le poids augmente plus rapidement que sa taille » (Delarue, Brossin, 1981, p. 40).

[18] Le forficule est communément appelé le « perce-oreille ».

[19] (Mikó et al., 2014).

a.



b.

Figure 1.7 - Le pli chez le cactus.
a. Variétés morphologiques du cactus issues d'une adaptation climatique.
b. Coupe de cactus en période sèche et en période humide ; grâce aux côtes, cette plante peut multiplier jusqu'à 6 fois sa section en période humide. Disponible à l'adresse : https://tpecactusabk.wordpress.com/2016/01/27/ladaptation-des-formes/ [Consulté le 7 avril 2016]

Par ailleurs, des plissages développables, comme celui en accordéon, permettent aux végétaux de s'adapter aux variations climatiques (cycle journalier ou saisonnier). À l'image du grand cactus Saguaro, cette accommodation subsiste au travers d'actions comme la dilatation et la rétraction du corps de la plante au gré des périodes de pluies et de sécheresse, sans déchirures de l'épiderme. Le plissage offre une souplesse de l'enveloppe dans le sens diamétral afin d'assurer le phénomène de rétention de l'eau dans le cactus (Figure 1.7). Il est intéressant de noter que les plis ou « côtes » du cactus produisent, par leur résistance au flambement, un plissage d'une grande rigidité dans le sens de compression privilégiant ainsi leur grande hauteur.

Les plis semblent trouver une place dans les dispositifs évolutifs. La grande richesse de « l'origami » réside bien dans le pliage de surfaces continues de faible épaisseur. De tels pliages sont réversibles, autrement dit développables. Cela est bien visible dans le plissage de certaines feuilles d'arbre ainsi que dans les ailes de nombreux insectes. Cette remarque ouvre la réflexion sur la stabilité structurale des différents plissages issus de l'origami.

1.1.c. Les systèmes structuraux

Ce dernier thème fournit divers exemples attestant du pli comme principe structural. La nature est à la recherche d'une résistance permanente face aux contraintes extérieures. Le vent, le poids de la neige, mais aussi le simple effet de la gravité nécessitent une efficacité structurale. Cette dernière s'obtient par la recherche d'une stabilité et d'une rigidité matérielle suffisantes.

La pesanteur est certainement la première force en présence à laquelle le monde végétal doit faire face. Les feuilles de palmier ou du chlorophytum certifient l'intérêt d'un pli. Suivant la direction longitudinale de la feuille, cet unique pli de section en « V » reprend les efforts de flexion issus de l'effet du porte-à-faux. L'orientation du « V » prend toute son importance. Les deux extrémités libres travaillent parfaitement en traction, alors que la pointe du « V » assure une géométrie indispensable à la reprise des efforts de compression. La morphologie du pli n'est pas le seul principe structurant et s'associe judicieusement à une augmentation de l'épaisseur de la feuille dans la zone de compression.

L'exemple des coquillages est intéressant pour les caractéristiques structurales de leur coque. En effet, cette coque constitue la seule protection contre les chocs et les prédateurs. La première spécificité structurale de ces coques réside dans leur forme majoritairement non développable. Cependant, pour vivre, le mollusque a besoin d'un contact avec le milieu marin. L'utilisation d'une coque ouverte ou ouvrable fragilise considérablement cette structure. Une première parade à cette faiblesse structurale repose sur la composition de la coquille : les biominéraux[20]. Toutefois, de nombreux coquillages ont développé des morphologies plissées (Figure 1.8). Par exemple, l'amplitude des plis de la coquille du Lopha contrebalance la faible épaisseur du matériau. Chez la Patelle[21], la coquille est un cône renforcé par des plis disposés selon des génératrices rectilignes. Ce principe s'observe sur la coquille Saint-Jacques où les plis, telles des ondes, suivent la direction de plus faible courbure. Ces ondes se rencontrent toutes au point de charnière assurant une bonne rigidité des deux coques ainsi que l'engrènement lors de la fermeture. La disposition de ces plis apporte une inertie et assure un emboîtement solidaire.

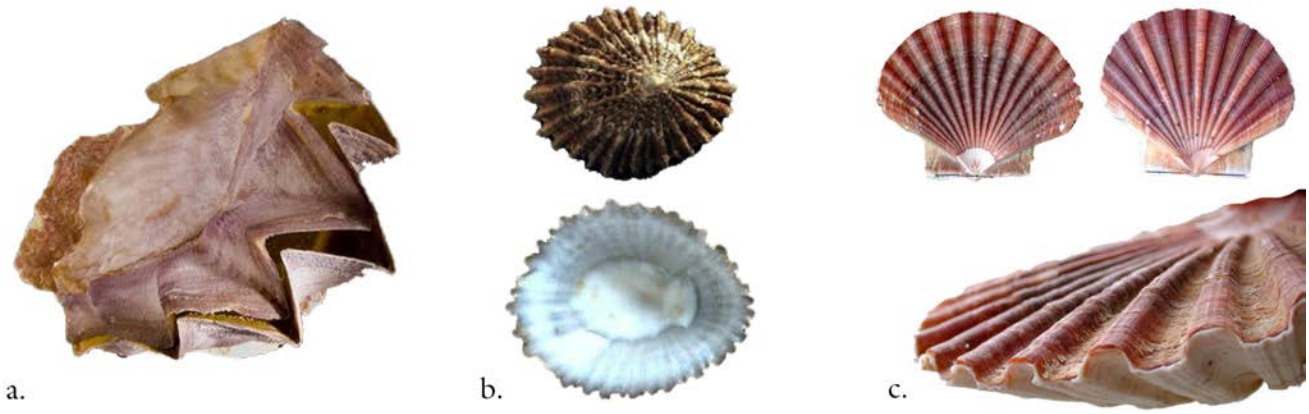


Figure 1.8 - Plis morphologiques chez les coquillages.
a. Huître zigzag ou Huître crête de coq (Lopha cristagalli).
b. Chapeau chinois ou Patelle commune (Patella vulgata Linnaeus).
c. Coquille Saint-Jacques (Pecten maximus).

[20] « Structure minéralisée synthétisée par un organisme vivant » (Marin, 2009, p. 40).

[21] Appelé communément « chapeau chinois ».

OBSERVATIONS : La nature et notamment le monde végétal sont très représentatifs de l'usage du pli comme facteur important de la morphogenèse[1].

Dans les trois thèmes présentés, le plissage le plus récurrent est sans doute celui de l'accordéon. En effet, cette morphologie permet de faire face aux différentes contraintes physiques et mécaniques tout en assurant une possibilité d'évolution : la direction principale suivant la ligne du pli garantit une résistance à la compression ; perpendiculairement, le développement des plis offre une grande souplesse ; enfin, la direction perpendiculaire aux deux premières définit l'inertie nécessaire à la résistance en flexion.

Qu'il s'agisse d'un pli unique ou d'une combinaison complexe de plis, le plissage résulte d'un champ de contraintes établies dans un milieu donné. Il est une réponse aux exigences de croissances[2] et aux règles physiques régies par l'environnement.

Face à une récurrence des systèmes combinatoires de plis, il est difficile d'ignorer les bases d'une logique structurale. Cependant, Delarue fait remarquer que la technique du pliage, bien qu'elle soit un processus de morphogenèse reconnu, est encore rarement présentée comme règle de transformation dans les ouvrages de morphologie structurale.

Le domaine de l'architecture partage de nombreuses règles physiques avec le domaine végétal. Par exemple, l'un des premiers défis de la construction est de combattre la pesanteur. Cependant le plissage ne semble pas un processus très familier dans le contexte constructif. Quelles sont donc les raisons supplémentaires qui régissent la production des structures architecturales plissées ?

---

[1] (Delarue, Brossin, 1981)

[2] Dans le cas des plantes, la survie est assurée par la photo synthèse. Le pli intervient ici comme un moyen d'augmenter la surface d'échange afin d'assurer ce processus.

1.2. Le plissage et ses applications constructives

Dans l'architecture, le plissage adopte des fonctions initialement présentes dans la nature comme organiser, envelopper ou encore déployer qu'il conjugue harmonieusement. La géométrie du plissage satisfait un ensemble de « *facultés associées* »[22] issues d'une combinaison des principales propriétés inhérentes au pli. Ces propriétés sont présentées sous forme de dimensions.
À travers différents exemples de constructions plissées réalisées dans le monde, nous souhaitons présenter plusieurs de ces dimensions qui présentent un intérêt pour l'architecture.
Le terme « architecture » est employé ici dans un sens étendu. Ainsi, nous intégrons des dimensions relevant aussi bien d'une thématique sensorielle que constructive. Ces dimensions, développées ci-après, ne sont pas exhaustives, mais représentent à elles seules les bases d'un vocabulaire architectural.
À la fin de cette section, nous proposons une vision synthétique de l'expression architecturale des constructions plissées issue d'une combinaison de ces dimensions. Nous nous appuyons sur un corpus d'étude d'une vingtaine de réalisations dont les fiches descriptives sont consultables dans l'annexe 1 de ce mémoire.

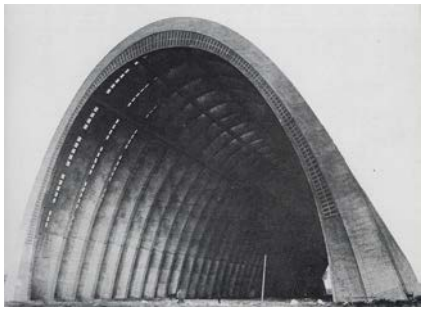


Figure 1.9 - Hangar d'Orly. D'après (Fernández Ordóñez, 1979).

Figure 1.10 - Chapelle de la Royale Air Force Académie (cf. Annexe 1).

1.2.a. La dimension structurale

Dans l'ouvrage « *Comment ça tient ?* », Mario Salvadori a écrit : « *Bien que les composants fonctionnels et structuraux de l'architecture se distinguent très souvent, la structure exerce toujours une influence décisive sur l'architecture* »[23]. Ce point de vue doctrinal peut s'appliquer parfaitement aux formes plissées. Si nous nous référons au monde végétal, le pli se révèle comme une sorte de conformation[24] qui allie résistance et possibilité de croissance[25]. Par analogie, les enveloppes plissées se présentent comme une méthode constructive qui associe efficience structurale et vertu architecturale. En lien avec ces propos, on évoque notamment les travaux d'Eugène Freyssinet pour les hangars d'Orly où les ondes donnent l'aspect d'un voile plissé (1924) (Figure 1.9), ainsi que ceux de Walter Netsch pour la

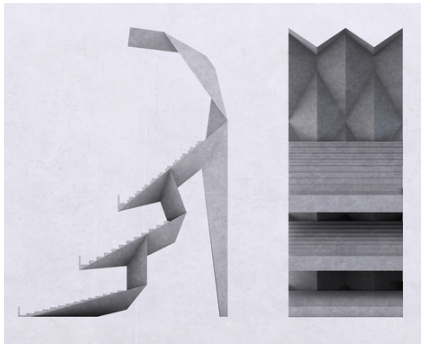


Figure 1.11 - Projet du stade de Jeddah. Disponible à l'adresse : http://blog.la76.com/2012/04/jorn-utzon/ [Consulté le 16 mars 2015].

[22] (Delarue, Brossin, 1981, p. 104, Partie 2).

[23] (Salvadori, 2005, p. 13).

[24] Disposition des différentes parties d'un corps organisé

[25] (Delarue, Brossin, 1981, p. 13).

United States Air Force Academy Cadet Chapel (1954) (Figure 1.10) ou encore le projet du stade à Jeddah de Jorn Utzon, en Arabie Saoudite (1999) (Figure 1.11).

Figure 1.12 - Le pli de la feuille de papier permet d'absorber les contraintes de flexion. D'après (Salvadori, 1976, p. 185).

Le pli et les techniques de plissage qui en sont dérivées apportent une dimension structurale, en l'occurrence une stabilité et une rigidité. Une feuille de papier maintenue par l'une de ses extrémités ne peut supporter son poids propre étant donné sa fine épaisseur (Figure 1.12). Mario Salvadori explique comment un pli, sur cette feuille de papier, permet de lui apporter la raideur suffisante afin de pouvoir la maintenir horizontalement. Cependant, le système de plissage engendre une complexité structurale. En effet, le plissage est référencé à un objet géométrique caractérisé par la surface : cela classe les structures plissées dans la théorie des coques dont la connaissance reste limitée. Le plissage peut être pensé « comme un ensemble de voiles liées de façon monolithique »[26]. Toutefois, une distinction s'opère à l'échelle de la composition structurale de l'élément surfacique constituant la coque. Une structure plissée peut être composée d'une coque massive comme c'est le cas dans le bâtiment en béton du CNIT[27] de Bernard Zehrfuss et Nicolas Esquillan, mais elle peut également être réalisée par une structure « poutre » à l'image du treillis métallique du Riverside Museum de Glasgow[28]. Dans ce deuxième exemple, l'effet visuel du plissage n'apparaît qu'une fois la structure recouverte. Néanmoins, ce dispositif de treillis allège la complexité du calcul structural.

Comparée à une surface plane telle qu'une dalle, une surface plissée de même épaisseur est capable d'absorber des efforts de flexions plus élevés[29]. En effet, la résistance par la forme évoque principalement la notion d'inertie. Ce principe a pour objectif de pallier l'affaiblissement structurel relatif au matériau employé, notamment pour les surfaces de faible épaisseur. Ces structures à résistance de forme présentent un rapport efficient entre la surface plissée projetée et la quantité de matière requise pour sa réalisation. Le moment

[26] (Muttoni, 2012, p. 200).

[27] CNIT : Centre des Nouvelles Industries et Technologies, construit dans le quartier de la Défense à Paris en 1958.

[28] Musée écossais des transports conçu par l'architecte Zaha Hadid en 2011.

[29] (Salvadori, 1976, p. 185).

d'inertie d'un pli composé de deux éléments disposés en « V » est équivalent à une poutre de section rectangulaire de même hauteur et de largeur égale à la somme des largeurs horizontales des deux éléments[30] (Figure 1.13). Ainsi, à matière équivalente, un plissage peut couvrir une plus grande surface qu'une dalle plane. Toutefois, cette affirmation doit prendre en compte les points d'appui, les conditions de chargement et le nombre de plis qui compose le plissage (Figure 1.14).

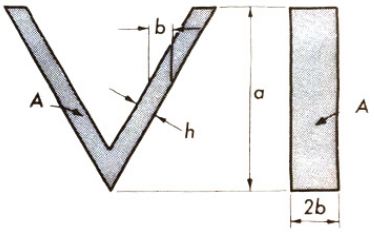


Figure 1.13 - Poutre rectangulaire équivalant à un voile plissé.
D'après (Salvadori, 1976, p. 185).

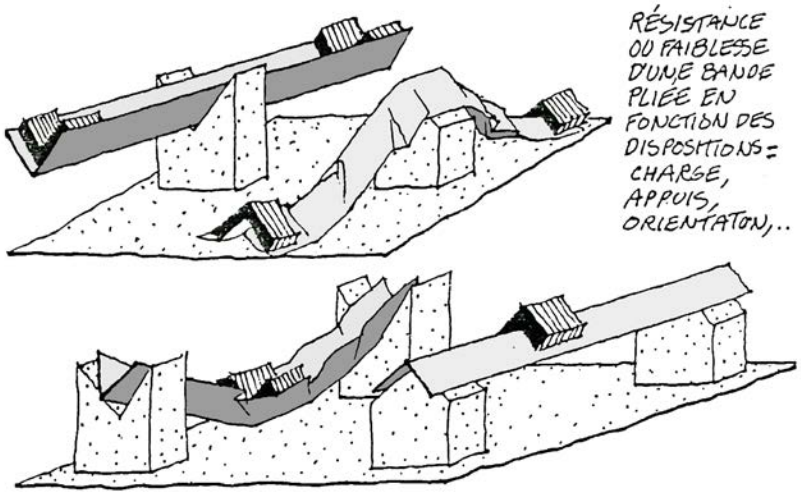


Figure 1.14 - Importance des appuis lors de la sollicitation d'une poutre en «V».
D'après (Delarue, Brossin, 1981, p. 58).

Une feuille de papier disposée entre deux appuis s'effondre sous son propre poids. L'absence de rigidité, due à la faible épaisseur de la feuille, peut être compensée par l'apport d'un pli. Cependant, une dimension trop importante du pli peut entrainer son effondrement par flambement des éléments qui le constituent. Ce phénomène physique peut être empêché par une démultiplication du nombre de plis. Toutefois, à surface de plissage équivalente, l'augmentation du nombre de plis entraine un affaiblissement du moment d'inertie (Figure 1.15). L'intérêt du plissage réside donc dans un rapport judicieux entre l'inertie et l'épaisseur du matériau en fonction de la surface à couvrir[31]. L'exemple de la passerelle piétonne Lederer illustre ces propos. Le pli formé par l'association de deux panneaux de lamellé-collé d'une épaisseur de 17 cm, dont le déploiement est bloqué par des tirants, forme une poutre d'une portée de 24 m.

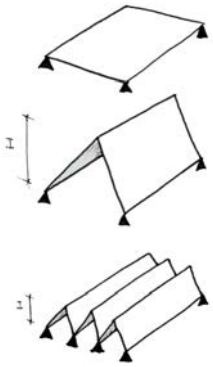
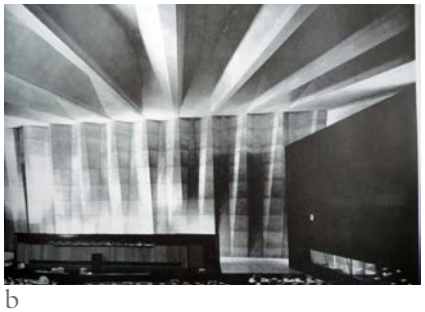


Figure 1.15 - Diverses possibilités d'augmenter l'inertie d'une dalle.

[30] Ibidem.

[31] Ces paroles sous-entendent une référence d'usage, c'est-à-dire la connaissance du milieu ainsi que des forces en présence.

a



b

Figure 1.16 - Morphologies structurales :
a. Le «State Farm Center», Illinois
b. La salle de conférence de l'UNESCO, Paris (Cf. Annexe 1)

Elle absorbe les contraintes de flexion provenant des charges verticales du tablier[32]. Par son degré d'ouverture faible, le pli apporte la raideur et l'inertie nécessaires au dimensionnement structural de l'ouvrage en garantissant une faible épaisseur de l'enveloppe.
Ainsi, la morphologie du plissage permet de répondre aux contraintes structurales. Des bâtiments comme le State Farm Center de l'Université de l'Illinois ou encore la salle de conférence de l'UNESCO à Paris présentent un plissage structuré comme une retranscription formelle du champ des contraintes (Figure 1.16). Cette pensée se cofirme dans les propos de Pier Luigi Nervi au sujet du bâtiment parisien : « *De la continuité dans la longueur […] a dérivé l'idée d'une construction ondulée dont les ondulations varieraient selon la hauteur, au gré des variations des moments fléchissants* »[33].

Cette relation peut être optimisée si la forme globale du plissage est associée à une forme courbe comme cela a été présenté dans le cas des plis structuraux des coquillages. Il subsiste donc deux échelles combinatoires : la première concerne le type de plissage engendré par une combinaison de plis et la seconde se rapporte à la courbure de la surface moyenne définie par le plissage, dont nous abordons ici une description. Par cette forme courbe, synclastique, développable ou anticlastique, une résistance supplémentaire est apportée au plissage (Figure 1.17). Ces trois formes de courbure ont été définies par Carl Friedrich Gauss[34], caractérisant les surfaces courbes présentes dans la nature[35]. La courbure de Gauss est une quantité algébrique correspondant au produit des courbures principales de la surface en un point donné[36]. Si la courbe de Gauss est positive ou négative (surface synclastique ou anticlastique), la surface est non développable et a contrario, si le résultat est nul en tout point, la surface est développable. Une spécification structurale distingue les surfaces non développables des surfaces développables.

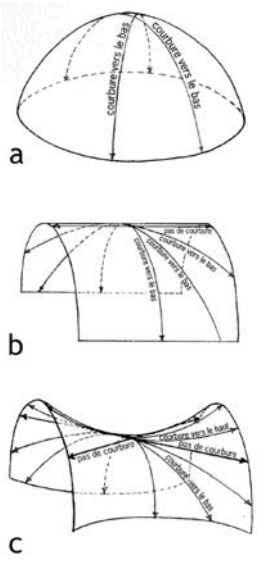


Figure 1.17 - Formes de courbure.
a. Forme synclastique
b. Forme développable
c. Forme anticlastique
D'après (Salvadori, 2005, p. 160-161).

[32] (Herzog, 2005, p. 242).

[33] (Desideri et al., 1982, p. 63).

[34] (Gauss, 2008).

[35] (Salvadori, 2005, p. 159).

[36] Repère principal (repère orthonormé) des courbures en un point donné possédant la valeur minimale de courbure (K1) et la valeur maximale de courbure (K2) (Lahbari, 2007, p. 39).
La courbure de Gauss notée (K) est définie par K=K1K2. Si K=0, alors la courbure maximale est une ligne droite (Rayonmax =∞).

Ces dernières n'opposent pas de résistance aux déformations qui tendent à les aplanir, contrairement aux surfaces non développables qui font preuve d'une grande rigidité. Par conséquent, un plissage structurel ne doit pas être développable, ce qui tendrait à éloigner, de notre étude, les principes de pliage issus de l'origami. Toutefois, l'utilisation de telles surfaces est possible par la mise en œuvre de dispositifs bloquant les plis tels que le diaphragme comme constaté dans la toiture plissée du palais des Expositions de Turin conçue par Pier Luigi Nervi en 1949 (Figure 1.18).

On n'a présenté ici que les principes essentiels du pli et ses acceptions vis-à-vis du plissage. Plusieurs ouvrages[37], portant sur le sujet, apportent des informations complémentaires relatives à la mécanique du pli et à ses principes structuraux inhérents.

Figure 1.18 - Couvrement plissé du palais des Expositions de Turin. D'après (Meiss, 2003, p. 253).

1.2.b. La dimension spatiale

Dans cette dimension nous nous intéressons à l'impact d'une construction plissée sur l'espace qu'elle génère.

Si l'on considère que la verticalité est l'orientation privilégiée face à la pesanteur et que la ligne droite est la distance la plus courte entre deux points, on comprend alors l'omniprésence des parallélépipèdes rectangles dans la construction. La génération d'espaces architecturaux, alors fortement régie par l'art de la construction, ne prend sens que s'ils possèdent une fonction.

Ainsi, les constructions plissées définissent une nouvelle orientation en matière de conception d'espace. La question qui demeure est la suivante : l'espace généré par le plissage peut-il s'adapter à toutes sortes d'usages ?

Nous trouvons une réponse dans les différents courants architecturaux. Par exemple, la relation « intérieur | extérieur » s'est fortement développée dans l'art du baroque. Elle est décrite par Pierre Von Meiss comme une antonymie exprimant à la fois « *frontière et passage, continuité et discontinuité* »[38]. Nous pouvons également citer les thématiques prépondérantes dans le déconstructivisme telles que la rupture ou la fragmentation. Daniel Libeskind, Rem Koolhaas, Peter Eisenman, Frank Gehry, ou encore Zaha Hadid voient dans

[37] Nous faisons allusion à des ouvrages comme le rapport sur les « Constructions Plissées » de Jean-Marie Delarue ou encore les divers livres de Mario Salvadori.

[38] (Meiss, 2003, p. 160).

Figure 1.19 - Hôtel Marques De Riscal.
Disponible à l'adresse : https://artichaut-magazine.fr/frank-gehry-au-centre-pompidou/ [consulté le 17 Mai 2017]

le plissage une expérience de la spatialité. Par exemple, la juxtaposition « concaves | convexes » des plis crée une sensation de division puis de canalisation de l'espace vers des zones subsidiaires offrant refuge et intimité.

L'hôtel Marques De Riscal conçu par Franck Gehry en 2006 (Figure 1.19), tout comme le projet de l'église Tor Tre Teste à Rome proposé par Eisenman montrent qu'une combinaison de plis peut convenir à la mise en œuvre du projet architectural. Le pli et ses multiples propriétés, dans un esprit de perpétuation, organisent l'espace de manière fluide.

Cet espace ainsi généré par le plissage peut répondre à des usages spécifiques en fonction de sa morphologie. Deux facteurs sont primordiaux : l'échelle du plissage et la distance qu'entretient l'utilisateur avec la morphologie du plissage. D'une part, un pli de quelques mètres n'engendre pas les mêmes fonctions spatiales qu'un pli de quelques centimètres comme cela peut se constater entre l'arrêt de bus à Krumbach et les abris temporaires des fermiers californiens appelés « Plydome » (Figure 1.20).

a. b.

Figure 1.20 - Variation de la perception de l'espace engendrée par les dimensions du pli.
a. Plydome (cf. Annexe 1).
b. Abri de bus à Krumbach. (cf. Annexe 1).

D'autre part, un plissage dont les plis mesurent plusieurs mètres n'a pas le même impact spatial s'il est distant de l'utilisateur, comme on le voit dans le bâtiment l'Assembly Hall de l'Université de l'Illinois, que si l'utilisateur peut en mesurer les interstices comme cela est possible au Gumna Music Center d'Antonin Raymond.

1.2.c. La dimension plastique

Nadine Vasseur présente, dans son ouvrage sur les plis, un chapitre consacré aux « traités du pli »[39]. Elle y décrit l'intérêt porté à « l'art de l'étoffe » depuis Léonard de Vinci jusqu'à Roger de

[39] (Vasseur, 2002, p. 31).

Piles. De la peinture à la sculpture, en passant par la photographie ou la couture, sa présence, inconsciente ou non, a façonné l'histoire de ces arts. Par le pli, les artistes révèlent la nature de la matière, si bien que nous possédons la capacité de deviner le tissu représenté dans un drapé de marbre. Quant à la peinture, les artistes s'évertuent à révéler la forme par drapé au travers des jeux d'ombres et de lumière. L'écriture stylistique de chaque drapé est tributaire de l'expressivité du message qu'il doit transmettre : la grâce par le mouvement, la majesté par la légèreté, la stature par la massivité…

La dimension plastique est donc indissociable d'une valeur émotionnelle. Cette sensibilité dépend des « aptitudes expressives » du plissage. Pour Jean-Marie Delarue, la morphogenèse du plissage est dirigée par quatre « harmonies » qui lient la valeur explicite de la dimension plastique à la valeur implicite d'une émotion[40] :

- La « fascination de l'animé », par le mouvement le rythme et la vitesse.

- L' « euphonie », variation du contraire, sommets et vallées, positif et négatif.

- Les « nuances » issues de la lumière révélée.

- L' « emprise du trait » guidant le regard.

Dans la religion chrétienne, la dimension des églises impose l'humilité face au pouvoir divin. Elles jouent subtilement avec la lumière pour afficher l'omniprésence céleste. Ces critères architecturaux se conjuguent parfaitement aux structures plissées à en juger le nombre de réalisations. L'église St Marc de Bagotville fait partie de ces dizaines d'églises du milieu du XXe siècle qui disposent d'une coque plissée (Figure 1.21). Ce processus permet d'obtenir un effet grandiose par une nef évidée de ses piliers : il y a une intensité dans la perception du pli qui accompagne l'effet émotionnel.
L'église de la divine miséricorde[41] à Tylmanowa en Pologne illustre aussi ces propos. Bien que l'extérieur du bâtiment cultuel reflète le style massif de la région, à l'intérieur, la gravité s'estompe. Telle une

Figure 1.21 - Église de St Marc de Bagotville, Québec.
Disponible à l'adresse : http://www.shistoriquesaguenay.com [consulté le 2 juin 2015]

[40] (Delarue, 1997, p. 46).

[41] Une visualisation à 360 ° de l'intérieur de l'église est disponible à l'adresse : http://www.vtour.pl/wirtualny-spacer/2600/ochotnica-dolna/parafia-pw-sw-mikolaja-w-tylmanowej.html [consulté le 2 juin 2015]

Figure 1.22 - Église de la Miséricorde de Tylmanowa, 1992 (architecte non renseigné). Disponible à l'adresse : http://basiazachwieja.pl/blog/2014/01/reportz-slubny-tylmanowa/ [consulté le 2 juin 2015].

tenture, un voile plissé d'une blancheur immaculée alloue légèreté et pureté à la sous-face de la couverture, laquelle est soutenue par des poteaux semblables à des retombées de flot (Figure 1.22).

Cette plasticité se retrouve également dans la façade en tôle d'aluminium du Centre de Recherche biomédicale de Pamplona. Des plis entrecroisés de façon régulière cherchent à imiter la beauté de l'écriture stylisée d'un tressage. De plus, la perforation des tôles produit un effet de légèreté et de transparence semblable à un voilage.

En ce sens, le pli peut être considéré comme un système plastique efficient qui rassemble et harmonise tous les moyens et procédés dont dispose le plissage. Ils sont catégorisés par les fonctions suivantes : l'échelle (jeux dimensionnels), la modénature (combinaison entre les arêtes saillantes et les retraits, jeux d'ombre et de lumière, jeux visuels) et le rythme (jeux d'orientation et répétition périodique d'un pli). L'ensemble de ces fonctions participe à la notion de « texture » du plissage.

1.2.d. La dimension de l'ambiance

Le plissage peut servir à une justification des contraintes énergétiques environnantes (échanges thermiques, acoustiques, hygrométriques, lumineux) afin de favoriser un confort de vie.
La morphologie du plissage peut être pensée de manière statique pour appuyer une propriété physique particulière ou dynamique dans le cas d'une adaptation saisonnière.
Cependant, les références dont nous disposons ne font clairement pas état de cette dimension. L'une des raisons réside dans le fait que la grande majorité de ces constructions ont été réalisées à une période où les préoccupations énergétiques et écologiques étaient différentes. Une autre raison peut provenir de l'usage des bâtiments qui ne nécessite pas une réflexion sur cette dimension à l'image des pavillons temporaires.
Une troisième raison peut provenir de l'absence, au moment de leur construction, des connaissances et des technologies de simulation actuelles dans le domaine de la physique du bâtiment. Aujourd'hui, nous pouvons proposer des pistes quant à l'impact du plissage sur des propriétés physiques telles que la thermique ou l'acoustique.

1.2.d.1. L'aspect thermique

L'approche environnementale menée ces dernières années par les grandes puissances mondiales tend vers une économie énergétique. Dans le cadre de la construction architecturale, cela correspond au « facteur de compacité » : il exprime le rapport entre la surface de déperdition et son volume protégé[42]. La sphère présente donc une compacité idéale. Pour un même volume, le plissage d'une surface accroît le facteur de compacité. Ainsi le plissage ne permet pas de minimiser la déperdition thermique. Cette condition fait apparaître un des critères importants dans la morphologie du plissage. Vraisemblablement, les réalisations plissées, visibles à ce jour, présentent des demandes énergétiques faibles ; nous faisons principalement référence à des bâtiments temporaires, des pavillons d'exposition, des pavillons extérieurs ou encore des bâtiments où la contrainte énergétique n'est pas prioritaire tels que les édifices religieux. Ces champs de la construction se prêtent particulièrement bien aux structures plissées. Cependant, il peut être intéressant d'investir des champs où le besoin d'échange énergétique est prépondérant. L'augmentation surfacique s'avère judicieuse pour réchauffer ou refroidir comme les échangeurs thermiques à ailettes. De plus, « l'inertie thermique de transmission », caractérisée par le temps de déphasage, est étroitement liée à l'exposition des surfaces réceptrices et à la capacité thermique du matériau employé[43]. Même si la morphologie du pli ne semble pas répondre efficacement à des échanges thermiques en zones climatiques froides, elle peut s'avérer judicieuse en zone climatique chaude et humide où il faut intensifier les transferts énergétiques. Des éléments de réponse ont été quantifiés dans le chapitre concernant le moteur d'évaluation thermique[44].

1.2.d.2. L'aspect acoustique

Nous ne présentons ici qu'un aspect global de cette dimension. L'intérêt acoustique porté à cette étude concerne le contrôle, la transmission, la réception et les effets de l'énergie sonore sur

---

[42] Le facteur de compacité noté Cf = A/V
Le rapport inverse se nomme la compacité et est noté C = V/A

[43] (Coque, 1977, p. 20).

[44] Cf. section 7.2.

Figure 1.23 - Exemple de diffuseur. Disponible à l'adresse : http://fr.yoycart.com/category/50020397/Matériau [consulté le 07 février 2017].

les enveloppes plissées. Quel est l'impact d'une telle enveloppe sur l'énergie sonore ? En fonction de ses caractéristiques, le pli va engendrer des effets de perceptions différents. Le plissage entre dans la gamme des « diffuseurs à résidu quadratique » (GRD) (Figure 1.23). Ces derniers ont été développés par le physicien allemand Manfred Robert Schroeder, afin d'obtenir une « réflexion diffuse » en renvoyant la même quantité d'énergie sonore dans toutes les directions[45]. Potentiellement, le plissage présente des spécificités concernant l'« absorption » et la « diffusion » de l'onde sonore en fonction de la profondeur et de la dimension des plis associés à la périodicité du plissage. La maîtrise de ces paramètres permet d'obtenir une qualité acoustique souhaitable. D'une part, le pouvoir absorbant dépend de la profondeur des plis[46]. Plus la profondeur des plis est importante, plus l'absorption est conséquente, notamment dans les basses fréquences. D'autre part, plus la périodicité est élevée, autrement dit plus le « pas » est relativement faible, plus les fréquences élevées sont ciblées (et réciproquement). Les fréquences sonores impactées dépendent donc de l'échelle du plissage.

Dans le cas des enveloppes plissées fermées, qui suggère le rapport intérieur | extérieur, une nouvelle dimension appelée « indice d'affaiblissement » doit être prise en compte. Cet indice désigne la capacité du parement à arrêter un « bruit ». Si l'on considère uniquement cette dimension, l'indice d'affaiblissement dépend entièrement de la composition du plissage. Les caractéristiques des matériaux, telles que la masse volumique et l'épaisseur, agissent sur les performances relatives au niveau de transmission sonore.

À titre d'exemple, nous pouvons citer le Gunma Music Center où l'architecte Antonin Raymond a souhaité que la coque plissée participe au traitement acoustique de la salle (Figure 1.24).

Figure 1.24 - Coupe longitudinale du Gunma Music Center (cf. Annexe 1).
D'après (Helfrich, Whitaker, 2006, p. 239).

[45] (Hamayon, 2014, p. 66).

[46] Cette affirmation sous-entend que la face du pli ne comporte pas de traitement acoustique spécifique : pas de perforation ou de rainures.

1.2.e. La dimension constructive

Comme cela a été mentionné dans la dimension spatiale, l'art de la construction est un pilier de l'architecture. La construction d'une structure plissée dépend donc de paramètres inhérents à la technique constructive: la première dimension concerne les caractéristiques du matériau employé et la seconde traite des enjeux économiques attenants à la construction.

1.2.e.1. L'aspect matériau

Dans le rapport sur les constructions plissées, Jean-François Brossin présente un historique concernant des technologies de pliage marquées par la révolution industrielle du XIXe siècle. En effet, l'émergence de nouveaux matériaux manufacturés comme la tôle ondulée (1828), le carton ondulé (1857) et les panneaux de bois contre-plaqué (1884) plaide en faveur des constructions plissées (Figure 1.25). Cependant, la manière de définir le mode de plissage va induire les possibilités de réalisation ; plier une feuille de tôle à l'échelle du carrossier n'engendre pas les mêmes difficultés à l'échelle d'un bâtiment. L'accès limité aux outils ou aux techniques ne permet pas d'assurer les sollicitations mécaniques nécessaires à la création d'un plissage. Il y existe donc une difficulté d'appréhension de l'échelle (dans la notion de fabrication) permettant de passer du plissage de la feuille de papier au plissage d'un bâtiment. Cela entraîne une réflexion sur la reconstitution d'un plissage par l'assemblage d'éléments préfabriqués. Dans le cas du béton, la solution du moulage reste possible. Néanmoins, le coffrage apporte ses contraintes de mise en œuvre et de coûts. Dans ce cas aussi, cette notion de reconstitution prend tout son sens.
L'église du Christ Obrero par Eladio Dieste est un exemple intéressant dans le rapport entre un matériau et son procédé constructif. Par la morphologie du plissage, l'architecte-ingénieur a su exploiter le potentiel de la brique en offrant une simplicité constructive et une efficience structurale(Figure 1.26).

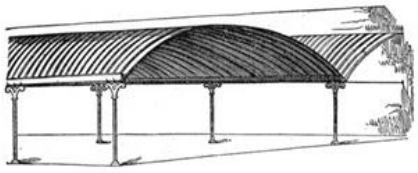


Figure 1.25 - « Turpentine Shed ». En 1829, Henry Robinson Palmer a breveté le concept de la tôle ondulée. Un an après, cet ancien hangar de la rive nord de la Tamise à Londres, est considéré comme le précurseur des constructions préfabriquées : poteaux en fonte et tôles ondulées de 5,5m de portée ont été fabriqués industriellement, 1830.
D'après (Mornement, Holloway, 2007).

Figure 1.26 - Église du Christ Obero, 1958,Uruguay.
Disponible à l'adresse: https://www.architectural-review.com/oldarchive/church-at-atlantida-uruguay-by-eladio-dieste/8683475.article
[consulté le 17 mai 2017]

1.2.e.2. L'aspect économique

Il présente des contraintes majeures dans le domaine de la construction ; elles peuvent être rangées en trois catégories. La première est liée à l'économie de matière et la seconde est associée à l'économie de temps. Une troisième intègre l'économie de prix en tant que conséquence des deux premières. Le choix des matériaux et le type de production utilisé sont deux choix majeurs dans le coût de production d'une structure architecturale plissée.

- L'économie de matière est liée à la maîtrise industrielle des procédés de fabrication. La réalisation d'un pli provient de techniques comme le pliage ou encore le moulage. L'évolution de ces techniques font appel à la recherche de nouveaux produits dont les lois de comportement, particulièrement en plasticité pour le pliage et en viscosité pour le coulage, ont été améliorées. Ainsi, la maîtrise du formage à froid de l'acier a connu une accélération à partir des années 1950[47]. Dans le secteur de l'automobile, les châssis des voitures disparaissent au profit d'une coque intégrale fabriquée par l'assemblage de tôles embouties de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur. L'optimisation matérielle peut être considérée comme le rapport entre la quantité de matière utilisée et la maîtrise de l'action de transformation nécessaire à l'obtention des caractéristiques mécaniques souhaitées. Dans le domaine du moulage, la prouesse technique a été marquée par l'évolution des moules en sable vers des moules sous pression favorisant des pièces complexes et moins consommatrices de matière. Cependant, la problématique du démoulage reste prépondérante pour le principe du moulage.
Enfin, par ses caractéristiques introduites à la sous-section 1.2.a[48], les morphologies plissées offrent un compromis économique entre une quantité minimale de matière et une nécessité structurale et architecturale.

- L'économie de temps présente sous critères distincts dépendants d'une architecture préfabriquée. Si l'on tient compte des propos mentionnés dans « l'aspect matériau »[49], la reconstitution

[47] (Yu, LaBoube, 2010, p. 1).

[48] « L'intérêt du plissage réside donc dans un rapport judicieux entre l'inertie et l'épaisseur du matériau en fonction de la surface à couvrir ». P39.

[49] « Il y existe donc une difficulté d'appréhension de l'échelle (dans la notion de fabrication) permettant de passer du plissage de la feuille de papier au plissage d'un bâtiment » P47.

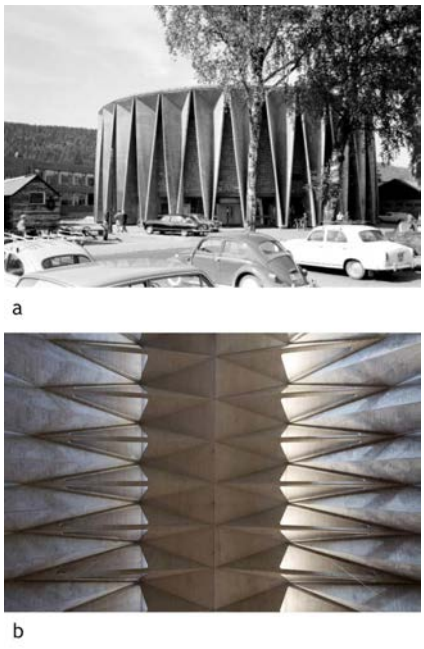
du plissage par éléments préfabriqués semble être une alternative économique convenable. C'est pourquoi l'un des critères traite du processus de fabrication des éléments en atelier et l'autre tient compte de la problématique de mise en œuvre sur chantier. Tout d'abord, l'économie de temps est tributaire d'une industrialisation des processus de fabrication. La réalisation d'objets semblables ou distincts par une pratique artisanale semble archaïque au vu de la géométrie complexe des éléments issus d'une forme plissée. Un environnement de fabrication robotique permet une réalisation à la chaîne d'éléments unitaires grâce une standardisation des moyens de conception et de production.
Ensuite, les structures préfabriquées apportent une économie de temps dans la mise en œuvre sur chantier (Figure 1.27). L'enjeu réside dans la rapidité d'assemblage des éléments préfabriqués comme les procédés mécaniques par vissage ou chimiques comme le collage.

Figure 1.27 - Mise en place des éléments préfabriqués en béton, salle multisports, Windisch, Suisse, Livio Vacchini, 2005.
Disponible à l'adresse : https://fr.pinterest.com/pin/314407617720404245/ [consulté le 18 mai 2017]

1.2.f. Synthèse

Malgré les facultés du plissage présentées sous ses diverses dimensions, la production de bâtiments ayant recours à cette morphologie est rare. À ce constat, la problématique d'un contexte favorable à l'utilisation des morphologies plissées semble se poser.
D'après l'architecte anglaise Farshid Moussavi, les caractéristiques des formes plissées définissent un langage[50] ; quels qu'en soient les dimensions ou les usages, les morphologies du plissage présentent un ensemble de propriétés esthétiques et physiques sélectionnées ponctuellement en fonction du caractère expressif recherché (Figure 1.28). L'intérêt du plissage réside dans la juste combinaison entre les dimensions.

L'analyse a mis en évidence une morphologie du plissage présente depuis plus d'un demi-siècle dans la construction. Bien que certains écrits attestent de la présence des constructions plissées dans les années 20, les deux tiers de ces constructions emblématiques, encore visibles aujourd'hui, semblent dater des années 50 et 60. Cette période correspond à l'apparition des premiers écrits théoriques sur ce sujet, parmi lesquels l'ouvrage sur les techniques des voiles plissées de Winter et Pei publié en 1948 fait figure de pionnier.



a

b

Figure 1.28 - Langage du plissage.
a. Le pli dévoile lentement le corps du cinéma de Kongsberg en Norvège. Arch. Ormulf Ljoterud, 1966 (cf. Annexe 1).
b. Jeu de lumière de la sous-face de la nef de l'église St Paul à Neuss en Allemagne. Arch. Fritz Schaller, 1968. Disponible à l'adresse : http://www.baukunst-nrw.de/objekte/St-Paulus-Neuss--2758.htm [consulté le 13 avril 2016].

[50] (Moussavi, López-Pérez, 2009, p. 44).

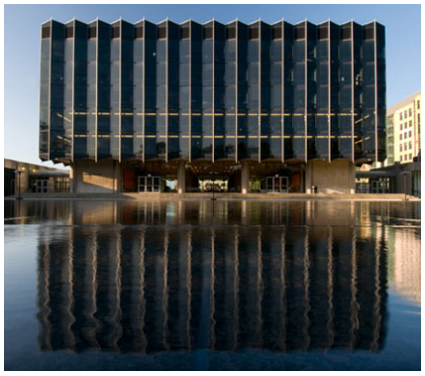


Figure 1.29 - École de Droit de Chicago, Eero Saarinen, 1960 (cf. Annexe 1).

Dans ces réalisations, l'expressivité du plissage est d'une telle force que l'association de ce langage architectural à tout autre vocabulaire peut devenir conflictuelle. Le plissage semble constituer à lui seul les facteurs déterminants pour que soient obtenus l'effet ou les résultats désirés par le concepteur. En effet, le message délivré à travers une combinaison des multiples dimensions du plissage peut prendre diverses formes : de l'expression sculpturale des façades de verre de « la bibliothèque de l'École de Droit de Chicago » (Figure 1.29) à la fonction structurale du « pavillon de l'aluminium », son champ d'élocution se montre relativement vaste. Ainsi, nous avons tenté de distinguer plusieurs aspects majeurs de ce langage, présentés ci-après :

- Premièrement, il existe dans le plissage une adéquation entre la pensée de l'espace et celle de la forme avec une poétique de la construction et de la matérialité. Cette relation permet d'appréhender le plissage comme un langage expressif où l'action de « construire » n'est plus seulement une démarche matérielle, mais aussi une démarche intellectuelle et artistique.

Dans les catégories de bâtiments comme les équipements publics et les constructions légères où le plissage excelle, les édifices cultuels sont certainement les représentants principaux de cette démarche. En Europe, en Amérique ou en Afrique du Sud, le plissage des édifices religieux est un moyen d'atteindre une valeur spirituelle. Par exemple, cette qualité est obtenue, dans les églises, par un volume intérieur imposant s'affranchissant des éléments structuraux comme la poutre ou la colonne. L'espace n'est plus séquencé ; seules les variations des plis poussent notre regard à s'élever jusqu'à des hauteurs vertigineuses. Par le fait que la géométrie du plissage soit lisible seulement par la matérialité de ses arêtes, toute notion d'épaisseur des parois est inhibée. Si l'on associe à cela l'unité du matériau, toute sensation d'une structure se battant contre la pesanteur est alors dissipée. De plus, la capacité de ces géométries à diffuser ou à absorber l'énergie lumineuse au rythme des plis, participe activement à cette quête d'émotions. La « Chapelle des Cadets » ou encore l'église « Santo Antonio da Polana » (Figure 1.30) en sont des illustrations admirables.

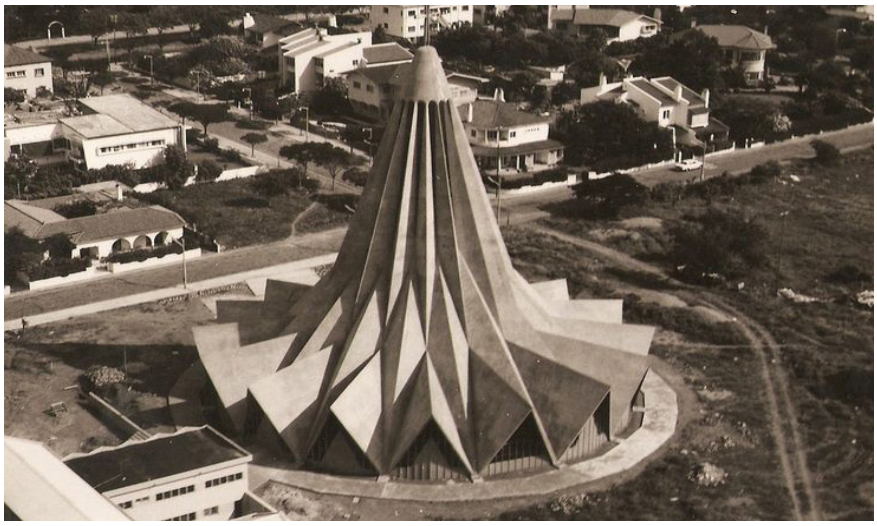


Figure 1.30 - Igreja de Santo Antonio da Polana, Nuno Craveiro Lopes, 1962 (cf. Annexe 1).

- Deuxièmement, dans les bâtiments cultuels cités, le plissage présente un aspect structural non négligeable. En 1955, l'architecte Paul Thiry a manifesté son intérêt pour le « A-frame » : « *N'est-ce pas exactement ce que le bâtisseur d'église a recherché depuis des siècles : une grande portée, de la hauteur, de la légèreté, de l'ouverture, un contrôle acoustique, une facilité de construction, une méthode simple!* »[51]. De cette réflexion est né le projet de l'« Independent Congregational Church » (Figure 1.31). Cette toiture plissée, réalisée en panneaux de contreplaqué, vante les mérites d'une structure économique dotée d'une grande force architecturale. Ces capacités résultent de la non-dissociation de l'enveloppe et de la structure. En effet, l'un des intérêts du plissage demeure dans sa capacité à générer à la fois une enveloppe protectrice d'un volume architectural couplée à la résistance d'une coque structurale.

Figure 1.31 - Independent Congregational Church, Manske & Dieckmann, 1961 (cf. Annexe 1).

[51] (Hamilton, Myers, 2010, p. 7).

Dans le plissage, architecture et structure sont deux thématiques qui s'associent parfaitement. Pour Claude Parent, la technique est « libératrice de forme »[52]. Il affirme cela avec souplesse en précisant également que si la création doit suivre la technique, elle n'en serait pas moins ridicule si elle se basait principalement sur les contraintes de calculs. Le « bâtiment des congrès de L'UNESCO » conçu par Marcel Breuer, Bernard Zehrfuss et Pier Luigi Nervi marque indubitablement le gain issu d'une collaboration « architecte-ingénieur-constructeur ».
Dans les constructions référencées, le couvrement est la principale fonction des structures plissées. Le plus souvent, le plissage est pensé comme une forme englobante qui s'affranchit de l'écriture traditionnelle distinguant les murs de la toiture. Toutefois, il n'est pas impossible que le plissage soit appliqué localement sur une partie d'un bâtiment.

- Troisièmement, le plissage marque à la fois une forme de continuité et une sensation de fluidité de la paroi. La notion de continuité s'exprime dans l'uniformité assurée par la cohésion des éléments constituant le plissage. Ce phénomène est visible dans le projet de la piscine de l'école des filles d'Alfriston conçu par le cabinet d'architecte Duggan Morris (Figure 1.32).

Figure 1.32 - Alfriston School Swimming-pool, Beaconsfield, Royaume-Uni, Duggan Morris Architects, 2010 (cf. Annexe 1).

La charpente de la piscine est composée de panneaux à ossature bois préfabriqués en atelier. Leur assemblage sur site a permis de constituer une enveloppe monolithique tant d'un point de vue

[52] (Parent, 1962).

architectural que structural. Ce principe de continuité est également représenté par la technique du béton « coulé sur place » utilisée pour les réalisations comme le « Gunma Music Center » ou l'ancienne salle de sport du « College of Art and Design » de Bâle (Figure 1.33).

Quant à la notion de fluidité, elle caractérise une variabilité plastique des plis d'une paroi. La chapelle Saint Loup est certainement l'exemple actuel le plus démonstratif. Cette variabilité des plis donne lieu à un modelage du plissage. Il permet d'obtenir une géométrie aux harmonies subtiles, présentant, d'une certaine manière, un pavillon plus vivant, plus délicat.

Figure 1.33 - Basel College of Art and Design and the Industrial Trade School, Bâle, Suisse, Hermann Baur, Hans Peter Baur, 1961 (cf. Annexe 1).

- Quatrièmement, la notion d'échelle visuelle, impactant l'ensemble des aspects présentés, est un facteur déterminant dans la conception d'une structure architecturale plissée. Ce changement dimensionnel occasionne de nombreuses variations dans l'efficacité plastique, le traitement des ambiances et le comportement structural amenant parfois à repenser la stratégie de composition.

Par la notion de distance que nous entretenons avec le plissage, nous en percevons une vision totalement transformée. Par exemple, cet effet est appréciable entre le plissage de l'« arrêt de bus » (Figure 1.34) et celui du dôme de l'« Assembly Hall » (Figure 1.35) : dans le premier cas, l'utilisateur perçoit l'espace contenu dans un pli unique et franc. Dans le second cas, l'amplitude des plis formant le dôme est largement supérieure à celle des plis formant l'abri. Cependant, la dimension majestueuse du « dôme » et une distance imposée entre l'observateur et le plissage ont raison d'une sensation d'un plissage massif au profit d'une impression de finesse perceptible dans le plissage d'un lampion de papier.

Figure 1.34 - Arrêt de Bus « Avril », Krumbach, Autriche, Architecten De Vylder Vinck Taillieu, 2014 (cf. Annexe 1).

Figure 1.35 - Assembly Hall, Harrisson et Abramovitz, 1963 (cf. Annexe 1).

Figure 1.36 - Tempodrom de Berlin, Gerkan, Marg et Partner, 2001 (cf. Annexe 1).

- Cinquièmement, le mimétisme est un aspect important dans l'expression du plissage. Il constitue un moyen puissant de sensibiliser le spectateur à la morphologie du bâtiment. Par ce principe d'illusion, le plissage est capable de s'approprier de nombreuses apparences. Les concepteurs usent de ce principe pour accentuer généralement l'effet symbolique de leurs réalisations. Rattaché de manière schématisée à des objets du quotidien voire à l'univers de la nature comme la géologie ou la flore, le plissage offre un caractère familier qui séduit. On peut citer le « Tempodrom » (Figure 1.36) de Berlin qui, par ses lignes incurvées, imite les grandes toiles d'un chapiteau de cirque. On peut également citer la réplique de la « grotte de Chauvet » qui recherche l'intégration paysagère par une analogie avec le rocher (Figure 1.37).

Dans les deux cas, il est intéressant de noter que le matériau employé et la texture qu'il reflète participent activement à ce mimétisme. Bien que la charpente du Tempodrom soit réalisée en béton et en acier, le recouvrement par une membrane à l'extérieur et par un bardage ajouré en bois à l'intérieur participe à l'effet de légèreté d'une toile de chapiteau. De la même manière, l'utilisation du béton sculpté pour la réplique de la grotte accentue l'effet massif de la roche.

Figure 1.37 - Réplique de la grotte du Pont-d'Arc, Xavier Fabre, Vencent Speller et Atelier 3A, 2015 (cf. Annexe 1).

Les exemples précédemment cités mettent en avant le sixième aspect : la synergie entre le matériau et le plissage. Elle influe fortement sur l'aspect structural du plissage. En effet, le choix du matériau se répercute sur le procédé constructif employé. Nous faisons allusion ici au projet de la « structure mobile pour l'extraction de soufre » dont la forme finale de l'ouvrage dépend d'un module de base. Ce module, représentant un élément du plissage, a été lui-même dimensionné en fonction des caractéristiques physiques et mécaniques de la résine polyester. Dans le même esprit, nous

pouvons citer l'« Église du Christ Oberto » conçu par Eladio Dieste. La morphologie et les dimensions du plissage de cet édifice cultuel traduisent une technique de construction associée à la brique.
D'autres exemples encore tentent d'explorer les potentialités du plissage au travers de différents matériaux. « One Fold », « Origami Coop » ou encore « Corogami » sont des constructions plissées basées sur des techniques de pliage d'une feuille de matière. Simplicité, stabilité, légèreté ou efficacité sont les maîtres mots de ces enveloppes auto stables.

a. b. c.

Figure 1.38 - a. One Fold, Patkau Architects, 2014 (cf. Annexe 1).
b. Origami Coop, Chris Mullaney, 2011 (cf. Annexe 1).
c. Corogami folding hut, David Penner, 2010 (cf. Annexe 1).

Ces expériences montrent que l'écriture du plissage dépend fortement du matériau employé. Les plus couramment utilisés sont le béton et l'acier, suivis du bois et des polymères ; d'autres matériaux comme la brique ou le verre font état d'utilisations plus rares.

OBSERVATIONS : Plus qu'un simple formalisme esthétique, la combinaison des multiples aspects du plissage procure une véritable tectonique[1] architecturale. Elle conduit à une évidence visuelle superposant à la fois la clarté d'une forme plastique et la franchise d'un concept constructif[2]. Cette conjonction est à son tour sublimée par le caractère des matériaux, dont la puissance poétique, révélée par l'histoire des techniques et l'art de bâtir, est rapportée dans les propos de Pierre von Meiss[3].

Les références architecturales présentées ont fait entrevoir combien le plissage est un langage qui invite l'architecte, l'ingénieur et le constructeur à s'exprimer. Loin de préconiser son utilisation systématique, on peut le considérer comme une pensée alternative de la conception architecturale. C'est un univers à découvrir dès lors que l'on souhaite élargir le champ des possibilités formelles et techniques qui offre une grande liberté de création.

---

[1] Se référer à la définition de ce mot dans l'ouvrage de Pierre von Meiss (Meiss, 2003, p. 244).

[2] (Frampton, Cava, 1995).

[3] (Ache, 1970).

1.3. Le plissage dans la science

Dans cette troisième section, nous apportons une définition du pli et par extension du plissage. Cette définition fait déjà partie de notre travail de recherche ; cependant, nous l'introduisons dès à présent afin d'employer un vocabulaire adapté dans la suite de ce mémoire.

Nous avons vu jusqu'à présent que le plissage constitue, pour de nombreux concepteurs, une écriture spécifique, un véritable langage. Les critères architecturaux et structuraux que nous venons de traiter apportent une vision globale sur les fondements qui régissent l'intérêt constructif d'un plissage. Ce nouveau chapitre offre un regard scientifique sur la conformation du plissage d'un point de vue géométrique et mathématique. Il convient, en premier lieu, d'appréhender les spécificités physiques d'un pli afin d'en proposer une définition théorique qui servira ultérieurement à qualifier le plissage.

Figure 1.39 - Drapé sculpté dans le marbre; «La Modestie» par Antonio Corradini (1751).
Disponible à l'adresse: https://fr.pinterest.com/pin/153052087312474924/ [consulté le 13 avril 2016]

1.3.a. Le pli

La définition du pli dans le dictionnaire de l'Académie française[53] présente de nombreuses nuances sémantiques relatives aux catégories d'emploi : on parle de rabat de la matière sur elle-même et d'ondulation d'un drapé dans le domaine de la couture, d'un accident de terrain résultant d'une contraction de l'écorce terrestre en géologie ou encore d'un sillon cutané en anatomie. Il ne peut donc pas y avoir une définition unique du pli, mais il est nécessaire d'en spécifier les caractères communs. Le pli se caractérise tant par son aspect physique que par sa représentation mentale. En effet, il peut être perçu de différentes manières : d'un côté, il est associé à l'idée de « résultat » tel que nous le constatons dans la représentation picturale ou sculpturale d'un drapé (Figure 1.39) et de l'autre côté, le pli est rattaché à la notion de « procédé » régi par une action comme le pliage (Figure 1.40). Cette distinction est essentielle dans le cadre d'une démarche conceptuelle visant à générer une structure plissée. Si le pli peut être considéré comme un état formel, sa création peut résulter de méthodes diverses[54].

Figure 1.40 - Modèle d'abris en tôle pliée. Architectes John et Patricia PATKAU, 2014. Voir Annexe 1.

[53] Cette définition est disponible à l'adresse : http://www.cnrtl.fr/definition/pli [consulté le 23 février 2013]

[54] Nous évoquons les processus de pliage et de moulage ainsi que toutes autres méthodes aboutissant à un résultat formel du pli comme la sculpture.

Figure 1.41 - Voûte nervurée des hangars de la base militaire d'Avord et Istres.
Disponible à l'adresse : http://www.explorations-architecturales.com/data/upload/images/hst59.jpg [consulté le 12 août 2013]

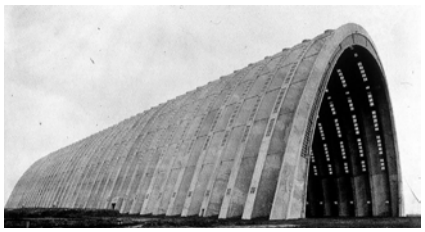


Figure 1.42 - Voûte à section ondulatoire des hangars d'Orly.
D'après (Fernández Ordóñez, 1979, p. 331).

Figure 1.43 - Agrandissement d'un pli effectué sur une feuille de papier.
D'après (Trebbi, 2008, p. 26).

La question de la représentation du pli en architecture est primordiale. L'image d'un pli peut être associée à différents concepts ; la forme d'une nervure ou d'une courbure peut s'apparenter à un pli dès lors qu'elle en possède les caractéristiques.

D'une part, les nervures, souvent en saillie, fonctionnent comme un réseau structural dissociable des surfaces à rigidifier. L'ambiguïté sémantique portée de la notion de pli apporte parfois une confusion entre une nervure structurale et l'arête brisant la planéité d'une surface ; le pli peut former une nervure, mais l'inverse n'est pas forcément vérifié. L'exemple de la cathédrale gothique de Strasbourg révèle les nervures comme un réseau saillant de moulures confortant une voûte. Ce principe est visible dans les coques modernes du début du XXe siècle. Sur les bases d'aviation militaires d'Avord et Istres, l'ingénieur Eugène Freyssinet réalise des hangars en berceaux nervurés, aux portées record de 40 mètres : un réseau d'arcs vient renforcer la grande voûte de béton (Figure 1.41). Quelques années plus tard, ce même ingénieur exécute, sur l'aérodrome de Villacoublay, des hangars à dirigeables constitués d'une coque monolithe, parabolique, atteignant 300 mètres de longueur pour 90 mètres d'ouverture. Dans ce dernier exemple, la frontière entre la notion de nervure et de pli s'estompe. Si la nervation constitue généralement une ossature distincte de l'enveloppe, elle présente par ses proportions et sa mise en œuvre, dans le cas des hangars d'Orly, une méthode de structuration comparable au principe de la tôle ondulée (Figure 1.42). Dans cette dernière, la nervure ne peut être isolée mentalement de l'enveloppe qu'elle rigidifie[55]. Cette adéquation lui permet d'endosser l'aspect figuratif et structural d'un pli.

D'autre part, les notions de pli et de courbure sont étroitement liées comme on l'observe dans le domaine de la géologie ; les ouvrages consacrés à cette science proposent une classification des formes qui distingue un pli sinueux d'un pli anguleux. Cette singularité est rattachée directement au concept de charnière[56] associé à un rayon de courbure[57]. Plus ce dernier tend vers l'infiniment petit, plus nous nous rapprochons d'un pli saillant. C'est le cas d'un pli réalisé dans une feuille de papier (Figure 1.43). Il existe pourtant

[55] (Fernández Ordóñez, 1979, p. 319-331).

[56] Région d'un pli où la courbure est maximale.

[57] (Coque, 1977, p. 20-21).

une différenciation entre l'action de courber et celle de plier. Cette distinction dépend principalement de l'échelle d'observation du rapport entre le rayon de courbure et la surface courbée. Les limites du domaine englobant le facteur d'échelle, qui sépare un pli d'une courbe, sont de l'ordre du culturel ; on parlera d'un « drapé » ou de « plis » pour une étoffe contrainte à s'adapter à une forme, mais on évoquera la « tôle ondulée » pour rappeler la régularité du profil sinusoïdal. Pousser à l'extrême la vulgarisation du pli reviendrait à le définir comme une arête. Ainsi, la nervation issue du profil trapézoïdal des hangars pour aéronefs peut être considérée comme une série de plis selon une direction courbe caractérisée par la voûte (Figure 1.44).

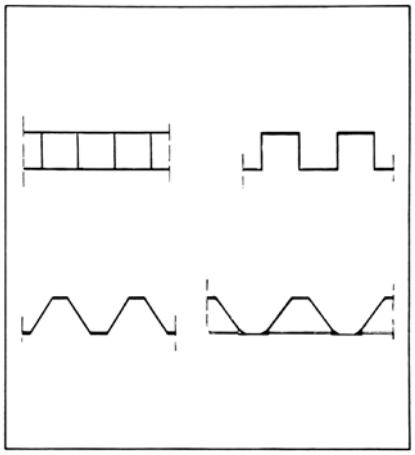


Figure 1.44 - Schémas des profils des voûtes en béton armé pour les hangars d'Orly.
D'après (Fernández Ordóñez, 1979, p. 321).

Dans la notion de nervure, de courbure ou de pli, chaque terme a ses limites susceptibles de se superposer avec ou sans ambiguïté. Il est donc nécessaire de tenir compte des caractéristiques de représentation et de mise en œuvre pour définir le pli en tant que tel.

1.3.a.1. La matière pliée

D'un point de vue physique, chaque matériau peut théoriquement être plié. Qu'il s'agisse d'un comportement visqueux introduisant la notion de temps ou d'un comportement plastique, le pliage suscite des contraintes propres à chaque matériau. Si l'on se réfère aux propos de Jean-Paul Wetzel dans un chapitre de sa thèse consacrée à la modélisation d'opérateurs morphologiques, le principe de la plieuse à tôle paraît le plus apte pour plier un objet de manière à conserver sa forme de part et d'autre de ce pliage[58]. L'auteur évoque les phénomènes d'élongation et de compression de la matière dans la zone du pli.
Contrairement aux matériaux ductiles qui absorbent de grandes déformations, les matériaux fragiles rompent brutalement sous l'action du pliage. Cependant, en intégrant la notion d'assemblage, il est possible de déjouer cette faiblesse. Cette liaison artificielle, interprétée comme une continuité matérielle, permet de réaliser un pli. Par ce constat, le pli peut être classé par « continuité » ou « discontinuité » de la matière.

[58] (Wetzel, 2009, p. 98).

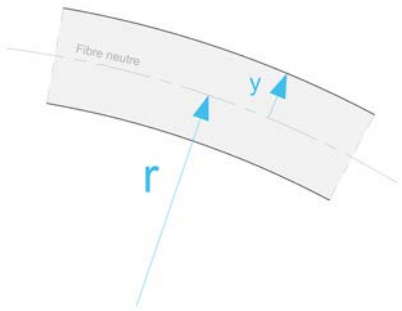


Figure 1.45 - Selon l'hypothèse de Bernoulli, la fibre neutre a un allongement nul.

La matière continue. Le pli peut être obtenu par moulage. Cependant, il est plus communément associé à la déformation irréversible d'une surface matérielle de faible épaisseur au rayon de courbure singulièrement petit au regard de ladite épaisseur (tôles métalliques, feuille de papier, tissu…). Le pliage est obtenu par flexion (ou flambement sous la compression) entraînant des contraintes internes (σ) de traction et de compression.
Dans le cas des matériaux fragiles comme le bois, on peut obtenir un cintrage de l'élément grâce à la viscosité de la matière[59].
Par les caractéristiques ductiles du matériau, la transformation est irréversible et limitée par la déformation critique (ε_c)[60] de la matière.
La déformation (ε) est définie par le rapport entre la distance à la fibre moyenne (y) et le rayon de courbure (r) (Figure 1.45) :

$$\varepsilon = y/r \leq \varepsilon_c \ (avec\ \sigma_c = E\varepsilon_c)$$

Ce rapport induit qu'à une épaisseur donnée, il existe un rayon de courbure critique. Mathématiquement, on estime que les tangentes en un point de la surface (relative à la dérivée première) demeurent continues dans toutes les directions (Figure 1.46). Dans ce cas, on peut définir un rayon de courbure minimum (relatif à la dérivée seconde) acceptable avant rupture de la matière.

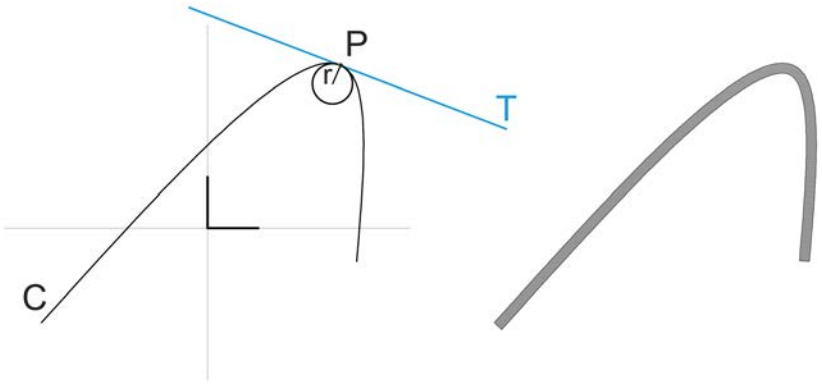


Figure 1.46 - Pli formé par un pliage de matière.

Il est important de préciser qu'après le relâchement des sollicitations externes nécessaires à la création d'un pli, les caractéristiques ductiles du matériau engendrent des contraintes internes qui

[59] Néanmoins, ce processus reste réversible si l'on se replace dans les mêmes conditions physiques.

[60] Déformation avant rupture du matériau.

peuvent être structurellement néfastes[61] ; une relaxation de ces contraintes est réalisable par réchauffement de l'élément déformé de manière à activer la viscosité de la matière.
L'inconvénient d'un pli par déformation de la matière réside dans l'incapacité à produire des structures de grandes dimensions[62].

La matière discontinue. Un pli peut être considéré comme l'union de différentes surfaces. En mathématiques, il se définit par la discontinuité des tangentes en un point d'une surface et dans une direction donnée (Figure 1.47). Ce changement ponctuel de direction traduit physiquement une interruption de la matière introduisant la notion d'assemblage. La nature des assemblages doit alors être adaptée au matériau utilisé pour assurer la stabilité et la transmission des efforts internes. Par exemple, le cas de l'encastrement assure une continuité parfaite de la matière.

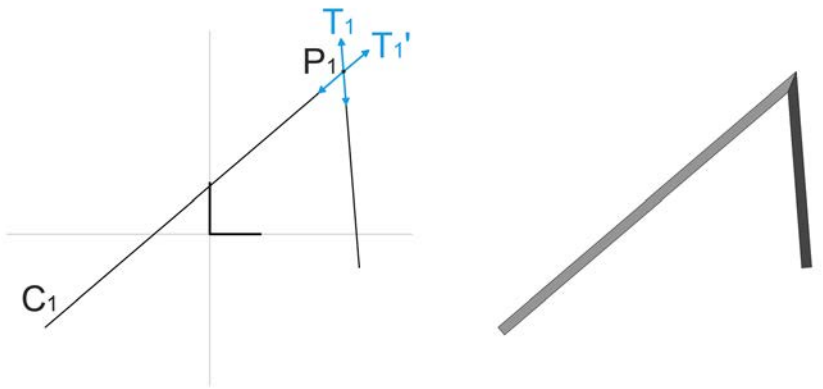


Figure 1.47 - Pli formé par un assemblage de matière.

Cette différenciation est importante dans notre démarche visant à générer géométriquement un pli tant structural qu'architectural. En effet, notre définition ne limite pas le pli comme déformation d'une surface initialement plane à l'exemple de la feuille de papier, mais accepte le pli comme l'union de différentes surfaces.

[61] Dans le cas où les contraintes internes, additionnées à une force extérieure supplémentaire, entraînent la rupture du matériau.

[62] Voir le paragraphe concernant « l'aspect matériau » relatif à l'effet d'échelle dans la production d'un plissage, p47.

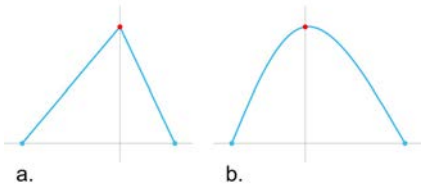


Figure 1.48 - Nature du profil :
a) anguleux
b) sinueux

1.3.a.2. Le pli élémentaire

Les descriptions physiques menées jusqu'à présent permettent d'aborder le pli comme un changement d'orientation « brutal »[63] occasionné au sein de la matière. Afin de le décrire géométriquement et mathématiquement, nous admettons qu'un pli est défini selon une « *surface de référence* ». Cette dernière permet de caractériser le pli selon deux directions : l'une transversale et l'autre longitudinale.

Dans le sens transversal, nous distinguons le « profil du pli ». Il s'agit d'une courbe présentant une forte perturbation en un point précis. Ce point d'articulation ou « charnière » correspond à l'« *extremum* » ou « *sommet* » de la courbe[64]. L'allure du profil qualifie le pli de « anguleux » ou de « sinueux » (Figure 1.48). Pour une courbe continue au profil sinueux, la dérivée de la tangente à l'extremum est nulle. En revanche, dans le cas où la courbe continue possède des points singuliers comme un point anguleux[65] ou un point de rebroussement[66], l'extremum se traduit par une discontinuité de la tangente. Plus généralement, l'extremum correspond au point de la courbe où il subsiste une inversion du signe de la tangente.

Le pli présente donc un extremum à partir duquel la courbe est fractionnée en deux segments représentant chacun un « *demi-pli* » : la bissectrice de l'angle qu'ils forment correspond à l'« *axe du pli* » (Figure 1.49). Chaque demi-pli se caractérise par la notion d'« *intervalle* ». La projection orthogonale de deux « *nœuds* »[67] consécutifs de la courbe sur la surface de référence définit la longueur de l'intervalle. La somme des deux intervalles formant le pli est égale à la « *période* ».

L'« *amplitude* » d'un pli, telle que nous la définissons dans ce travail, est relative à la surface de référence ; elle correspond à la distance spécifiée par le sommet (extremum) et le point de base de la normale à la surface de référence passant par ce sommet. L'amplitude et la période forment un « couplet » nécessaire à la définition d'un pli.

[63] Le terme « brutal » tient compte de la notion d'échelle mentionnée précédemment page 59.

[64] Les points des extrémités de la courbe définissent le domaine du plissage et ne sont pas, dans notre étude, considérés comme des extremums.

[65] Point d'une fonction dont les demi-tangentes forment un angle non plat.

[66] Point d'une fonction dont les demi-tangentes sont opposées.

[67] Les nœuds sont des points nodaux constitués par les extrémités de la courbe et les extremums.

Un déversement du pli peut être observé lorsque le point issu de la projection de l'extremum sur la surface de référence se situe en dehors de l'intervalle correspondant à la période.

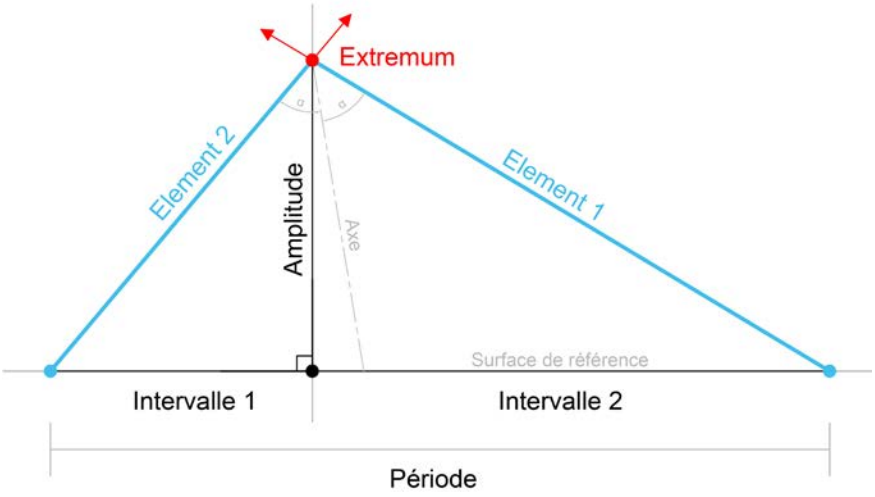


Figure 1.49 - Caractéristiques d'un pli selon une coupe transversale.

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* »[68] du pli et les deux demi-plis en définissent les « *facettes* ». D'une manière générale, on définit la direction de l'extrusion par une « *ligne directrice* » concordante avec la projection de l'arête du pli sur la surface de référence.

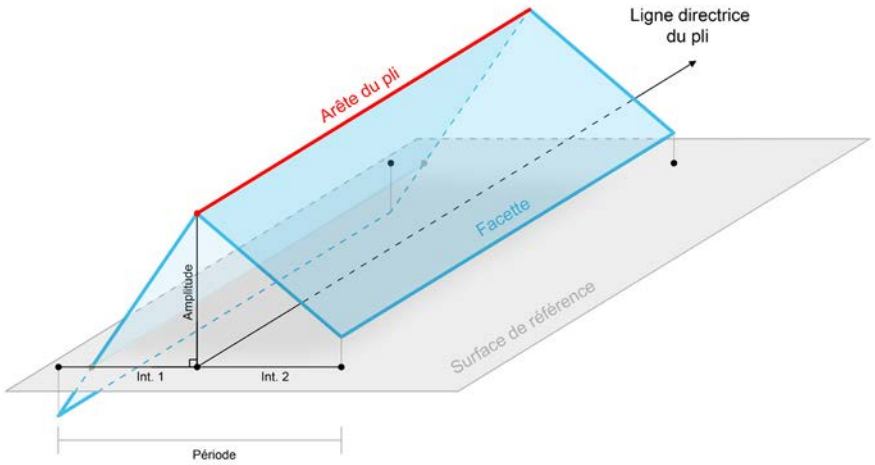


Figure 1.50 - Caractéristiques d'un pli selon son orientation longitudinale.

[68] Mathématiquement, l'arête correspond à la ligne des extremums de la surface pliée.

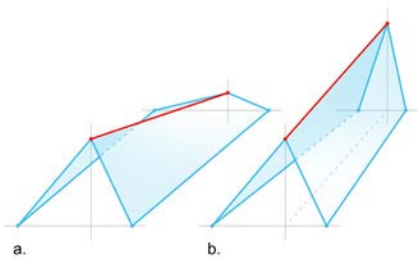


Figure 1.51 - Variation d'un pli :
a) Amplitude variable
b) Période variable

L'extrusion peut être accompagnée d'une variation des données du profil de pli comme l'évolution de l'amplitude ou de la période à l'origine d'un pli constant ou variable (Figure 1.51). D'autres caractéristiques du profil permettent de qualifier différents types de plis. Par exemple, deux demi-plis symétriques par rapport à l'axe du pli dessinent un pli droit.

En fonction de la nature anguleuse ou sinueuse du profil, un pli se distingue selon deux cas respectifs : soit l'arête est visible et marque une discontinuité de la surface du pli ; soit l'arête n'est pas visible comme dans le cas d'une surface continue au profil sinueux. Dans le deuxième cas, ces propos s'appuient sur la propriété des ombres : on distingue l'arête théorique représentant la ligne de l'extremum et l'arête virtuelle correspondant à la limite de l'ombre. Cette dernière ligne se détermine dans le rapport angulaire entre la direction de la source lumineuse (Ds) et la normale à la surface à l'extremum (N) (Figure 1.52). Lorsque (N) est parallèle à (Ds), la ligne de l'extremum et celle marquant la limite d'ombre se confondent.

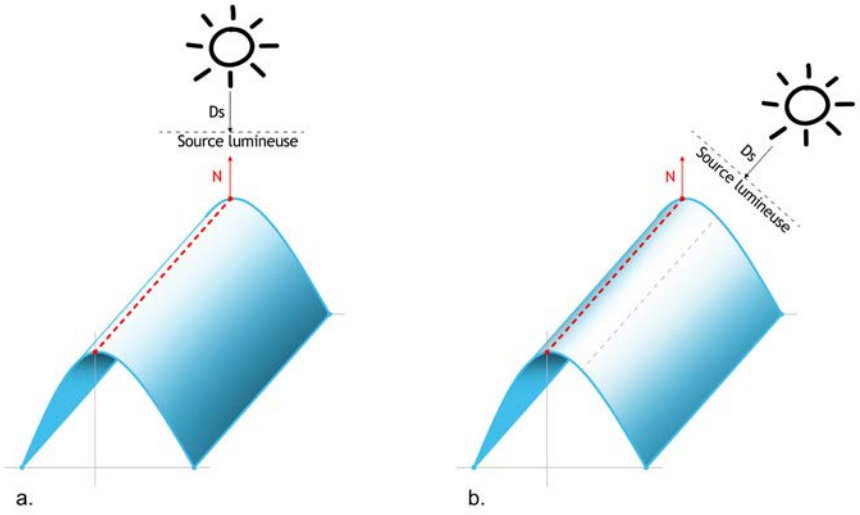


Figure 1.52 - Propriété des ombres :
a) La ligne de l'extremum et celle de la limite d'ombre se confondent.
b) La ligne de l'extremum et celle de la limite d'ombre sont distinctes.

Bien que l'arête du pli ne soit pas visible, l'association de deux facettes, sur une arête commune et selon une valeur angulaire non nulle, constitue géométriquement un pli.

Par ces quelques notions, les différentes morphologies du pli peuvent être caractérisées géométriquement. La forme et la disposition spatiale des arêtes spécifient un pli comme « droit », « curviligne », « parallèle » ou « quelconque ». Ces qualificatifs déterminent directement la nature surfacique de la facette, allant d'une surface plane à une surface quelconque.

1.3.b. Le plissage

Usuellement, on caractérise le plissage comme un ensemble de plis. Par simplification d'élocution, on attribue au « pli » les caractéristiques du plissage, qui n'est pas sans conséquence sur la compréhension des dissemblances entre ces deux termes. Si l'on considère que le plissage est un « mot », le pli désigne chaque « lettre » qui le compose : une combinaison de plis crée un plissage.

1.3.b.1. Les caractéristiques 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* » (Figure 1.53).

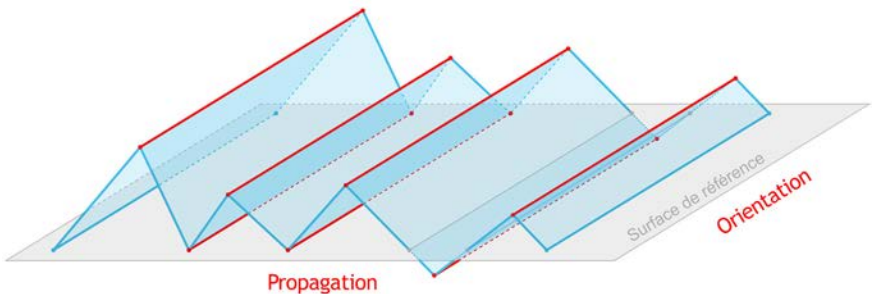


Figure 1.53 - Représentation d'un plissage reprenant les caractéristiques du pli d'un point de vue longitudinal et transversal.

Le profil transversal du plissage constitue une association de profils du pli, sinueux ou anguleux. Pour cette raison, la direction transversale devient le « *sens de propagation* » du plissage. Ils permettent de quantifier le nombre de plis ou « *fréquence du plissage* » et de qualifier la succession de plis sous forme de séquence communément appelée « *rythme du plissage* » (Figure 1.54).

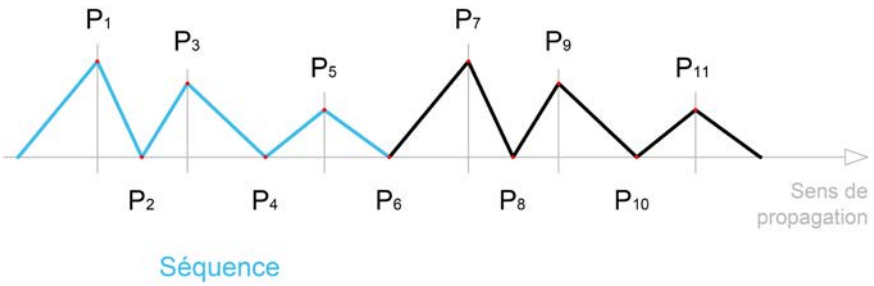


Figure 1.54 - Caractéristiques du plissage selon le sens de propagation

Si l'on considère l'union de deux plis comme un pli dont l'extremum correspond à la jonction des extrémités de ces deux mêmes plis, l'association de N pli unitaire est équivalente à un plissage de fréquence 2N-1 plis (Figure 1.55.a).
Cependant, cette réflexion ne permet d'obtenir qu'un nombre impair de plis. La notion de demi-pli[69] prend, ici, toute son importance. L'ajout d'un demi-pli, fusionné avec le précédent, permet la création d'un pli supplémentaire (Figure 1.55.b).

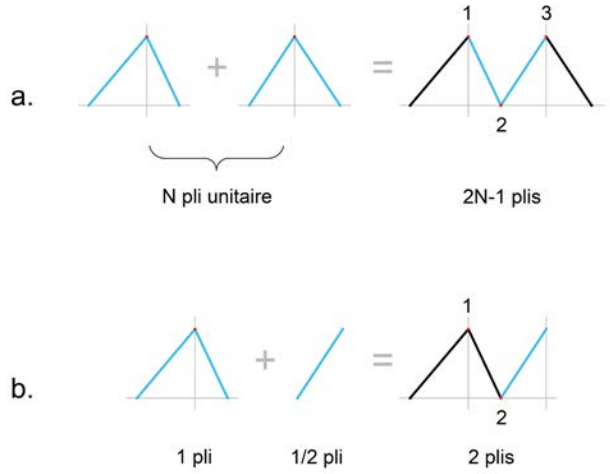


Figure 1.55 - Caractéristiques dans l'addition de plis.

Cela se vérifie lorsque l'on considère que l'ajout d'une facette, à l'extrémité d'un plissage, forme un pli. De cette manière, le plissage se constitue de plis « positifs » et « négatifs » disposés dans un ordre quelconque (Figure 1.56).

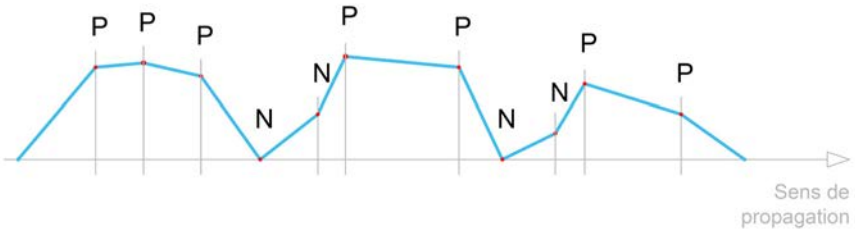


Figure 1.56 - Nature positive (P) ou négative (N) des plis qui constituent le profil d'un plissage.

Longitudinalement, le profil du plissage est transposé dans la troisième dimension. De manière identique au pli, les extremums déterminent les arêtes des sommets ou des vallées. Le profil du plissage récupère le répertoire qualificatif du profil du pli (sinueux ou anguleux) auquel s'ajoute celui des arêtes (droite, curviligne, parallèle ou quelconque).

[69] Entendez dans un plissage, la partie comprise entre deux extremums, soit une facette.

Comme mentionné précédemment, le plissage résulte d'une surface de référence. Cette dernière définit la « zone » de traitement du plissage et introduit la notion de « rang du plissage ». Le rang « 0 » correspond à la surface de référence non plissée ayant une continuité de courbure[70]. Ensuite, chaque action de plissage, dont l'orientation diffère du plissage précédent, entraîne la gradation d'un rang supplémentaire (Figure 1.57).Par exemple, un plissage de rang « 2 » peut être décomposé au minimum en deux plissages unitaires de rang « 1 ». Dans notre recherche, nous nous limiterons essentiellement aux plissages de rang « 2 » correspondant à l'association de deux plissages de rang « 1 ». Ce principe de récursivité ou « fractale » constitue une notion élémentaire des structures plissées.

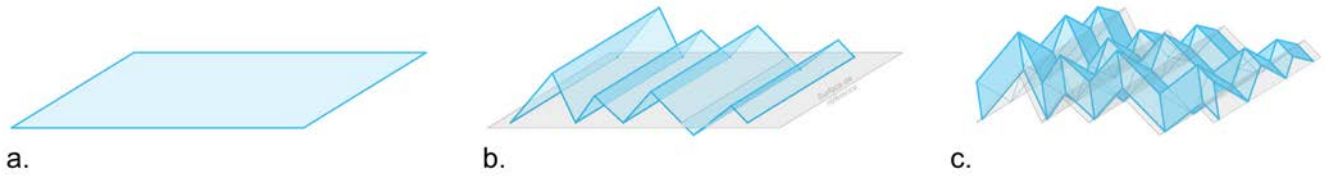


Figure 1.57 - Rang du plissage : a. rang «0» ; b. rang «1» ; c. rang «2».
L'orientation du plissage de rang «2» doit générer un angle non nul avec l'orientation du plissage de rang «1».

Par ailleurs, le pli ayant une direction, nous sous-entendons qu'un plissage est orienté. Il se distingue par deux classes : le plissage « *unidirectionnel* » et le plissage « *multidirectionnel* ».
Dans le premier cas, la direction de chaque pli est sans intersection dans la zone traitée. En fonction de la morphologique de chaque pli, le plissage unidirectionnel peut être qualifié de « constant »[71] ou « variable »[72] (Figure 1.58). Dans la condition où ce type de plissage est composé d'une série répétitive de plis aléatoires, on le désigne comme « séquentiel ».

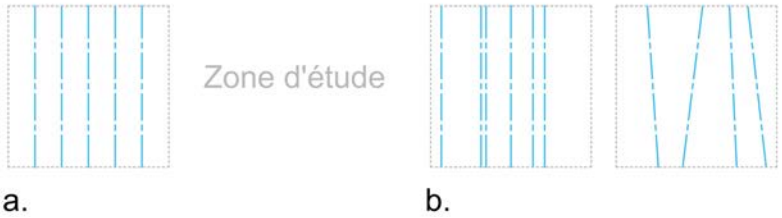


Figure 1.58 - « Patterns » des directions des plis qui composent le plissage unidirectionnel.
a. Plissage unidirectionnel constant.
b. Plissage unidirectionnel variable.

[70] En tout point de la surface, les tangentes sont continues.

[71] Répétition d'un même pli avec longueur d'onde constante.

[72] Variation de la morphologie des plis qui composent le plissage avec variation des longueurs d'onde.

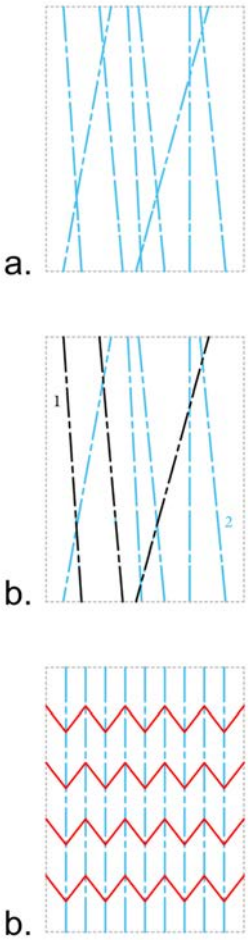


Figure 1.59 - « Patterns » des directions des plis qui composent le plissage unidirectionnel.
a. Croisement des directions des plis
b. Décomposition du pattern multidirectionnel en deux patterns unidirectionnel.
c. Pattern Miura-Ori.

Le second cas correspond à un plissage caractérisé par le croisement des différentes directions de plis qui le composent (Figure 1.58.a) . Lorsque ces directions se prolongent au-delà du point d'intersection et traversent de part et d'autre la zone traitée, le plissage multidirectionnel peut être le résultat d'une superposition de deux faisceaux de plissages unidirectionnels de rang « 1 » (Figure 1.59.b). Dans les autres cas, les lignes directrices sont concourantes en divers points formant des réseaux complexes aléatoires tels qu'ils sont visibles dans un « froissage » où la notion de rang de plissage n'est plus applicable.
Une exception est à noter dans le cas d'un plissage du type Miura-Ori. Par notre définition, nous pouvons le caractériser comme un froissage « régulier » (Figure 1.59.c). Cependant, en le décomposant, il décrit une juxtaposition de plissages dont les arêtes sont reliées par des « nœuds ». Leur compréhension nécessite l'introduction de la notion de « brisis ».

1.3.b.2. Cas du brisis

Nous venons de voir que le plissage correspond à une combinaison de plis. Le passage d'un plissage d'un rang « n » (avec n ≥ 1) à un rang « n+1 » engendre la création d'un « brisis »[73]. Il se présente sous la forme d'une polyligne nommée « profil de brisis ». Celui-ci peut être pensé de deux manières différentes :

- soit il correspond à la « déformation » d'une arête de pli provenant du plissage du rang inférieur (Figure 1.60.a).

- soit il correspond à la jonction de deux plissages de rang «1» dont les orientations ne sont pas colinéaires (Figure 1.60.b).

a. Déformation de l'arête du pli

b. Jonction de deux plis de rang «1»

Figure 1.60 - Présentation de deux méthode aboutissant à un brisis.

[73] Ainsi, un plissage de rang « 2 » présente nécessairement un brisis.

Toutefois, nous distinguons un cas particulier : dans l'exemple du plissage Miura-Ori[74], les lignes directrices des plis sont coplanaires et forment un angle non nul. On peut évoquer ici un plissage brisé en deux dimensions. Par généralisation, un plissage comportant une ou plusieurs lignes de brisis est nommé « plissage brisé » auquel se rajoute son rang de récursivité (Figure 1.61).

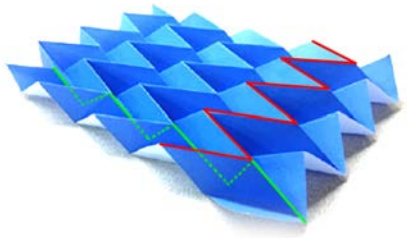


Figure 1.61 - Plissage Miura-Ori:
Ligne des extremums
Profil du brisis

Si nous revenons à la deuxième définition du brisis, nous pouvons dire qu'il constitue la jonction de deux plissages au nombre de plis équivalent, mais dont le rythme sommet/vallée peut être renversé . La jonction de deux plissages crée des arêtes issues de l'intersection des facettes respectives le long du brisis. Ces « *arêtes de brisis* » correspondent aux arêtes des plis formés lors de cette jonction. Ces dernières sont citées comme « *plis secondaires* » par rapport aux « *plis primaires* » qui composent les plissages initiaux. Le brisis peut alors être observé comme la synthèse des deux modes de pli, primaire et secondaire (Figure 1.62).

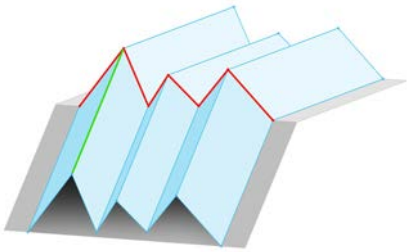


Figure 1.62 - Caractéristiques d'un plissage brisé :
– Arête de pli primaire
– Profil du brisis (composé d'arêtes de plis secondaires)

Par ces constatations, nous pouvons dire qu'un pli représente un blocage pour un autre pli. Dans un contexte général, la rencontre de deux arêtes provoque soit l'interruption de l'une d'entre elles, soit la continuité des arêtes marquée par un changement de direction (discontinuité de la tangente). Néanmoins, un même état peut résulter de plusieurs combinaisons ; il n'y a pas une unicité de la solution permettant de trouver un modèle unique du plissage. Par ailleurs, le « froissage » correspond à une combinaison aléatoire de plis. Ces derniers participent à une récurrence de plissages chaotiques de rang « n », dont il est difficile de déterminer la règle qui permettrait de distinguer les arêtes des plis primaires des arêtes des plis secondaires issues du brisis. Plusieurs cheminements semblent possibles afin d'obtenir le même effet.
Cependant, l'avantage d'un tel dispositif se mesure d'un point de vue géométrique. L'association des arêtes de brisis avec celles des extremums produit un dessin tridimensionnel qui participe à la dimension morphologique et structurale[75] du plissage.

[74] Ce nom provient de l'astrophysicien japonais Koryo Miura (Bain, 1981).

[75] Lorsque les configurations géométriques des brisis sont développables, la stabilité structurale du plissage est assurée par un blocage des plis, soit au niveau des points d'appui, soit au niveau de l'assemblage.

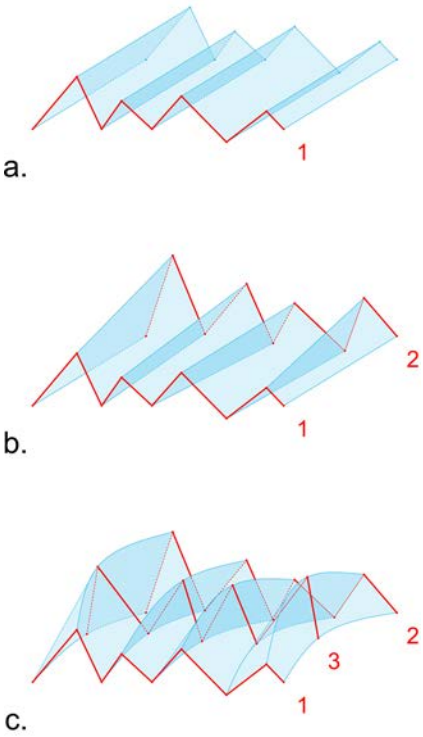


Figure 1.63 - Degré d'interpolation d'un plissage :
a. Degré « 0 », le plissage est caractérisé par une extrusion régulière d'un profil (un profil de référence).
b. Degré « 1 », le plissage est caractérisé par une extrusion linéaire variable (deux profils de référence)
c. Degré « 2 », le plissage est caractérisé par une extrusion quadratique (trois profils de référence).

1.3.c. Type et classement du plissage

Dans cette section, nous illustrons les propos précédents par quelques exemples de plissages anguleux[76] de rang « 1 » organisés dans différents tableaux. Afin de faciliter leur lecture, nous proposons une caractérisation synthétique d'un plissage.
Nous rappelons qu'un plissage se définit selon deux dimensions nommées « propagation » et « orientation » :

– La propagation : elle caractérise le nombre de plis formant le profil du plissage. Chaque « demi-pli » est formé par un couplet de valeurs représentant l'intervalle et l'amplitude. Leur nature constante ou variable spécifie le profil du plissage.

– L'orientation : elle génère le plissage par une « extrusion » du profil. En fonction du degré d'interpolation, cette extrusion est de nature constante (degré « 0 ») ou variable de manière linéaire (degré « 1 ») ou quadratique (degré « 2 »). D'un point de vue géométrique, une extrusion « constante » ne nécessite qu'un seul profil de propagation alors que les extrusions « linéaires » et « quadratiques » exigent respectivement deux et trois profils[77] (Figure 1.63).

Cette notion théorique du plissage est ensuite associée à un type de surface : ces surfaces sont désignées par leur caractère développable, synclastique ou encore anticlastique[78], mais aussi par le cas particulier de la surface plane. Elles sont considérées comme une surface de référence conférant au plissage une forme globale. Dans le (Tableau 1.1) et le (Tableau 1.2), le plissage est construit dans un repère cartésien ; en fonction du degré d'interpolation et de la surface de référence, les facettes du plissage sont soit planes (P) soit gauches (G).
Le plissage peut être également défini dans un repère polaire. Dans ce cas, la définition d'un seul profil de propagation par le couplet « intervalle, amplitude » [79] suffit à la génération d'un plissage d'interpolation de degré « 1 » (Tableau 1.3). De la même manière, deux profils suffisent à générer un plissage quadratique[80].

[76] Un plissage sinueux peut-être obtenu par des congés de raccordement effectués sur un profil anguleux. Si ces congés se rejoignent, on obtient un profil sinusoïdal.

[77] Ces propos sont valables dans un repère cartésien.

[78] Cf. Carl Friederich Gauss, section «1.2.a. La dimension structurale», p40.

[79] L'intervalle est traduit par une valeur angulaire.

[80] Dans ce cas, le profil central est défini par un triplet « intervalle, rayon, amplitude ».

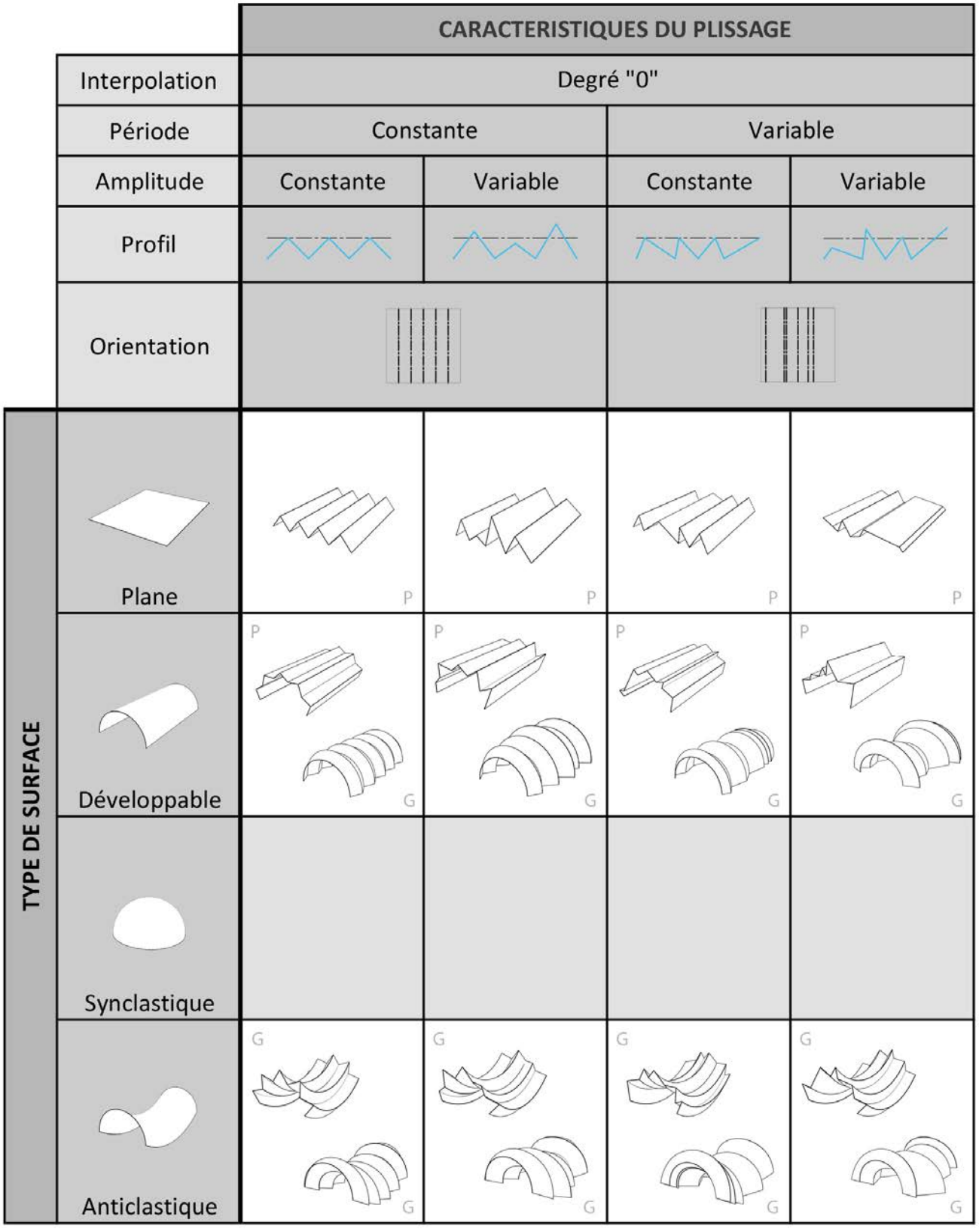


Tableau 1.1 - Dans un repère cartésien, les plissages représentant un degré « 0 » d'interpolation présentent un pattern où les directions des plis sont parallèles entre elles. Le profil du plissage est identique tout au long de l'extrusion.

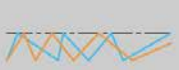
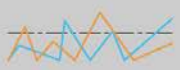
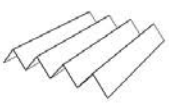
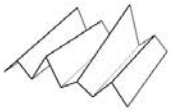
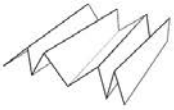
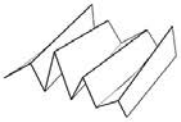
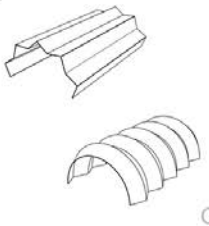
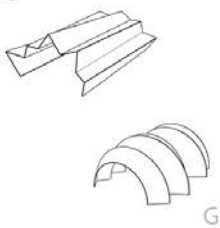
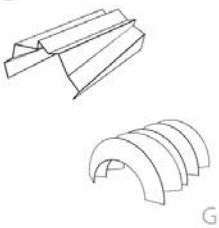
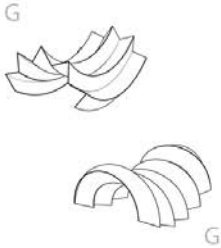
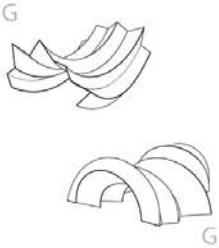
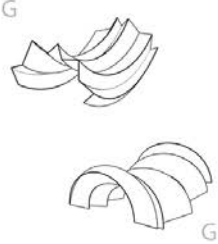
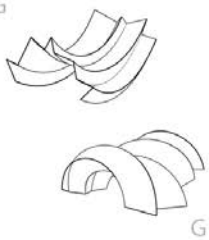
		CARACTERISTIQUES DU PLISSAGE			
	Interpolation	Degré "1"			
	Période	Identique		Différente	
	Amplitude	Identique	Différente	Identique	Différente
	Profil				
	Orientation				
TYPE DE SURFACE	Plane	 P	 G*	 G*	 G*
	Développable	 P G	 G* G	 G* G	G* G
	Synclastique				
	Anticlastique	 G G	 G G	 G G	 G G

Tableau 1.2 - Dans un repère cartésien, les plissages représentant un degré « 1 » d'interpolation présentent un pattern où les directions des plis peuvent varier. Ainsi, il existe plusieurs profils « différents » au sein d'un même plissage.

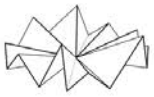
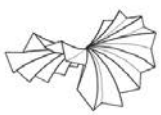
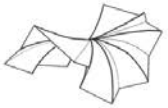
		CARACTERISTIQUES DU PLISSAGE			
	Interpolation	Degré "1"			
	Période	Constante		Variable	
	Amplitude	Constante	Variable	Constante	Variable
	Profil				
	Orientation				
TYPE DE SURFACE	Plane	P	P	P	 P
	Développable	G	G	G	G
	Synclastique	G	G	G	G
	Anticlastique	 G	G	G	 G

Tableau 1.3 - Dans un repère polaire, les plissages représentant un degré « 1 » d'interpolation présentent un pattern où les directions des plis sont rayonnantes. Le profil du plissage converge vers le point central du repère.

Ces tableaux présentent des possibilités non exhaustives de plissage. Ils résultent d'une combinaison entre leurs caractéristiques (période, amplitude, degré d'interpolation) et une surface de référence. Il est possible que la géométrie d'un plissage soit accessible par différents chemins. Par exemple, un plissage de degré « 0 » d'interpolation, dont la surface de référence est anticlastique de type « selle », peut être reproduit au moyen d'une surface de référence développable associée à un plissage de degré « 2 » (utilisation de trois profils de référence) (Figure 1.64). La décision quant au choix du chemin emprunté est à opérer par le concepteur.

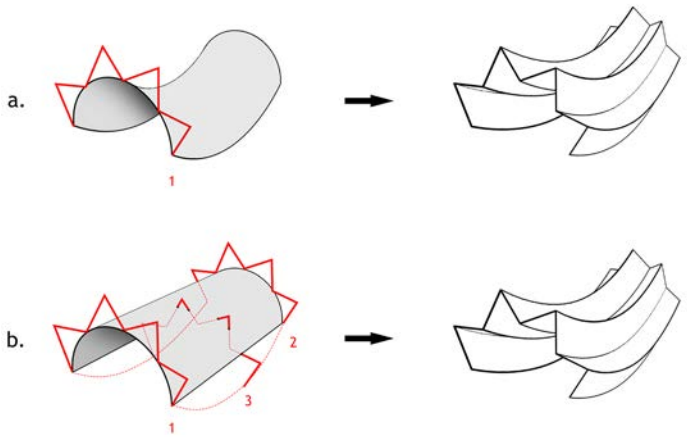


Figure 1.64 - Exemple de méthode différenciée pour la création d'un même plissage :
a. Plissage de degré « 0 » d'interpolation avec une surface de référence de type selle de cheval.
b. Plissage de degré « 2 » d'interpolation avec une surface de référence de type semi-cylindrique.

Chapitre 2

La construction par panneaux de bois

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au bois en tant que matériau de construction. Cette matière renouvelable et largement répandue dans les régions tempérées reste partiellement méconnue. Pour cause, chaque arbre est un organisme vivant qui se distingue par ses singularités. Aucun arbre ne ressemble à un autre, aucun élément de bois ne se comporte comme un autre. Afin d'exploiter le potentiel du matériau bois dans sa mise en œuvre, il est nécessaire d'être averti du potentiel de sa ressource et de ses propriétés physiques et mécaniques.
Grâce à cette connaissance, ce matériau peut répondre, sous la forme de produits dérivés tels que les panneaux, à des critères architecturaux et structuraux de plus en plus perfectionnés.
Notons également que ces matériaux produits présentent des caractéristiques adaptées à un contexte numérique, notamment dans leur capacité à être usinés.
Dans les sections qui suivent, nous exposons l'ensemble de ces traits de caractère qui contribue activement à l'émergence de l'architecture construite avec des panneaux en bois.

2.1. Le bois, une ressource

Dans un contexte où de nombreux matériaux sont confrontés à leur raréfaction, le bois présente une propriété intéressante : c'est un matériau «cultivable». En France, la surface forestière a augmenté d'un tiers au cours des deux derniers siècles[1]. Ce résultat est principalement lié à deux mesures essentielles survenues après 1945 pour lutter contre les friches agricoles, conséquence de l'exode rural : une taxe parafiscale revenant au Fonds Forestier National afin de financer de nouvelles plantations et une exonération fiscale sur le foncier pour les nouvelles plantations privées. En matière

[1] La forêt historique de 1830 comprenait 10Mha. Aujourd'hui, la forêt nouvelle a atteint 6Mha supplémentaires. Propos de Bernard Kientz de l'Observatoire dédié à l'économie de la Filière Bois en Lorraine (Gipeblor).

Figure 2.1 - Il faut environ 150 à 250 années avant d'exploiter un chêne. Ce long cycle de croissance nécessite une anticipation de son exploitation pour les générations à venir.

de productivité, cette « nouvelle » forêt est à présent exploitable[2] sans préjudice pour son renouvellement (Figure 2.1). Elle contient environ 60 % de feuillus et 40 % de conifères, composés d'une vingtaine d'essences d'arbres différentes[3].

En Europe, plusieurs pays comme l'Allemagne (12 millions de ha), la Suède (29 millions de ha), la Finlande (22 millions de ha), mais aussi la France (16 millions de ha) bénéficient d'une ressource en bois importante. L'Allemagne a le volume de bois sur pied le plus important (3,5 milliards de m³), devant la Suède (2,6 milliards de m³) et la France (2,4 milliards de m³)[4]. Cependant et contrairement à la France, l'uniformité des essences dans les pays scandinaves (épicéa et pin sylvestre) permet une production compétitive sur les marchés internationaux. En effet, les conditions de croissance particulières des bois du nord amènent à des singularités moins prononcées. Ce contexte est favorable à une industrialisation qui influe sur l'impact économique de ces bois[5].
Le prélèvement annuel dans les forêts d'Europe correspond à la moitié de l'accroissement naturel sur cette même période. En France, la croissance biologique annuelle s'élève à une moyenne de 86 millions de m³ contre un prélèvement de 40 millions de m³ ; cela crée une réserve excédentaire favorisant la consommation de bois[6].

Toutefois, cette consommation doit être valorisée en fonction de nos besoins. À ce jour, la ressource forestière est employée sous la forme de bois « énergie » et de bois « utile » regroupant principalement le bois « de construction » et de bois « noble » :

– Le « bois énergie » concerne toutes les essences d'arbre et ne demande pas nécessairement la mise en place d'une industrie de valorisation (coût de transformation peu élevé). Cependant, cette ressource semble être limitée face à nos besoins. En France, il est

[2] L'âge moyen de récolte d'un conifère à des fins constructives est de 80 ans. Celui d'un feuillu comme le chêne est le double (150 ans).

[3] Informations disponibles à l'adresse : http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/memento_2012.pdf
[consulté le 13 juillet 2016].

[4] Ibidem.

[5] Cette situation peut être comparée à celles des bois tropicaux.

[6] Moyenne calculée entre 2005 et 2010 en France.

difficile de penser que le bois pourra remplacer l'énergie fossile[7]. Si nous prenons en compte le fait que nous consommons déjà la moitié du rendement de nos forêts, une augmentation considérable de la production entraînerait rapidement une saturation de la filière bois.

– Une utilisation « noble » telle que pratiquée en ébénisterie ou en lutherie est certainement plus valorisante pour le bois. Toutefois, ce domaine peine à se développer face à la concurrence du marché industriel[8]. Si le bois ne peut être valorisé d'une manière « noble », la mise en valeur des ressources forestières a tout intérêt à se tourner vers le bois de construction.

– Mais aujourd'hui, c'est le bois construction qui représente la valorisation la plus intéressante. En 2000, Gerd Wegener et Bernhard Zimmer ont affirmé que le bois de construction était un matériau d'avenir. Ils se sont appuyés tous deux sur un comparatif entre la production annuelle de bois utile et celle de matières premières et matériaux de construction couramment employés (aluminium, acier et ciment). Le résultat a montré que le bois de construction est « irremplaçable »[9].

Ajoutons que cette proposition peut être encore plus intéressante, si l'on développe également l'usage de produits forestiers connexes rarement utilisés dans la construction. C'est le sens d'une réflexion menée au sein du laboratoire MAP/CRAI. Le projet ECO-Chute, se concentre sur la conception de structures avec des éléments de bois pas ou peu transformés tels que des branches ou des chutes industrielles[10] (Figure 2.2).

Figure 2.2 - Projet ECO-Chute. Informations complémentaires disponibles à l'adresse : http://meurthe.crai.archi.fr/wordpressFr/?page_id=37&num_publi=637 [consulté le 5 janvier 2017].

L'adaptation des besoins à la ressource est une idée maîtresse dans la valorisation du bois « local » français. Elle permet par exemple de soutenir l'économie locale de la filière bois. Cette situation

[7] Rapportée à la masse équivalente de bois sec, la production annuelle de bois correspond à 15 millions de tonnes en équivalent pétrole. Sachant que la consommation annuelle française de pétrole est de l'ordre de 76 millions de tonnes (source INSEE), on constate que la production de bois est insuffisante pour subvenir à nos besoins énergétiques. Ce résultat est aggravé que la consommation française de pétrole est minimisée par la production d'énergie nucléaire.

[8] cf. les meubles en kit fabriqués de manière industrielle.

[9] (Herzog, 2005, p. 47).

[10] Travaux menés par Vincent Monier (Monier, 2011).

s'est produite dans l'industrie des scieurs de hêtre et de chêne en Lorraine. Initialement, leur production était destinée à l'industrie du meuble alors implanté dans le département des Vosges. Sous l'effet de la mondialisation, l'industrie de l'ameublement a été délocalisée dans d'autres pays. Aujourd'hui, tout le bois destiné à cette industrie du meuble doit trouver une nouvelle filière de valorisation. Ce contexte a donné naissance au programme régional « hêtre-construction » favorisant l'usage de cette essence dans la construction. Ainsi des bâtiments employant du hêtre pour leur structure ont vu le jour à l'image du périscolaire de la commune de Tendon par HAHA Architecture en 2012 ou des gîtes de Xertigny de WM Architecture en 2015[11].

Un autre intérêt à l'exploitation de la ressource locale réside dans la réduction de l'énergie nécessaire au déplacement du matériau. Malgré cela, cette pratique peine à trouver une place face à l'enjeu économique offert par la mondialisation comme le révèle le marché du chêne français avec la Chine[12]. La question énergétique liée au transport dépend non seulement de la distance à parcourir, mais aussi de la charge à transporter. À distance égale, la consommation théorique d'énergie est moindre pour le transport du bois que pour celui de l'acier. Ceci est dû à la faible densité du bois vis-à-vis de l'acier : contrairement à ce dernier, le transport du bois est plus souvent limité par le volume que par le poids des éléments transportés. Rapporté à un itinéraire de proximité, le bilan énergétique du transport du bois est forcément plus intéressant.

Face à ce constat, le groupement « AA » (Architecturale Association School of Architecture) prône l'éthique d'une utilisation in situ de la ressource matérielle pour la construction[13]. Ainsi, dans le site

---

[11] Ces exemples ont cependant montré que l'emploi du hêtre dans des conditions inhabituelles d'utilisation peut soulever des questions normatives. Théoriquement, toutes les essences peuvent servir à un usage constructif. Cependant, en fonction de leurs caractéristiques, certaines essences s'avèrent plus adaptées que d'autres à un emploi précis.

[12] Journal « Le monde Économie », disponible à l'adresse : http://www.lemonde.fr/economie/article/2012/07/20/quand-la-france-exporte-son-bois-en-chine_1735730_3234.html [consulté le 14 juillet 2016].

[13] Disponible à l'adresse : http://www.aaschool.ac.uk/AASCHOOL/HOOKEPARK/hooke.php [consulté le 13 juillet 2016].

forestier de Hooke Park, plusieurs constructions expérimentales en bois ont vu le jour : l'atelier de Frei Otto et Richard Burton (1989), conçu avec du bois d'éclaircies assemblé pour former une voûte et plus récemment le « Biomass Boiler House » dont le mur incurvé reprend la courbure naturelle des troncs d'arbres sélectionnés dans la forêt (Figure 2.3).

Figure 2.3 - La chaufferie du campus de Hooke Park est composée de 167 résineux. Ces derniers ont été scannés sur pieds pour déterminer numériquement une solution morphologique par empilement. Des gabarits en panneaux de bois ont permis de positionner les troncs débités selon le modèle numérique. Disponible à l'adresse : http://designandmake.aaschool.ac.uk/biomass-boiler-house/

Notons que la valorisation de la ressource forestière dans le domaine de la construction participe à un enjeu écologique par le stockage d'une partie du carbone atmosphérique. En effet, le bois est composé à 50 % de carbone[14] ; ce carbone provient exclusivement du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère. En effet, lors de la photosynthèse, l'oxygène et le dioxyde de carbone sont transformés

[14] Composition élémentaire du bois anhydre : 50 % de carbone, 43 % d'oxygène, 6 % d'hydrogène et 1 % d'azote (Trouy, 2015).

en substances organiques telle que le glucose ; ce dernier forme la matière première essentielle à l'élaboration du bois[15]. Ainsi, pour fabriquer une tonne de bois anhydre, l'arbre a dû absorber 1,8 tonne de dioxyde de carbone provenant de l'atmosphère.
Bien que cette action ait un effet limité dans le temps, puisqu'aucune construction en bois n'est éternelle, elle permet dans un avenir proche de minimiser les effets néfastes issus de l'exploitation des énergies fossiles en maîtrisant le cycle du carbone. L'exploitation de la forêt de manière durable constitue un enjeu primordial.

OBSERVATIONS : La ressource forestière est renouvelable, mais elle n'est pas illimitée si l'on tient compte de la vitesse de croissance biologique par rapport à la vitesse de consommation liée aux besoins. Il est donc nécessaire de définir quel secteur valorise au mieux cette ressource. Aujourd'hui, l'enjeu environnemental nous conduit en particulier à diminuer notre consommation d'énergie notamment dans la construction de bâtiments à énergie positive. Il semble donc opportun de donner la priorité au bois de construction par rapport au bois énergie.
Le domaine de la construction est certainement le meilleur moyen actuel de valoriser la ressource forestière, particulièrement dans l'éventail des produits utilisés. Ce dernier s'étend des produits peu ou non transformés comme les constructions en fuste, aux produits de sciage et produits dérivés tels que les constructions en panneaux contrecollés.

[15] Composition élémentaire du bois par rapport à sa masse anhydre : Carbone 50 %, Oxygène 43 %, Hydrogène 6 % et Azote 1 %.

2.2. Le bois, un matériau « dérivable »

Dans cette seconde section, nous mettons en avant l'intérêt des panneaux de bois en tant que produit dérivé. Pour cela, nous introduisons les principaux traits de caractère du bois massif afin d'en évaluer les effets sur les panneaux.

2.2.a. Les caractéristiques du matériau bois

L'intérêt des panneaux de bois réside dans la gestion des singularités du matériau qui les compose. Ainsi, nous présentons sommairement des caractéristiques du bois massif qui peuvent être maîtrisées lors de la création de panneaux. Pour plus de précisions, une description amplement détaillée des caractéristiques du bois massif est disponible à l'annexe 2 de ce mémoire.

– Le bois est un matériau anisotrope. Les propriétés physico-mécaniques sont donc différentes selon que la direction est longitudinale (L), radiale (R) ou tangentielle (T) (Figure 2.4). Ce matériau composite offre un rapport de l'ordre de « 10 » entre (L) et (R) et de « 2 » environ entre (R) et (T). Cette singularité se répercute sur des propriétés physiques telles que l'acoustique solidienne ou la conductibilité thermique, mais aussi mécaniques telles que l'élasticité.

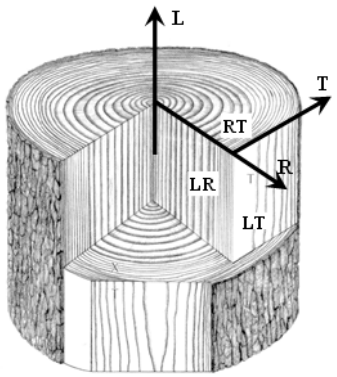


Figure 2.4 - Directions principales et plans de coupe d'une pièce de bois. D'après (Moutee, 2006).

– Le bois est également un matériau hétérogène en raison de l'existence de singularités de croissance comme les nœuds ou les cernes annuels. Le nœud produit une déviation du fil du bois entraînant une faiblesse mécanique lors d'une sollicitation longitudinale : en règle générale, la rupture d'un bois massif a lieu autour d'un nœud.
Les cernes correspondent à un cycle de croissance de l'arbre dans une zone tempérée. La différence de densité entre le bois de printemps (bois initial) et le bois d'été (bois final), due à une différence de porosité, engendre un effet de « bilame » à l'origine de la déformation des éléments en bois.

– Le bois est un matériau relativement léger. La densité du bois influe sur sa rigidité et sa résistance. Elle varie en moyenne entre 0,15 (balsa) et 1,1 (ébène) ; cette variation est liée à la porosité du matériau. Chaque essence présente également une variation de densité liée aux aléas climatiques ; en effet, un cerne de croissance

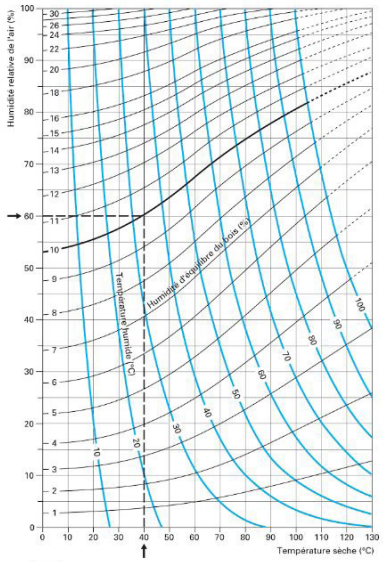


Figure 2.5 - Équilibre hygroscopique du bois.
Pour des conditions atmosphériques de l'ordre de 20 °C et 70 % d'humidité relative de l'air (HR), l'équilibre hygroscopique du bois est d'environ 13 %.
D'après (Natterer et al., 2000).

annuelle présente une densité du bois initial inférieure à 0,4 contre une densité supérieure à 1 dans le bois final. Ainsi, la densité moyenne d'un épicéa peut varier de 0,3 à 0,7 en fonction du pays d'implantation.

– Le comportement « hygroscopique » est à l'origine des changements volumiques. Le bois est un matériau en recherche constante d'un « équilibre hygroscopique » en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant (l'humidité du bois mise en œuvre est d'environ 13 %) (Figure 2.5). Lorsque son taux d'humidité varie en dessous du point de saturation des fibres (≈30 % d'humidité en moyenne), des phénomènes de dilatation et de retrait dimensionnels apparaissent. Les cycles successifs de retrait et de gonflement engendrent une fatigue du matériau.

– Le comportement « thermique » du bois peut être caractérisé par trois températures significatives :
Tout d'abord, la température de changement d'état de l'eau en glace à 0 °C (pression atmosphérique normale) qui engendre un risque de gel de l'eau libre (gélivure dans l'arbre).
Ensuite, la température de « transition vitreuse » (Tg) qui classe le bois en tant que matériau polymère. Elle correspond à la moyenne de celle de ses constituants comme la lignine (65 °C < Tgligni < 105 °C) et favorise le passage de l'état vitreux à l'état « caoutchoutique » du bois : activation rapide du fluage.
Enfin, la température de pyrolyse (Tpyro = 300 °C) qui est utilisée dans les calculs de stabilité au feu d'un bâtiment. La tenue au feu est rattachée à la conductivité thermique (qui dépend de l'anisotropie et de la densité de l'essence) et à la vitesse de combustion (estimée à 0,7 mm/min et par face exposée).

– Le comportement à « l'usinabilité » se spécifie par une qualité géométrique au regard de l'ingénierie, mais également par une qualité de finition portant sur l'état de surface (visuel, toucher…). Les singularités du bois entraînent des spécificités d'usinage : l'anisotropie, l'ange de fil et les variations de densité dans les cernes ou dans un nœud. Ils sont les principaux facteurs agissant sur la qualité d'usinage. Par conséquent, les conditions d'usinabilité varient dans une même pièce de bois.
Toutefois, le bois n'en est pas moins un matériau facilement usinable. Cette singularité lui confère un statut de matériau incontournable de la construction (Figure 2.6).

Figure 2.6 - Procédé «TOBI» (Tour à Bois Innovant) permettant un fraisage épicycloïdal multidirectionnel. Société d'Innovation et d'Ingénierie en Machines-Outils (SIIMO).
Disponible à l'adresse : http://www.tobi-innovation.com/ [consulté le6 juillet 2016]

– Le comportement « visuel » dépend du mode de débit du bois. Par une composition fibreuse particulière à chaque essence (anatomie), chacun des plans (L), (R) et (T) confère une texture propre (Figure 2.7). De plus, la présence de cernes ou de nœuds génère un graphisme indissociable d'une dimension sensible, esthétique, voire symbolique. Par les cernes, nous pouvons lire un ensemble d'informations tel que l'âge de l'arbre. Quant au nœud, il évoque la mémoire de la branche et par extension de l'arbre : il agit, d'une part, comme un révélateur d'échelle et d'autre part, il personnalise ponctuellement le motif par la déviation des cernes qu'il occasionne.

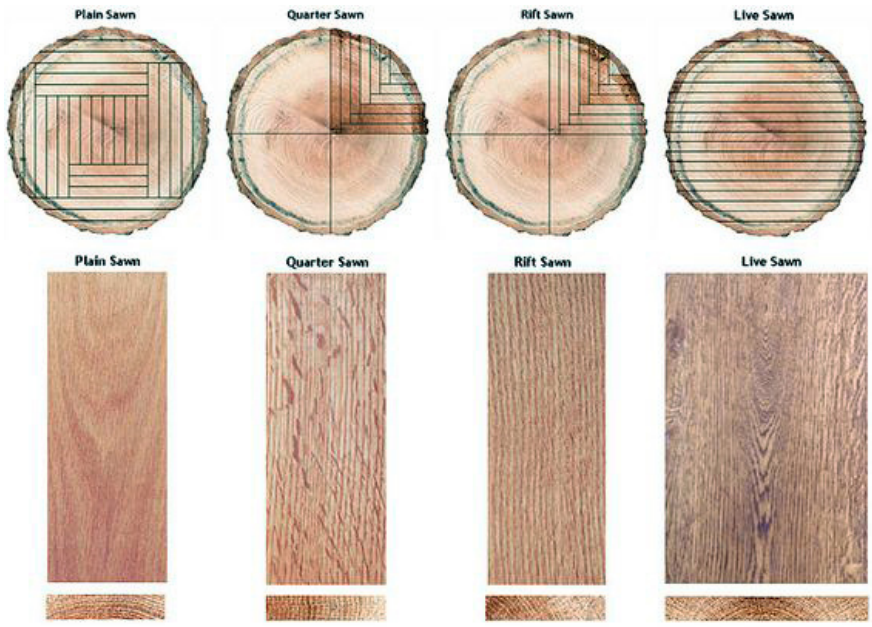


Figure 2.7 - Visualisation de la fibre selon le plan de coupe.
Disponible à l'adresse : http://www.brodensupply.com/hardwood/ [consulté le 12 décembre 2016]

Figure 2.8 - Panneau en châtaignier purgé de nœuds.
Disponible à l'adresse : http://www.presto-bois.com/plateau-plande-travail-tablette-chataignier-massif-c2x14418923
[consulté le 22 mai 2017)

Les singularités du bois massif, en fonction de la dimension considérée, peuvent disposer à la fois d'une connotation négative en tant que « contrainte-faiblesse », et également positive sous la forme d'une « qualité ». Toute la difficulté d'un projet en bois réside dans la capacité à composer avec ces singularités.

Aujourd'hui, la tendance à l'industrialisation de produits de construction se heurte aux singularités du bois massif. En effet, les singularités propres à chaque essence compliquent une production sérielle d'éléments aux propriétés physiques, mécaniques et esthétiques identiques.

L'une des possibilités de maîtriser les singularités, d'un point de vue aussi bien esthétique que technique, passe par la création de bois dérivés tels que les panneaux (Figure 2.8). Ces produits permettent de « gommer » les limites imposées par ces singularités grâce aux connaissances scientifiques associées à ce matériau composite, poreux et polymère. La création de panneaux permet :

– de s'affranchir de la géométrie de l'arbre,

– de diminuer l'impact de l'anisotropie,

– d'atténuer l'incidence de l'hétérogénéité de croissance,

– d'assurer une stabilité dimensionnelle,

– d'augmenter ses caractéristiques mécaniques,

– de maîtriser l'aspect visuel de l'élément de bois.

Par une combinaison variable de ces possibilités, les panneaux qui présentent des caractéristiques mesurables et prévisibles dépassent les limites naturelles du bois afin de proposer des solutions aux besoins changeants du marché de la construction.

Dans ce domaine, la prépondérance croissante des panneaux de bois nécessite une attention particulière. Ainsi, nous proposons de définir la notion de panneau de bois et d'en décrire les limites actuelles.

2.2.b. Les panneaux de bois

Le panneau est un produit autostable qui est transportable et manipulable. À l'instar de l'arbre ou des produits de sciages comme la planche, leur caractérisation géométrique à deux dimensions faibles les classe structurellement dans la famille des « poutres ». Mais d'un point de vue géométrique, le panneau constitue généralement un objet de surface plane dont l'épaisseur est significativement faible vis-à-vis des dimensions de ladite surface. De ce fait, le panneau se distingue par une libération des contraintes dimensionnelles attenantes à l'arbre : il doit être donc considéré comme l'assemblage de plusieurs éléments.
Deux types de panneaux se distinguent selon le mode de constitution : le panneau « massif » et le panneau « composant ».

2.2.b.1. Les panneaux en bois massif

Ces produits dérivés sont le résultat d'une combinaison entre un constituant et un produit assurant sa cohésion (adhésif, liants…). Les constituants sont issus de différents modes de débit du bois massif : le bois de sciage couramment utilisé dans le débit des bois de construction comme la planche ; le bois déroulé ou tranché formant des feuilles de quelques millimètres d'épaisseur ; le bois déchiqueté formant des particules sous forme de grands copeaux, copeaux de rabotage et particules de sciure ; le bois raboté afin d'obtenir de la laine et le bois défibré. L'ensemble de ces produits provenant de la transformation du bois massif joue un rôle important dans la filière bois. Ils assurent une gestion des déchets par le recyclage et valorisent des produits forestiers jusque-là dépréciés dans le domaine du bois de construction.
Ces panneaux industriels sont formés d'un agglomérat aléatoire ou structuré de constituants dont la cohésion est assurée le plus souvent par collage. Ce processus d'adhésion est généralement accompagné d'un facteur de pression et de température. Les colles sont les principaux liants utilisés dans les produits dérivés. Leur composition évolue en fonction des caractéristiques désirées comme la résistance

à l'humidité, la capacité structurale[16], le degré de souplesse ou encore la capacité d'expansion de la colle pour combler les « vides » entre les plans de joints[17]. Ces divers matériaux sont présentés dans la figure suivante (Figure 2.9) :

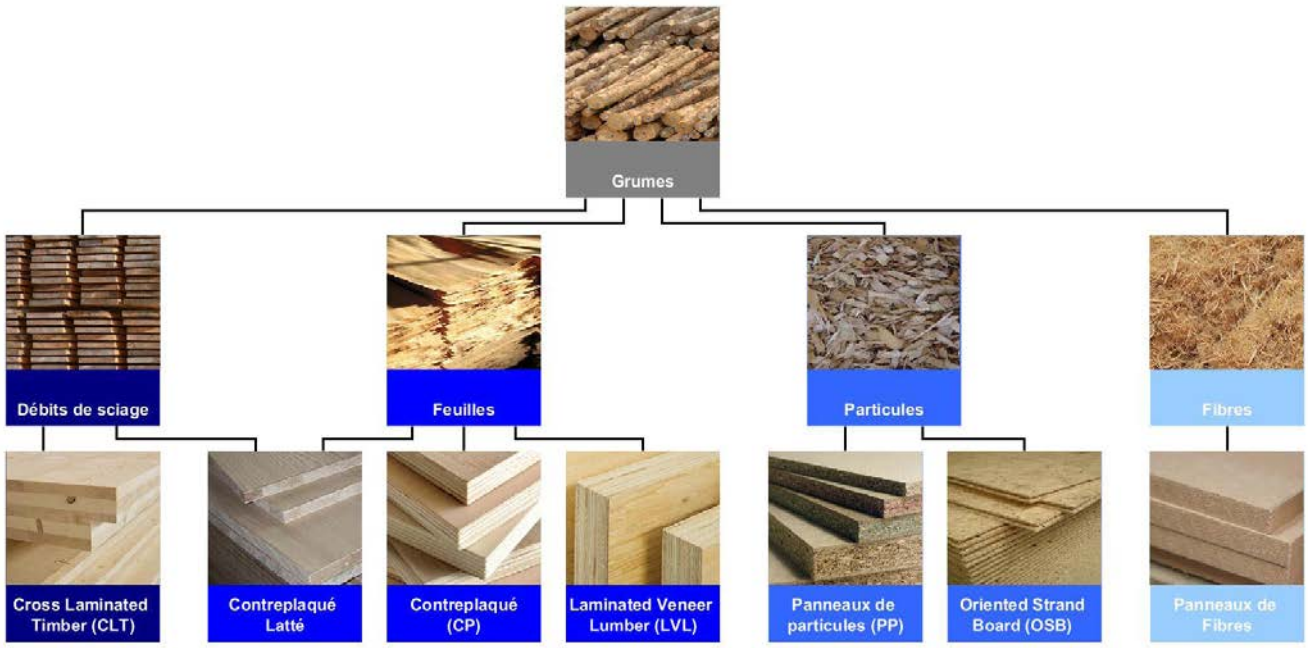


Figure 2.9 - Organigramme des panneaux selon leurs constituants

Il est nécessaire de prendre en compte que les produits, tels qu'ils sont fabriqués aujourd'hui, présentent des caractéristiques distinctes favorables ou non à un mode de construction.
Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons plus particulièrement aux panneaux usuellement utilisés dans la construction pouvant assurer une fonction structurale[18]. Voici quelques exemples :

[16] Pour un usage structural, on emploie généralement des colles phénoliques (résorcine) ou Aminoplastes (Urée formol et Mélamine Urée). Autrement, des colles vinyliques et polyuréthannes sont préférables.
Disponible à l'adresse : http://www.cndb.org/live/produits_et_materiaux/produits_assemblage/colles_et_adhesifs.pdf
[consulté le 6 novembre 2016].

[17] L'utilisation de ces produits engendre un risque environnemental et sanitaire qui ne doit pas être écarté, particulièrement dans la diffusion des solvants comme les COV (corps organiques volatils).

[18] De futurs produits plus performants ne sont pas à exclure dans les prochaines années ; ce constat se base sur les caractéristiques techniques du produit. Il n'est pas impossible que des panneaux considérés comme non structuraux le deviennent par modification de leurs caractéristiques comme l'adhésif employé.

– Le« CLT » (Cross Laminated Timber). Le collage de planches par couches croisées à 90 degrés permet d'approcher un équilibre des propriétés physico-mécaniques dans la direction longitudinale et transversale. Toutefois, le nombre impair de plis, qui assurent la stabilité dimensionnelle vis-à-vis des variations hygrométriques, est à l'origine de l'orthotropie de ce produit.

– Le « LVL » (Laminated Veneer Lumber). L'objectif principal d'une reconstitution « multi-feuille » consiste à diminuer l'effet des singularités du bois comme les nœuds ; en effet, le nœud est diffus dans l'épaisseur du panneau ; la superposition de fines couches participe à l'homogénéisation du produit. Cela permet d'obtenir des propriétés mécaniques plus élevées et plus uniformes dans la direction principale des plis. D'autres produits comme le « CP » (contreplaqué) privilégient la stabilité dimensionnelle par plis croisés en dépit d'une moindre efficacité structurale.
Par ailleurs, le pressage à chaud lors du processus de fabrication augmente la densité du produit afin d'augmenter sa rigidité et sa résistance (de 500 kg/m3 pour une feuille de résineux à 700 kg/m3 pour le produit fini).

– L'« OSB » (Oriented Strand Board). Ce panneau composé de trois couches croisées de grandes lamelles présente, comme les deux produits précédents, des caractéristiques mécaniques élevées et une meilleure stabilité dimensionnelle qu'un élément de bois massif. Par comparaison, le WAFER BOARD qui est composé de grandes lamelles « non orientées » présente des propriétés physico-mécaniques inférieures à l'OSB mais équivalentes dans les deux directions du panneau.

De manière générale, ces panneaux regroupent des caractéristiques communes.
Tout d'abord, leurs techniques de réalisation dépendent d'un contexte normatif rattaché au milieu industriel. Elles offrent la possibilité de produire en série des panneaux de grandes dimensions. Néanmoins, les dimensions usuelles d'un panneau sont limitées par la manutention (poids et encombrement), les possibilités de

transport[19], mais également par les capacités des outils de productions[20]. Dans le cas des panneaux contrecollés, les dimensions peuvent avoisiner les 24 m de longueur pour 4,8 m de largeur et jusqu'à 50 cm d'épaisseur (Figure 2.10).

Figure 2.10 - Production d'un panneau de CLT: encollage et positionnement des couches croisées de planches. Disponible à l'adresse : https://www.holzkurier.com/schnittholz/2013/07/ein_klebstoff_fuerzinkefugeflaeche.html [consulté le 22 mai 2017]

Dans le cas du LVL, la chaîne de production est ininterrompue et produit un panneau d'une longueur théoriquement infinie et débité sur mesure. La largeur standard est de 2,5 m pour une épaisseur comprise entre 21 et 90 mm. Il en va de même pour la production de panneaux à particules comme l'OSB dont les dimensions d'usage correspondent à une largeur de 1,2 m, à une longueur de 2,5 m et à une épaisseur de 6 à 28 mm.
Ensuite, ces panneaux sont conçus de manière à proposer des caractéristiques mécaniques optimisées pour un contexte donné.
Enfin, l'aspect et la qualité surfacique peuvent être considérés comme un critère esthétique en tant qu'élément visible (texture, couleur…).

D'un point de vue plus spécifique, les caractéristiques de chaque panneau massif sont décrites dans le tableau suivant selon les différentes familles de constituants (Tableau 2.1) :

[19] Pour les semi-remorques : l=2,55 m ; L=14m à partir du pivot d'attelage ; h=4m à partir du sol.

[20] La capacité dimensionnelle des presses est limitée par les moyens techniques garantissant une planéité des panneaux tout en conservant un rapport « multiplicateur » avec la dimension d'un panneau transportable.

Constituants	Type	Les caractéristiques
 Bois de sciage	 CLT	– Débits de sciage (généralement des planches de 20 < ép < 40 mm) – Usage de résineux (ex. : sapin, épicéa, douglas, pin, mélèze) – Couches croisées perpendiculairement (3, 5, 7, 8 plis) – Collage et mise sous pression (polyuréthane, phénolique) – Dimensions courantes : L ≤ 19,50 m ; l ≤ 3,50 m ; ép ≤ 500 mm – Masse volumique moyenne : 480 kg/m³ – Facilement usinable (rabotage, ponçage, taille, finition...) – Qualité externe : finition brute, soignée, acoustique... – Éléments structuraux : murs, planchers, toitures... – Le nombre impair de plis est à l'origine de l'orthotropie du matériau – Nombre de plis en fonction des reprises de charges appliquées aux panneaux
 Placage	 CP	– Lamellé collé de placage sur chant (ép. 1 à 3 mm) – Usage de résineux (ex. : pin maritime, pin sylvestre, douglas) ou de feuillus (ex. : hêtre, bouleau, sipo, okoumé) – Plis croisés au nombre impair – Collage et mise sous pression à chaud (résines phénoliques, urée-formol...) – Dimensions courantes : L = 2,50 m ou 3,10 m ; l = 1,25 m ou 1,50 m ; 6 mm < ép < 30 mm ; – Masse volumique moyenne : 400 kg/m³ – Éléments travaillant : contreventement, platelage, support de couverture... – Panneaux de parement : bardage, plafond, cloison... – Différentes finitions : (hydrofuge, ignifugé, pour coffrage avec film phénolique lisse, décoratif avec placage de finition, flexible...)
	 LVL	– Placage de déroulage (ép. 3 mm) collé en quinconce – Usage de résineux (ex. : épicéa) ou de feuillus (ex. : hêtre) – Orientation unique des fibres ou 20 % de couches croisées (stabilité) – Collage et mise sous pression à chaud (résines phénoliques) – Dimensions courantes : L ≤ 25 m ; l ≤ 2,50 m ; 24 mm ≤ ép ≤ 90 mm – Masse volumique moyenne : 400 à 480 kg/m³ – Éléments structuraux : poutre sur chant, poteau, portique... – Panneaux autoporteurs à plat : plancher, toiture... – Panneaux de parement : bardage, plafond cloison... – Qualité externe : finition variable en fonction du placage – Grande résistance à la flexion dans le sens des fibres (caractéristiques proches de celles du bois naturel) : $\sigma^{flexion} = 40\ N/mm^2$
 Particule	 OSB	– Grandes lamelles orientées (0,5 < ép < 3 mm) et liées par collage – Panneaux anisotropes : orientation différente des particules entre les couches extérieures et la couche médiane due au processus de fabrication – Dimensions courantes : L =2,50 ; l = 1,20 m ; 6 mm < ép < 28 mm – Masse volumique moyenne : 650 kg/m³ – Éléments travaillant : contreventement, platelage, support de couverture, connecteur de charpente... – Panneaux de parement : bardage, plafond, cloison... – Finition non modifiable (sauf ponçage) – Panneau avec « ouverture » du chant (variation de densité dans l'épaisseur du panneau) ; l'OSB a une densité plus faible en âme.

Tableau 2.1 - Intérêts et limites de quatre panneaux de bois choisis pour leurs caractéristiques structurales et d'usinabilité.

2.2.b.2. Le panneau composant

Le panneau composant se définit comme un complexe à base de différentes sources de bois telles que des débits de sciage ou des produits dérivés comme les panneaux massifs. Leur combinaison permet d'obtenir des composants prêts à l'emploi fabriqués en série ou sur mesure tels que les panneaux alvéolaires, les panneaux caissons ou encore les panneaux à ossature (Figure 2.11).

Figure 2.11 - Montage des panneaux à ossature formant la coque plissée qui recouvre la piscine. D'après (Hobhouse, 2015).

Ces composants, fabriqués de manière industrielle ou artisanale, sont composés à partir de bois de sciage tels que les produits Lignotrend ou Lignatur, voire associés à des panneaux comme le panneau caisson de la marque Novatop. Les composants du type Lignotrend sont conçus pour travailler comme une poutre entre deux appuis. De ce fait, ce produit nous intéresse moins dans notre recherche sur les structures plissées. Au contraire, le caisson du type panneau à ossature présente une alternative intéressante. Ce complexe est doté d'une grande liberté géométrique en respectant les contraintes de transport et de manutention ainsi que formelles notamment en trois dimensions (aspect curviligne). Un autre intérêt réside dans sa faible densité pouvant se restreindre à une valeur inférieure à 100 kg/m3.

De plus, le composant est doté d'un degré « d'intelligence » par l'amélioration de ses propriétés physiques comme l'intégration possible d'une composante acoustique ou thermique (Figure 2.12).

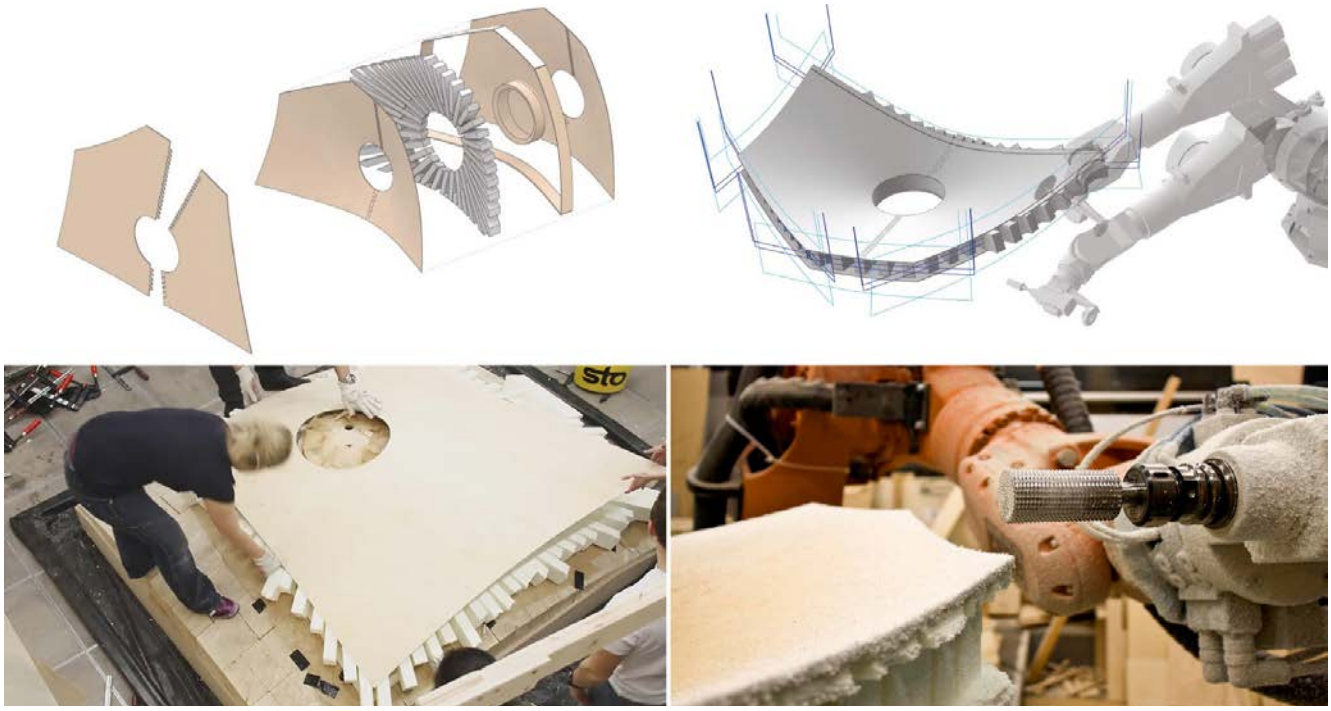


Figure 2.12 - Fabrication d'un panneau composant pour le pavillon «Hydroskin» réalisé en 2013 par Achim Menges. Disponible à l'adresse : http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869 [consulté le 6 juillet 2016]

OBSERVATIONS : Le développement des produits dérivés tels que les panneaux offre de nouvelles alternatives dans la conception architecturale et structurale. Dans un contexte rapporté à notre sujet d'étude sur les enveloppes structurales plissées, cette évolution est bien visible. Une forme plissée peut être pensée soit par un système traditionnel « poteaux-poutres » avec remplissage, soit par un système de panneaux liés. D'un point de vue formel, le résultat est identique, par contre le concept diffère fortement. Notre attention s'est tournée vers l'usage des produits dérivés sous forme de panneaux. Pour comprendre l'intérêt d'un système par « assemblage de surface », il faut porter un regard sur cette production architecturale initiée depuis près d'un demi-siècle.

2.3. Les assemblages de panneaux

Par son comportement favorable au façonnage ou à l'usinage, le bois demeure plus que jamais un matériau d'assemblage.
Nous portons donc une attention particulière au développement de cette technologie. Plus exactement, nous exposons le potentiel des méthodes traditionnelles d'assemblages par emboîtement telles que les tenons-mortaises, les queues d'aronde ou encore les entures face au contexte numérique actuel. En effet ces méthodes présentent aujourd'hui un nouvel intérêt dans le contexte des usinages robotisés comme l'a montré la recherche « Interlocking folded plate ». Christopher Robeller, son auteur, stipule également que ces assemblages sont adaptés aux structures spécifiques telles que les coques plissées en panneaux de bois[21].

2.3.a. La notion d'assemblage

Historiquement, les premiers assemblages dans la construction en bois présentaient des enchevêtrements d'éléments non manufacturés. La hutte paléolithique fait référence à ces propos : la structure de l'abri était constituée de branches fichées dans le sol dont les extrémités opposées, présentant des ramifications naturelles de branche, étaient enfourchées les unes dans les autres. Au néolithique, l'utilisation de ligatures telles que des fibres végétales ou des nerfs animaux ont renforcé ces assemblages primitifs[22]. L'ajout de ces liens garantissait une continuité physique entre les différents éléments qui constituent l'assemblage.

Aujourd'hui, l'assemblage des structures en bois, favorable parfois au collage, est réalisé principalement par des procédés mécaniques[23]. Les liaisons mécaniques peuvent être établies par des connecteurs additionnels, par le taillage de la pièce elle-même ou encore par

[21] (Robeller et al., 2015).

[22] (De Beaune, 2010).

[23] Bien que le collage prenne de l'ampleur dans l'assemblage d'éléments en bois, ce type de technologie est principalement utilisé dans la fabrication industrielle de produits manufacturés en bois (lamellé-collé) ou encore dans la préfabrication d'éléments en atelier. Il est plus pertinent de considérer les fixations mécaniques rapportées (clous, vis…) ou intégrées (tenons-mortaises, raines et languettes…) favorisées lors un montage sur chantier (Robeller, 2015, p. 7).

une combinaison de ces deux types ; le clou ou la vis relèvent d'un « assemblage à force » alors que les liaisons comme les entures ou les tenons et mortaises relèvent d'un « assemblage par blocage géométrique »[24].

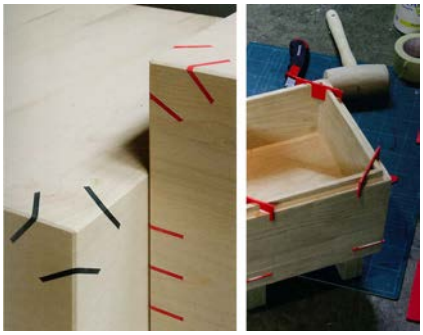


Figure 2.13 - Assemblage par clavettes. Laetitia Florin, École Cantonale d'Art de Lausanne (ECAL).
D'après (Glasner, Ott, 2013).

Une grande variété d'assemblages, issue de ces deux catégories d'assemblages, existe dans le domaine artisanal des métiers du bois[25]. Qu'ils soient apparents ou dissimulés, mobiles ou rigides, les assemblages doivent transmettre les efforts d'un élément à l'autre (Figure 2.13). Ces modes de jonctions diffèrent selon leurs usages. En charpenterie traditionnelle, les assemblages sont principalement utilisés dans la connexion d'éléments linéaires, appelés assemblages de bout (poteaux, poutres). L'enfourchement, le trait de jupiter ou encore l'embrèvement sont autant d'assemblages par blocage mécanique.

La qualité structurale d'une structure en bois réside principalement dans la capacité des assemblages à résister aux charges importantes qui les traversent. Le façonnage géométrique de chaque élément joue un rôle aussi important que la manière dont ces éléments sont combinés entre eux. D'une part, l'assemblage est le composant maître de la construction. Sa facture détermine les caractéristiques constructives d'un élément telles que sa dimension ou encore sa durée de vie[26]. D'autre part, chaque élément a une fonction précise : dans une structure à pans de bois, les éléments verticaux assurent le transfert de charge vers le sol, les éléments horizontaux transmettent les charges aux éléments verticaux et les éléments obliques assurent la stabilité en contreventant la structure. Ce système fonctionne à condition que l'ensemble des éléments soient solidaires. Ainsi, il existe une relation entre la nature de l'assemblage et la géométrie formée par les éléments assemblés attestant de la stabilité d'une structure.

---

[24] Dans son article intitulé « *Le collage : un moyen ancestral, moderne et durable d'assemblage* », Michel Barquins présente six principaux types d'assemblages apparus au cours des âges (Barquins, 2004, p. 2).

[25] Voir *Le Dictionnaire Pratique de Menuiserie — Ebénisterie — Charpente*, par Justin Storck (Storck, 2002).

[26] (Gerner, Genevrier, 1994).

Mais si les assemblages sont à l'évidence un dispositif structurel clef, ils sont aussi un dispositif plastique qui participe à l'écriture architecturale.
Les Chinois ont probablement été les premiers maîtres de cette discipline, influant sur la grande variété géométrique des assemblages présents dans la charpenterie traditionnelle orientale et en particulier japonaise[27]. Par leur faculté à imaginer des formes complexes, les maîtres charpentiers japonais ont par exemple su conférer à ces points nodaux deux qualités essentielles : l'une structurale qui supporte les efforts de traction et de compression, l'autre esthétique par l'effet stylistique qu'ils suscitent[28].

Le courant « Art and Craft » en est aussi une belle illustration. Les assemblages y sont largement constitutifs du vocabulaire architectural comme par exemple dans les réalisations menées par les frères Greene[29]. La maison « Gamble », réalisée en 1908, en est le manifeste (Figure 2.14). Charles et Henry Greene ont pensé et réalisé un bâtiment en bois avec le même souci du détail qu'un ébéniste accorderait à la confection d'un meuble.

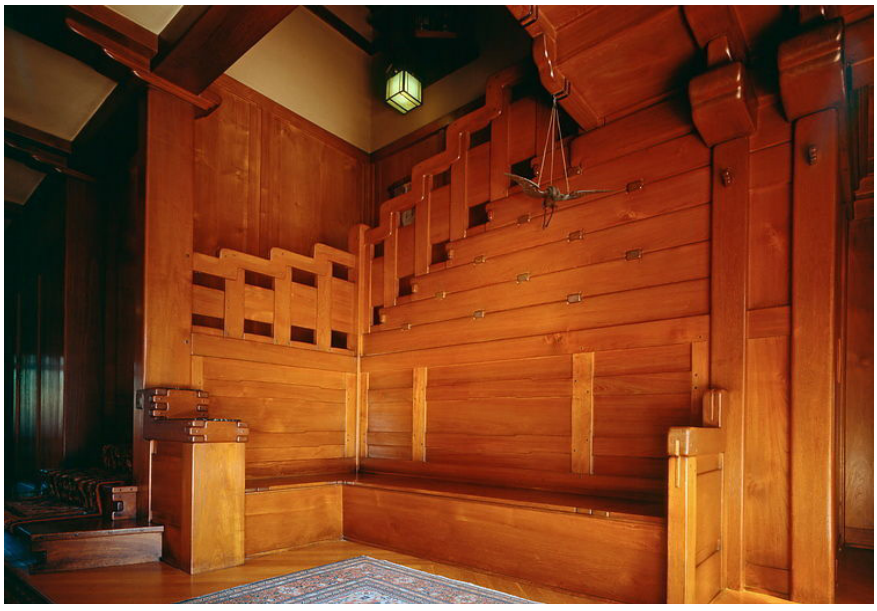


Figure 2.14 - Escalier de la maison Gamble. Les frères Greene associent les techniques de menuiserie au vocabulaire de la charpenterie. Disponible à l'adresse : http://gamblehouse.org/interior/ [consulté le 14 avril 2017]

[27] (Graubner, 2002).

[28] L'évolution des assemblages japonais tend à dissimuler le mode exact d'imbrication pour ne laisser visible qu'une fine ligne de jonction (Graubner, 2002, p. 31).

[29] (BOSLEY, 1992)

Pour ces architectes, révéler l'assemblage magnifie chaque élément dans son individualité tout en exprimant une cohésion au sein des éléments assemblés. Par exemple, chaque membrure d'une charpente doit pouvoir être comprise comme un élément autonome, mais aussi comme un élément faisant partie de l'ensemble. Ainsi, les pièces de bois ont été taillées dans différentes essences. Ce procédé permet d'attribuer à l'élément les caractéristiques de l'essence choisie (densité, résistance, dureté, texture et couleur) en fonction de son emploi. C'est le cas, entre autres, des clavettes réalisées en ébène pour la maison « Gamble ». Afin d'affirmer visuellement les jointures entre chaque pièce de bois, leurs arêtes ont été remplacées par un congé ou un arrondi. Ce dispositif crée une « ligne d'ombre » qui autonomise les différents constituants.
Par ces différentes interventions, les frères Greene ont su construire un langage architectural qui offre une cohérence entre une dimension esthétique et une efficience structurale.

L'arrivée du panneau en bois a considérablement changé la nature des assemblages de charpenterie. Dans les ossatures bois type « plateforme », le contreventement est assuré par un panneau cloué appelé « voile travaillant ». Cette technique ne requiert pas de façonnage particulier des assemblages entre les montants et les traverses qui composent l'ossature. Toutefois, cette simplification dans la taille d'assemblage nécessite l'ajout d'un élément de maintien tel que la vis ou le clou. Dans cette situation, le panneau vient gainer l'ossature pour pallier le manque de raideur des assemblages et ainsi stabiliser l'ossature.
Aujourd'hui, de nouvelles typologies structurales composées de panneaux minces en bois massif font abstraction d'une ossature primaire à l'exemple des bâtiments réalisés en CLT. Ce panneau en bois massif assure, à la fois, la fonction d'élément porteur et d'élément stabilisateur de la structure. Le travail de charpentier ne consiste plus seulement à assembler des éléments linéiques, mais aussi des éléments plans.

2.3.b. L'assemblage des panneaux

Avant l'apparition des panneaux de bois dans le domaine de la construction, les éléments plans étaient principalement constitués de pièces en bois massif juxtaposées telles que les planches. Dans les premières décennies du XIXe siècle, l'habillage des ossatures bois du type « balloon-frame » était assuré par des planches. Ces dernières étaient clouées de manière horizontale, voire en diagonale pour assurer le contreventement de la structure.

En menuiserie ou ébénisterie, l'assemblage dit de « plan » ou « à bois de fil » se pratique couramment pour la confection de panneaux composés de planches en bois massif. Le vantail, le plateau, l'abattant ou encore le caisson sont autant d'éléments d'ébénisterie composés de panneaux en bois massifs d'une largeur de plusieurs dizaines de centimètres. Même s'il existe des sections de troncs d'arbres capables d'offrir de telles dimensions, la variation du taux d'humidité entraînerait une détérioration des bois débités[30]. Ainsi, l'assemblage de pièces plus étroites en un corps distinct empêche la déformation et l'éclatement du panneau. Dans son ouvrage sur les assemblages du bois[31], Wolfram Graubner présente la rainure-languette et la queue d'aronde comme les deux principales techniques pour l'« assemblage de plans » (Figure 2.15) et l'« assemblage d'angle de plans »[32].

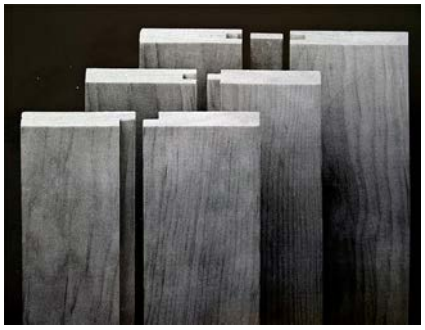


Figure 2.15 - Assemblage à feuillure simple, à rainure et langeutte simple ou à fausse languette.
D'après (Graubner, 2002).

L'auteur décrit l'assemblage rainure et languette comme le plus aisé à mettre en œuvre. L'assemblage de plans selon cette technique offre une grande stabilité en évitant tout gauchissement du bois. Des variantes comme la fausse languette permettent d'économiser la matière et d'optimiser le travail (rainure identique sur chaque pièce). D'autres, comme la languette en queue d'aronde, assurent une résistance à la traction en cas de retrait du bois. La présence de colle ou de connecteurs mécaniques comme le clou ou la vis n'est pas indispensable. Dans le cas d'un assemblage d'angle de plans, ces dispositifs sont tout aussi efficaces[33].

[30] L'anisotropie du bois peut entraîner, lors du séchage, des tensions à l'origine du gauchissement et de la rupture du matériau. (Herzog, 2005, p. 31-33)

[31] (Graubner, 2002, p. 134-154)

[32] Wolfram Graubner y mentionne également les auxiliaires d'assemblage tels que les chevilles, tourillons, papillons et autres languettes rapportées.

[33] Voir (Graubner, 2002, p. 142-143)

Les queues d'aronde présentent un intérêt lorsqu'il s'agit d'un assemblage sur angle (Figure 2.16). En effet, les entailles des arondes nécessitent un positionnement dans le sens du fil afin d'empêcher tout soulèvement de la fibre. Ainsi, la languette d'aronde sera privilégiée dans le cas d'un assemblage de plans. La queue d'aronde s'inspire « du mouvement des mains jointes »[34]. À l'instar des queues droites, ce type de connexion offre une meilleure résistance au chargement. Outre la fréquence des queues présentes sur un assemblage, le tracé en forme d'aronde augmente la surface de contact. Cependant, l'assemblage par queues d'aronde ne dispose plus que d'un seul degré de liberté correspondant au mouvement de translation nécessaire au montage. Cette géométrie contribue à une amélioration considérable de l'assemblage. Elle permet la transmission des contraintes de traction[35] ainsi que le transfert des moments de flexion vers des forces de cisaillement et de compression[36]. Outre l'intérêt mécanique, cette technique connaît de nombreuses variations, notamment dans un but esthétique. Bien que la visibilité de ce type d'assemblage soit assumée dans la plupart des cas, certaines géométries comme les queues d'aronde perdues avec coupe d'onglet trilatérale effacent totalement la technique employée. Le camouflage des assemblages exige souvent des complexités supplémentaires dans la taille des pièces de bois. Cela risque de diminuer la précision d'exécution indispensable au bon fonctionnement mécanique de l'assemblage.

Le développement des panneaux industriels tel que le panneau de particules a entraîné un usage restreint des assemblages par blocage géométrique au profit d'un assemblage à force. Dans l'assemblage de pièces de bois brut, des jeux spécifiques sont nécessaires à l'absorption du gonflement et du rétrécissement du matériau. La grande stabilité dimensionnelle des panneaux industriels[37] ne requiert pas autant de complexité technique et autorise une simplification des assemblages.

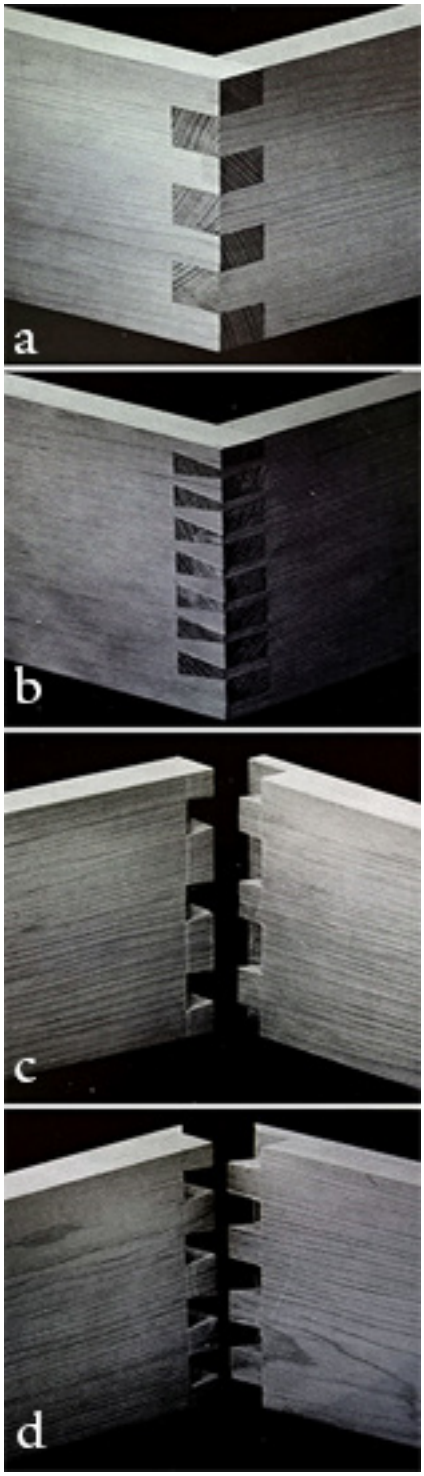


Figure 2.16 - Assemblages plans à queues : a. queues droites, b. queues d'arondes, c. queues d'raonde perdues, d. queues d'aronde perdues coupées sur onglet.
D'après (Graubner, 2002).

[34] (Graubner, 2002, p. 147)

[35] (Gerner, Genevrier, 1994, p. 108)

[36] (Robeller, 2015, p. 9 et 65)

[37] Pour une variation d'humidité de 1 %, la variation dimensionnelle d'un panneau OSB est de 0,03 % et celle d'un contre-plaqué (deux directions) ou d'un panneau aggloméré est de 0,01 % (Herzog, 2005, p. 33).

D'autres techniques se sont développées au cours des années 2000. Les designers Sandor Klunker et Timm Herok ont produit une texture pliable : le « Foldtex ». Il se compose de deux panneaux en bois enserrant une membrane textile. L'usinage du bois de part et d'autre de la membrane crée une charnière grâce à la souplesse du textile. Ce procédé va être repris par le studio de design de Milan Mamma Fotogramma en 2013 sous le nom de « Woodskin ». Leurs motivations résident dans les recherches appliquées sur la géométrie de surfaces complexes comme sur la technologie des matériaux. Ce projet se dirige vers une définition plastique sans tenir compte de l'aspect structural. Cet aspect est traité par un groupe de chercheurs de l'université RWTH de Aachen[38]. Entre 2000 et 2004, les investigations ont permis de définir un assemblage structural : le textile emprisonné dans l'épaisseur du panneau de bois transfère les efforts de cisaillement et de traction alors que la transmission des efforts de compression est assurée par le contact entre les panneaux présents de chaque côté de l'articulation (Figure 2.17).

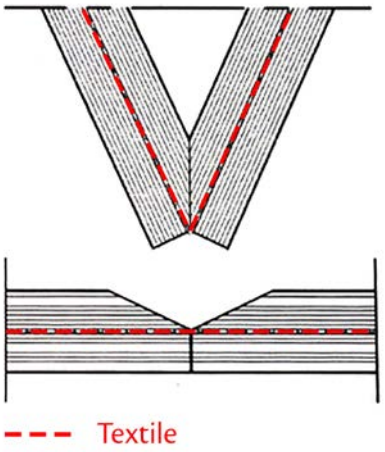


Figure 2.17 - Assemblage textile, Katharina Leitner, RWTH, Aachen, 2004.
D'après (Jeska, Pascha, 2015).

La composition du panneau utilisé engendre une spécification des assemblages. Une faible densité de la fibre au cœur d'un panneau de particules et une résistance mécanique inférieure à celle du bois massif exclut l'emploi de la queue d'aronde comme technique d'assemblage. Cet exemple met en évidence la capacité d'un assemblage à résister aux efforts qui le traversent. La technique d'assemblage dépend de la géométrie de la structure porteuse et des propriétés mécaniques du matériau[39]. Le choix s'établit entre une méthode unique ou combinatoire d'assemblages dits à blocage géométrique, à force ou par adhésion (collage) associée éventuellement à une pièce auxiliaire. Ce choix doit valider trois critères majeurs :

– La stabilité : capacité de l'assemblage à transmettre des efforts qui existent entre les éléments.

– La fabrication : possibilité de façonnage ou d'usinage du panneau.

– Le montage : compatibilité de l'assemblage avec la cinématique de montage.

[38] Voir la thèse de Katharina Leitner (Leitner, 2004).

[39] (Jeska, Pascha, 2015, p. 15).

OBSERVATIONS : Avec le développement des structures en bois non standard, les assemblages sur-mesure sont devenus indispensables. L'utilisation de la robotique et la mise au point de nouveaux matériaux permettent une plus grande précision dans l'exécution des assemblages. Cette justesse de fabrication garantit une géométrie structurale fidèle au modèle numérique, indispensable pour la réalisation de charpentes complexes sur le modèle de la halle d'exposition du Landesgartenschau. Dans ce contexte, l'assemblage traditionnel est repensé et une hybridation des techniques citées précédemment se développe dans l'intention de répondre aux besoins de ces nouvelles géométries structurales.

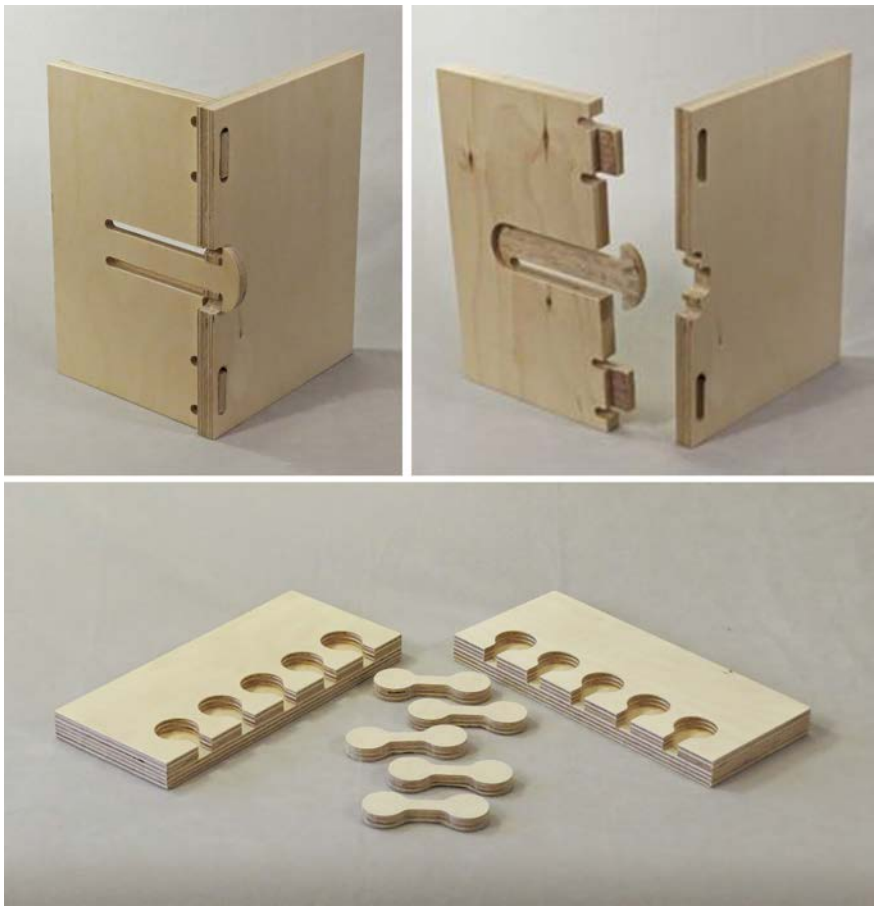


Figure 2.18 - Deux exemples d'assemblages innovants réalisés à l'aide d'une machine à commande numérique.
En haut, assemblage avec blocage intégré.
En bas, assemblage avec connecteurs amovibles.
Disponible à l'adresse : http://mkmra2.blogspot.fr/2014/08/cnccut-wood-joinery.html [consulté le 23 mai 2017]

2.4. Le numérique et l'architecture en panneaux

L'apparition des nouvelles réalisations en panneaux de bois, comme celles présentées dans l'ouvrage de Simone Jeska et Khaled Saleh Pascha, témoigne de l'intérêt porté à la redécouverte de ce matériau. Grâce aux caractéristiques présentées dans le chapitre précédent, le bois est un matériau prometteur et adapté aux contextes des constructions de demain. À l'image de sa façonnabilité, le matériau bois et ses produits dérivés se sont avérés des médiums appropriés à une conception assistée par ordinateur pouvant être couplée à une fabrication robotique (CAO/FAO). L'utilisation de machines-outils à commande numérique (CN) contribue à une précision et une rapidité de production de formes géométriques complexes de sorte que ces nouveaux types de construction élaborés deviennent économiquement accessibles.

Afin d'évoquer l'impact du numérique sur l'architecture, nous présentons tout d'abord quelques concepts fondamentaux inhérents à cette pratique.

2.4.a. Les spécificités de l'architecture numérique

Comme le souligne William Mitchell, l'architecture suscite une constante adaptation des techniques de représentation : « *les architectes dessinent ce qu'ils peuvent construire et construisent ce qu'ils peuvent dessiner* »[40]. Aujourd'hui, les nouveaux outils numériques tels que les modeleurs facilitent les techniques d'analyse et de retranscription géométrique. La pratique du dessin de représentation devient aisément accessible. Selon les propos de Mitchell, l'évolution du dessin permet l'évolution de l'architecture. Il est important de remarquer que ce principe est aussi valable dans l'évolution et la compréhension de la mécanique structurale. Grâce au perfectionnement des outils de représentation, on peut entrer dans la complexité architecturale et structurale. L'équipe de Frank Gehry explore les possibilités des technologies numériques tridimensionnelles grâce à l'apparition du logiciel CATIA[41] permettant la création de maquettes numériques et le prototypage. Le détournement de ce

[40] (Mitchell, 2001, p. 354).

[41] CATIA : Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée

logiciel marque un point important vers une évolution complexe de l'architecture. Initialement conçu pour l'aéronautique par Dassault Systèmes, ce logiciel de conception et de fabrication assistées par ordinateur a permis à Gerhy de réaliser des bâtiments d'un nouveau genre où la compréhension formelle et structurale est difficilement accessible au premier regard (Figure 2.19).

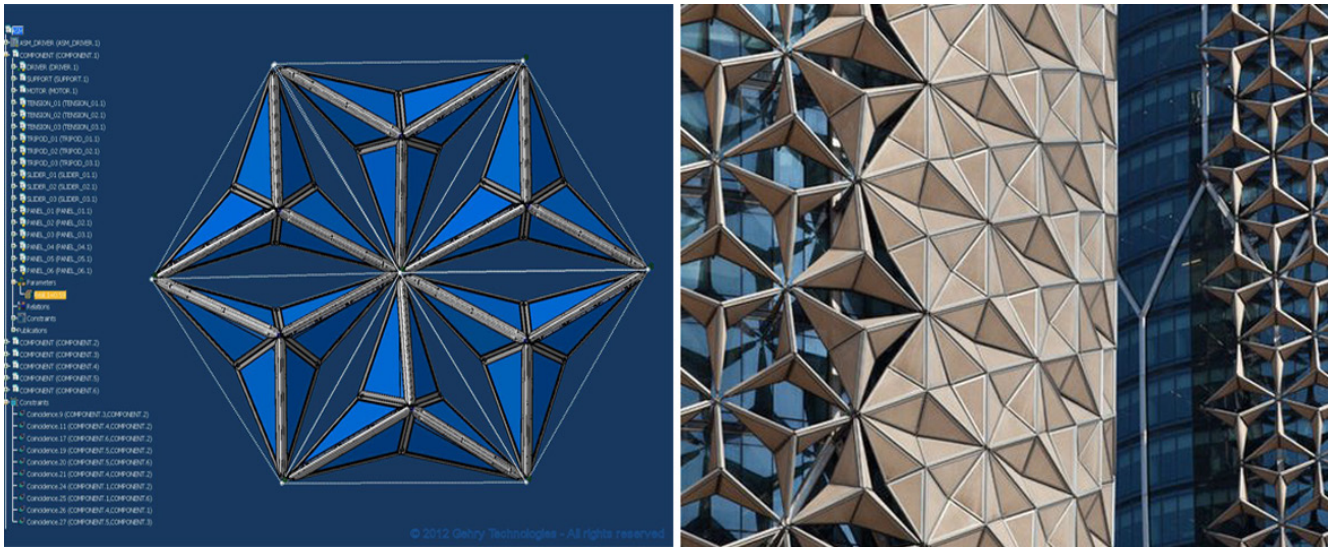


Figure 2.19 - Développement du programme CATIA par l'entreprise GT design & engineering (Gehry Technologies) au service de la production architecturale.
Disponible à l'adresse : http://www.gehrytechnologies.com/en/services/1/ [consulté le 14 avril 2017]

Le numérique de conception, en trouvant ses prolongements dans le numérique de fabrication, a donné naissance à la Conception Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO ou CAD/CAM en anglais). Elle favorise l'émergence d'architectures complexes comme le musée Guggenheim de Frank Gehry à Bilbao en 1997 ou encore le « Puppet Theatre » de Michael Meredith réalisé en 2004.

Plus récemment la notion de paramétrique dans le processus de conception a ouvert de nouvelles perspectives en redéfinissant la notion même d'objet. Sur une réflexion deleuzienne, « l'objet » n'est plus envisagé comme le rapport traditionnel entre la matière et la forme ; il ne possède plus la structure d'un moule spatial, mais constitue une modulation temporelle qui « *implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme* »[42]. L'objet prend place dans un continuum évolutif dont la fluctuation des paramètres se substitue à la constance d'une loi.

[42] (Deleuze, 2005, p. 26).

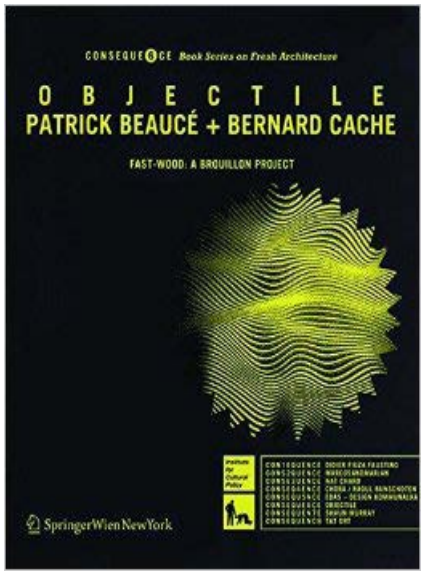


Figure 2.20 - Objectile, Patrick Beaucé + Bernard Cache, Volume 6 of the series Consequence Book Series on Fresh Architecture, 2003, pp 40-45.

C'est dans cette dynamique que le philosophe qualifie l'objet d'« *objectile* ». Cette notion a été reprise par B. Cache et P. Beaucé pour leur atelier de design et d'architecture (Figure 2.20). Dans l'univers de la technologie avancée, où « *la machine à commande numérique se substitue à l'emboutissage* »[43] en tant qu'action répétitive qui caractérisait encore les débuts de l'ère industrielle, leur recherche porte une attention particulière à la multiplicité, à la différence dans l'itération, s'affranchissant de toute pratique de standardisation. Partant du constat qu'un objet peut-être désormais calculé et non plus dessiné, la fonction paramétrique génère, sur une même thématique morphologique, des formes aux variables typologiques singulières. La fabrication industrielle d'objets uniques pose les bases d'une production non standard. La dénomination d'objectile est reprise par Cache pour définir des objets variables calculés comme des volumes fermés auxquels il oppose des surfaces ouvertes nommées « *subjectiles* »[44]. À ce stade, ces architectes sont persuadés que la création architecturale commence désormais au stade des outils numériques et technologiques : « *l'architecture ne profitera des opportunités offertes par le non-standard qu'à condition de construire, progressivement et patiemment, une véritable culture de la production numérique. À terme, ceci devrait favoriser la clarté des procédures et des concepts architecturaux* »[45].

La pratique numérique a dépassé le stade de la conception. Sa présence est aujourd'hui indissociable de la phase de fabrication et fait partie du processus d'élaboration de prototypes et de fabrication rapide. La chaîne chronologique, de la conception à la fabrication, n'est plus linéaire, mais devient une série d'évolutions simultanées. L'architecture « paramétrique » prend racine dans les années 90. Bien que ce terme ait été énoncé pour la première fois par l'architecte italien Luigi Moretti dans les années 40, il est attribué depuis plus d'une vingtaine d'années à une architecture « fondée sur la pensée algorithmique »[46]. L'algorithme y est défini comme une combinaison de paramètres et de règles assurant une corrélation entre l'intention de conception et la forme géométrique obtenue.

[43] Ibidem.

[44] (Cache, 1997, p. 115).

[45] (Beaucé, Cache, 2007) 2007.

[46] (Frazer, 2016).

Ce processus de conception s'est développé dans la lignée des architectes « d'avant-garde » de la période post-modernisme en quête d'une complexité formelle[47]. L'un des pionniers de l'architecture paramétrique est Greg Lynn. En 1993, il publie l'article « Folding in architecture » dans la revue « Architectural Design » dans lequel il énonce le pli comme un système de morphogenèse capable d'intégrer en douceur l'hétérogénéité de la forme de manière continue[48]. Les recherches de Lynn, menées dans le cadre du studio « Paperless » du département d'architecture de l'Université de Colombia, ont permis d'expérimenter la programmation architecturale qui génère des formes modulables à l'infini (Figure 2.21). Pour Lynn, la morphologie du pli ne s'explique pas uniquement par métaphores ou opérations mécaniques de pliage, mais peut être issue d'un traitement numérique[49]. Lynn présente l'architecture comme un processus de conception dynamique complexe où la forme résulte de divers paramètres tels que les données environnementales[50].
À ce stade, il est intéressant de s'arrêter sur la démarche de Lynn. Dans un contexte où il n'existe pas de règles formelles prédéterminées, les résultats produits par la « *morphogénèse numérique* »[51] sont autant de solutions portées au choix du concepteur. La « *forme libre résultante* »[52] constitue une réponse optimisée aux paramètres et « *aux lois de couplage* »[53]. Cette forme architecturale paramétrique repose sur une suite de critères de performance architecturaux (fonction, expression, etc.), structuraux (mécanique, statique, etc.) et physiques (thermique, acoustique, etc.).

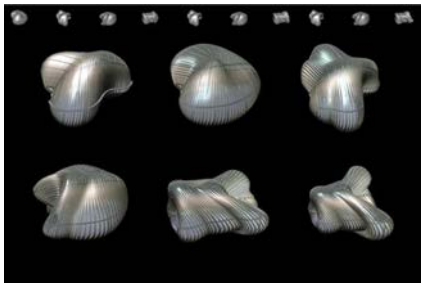


Figure 2.21 - Embryologic House, Greg Lynn, 1988.
Disponible à l'adresse : http://www.digischool.nl/ckv2/ckv3/kunstentechniek/lynn/greglynn.html [consulté le 13 mars 2017]

L'association du numérique à la conception architecturale offre aux architectes un moyen de se réapproprier les savoirs techniques alors délégués à l'art de l'ingénieur. L'évolution des outils de conception et de fabrication, ainsi que l'évolution dans leur interaction

[47] Cette complexité s'oppose à la simplicité du formalisme moderne et aux formes symboliques postmodernes.

[48] (Picon, 2010, p. 64).

[49] (Lynn, 2004, p. 11).

[50] (Lynn, 2013).

[51] (Kolarevic, 2003).

[52] (Oxman, 2006).

[53] Des paramètres de natures différentes (géométrique, fonctionnelle, esthétique...) sont couplés de manière à générer des formes dépendant du caractère associatif des paramètres (Silvestri, 2009, p. 14).

suscitent l'émergence d'un nouveau profil d'architectes soucieux d'une maîtrise technique au service d'une caractérisation esthétique et spatiale. Les mathématiques tout comme la géométrie s'invitent dans ce nouvel univers du numérique et repoussent les limites de la tectonique architecturale. La prédominance de cette pratique dans l'architecture mondiale a fait naître un style nommé « Parametricism » par Patrik Schumacher[54].

2.4.b. L'architecture numérique et les panneaux de bois

L'avènement de la conception numérique et des procédés de fabrication robotisée offre de nouvelles opportunités de réalisation. Les systèmes de CAO paramétriques combinés aux bases de données des outils CAM constituent un outil idéal pour les formes architecturales « libres ». Les possibilités offertes par la CFAO ont fortement transformé le secteur de la construction en bois et particulièrement celui des structures en panneaux de bois.

Figure 2.22 - Mise en œuvre des panneaux courbes de la toiture, maison Prouvé, Nancy.
D'après (Prouvé, Stoullig, 2012).

Et si les explorations de Jean Prouvé autour de l'usage des panneaux de bois comme pour son habitation (1954) (Figure 2.22) ou encore pour la maison des Jours Meilleurs destinée à l'Abbé Pierre (1956) étaient marquées du sceau de l'industrialisation fermée, celles qui naissent du numérique s'affichent au contraire comme issues d'une industrialisation ouverte.
L'émergence de l'architecture paramétrique amplifie encore cette voie avec la notion de « *mass customization* »[55]. L'évolution des techniques industrielles, notamment la robotique, permet une production massive d'éléments « variés et personnalisés ». Ce procédé favorise, depuis les années 2000, l'utilisation des panneaux de bois dans la construction.

Les panneaux de CLT se développent dans le secteur résidentiel à l'image de l'immeuble de logements réalisé dans la ville autrichienne de Judenburg en 2002 par les architectes Roland Hagmüller et Mark Mack, mais aussi dans la construction industrielle comme la halle de production de l'entreprise Obermayer à Schwanenstadt par F2 Architekten en 2005.

[54] (Schumacher, 2013).

[55] Voir l'ouvrage (Piroozfar, Piller, 2013).

D'autres exemples comme les bâtiments de grande hauteur ont été réalisés. En 2016, on peut citer le groupement résidentiel à Dalston Lane conçu par l'agence Waugh Thistleton ou encore le « Treet », bâtiment de quatorze étages construit à Bergen en Norvège[56].

Par ailleurs, le secteur de la recherche s'intéresse de près aux potentiels du CLT. L'innovation dans la recherche architecturale a produit de nombreuses expérimentations en panneaux de bois. Le « lignum pavilion » de Frei et Saarinen est conçu comme une stratification ; il est constitué d'une superposition d'éléments horizontaux suivant la morphologie requise (Figure 2.23). Une coupe verticale fait apparaître une discrétisation de la forme.

Figure 2.23 - Lignum Pavilion, Architectes Frei et Saarinen, Zurich, 2009.
D'après (Furuto, 2012).

En 2014, le prototype présenté à l'académie d'architecture de Mendrisio en Suisse[57] est une démonstration convaincante du potentiel des structures en des panneaux de CLT (Figure 2.24). Ce prototype a permis de façonner, grâce à la robotique, des panneaux incurvés et assemblés par des queues d'aronde selon une ligne courbe. Les méthodes d'assemblage habituellement utilisées pour les panneaux ne peuvent être appliquées dans cette situation. Les connecteurs métalliques sont visibles, les inserts métalliques scellés ne fonctionnent pas avec le CLT[58] et la procédure de collage nécessite un système de serrage hors d'échelle[59]. Dans cette situation, l'assemblage par queues d'aronde usiné par un robot a su répondre aux exigences, notamment mécaniques, de la structure.

Figure 2.24 - Prototype formé de panneaux de CLT incurvés et assemblés par un système de queues d'aronde. L'ensemble des panneaux a été usiné par une machine à commande numérique.
D'après (Robeller et al., 2014).

[56] Ole Herbrand Kleppe et Rune Abrahamsen (Forum Bois Construction, 2015)

[57] Voir « Curved Folded Wood Pavilion », (Robeller et al., 2014)

[58] Le stress interne entraîne un décollement de l'adhésif.

[59] (Robeller et al., 2014, p. 69).

Grâce à la chaîne numérique reliant la conception à la fabrication, les structures architecturales tendent vers des formes de plus en plus libres. L'ensemble des critères comme la forme, le calcul structural, la fabrication et le montage sont désormais des paramètres intégrés en tant que loi dans le processus de morphogénèse.

Figure 2.25 - Montage du pavillon ICD/ITKE 2010. Chaque bande de contreplaqué est maintenue par la précédente.
Source ICD/ITKE, Stuttgart, 2010.

Les connaissances scientifiques et les moyens analytiques actuels offrent une stratégie de conception établie sur une approche dite « intégrée » ; elle correspond à une recherche simultanée entre l'approche structurale et l'approche géométrique[60]. Le tore tressé réalisé par l'université de Stuttgart (ICD/ITKE) en 2010 met en avant le potentiel de l'aide numérique dans la recherche des structures à courbure active (Figure 2.25). La recherche de forme a été basée sur la capacité élastique des bandes de contre-plaqués de bouleau. Cette structure est constituée par une alternance d'éléments tendus puis courbés ; tel un arc sous-tendu, la partie courbée est stabilisée par le segment sous tension de l'arche suivant[61]. Bien que la courbure maximale admissible par le contre-plaqué ai été déterminée expérimentalement, la définition morphologique complexe du tore, adaptée à la topographie du site, n'aurait pu se faire sans l'aide de l'outil informatique. La réalisation de ce pavillon a nécessité la mutualisation des paramètres morphologiques, structuraux et matériels au sein d'un même outil de conception. Cette disposition permet d'obtenir un « modèle d'informations » contenant des données nécessaires à la génération d'un modèle géométrique en trois dimensions et à la production d'éléments par commande numérique[62].

Un autre exemple vient conforter notre propos : le hall d'exposition du Landesgartenschau de Schwäbisch Gmünd en Allemagne. La forme générale représente deux dômes associés formant une double courbure comme celle d'une coque d'arachide. L'enveloppe structurale est composée de 243 éléments de forme unique taillés dans du contre-plaqué de hêtre de 5 cm d'épaisseur. Afin d'assurer

[60] (Lienhard et al., 2013).

[61] Informations disponibles à l'adresse : http://icd.uni-stuttgart.de/?p=4458 [consulté le 25 juin 2015]

[62] (Jeska, Pascha, 2015, p. 81).

la pérennité de cette structure en bois dans un environnement extérieur, une étanchéité recouverte d'un bardage sous forme de panneaux « à pourrir » a été prévue.
La complexité de ce hall, comme celle du pavillon formant un tore tressé, est certes visuelle par sa forme, mais réside aussi dans l'organisation et l'intégration des paramètres qui le définissent. L'articulation et l'interdépendance entre la forme, la géométrie, les caractéristiques du matériau employé, l'efficacité structurale ou encore les contraintes de fabrication, furent possibles grâce à une approche intégrée du processus de conception.
Le modèle intégré a été implémenté dans un outil numérique spécifique développé pour l'occasion. D'une part, cette stratégie a permis, au sein d'un même logiciel, de générer le modèle géométrique en fonction des paramètres établis. D'autre part, elle assure une continuité de la chaîne numérique jusqu'à la préparation des fichiers informatiques qu'exige l'outil de fabrication robotique.
La génération du modèle géométrique se compose en deux phases succinctes, l'une globale et l'autre locale : globalement, le « pavage » de la forme générale est relatif à une optimisation dans la taille et la distribution des éléments selon la courbure positive ou négative de l'enveloppe. Localement, la « matérialisation » de chaque élément évoque une prise en compte des caractéristiques formelles et matérielles de cette structure essentielle à la définition géométrique des assemblages. Dans le cas de cette structure, des queues droites assurent un emboîtement des éléments[63].
La définition numérique de chaque élément rend possible leur fabrication par usinage robotique. Ce dernier assure la précision de fabrication indispensable afin d'assurer une fidélité entre le comportement physico-mécanique réel et les estimations établies par simulation (Figure 2.26).
Grâce à ce processus de conception intégrée, ce pavillon n'a demandé que 12 m3 de contre-plaqué de hêtre, pour une surface au sol de 125 m2. Un autre point important de cette démarche se trouve dans la rapidité de montage ; quatre semaines seulement ont été nécessaires à l'assemblage du pavillon complet.

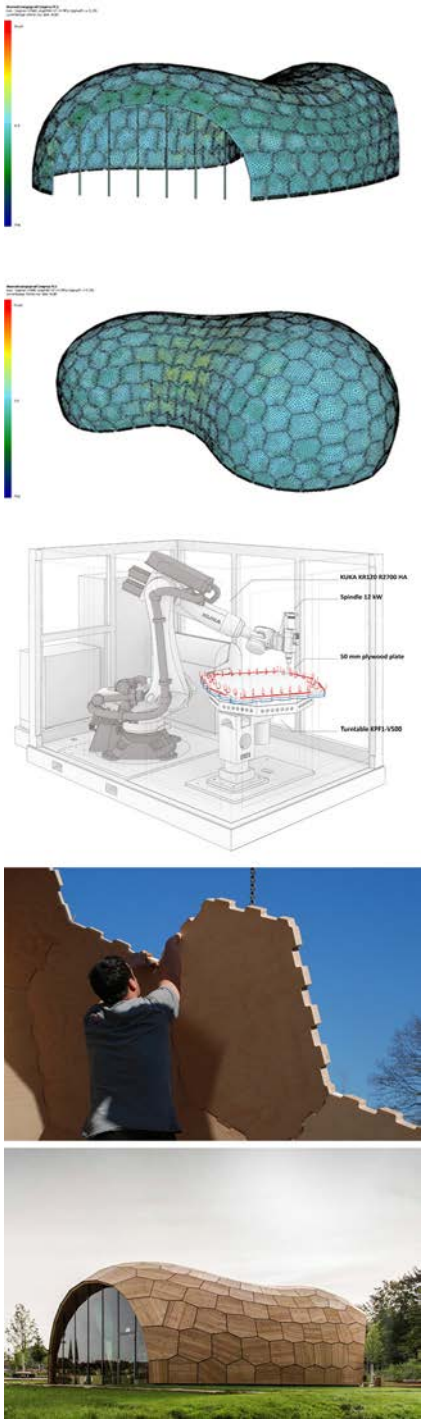


Figure 2.26 - Halle d'exposition du Landesgartenschau. Enveloppe structurelle conçue et fabriquée numériquement.
D'après ICD/ITKE de Stuttgart.

[63] La forme demi-sphérique garantit un effort de compression dans les assemblages. Les queues droites ne sont pas conçues pour répondre à des efforts de traction. Des vis sont alors destinées au verrouillage de l'assemblage. Disponible à l'adresse : http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11173 [consulté le 20 juillet 2016]

OBSERVATIONS : Les réalisations en panneaux de bois contre-collés ou déroulés présentent un fort potentiel dans l'utilisation d'outils robotiques pour la fabrication. Ce nouveau mode de production est devenu très efficace dans un contexte industriel de préfabrication où la rapidité et la précision de fabrication sont essentielles. Cela implique, dans un contexte constructif particulier, le développement d'un environnement numérique spécifique capable de générer la géométrie des éléments qui constituent la structure. Cet outil devient le principal moteur de la recherche de forme, notamment par son aspect paramétrique. La complexité architecturale et structurale ne demeure plus un obstacle, mais présente bien de nouvelles opportunités dans le champ de la construction.

Figure 2.27 - SkilledIn Office. Exemple d'une structure développée et réalisée au Centre des techniques innovantes de Rotterdam. Ce projet affiche le lien qui existe entre les possibilités potentiellement illimitées du monde numérique et le monde matériel grâce à la fabrication robotisée.
D'après Wessel Van Beerendonk, Studio RAP.

2.5. L'architecture plissée en panneau de bois

Dans la terminologie des métiers du bois, ce matériau ne se plie pas, mais il se cintre (cf. Annexe 3). Cependant, nous avons mentionné dans la section 1.3 qu'un pli pouvait être matérialisé, d'un point de vue géométrique et mathématique, par l'assemblage d'éléments. Quatre exemples, dans la construction de structures plissées en panneaux de bois, illustrent notre pensée.

La piscine de l'école des filles d'Alfriston, conçue par le cabinet d'architecture Duggan Morris, révèle une structure plissée réalisée en panneau composant (Figure 2.28).
La toiture a été pensée comme une coque qui repose sur un ensemble de petits potelets métalliques insérés dans le soubassement en béton. Cette technique a permis aux architectes de désolidariser visuellement la toiture plissée de son soutènement, lui conférant ainsi un effet de légèreté.
À l'intérieur, une structure nervurée en bois est révélée. Elle fait état d'un assemblage de panneaux à ossature bois composés de poutres, de solives et d'un panneau contrecollé assurant le contreventement. L'utilisation de la technologie CNC a permis la sophistication des éléments préfabriqués afin de dissimuler au maximum les assemblages. La dimension des éléments a été définie en fonction des possibilités de transport et de levage.
Cette forme sculpturale sert également de déflecteur acoustique empêchant ainsi une forte réverbération du son à tel point qu'aucun amortissement sonore supplémentaire n'est nécessaire.

Figure 2.28 - Vue extérieure et vue intérieure de la piscine d'Alfriston School. La morphologie du plissage ainsi que les montants visibles des composants favorisent l'absorption du son.
D'après (Hobhouse, 2015).

Le pavillon temporaire développé par Ryuichi Ashizawa dans le cadre de l'« Aqua Metropolis Osaka 2009 » présente un plissage en « zigzag » (Figure 2.29). Afin d'atteindre l'intérêt structural qu'offre cette morphologie, l'architecte a décomposé son pavillon en deux systèmes simples : une ossature primaire et une secondaire. La première est un squelette formé par des portiques définissant, d'une part, les arêtes de sommets du plissage, et d'autre part, celles qui donnent naissance aux vallées. À partir de cet état, un remplissage par triangulation (afin de garantir la planéité des surfaces) s'opère entre les différents portiques. Cette ossature secondaire composée de panneaux contreplaqués vient contreventer les portiques et assure leur stabilité. Les panneaux recouvrent chaque côté de l'ossature, dans l'intention de garder une continuité surfacique à l'intérieur comme à l'extérieur.

Il existe deux raisons principales dans la mise en œuvre de l'ossature primaire. D'une part, elle permet l'utilisation de panneaux aux dimensions inférieures à la géométrie finale de l'élément qui compose le plissage. D'autre part, ce squelette évite un assemblage « direct » entre les panneaux, ce qui participe à l'utilisation de panneaux de faible épaisseur (quelques millimètres d'épais pour une portée globale de 10 mètres).

Figure 2.29 - Pavillon Temporaire. Plissage d'éléments triangulaires formant une «voûte» à deux brisis. Disponible à l'adresse : http://www.archdaily.com/44225/bamboo-forest-and-corinth-hut-raa/hut18 [consulté le 15 octobre 2014]

Le plissage de la salle de répétition de Thannhausen, imaginé par Régina Schineis en 2002, présente une construction en panneau de CLT d'une épaisseur de 100 millimètres. D'un aspect brut à l'intérieur, les panneaux sont recouverts d'une étanchéité et d'un bardage de cuivre sur l'extérieur (Figure 2.30).
La structure se compose d'une répétition d'un « portique » d'une largeur de 10 mètres fixé sur une dalle de béton. Le portique est formé par un module de deux panneaux quadrilatéraux assemblés selon la forme « V » qui repose sur deux poteaux de même composition[64]. Ce module marqué par un pli remplace l'effet de la courbure utilisée dans le projet « Curved Folded Wood Pavilion »[65]. Ce pli monolithique assure, en ce qui concerne les angles du portique, le contreventement dans son plan médian. Le pli des poteaux reprend, quant à lui, les efforts transversaux (poussée au vent). La cohésion entre ces différents portiques garantit donc l'équilibre du bâtiment.
La stratégie de préfabrication des modules assure une discrétion de l'assemblage. Vu de l'intérieur de la salle, chaque module présente un pli saillant qui correspond au collage sur coupe d'onglet de deux panneaux. Cette technique rend invisible toute marque d'assemblage de vis et masque l'épaisseur du panneau. De la même manière, un pli rentrant n'expose pas le chant du panneau. Un assemblage traditionnel par recouvrement peut être choisi tout comme l'emploi de vis : ainsi, tous les plis rentrants peuvent être fixés mécaniquement sur site. Ils correspondent aux plis formés par la connexion des modules.

Figure 2.30 - Salle de répétition de Thannhausen. Ce plissage est constitué d'une série de plis identiques agissant comme des portiques structuraux.
Disponible à l'adresse : http://architettura-italiana.com/projects/17636-regina-schineis-architektin-eckhart-matthaus-probensaal-und-musikschule-thannhausen [consulté le 15 octobre 2014]

[64] L'ange du « V » varie de 115 à 145 degrés (Schineis, 2004).

[65] Cf. sous-section «2.4.b L'architecture numérique et les panneaux bois», p104.

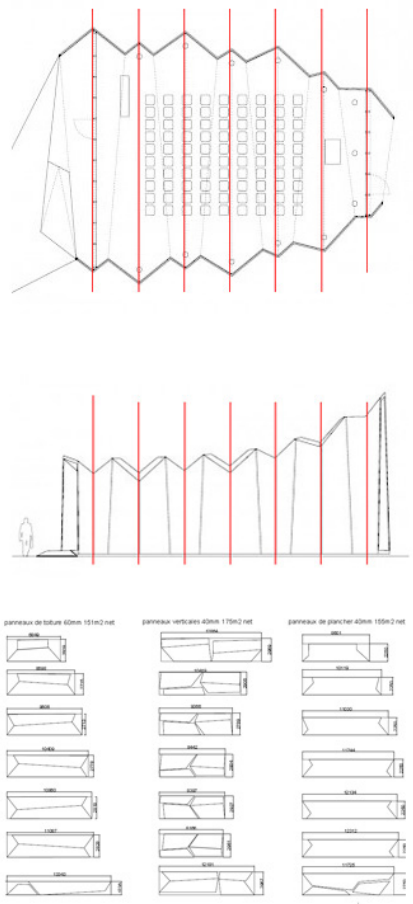


Figure 2.31 - Cette géométrie de plissage optimise le calpinage des éléments.
D'après (Buri, 2010).

La chapelle St Loup de Pompaples conçue en 2008 par le groupement d'architectes Localarchitecture et Danilo Mondada est certainement l'exemple emblématique des structures plissées en panneaux de bois. Sa conception fut menée en collaboration avec le laboratoire de l'Ibois en s'appuyant sur les travaux de recherche de Hans Ulrich Buri. Dans sa thèse, ce dernier propose une méthode pour la génération de géométries plissées inspirées de l'origami[66]. Ainsi, la morphologie de la chapelle a été définie selon un profil d'ondulation du pli (profile longitudinal) et un profil de section (profile transversal) déterminant les brisis du plissage. Le profil longitudinal est alors projeté sur une série de plans passant par les sommets du profil transversal et perpendiculaire à la bissectrice de l'angle passant par ces sommets[67].

Aux premiers abords, cette chapelle protestante suggère un plissage aléatoire, mais elle repose cependant sur un « pattern » particulièrement judicieux (Figure 2.31). Une trame séquentielle est instaurée : vues de l'extérieur, toutes les arêtes de sommets des parois sont parallèles entre elles alors que les arêtes des vallées sont obliques[68]. L'ensemble des plis est modulé par des amplitudes différentes permettant d'apporter une pente suffisante pour l'évacuation des eaux de pluie et d'accroître le confort acoustique et lumineux.

Les concepteurs établissent une forme économique par son coût de production et par sa rapidité de fabrication. L'emploi de logiciels a permis la conception, la réalisation des éléments préfabriqués et le montage de la chapelle en un temps record. Sa forme peut être reproduite par le plissage d'une feuille de papier et est donc développable. Associé à la géométrie particulière du plissage (alternance de plis parallèles), un calepinage optimisé avec un minimum de chute de matière a pu être proposé.

L'enveloppe plissée révèle plusieurs couches associées à des fonctions différentes. La première forme la structure porteuse. Elle est composée de panneaux de bois contrecollés (60 millimètres d'épaisseur pour la toiture et 40 millimètres pour le mur et le sol). Les panneaux structurels sont découpés par une scie à commande

[66] « Nous avons fourni les paramètres préalables définis pour notre chapelle, puis nous avons joué avec le logiciel mis en place par Hans Buri, qui comporte les règles de base de l'origami », propos de l'agence Localarchitecture

[67] Les surfaces plissées produites présentent un renversement du pli au niveau des lignes de brisis (Buri, 2010, p. 262).

[68] L'effet est inversé en toiture à cause de la géométrie du plissage employée.

numérique (CNC) selon des dessins 3D établis par IBOIS. Ils sont ensuite assemblés au moyen de connecteurs métalliques cloués sous l'étanchéité. Enfin, des panneaux lasurés (3 plis de 19 millimètres d'épaisseur) viennent protéger l'étanchéité. Fixés sur des lambourdes et à joints ouverts afin de garantir l'écoulement des eaux de pluie, ils agissent comme des planches à pourrir, éléments destinés à être remplacés.

L'association entre le groupement d'architectes et l'Ibois a favorisé la mise au point d'une structure capable de couvrir un grand espace avec des éléments de faibles épaisseurs : « *Nous avions à construire un grand espace libre. Compte tenu des faibles moyens financiers et du caractère provisoire de la chapelle, l'idée s'est imposée de travailler avec un seul élément, servant à la fois de structure et d'enveloppe et de recourir, pour ce faire, à des panneaux de bois préfabriqués* »[69]. Synthétisant à la fois des caractéristiques structurales et architecturales comme les contraintes spatiales, acoustiques et d'éclairement, cette forme plissée se présente comme une évidence morphologique (Figure 2.32).

Figure 2.32 - Chapelle Saint Loup. La géométrie du plissage permet à la fois d'affirmer une identité morphologique forte et un principe architectural ingénieux : l'enveloppe protectrice et la structure se confondent.
D'après (Buri, 2010).

[69] Propos d'Antoine-Robert GRANDPIERRE, assistant auprès du Laboratoire de la Production d'Architecture (LAPA) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), dans le quotidien « Le Temps » du mardi 7 octobre 2008, p36.

OBSERVATIONS : Les enveloppes structurales plissées présentées ci-dessus confirment le potentiel d'une structure architecturale réalisée avec des panneaux de bois. Nous en énumérons ici les principaux avantages :

– L'utilisation des panneaux offre les avantages de la préfabrication sur mesure en filière sèche (rapidité de montage, gestion des déchets…)

– La création de panneaux composants assure une gestion des besoins à la fois mécaniques (renforts structuraux), techniques (mise en place d'équipements) ou encore d'ambiance (apport acoustique et thermique).

– L'usinabilité du matériau participe à la réalisation d'éléments géométriquement précis favorisant la conception de morphologies architecturales riches.

– Les caractéristiques physico-mécaniques des panneaux donnent lieu à des structures légères et économiques d'un point de vue du prix et de la matière.

– Les textures variées procurent une écriture architecturale propre pour chaque type de panneau.

Ces atouts nous ont poussés à expérimenter la conception et la fabrication d'une structure architecturale plissée réalisée avec des panneaux de bois. Cette expérience est décrite dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Cas d'application : la New-Yourte

Les analyses du plissage présentées au chapitre 1 et du potentiel constructif des panneaux de bois exposé dans le chapitre précédent nous ont conduits à mener une première expérience de « conception – fabrication - mise en œuvre » d'une structure architecturale plissée en bois.

Ce travail à l'échelle 1/1 a été l'occasion :

– de mettre au jour les données « utilisées et échangées » nécessaires à la définition d'un modèle de données global.

– d'inventorier les différentes tâches et leurs répercussions lors d'une activité de conception-fabrication en vue de la création d'un modèle de processus intégré.

L'analyse de cette expérience nous a permis de révéler et de catégoriser les différents paramètres de conception-fabrication qui entrent jeu. Elle nous a également permis de révéler et d'identifier les problèmes et obstacles à l'émergence, aujourd'hui, d'un continuum numérique.

3.1. Le contexte

L'expérience a pris place dans le cadre d'une manifestation étudiante : les Défis du bois[1]. Pendant une semaine, cette expérience pédagogique a pour ambition de sensibiliser les étudiants à une culture de la construction bois, en associant les compétences de l'architecte et celles de l'ingénieur. Le défi consiste à explorer les capacités du bois pour répondre aux enjeux architecturaux, techniques, économiques et environnementaux d'aujourd'hui.

Le contexte précis dans lequel nous avons mené notre travail était le suivant :

[1] cf. « www.defisbois.fr/ ».

– **Le contexte architectural :** La structure architecturale plissée devait être pensée comme un pavillon d'accueil pour la manifestation des Défis du Bois.
La volumétrie globale du projet a été définie à l'échelle du contexte des défis ; ce projet, volontairement conçu à taille humaine, soit 8 m de longueur, 5 m de largeur et 4 m de hauteur, a été pensé en fonction des différents facteurs comme la position d'entrée sur la parcelle des défis, la gestion des flux de personnes, ou encore l'orientation par rapport à la lumière et à l'accessibilité. Ces éléments contextuels ont servi à élaborer une première volumétrie générale en la positionnant sur le site (Figure 3.1).

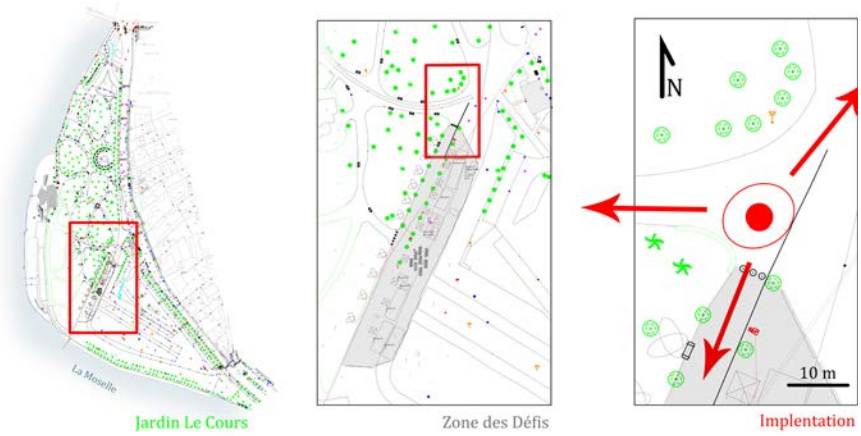


Figure 3.1 - Définition de la zone d'implantation en fonction des trois flux principaux du site.

Figure 3.2 - Panneaux de lamibois débités en deux parties. Dimensions des panneaux bruts : 10 500 mm x 1800 mm x 40 mm.

– **Le contexte matériaux :** dans le cadre de notre expérience, nous avions à disposition un lot de sept panneaux de lamibois (10 500 mm x 1800 mm x 40 mm) fournis par un sponsor (Figure 3.2). Nous avons composé notre enveloppe avec ces contraintes dimensionnelles. Par exemple, l'épaisseur des panneaux intervient dans le poids des éléments. Elle impacte également le choix d'une technologie d'assemblage et la géométrie du brut qui conditionne le calepinage et la taille des éléments constituant un pli. La ressource disponible a donc orienté directement les dimensions globales du projet ainsi que celles des facettes constitutives des plis, mais aussi les techniques d'assemblage.

– **Le contexte instrumental :** L'environnement numérique de conception était composé de l'éditeur d'algorithme graphique *Grasshopper®* rattaché au modeleur 3D *Rhinoceros®*. Son efficacité dans la modélisation paramétrique a été montrée par différents

travaux effectués au sein du laboratoire[2]. Ce plug-in offre une grande liberté d'action, notamment dans le couplage éventuel avec d'autres logiciels.
L'objectif de l'expérience étant d'utiliser des éléments à géométrie variable, nous avons bénéficié d'un partenariat avec l'École Nationale Supérieure des Technologies et de l'Industrie du Bois (ENSTIB) pour utiliser un portique CNC Güdel à cinq axes couplé à un programmeur *ABB®* (Figure 3.3).

Figure 3.3 - Portique cinq axes robotisé de l'ENSTIB.

– **Le contexte temporel :** Initialement, il était prévu de réaliser notre expérience sur la période du workshop, soit une dizaine de jours. Toutefois, compte tenu de l'importance du travail à mener, il fut nécessaire de quintupler cette durée et de démarrer bien avant le début de la manifestation. Seul le montage a été assuré durant la semaine des Défis du bois. Nous verrons, au fil de l'analyse de l'expérience, les différentes raisons à cette réévaluation de la durée.

3.2. Investigations

Le processus de production proposé dans le cadre de notre expérience, se compose d'une phase de conception paramétrique d'enveloppes morpho-structurelles associées à une phase de fabrication robotique. Ces phases sont constituées par un ensemble d'étapes formant la structure de base de notre démarche.

La première étape concerne la mise en forme de la surface globale qui sera ensuite plissée. Une fois la géométrie du plissage définie, l'étape de la matérialisation consiste à transformer cette géométrie immatérielle en une structure architecturale concrète (choix du matériau, définition des assemblages…).
Ensuite, cette géométrie nouvellement définie est évaluée avant la phase de production et de montage. Enfin, le continuum de données issu de ce processus de « conception-fabrication » a été validé par différents tests effectués sur le pavillon réalisé.
Une description plus détaillée de ces étapes est fournie dans les paragraphes suivants.

[2] Cf. la thèse de Kévin Jacquot et celle de Mohamed-Anis Gallas (Jacquot, 2014), (Gallas, 2013).

3.2.a. La volumétrie

Cette première étape constitue la base de notre processus de conception. Elle est établie sur deux principes :

– Premièrement, dans l'exercice de recherche de forme, nous prenons le parti de dire que le concepteur procède par des suppositions et des essais empiriques afin de trouver une forme satisfaisante. Ainsi, la définition de la volumétrie globale en accord avec le cahier des charges, dépend fortement des intentions du concepteur.

– Deuxièmement, dans cette démarche, nous considérons le plissage comme la déformation d'une forme et non comme une « construction directe ».

Ces deux postulats nous ont conduits à proposer la notion d'« enveloppe initiale ». Il s'agit d'une surface quelconque qui permet une recherche de forme rapide établie suivant le cahier des charges[3] et assure la fonction de « support » pour la réalisation du plissage. Mais en tant que surface de référence pour le plissage, elle connaît des limites de définition. La volumétrie générée par une surface ayant un rayon de courbure trop important est peu respectée lorsque nous la plissons avec des éléments plans tels que des panneaux de lamibois.
Nous avons donc proposé de définir cette enveloppe de référence comme une composition de plusieurs surfaces.

Cette méthode a permis d'ajuster au mieux le plissage à la volumétrie initialement envisagée. Toutefois, elle a entraîné une difficulté supplémentaire qui consistait à « plier » le plissage (cf. la sous-section suivante).

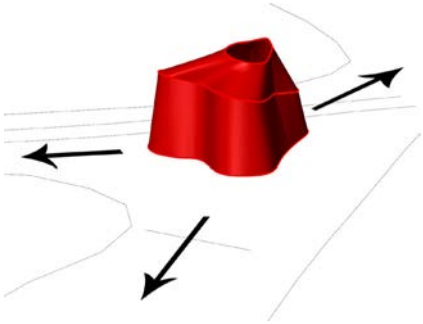


Figure 3.4 - Modélisation de l'enveloppe initiale à partir de trois courbes planaires.

Pour notre pavillon, nous avons donc modélisé l'enveloppe initiale au moyen de trois courbes fermées inscrites dans trois plans respectifs définissant le volume primaire de la New-Yourte (Figure 3.4). Afin de répondre au cahier des charges, cette volumétrie a fait l'objet de plusieurs corrections manuelles tout au long du processus de production. Ces corrections ont été induites pour partie par les

[3] Par exemple, les dimensions de l'enveloppe dépendent de la quantité de matière offerte par le sponsor.

incertitudes de fabrication. Par exemple, les contraintes d'usinage du robot impliquent une maîtrise de la géométrie du plissage, elle-même tributaire de la forme de l'enveloppe initiale.

3.2.b. Le plissage

Le plissage constitue un ensemble de plis défini par une amplitude et une période. La surface de référence a été plissée en fonction de ces deux paramètres. Ils permettent de configurer le plissage d'un point de vue architectural (rythme, ombre et lumière...) et jouent un rôle important dans l'aspect structural (stabilité, rigidité, inertie...) et technique (gestion du poids et de la taille des panneaux).

Il existe différentes géométries de plissage (cf. section 1.3). Pour la présente expérience, nous nous sommes limités à un plissage « simple » composé d'éléments plans, alternant arêtes de sommets et arêtes de vallées. En effet, ne disposant d'aucun outil de modélisation spécifique au plissage, il s'est rapidement avéré difficile d'en établir un modèle géométrique. De plus, la « paramétrisation » se révélant extrêmement longue, nous avons limité la diversité géométrique des plissages.
Nous avons également fait le choix de n'utiliser que des facettes planes pour faciliter l'usage ultérieur des panneaux à notre disposition. N'ayant ni outil pour transformer des surfaces curvilignes en surfaces planes, ni outil permettant de vérifier, contrôler ou valider la géométrie du pli, nous avons modélisé notre enveloppe directement avec des plans. Cette méthode a fortement restreint le champ des libertés formelles du plissage par une réduction du nombre des paramètres.

Concrètement, le plissage de la surface de référence a débuté par le choix de l'orientation des plis. Une disposition « horizontale » des plis aurait nécessité un grand nombre de brisis pour se conformer à la surface de référence, alors qu'un seul brisis suffisait à l'approcher dans une mise en œuvre « verticale » des plis. Dans le premier cas, la géométrie du plissage aurait entraîné des difficultés trop importantes pour qu'elles puissent être traitées dans cette expérience. Ainsi, notre choix s'est porté vers la deuxième solution.

Puisque nous voulions respecter au minimum la volumétrie de l'enveloppe initiale, la ligne de brisis que nous nous sommes imposée a soulevé une contrainte importante de « continuité », celle de la « jonction » des différentes surfaces plissées. Pour ce faire, nous avons procédé à une modélisation en « cascade » de deux « pans » de plissage (Figure 3.5).

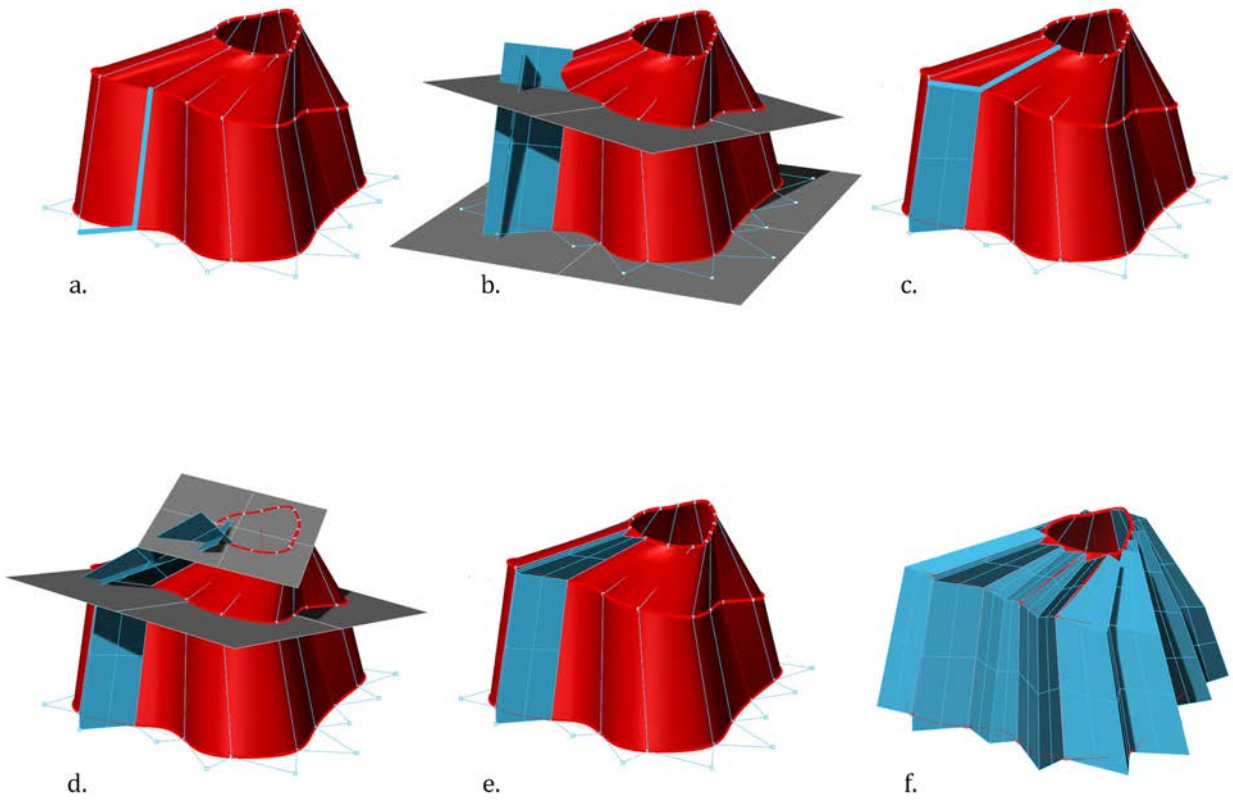


Figure 3.5 - Mise en forme du plissage.
a) Définition du rythme du plissage par un séquençage de la surface ; matérialisation du profil par les amplitudes.
b) Disposition des plans pour la création des plis du premier pan de plissage.
c) Récupération des surfaces du pli par intersection des différents plans : les plans formant le pli (plans bleus) et le plan contenant la courbe qui a servi à la création de la surface de référence (plan gris).
d) Disposition de plans pour la création des plis du deuxième pan de plissage : le premier pan de plissage définit les caractéristiques d'amplitude pour la création du deuxième pan.
e) Récupération des surfaces du pli par intersection des différents plans.
f) Visualisation de l'enveloppe plissée complète.

Dans cette situation, la modification du second pan de plissage s'effectue nécessairement par rapport au pan précédent. Cette configuration s'est avérée très contraignante pour le réglage du plissage. Idéalement, chaque pli de chaque pan devrait être autonome.

3.2.c. Les éléments singuliers

Nous avons fait le choix d'ajouter des « éléments connexes » comme une couronne et de modifier des éléments du plissage pour la création d'ouvertures (Figure 3.6). La réalisation de la couronne a contribué à résoudre différents obstacles qui sont apparus lors de l'expérience. Premièrement, la couronne a été pensée comme un verrou de sécurité bloquant la déformation de la structure. Deuxièmement, elle a servi de gabarit pour le montage de la structure et troisièmement, elle a permis de constituer un oculus pour maîtriser l'apport lumineux à l'intérieur de l'enveloppe architecturale.

Figure 3.6 - Définition des éléments connexes : anneau de compression et ouvertures.

3.2.d. La matérialisation

Pour la représentation en conception de notre structure, nous avions envisagé d'utiliser une modélisation tridimensionnelle des « surfaces ». Cependant pour respecter les délais nous avons orienté notre choix vers une méthode de travail utilisant des surfaces en deux dimensions. La procédure de conception s'effectue donc en deux temps. Elle consiste à créer des surfaces d'une part, puis à les matérialiser d'autre part.

L'étape de la matérialisation s'établit à partir de trois préoccupations. Tout d'abord elle s'attache à mettre en épaisseur les surfaces qui constituent le plissage. Ce processus peut s'opérer de manières différentes selon que la surface plissée de référence représente la surface moyenne ou la surface extérieure ou encore la surface intérieure (Figure 3.7). Délibérément, nous avions choisi la dernière solution dans le but de favoriser d'éventuels tests comparatifs entre le modèle numérique et le pavillon réalisé.

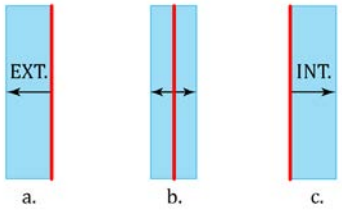


Figure 3.7 - Possibilités de mise en épaisseur :
a. vers l'« extérieur » ;
b. de part et d'autre de la surface de référence ;
c. vers l'« extérieur ».

Ensuite, la matérialisation doit répondre aux problèmes des nœuds. La mise en épaisseur « constante »[4] du modèle surfacique à révélé une complication géométrique qui entraîne, dans la majorité des cas, une démultiplication des nœuds (Figure 3.8). Bien que cette contrainte puisse être évitée dans des situations géométriques précises, nous avons, pour gagner du temps, contourné le problème

[4] Nous précisons le terme de « constant » puisqu'une épaisseur variable peut annuler les contraintes géométriques qui apparaissent au niveau des nœuds.

en « évidant » la partie du nœud. Cette singularité géométrique du nœud demande une attention particulière qui devra être traitée ultérieurement.

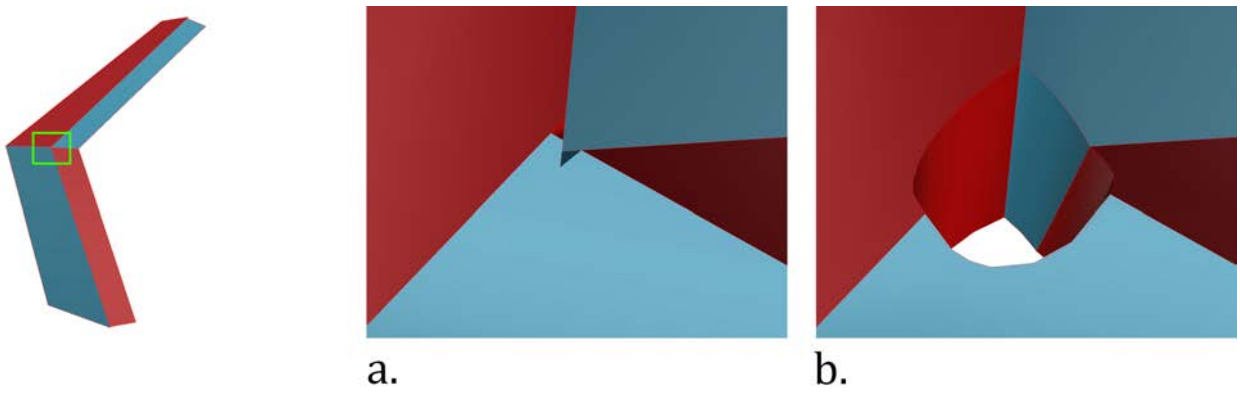


Figure 3.8 - Collision de matière lors de la mise en épaisseur.
a) Pour une épaisseur constante, les arêtes des plis ne sont pas concourantes hors de la surface de références.
b) Solution retenue par un évidement de matière.

Enfin, la matérialisation s'attache à définir les assemblages. À ce jour, une maîtrise insuffisante des lois de comportement du matériau « bois » ne permet pas encore son utilisation par déformation irréversible lors de la fabrication d'un « pli de matière continu ». Nous avons donc orienté nos travaux vers une technologie de plis assemblés.

Dans notre projet, les assemblages ont été examinés d'un point de vue structural, d'un point de vue plastique, du point de vue de la fabrication et enfin de celui du montage.
Du point de vue structural, l'assemblage est à l'origine de la stabilité de la structure et il ne peut pas être considéré comme « parfait », notamment dans le cas d'un assemblage bois/bois. Afin d'assurer et de faciliter l'emboîtement des éléments lors du montage — cette étape risquant d'être compromise par la variation dimensionnelle liée aux caractéristiques du matériau bois — un « jeu » dans l'assemblage a été introduit. Le problème de la stabilité engendré par ce jeu aurait pu être résolu par un outil de simulation. Cependant, l'absence de cet outil nous a contraints à prendre deux précautions pour assurer la stabilité de la structure plissée : l'ajout d'un couronnement et le renforcement des assemblages bois/bois par de la visserie.

Parmi tous les assemblages possibles, nous avons choisi, pour des raisons esthétiques mais aussi expérimentales, la fabrication d'assemblages par emboîtement. Ainsi, tous les assemblages mixtes à base de connecteurs métalliques, comme la coupe sur onglet avec broches, ont été évités. De même, les adhésifs ou colles ont été proscrits afin de faciliter le démontage de la structure.

Notre choix s'est tourné vers un assemblage à queue. Pour des raisons de fabrication, la queue droite a été préférée à la queue d'aronde au vu des outils de coupe dont nous disposions.

Afin de répondre à la cinématique de montage, nous avons choisi d'associer un second assemblage par rainure et fausse languette. Dans cet assemblage, la fausse languette a servi de clef de verrouillage lors de la jonction des panneaux sur la ligne de brisis (Figure 3.9).

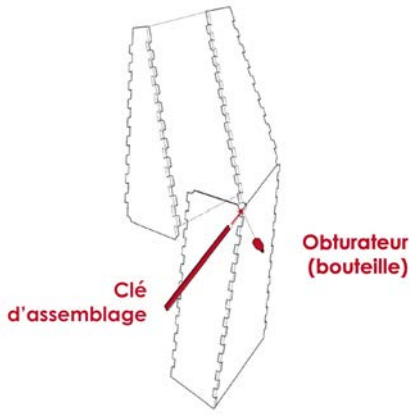


Figure 3.9 - Principe d'assemblage.

Ici aussi, un outil de simulation de la cinématique de montage aurait certainement évité d'éliminer trop rapidement certaines catégories d'assemblage et d'autres assemblages pourraient être envisagés comme les queues d'aronde angulaires développées par Christopher Robeller[5].

3.2.e. L'évaluation

Durant le travail de conception, nous avons mené une évaluation technique et une évaluation architecturale afin de valider notre proposition pour l'étape de fabrication. Cette évaluation a eu lieu à deux moments : lors de l'étape de définition géométrique de la surface plissée et lors de celle de sa matérialisation.

-**L'évaluation technique :** cette évaluation concerne la validation des paramètres liés aux outils de fabrication utilisés et également la méthode de mise en œuvre lors du montage.
La production dans un environnement robotisé induit une remise en cause des processus de fabrication traditionnels, mais elle nécessite aussi un développement particulier des processus de conception et des simulations architecturales. Au cours de notre expérience, nous avons constaté que le processus de fabrication a imposé des

[5] (Robeller, 2015).

contraintes influant sur la géométrie du plissage. La prise en compte des paramètres d'usinage et ceux relatifs au matériau apparaissent comme déterminants.
La méthode d'usinage dépend des caractéristiques de l'outil employé, de la taille des panneaux admissibles (gestion du poids et des dimensions), de la cinématique possible du robot, de la valeur de coupe angulaire maximale et enfin du système d'ablocage. De la même manière, nous avons tenu compte des paramètres du matériau comme le sens du fil du bois ou la dimension initiale des panneaux bruts. Ainsi, ces paramètres ont permis d'affiner la géométrie de chaque élément composant le plissage et particulièrement celle de leur assemblage.
Par ailleurs, cette géométrie une fois définie a été confrontée à la cinématique de montage. En effet, les contraintes liées au montage comme le poids maximal admissible, correspondant aux dimensions maximales des éléments, ainsi que la technologie d'assemblage établie ont dû être évaluées afin de satisfaire l'étape du montage.

- **L'évaluation architecturale :** cette évaluation a été réalisée essentiellement par visualisation du modèle numérique. Après plusieurs modifications sur la géométrie du plissage, provenant de l'évaluation technique, nous avons validé la nouvelle morphologie de la structure architecturale au regard des intentions du projet (Figure 3.10). Ceci concerne aussi bien la morphologie de chaque pli, notamment dans son rapport avec l'ensemble du plissage, que l'aspect visuel des assemblages tel que la taille et le nombre de queues droites utilisées. Dans notre expérience, cette évaluation a porté également sur des paramètres de construction nécessaires à la pérennité du pavillon : nous avons vérifié, par exemple, la pente minimum de chaque arête de pli formant une vallée afin de favoriser l'écoulement des eaux.

Ces évaluations ont eu lieu régulièrement au cours du processus de conception. Elles ont révélé de la complexité de gestion de nombreux allers-retours. Compte tenu des contraintes temporelles attachées à notre expérience, seules les modifications indispensables ont été réalisées. Pour les autres, elles ont été simplement abandonnées. Cette situation nous montre tout l'intérêt qu'il y aurait à créer des moteurs d'évaluations permettant de transformer les résultats d'un éventuel outil de validation en paramètres de conception.

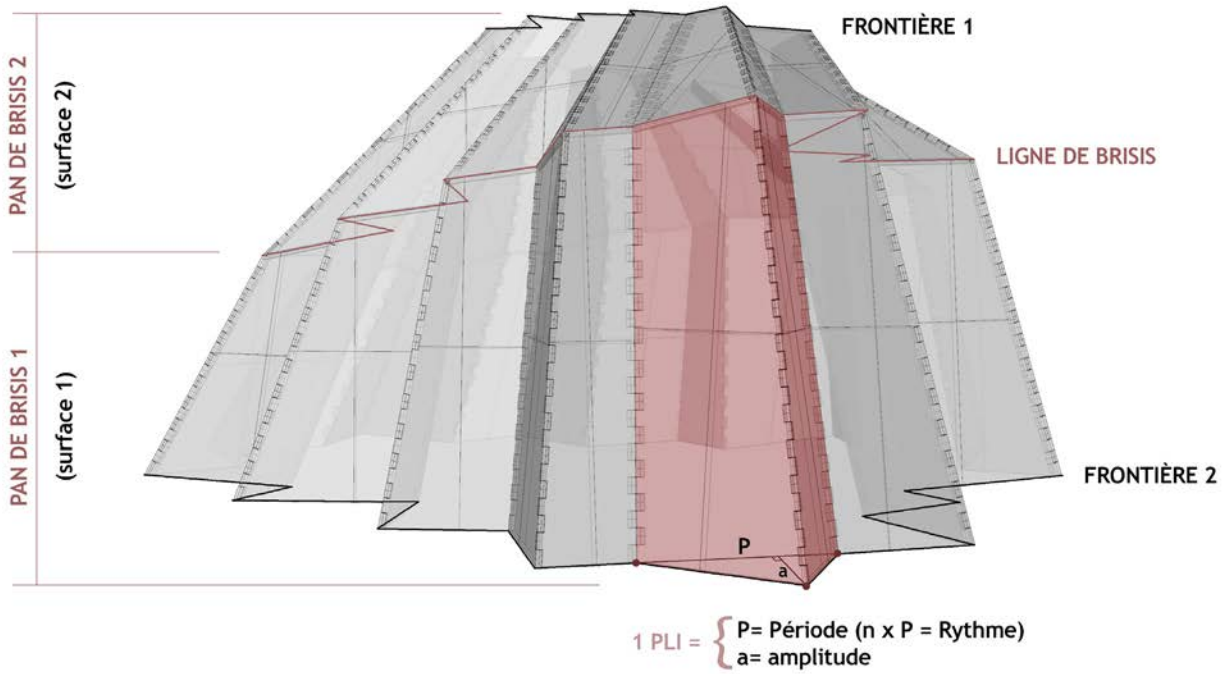


Figure 3.10 - Validation du modèle géométrique après vérification manuelle des paramètres et contraintes techniques et architecturales.

3.2.f. Le calepinage

Le calepinage, en vue d'optimiser les chutes par rapport à la forme donnée de la structure plissée, est une étape qui nécessite une grande attention. En l'absence d'un outil dédié, nous avons réalisé ce travail manuellement. Les éléments qui composent notre structure ont été rapportés dans un même plan et numérotés afin de préparer le calepinage sur les sept panneaux bruts (Figure 3.11).

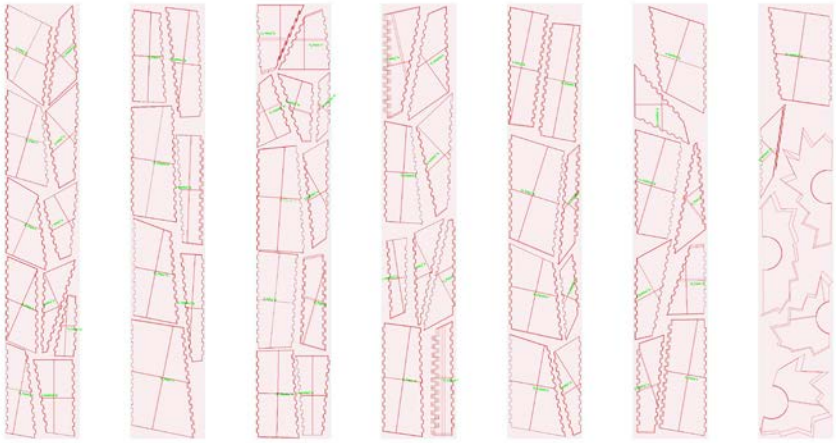


Figure 3.11 - Calepinage manuel des 57 pièces constituant le plissage.

Le lamibois étant un panneau orienté, nous avons tenu compte du fil du bois (des plis extérieurs du panneau) pour le calepinage. À nouveau, nous souhaitons souligner l'intérêt que représenterait un outil de calepinage. Il pourrait être considéré comme un évaluateur et un générateur de recherche de forme, conformément aux produits de base. Par exemple, la valeur du rendement de matière définie par rapport aux chutes issues du calepinage pourrait être utilisée comme une donnée d'entrée dans le processus de conception. Ainsi, la forme s'adapterait pour réduire les chutes au minimum.

3.2.g. La fabrication

Deux aspects particuliers de la fabrication seront évoqués. Le premier concerne l'environnement numérique et les formats d'échange de données. Le second est relatif au positionnement des pièces à débiter et à la gestion du robot qui était lui aussi en phase d'expérimentation.

L'environnement numérique de fabrication, mis à disposition pour cette expérimentation, a nécessité trois changements de format de fichier afin d'assurer une continuité de l'information entre le processus de conception et celui de la fabrication. Les différents formats d'échange de données (STEP, BTL, ISO et RAPID) sont autant de risques de ruptures dans la continuité de la chaîne numérique (Figure 3.12).

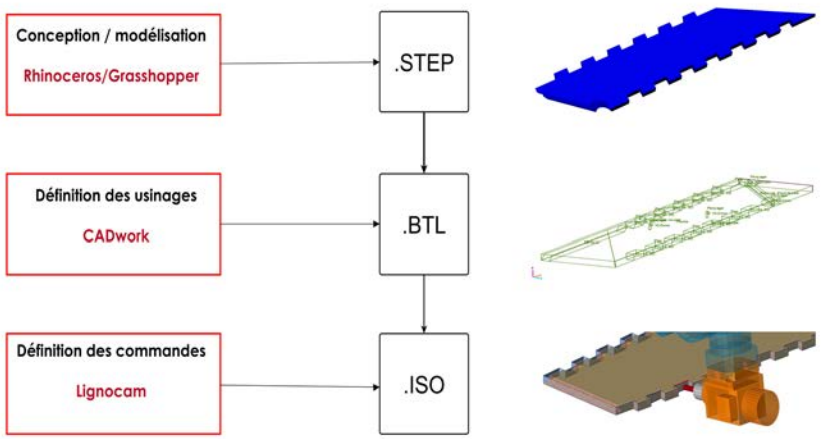


Figure 3.12 - La fabrication numérique nécessite plusieurs formats de transfert de données : a) une norme STEP a été utilisée pour réaliser le transfert de données de *Grasshoper*® vers *Lignocam*®; b) une norme BTL, fournie par *Lignocam*®, est particulièrement intéressante puisqu'elle tient compte des spécificités du processus du bois; par exemple, un demi-tour sur une extrémité de pièce ne peut pas être usiné de la même manière qu'un processus longitudinal; c) une norme ISO, transfère les trajectoires générées par *Lignocam*® vers le portique *Woodlex*® grâce aux logiciels *L1E*® et *ABB Robo-studio*®.

La fabrication a demandé le débit et l'usinage de 57 pièces de bois. Dans ce travail d'usinage, le dispositif d'ablocage est essentiel. Le positionnement précis de la pièce et son maintien sont tributaires de la forme de la pièce et de son type d'usinage.
Lors de notre expérience, l'ablocage a été décomposé en deux temps. Tout d'abord, des perçages de positionnement ont été effectués dans le panneau brut de lamibois, leurs dispositions ont été coordonnées lors du calepinage, de manière à pouvoir repositionner dans le bon référentiel les pièces dégrossies après le pré-débit. Ensuite, l'usinage définitif des pièces dégrossies et repositionnées a été effectué (Figure 3.13).

Figure 3.13 - Processus d'usinage en deux étapes.
Une réflexion sur le système d'ablocage a été menée afin de procéder à l'usinage des 57 pièces : des plots amovibles sont positionnés sur une table (selon un quadrillage correspondant au référentiel du robot) permettant le positionnement successif des éléments.

Malgré les outils numériques mis à notre disposition, de nombreuses actions manuelles sont venues compléter la fabrication de la structure plissée.

Figure 3.14 - Aspect brut de l'usinage : éclatements du bois et usinage non abouti.

On mentionnera :

– la subdivision des panneaux bruts afin qu'ils puissent être disposés dans l'environnement de travail du robot (les panneaux initiaux étant trop lourds pour être déplacés par le robot).

– l'usinage des assemblages, soit pour corriger les imperfections du robot, soit pour tailler les parties que le robot a refusé d'exécuter.

– la finition complète par ponçage de chaque panneau débité afin d'éliminer les éclats du bois issus de l'usinage (Figure 3.14).

Ces opérations manuelles, largement liées au caractère expérimental de notre travail, ont affecté le temps de production, mais elles sont restées sans effet sur la définition des composants de notre structure.

3.2.h. Le montage

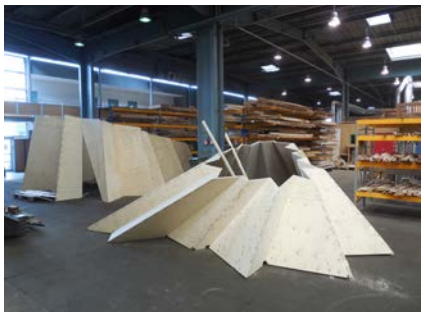


Figure 3.15 - Montage à blanc en atelier : recherche d'éventuelles anomalies.

Le montage a été pris en compte dès le début du processus de conception. Le contexte des Défis du bois prévoyait un montage manuel. Cette contrainte fut essentielle dans la modélisation géométrique du plissage puisqu'elle est à l'origine d'une restriction dans le poids[6] et la taille des éléments.
Un pré-montage en atelier a permis de vérifier la justesse du jeu conféré aux assemblages, indispensable au montage de la structure (Figure 3.15).
Le montage sur site s'est fait grâce au référencement de chacun des composants sur le modèle et par un identifiant sur chaque panneau. Afin de respecter l'orientation et les angles de chaque pli, le plan de la structure a été dessiné sur le sol (Figure 3.16).
Le montage s'est effectué en trois phases : a) mise en place de l'anneau inférieur ; b) positionnement de la couronne sur un échafaudage ; c) disposition des éléments de l'anneau supérieur. Les deux anneaux ont été reliés grâce à la fausse languette utilisée comme clef de verrouillage. Des barres de maintien temporaire ont servi à la stabilisation de la structure jusqu'à la pose du dernier élément. Pour des raisons de sécurité, les panneaux ont été vissés les uns aux autres.

[6] Dans les articles R. 4541-1 à R. 4541-9 du Code du travail, les hommes ne peuvent porter des charges supérieures à 55 kg.

Figure 3.16 - Montage de la New-Yourte.

3.2.i. La validation

Après l'achèvement du pavillon, une analyse morpho-structurelle a été conduite. Elle s'est appuyée sur deux opérations de mesure afin de valider les paramètres définis durant la conception.
Les résultats d'une numérisation par balayage et d'un test de charge nous ont fourni une base pour comparer le modèle numérique initial au pavillon réalisé.
L'analyse morphologique avait comme objectif de valider la méthode d'usinage et celle du montage en réalisant une numérisation par lasergrammétrie des pièces après usinage et de la structure après montage.
La lasergrammétrie d'une pièce après son façonnage nous a permis de connaître le pourcentage d'erreurs dimensionnelles entre le modèle numérique de la pièce et le panneau usiné ; le résultat est d'environ 5 % (Figure 3.17). Cela provient essentiellement d'un manque de précision dans le déplacement du robot et dans le positionnement du porte-outil. La validation de la méthode de montage a été faite par lasergrammétrie complète de la structure assemblée. L'intérêt était d'analyser l'impact morpho-structural des écarts dimensionnels de chaque élément assemblé : la précision moyenne obtenue est de 1/1000. Les quelques 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 (Figure 3.18).

Figure 3.17 - Numérisation d'une des 57 pièces usinées. (EXAscan de *CREAFORM*®).

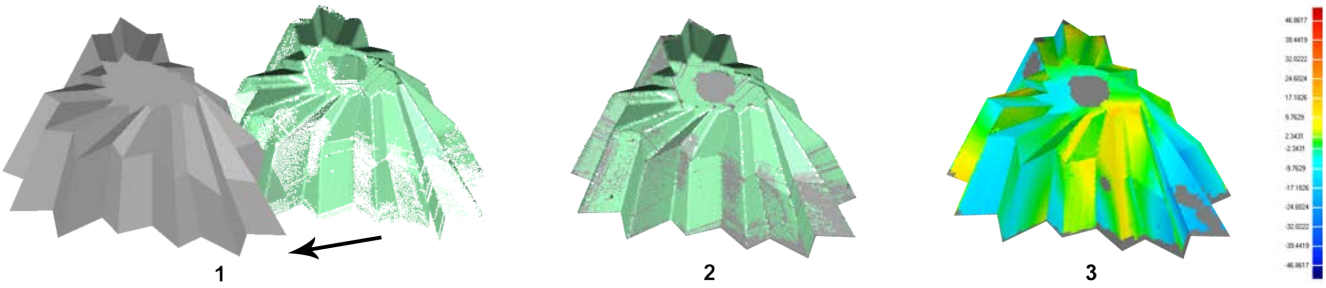


Figure 3.18 - Comparaison géométrique entre le modèle de l'enveloppe interne issu du logiciel de CAO (couleur grise) et le modèle numérique issu de la lasergrammétrie de la face intérieure du pavillon réel (couleur verte).
Le pavillon a été numérisé avec un scanner SOIZIC® et la comparaison a été réalisée par le logiciel GEOMAGIC®.

La vérification structurale a permis, par un raisonnement inverse, de valider les hypothèses de calculs implémentées dans le logiciel de calculs d'éléments finis *Castem®*. Ces résultats font l'objet d'une partie, dans ce mémoire, consacré aux moteurs d'évaluation (cf. Chapitre 7).

3.2.j. Synthèse

Cette expérience a permis de capitaliser les informations nécessaires à l'élaboration d'une structure plissée en panneaux de bois. D'une part, nous avons pu distinguer les données sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour mener l'expérience et celles qui ont été mises au jour par l'expérience. D'autre part, nous avons pu discerner les différentes étapes d'un processus de conception ainsi que leurs interactions.
Ces informations sont retranscrites respectivement sous la forme d'un modèle de données et d'un modèle de processus attenant à cette expérience.

Le modèle de données. Dans un premier temps, nous faisons allusion aux données recueillies avant l'expérience. Elles sont issues d'un modèle empirique du plissage fondé sur la littérature analytique du pli et l'analyse de bâtiments formant un corpus de références architecturales. Ces données traduisent la direction morphologique globale du plissage souhaitée par le concepteur. Elles sont de l'ordre de :

– la volumétrie : forme globale, surface de référence…

– la géométrie du pli : amplitude, période, direction, nature des facettes (rectilignes, planes)…

– la géométrie du plissage : profil, rythme, diffusion, sens de lecture (pli positif ou négatif), ligne de brisis, éléments singuliers et connexes…

Dans un second temps, nous abordons les données révélées durant l'expérience. Ces données sont apparues majoritairement durant les étapes de matérialisation. Elles sont catégorisées de la manière suivante :

– les données des matériaux : caractéristiques physiques et mécaniques, dimensions des produits sources (calepinage, taille des éléments), quantité…

– les données des assemblages : le type (degrés de liberté), la famille technologique (tenons-mortaise, queue d'aronde…), le jeu d'assemblage…

– les données de fabrication : caractéristiques du centre d'usinage (capacité d'usinage), système d'ablocage, les formats d'échange (STEP, BTL, ISO)…

– les données de montage : cinématique de montage, manutention (poids et tailles des éléments)…

Le modèle de processus. Le modèle proposé pour cette expérience a été fondé sur une approche séquentielle déductive résultant largement de l'organisation traditionnelle du travail ainsi que de la spécialisation des tâches et des métiers. Il s'est heurté à la nécessité d'effectuer de nombreux « allers et retours » entre les différentes étapes liées à la conception, à la fabrication et à la mise en œuvre de la structure : forme ↔ plissage ; « matériau ↔ forme ; fabrication ↔ forme, montage ↔ forme ; fabrication ↔ montage…

Un modèle de processus intégré favorisant les nombreux « allers et retours » permettrait une résolution progressive et un gain de temps pour la conception et la fabrication d'une structure architecturale plissée. Cependant, la continuité des échanges est confrontée à la diversité des formats de données.
L'objectif de notre travail consiste donc à poser les bases d'un outil capable d'intégrer toutes les données de la géométrie de la forme aux commandes du robot. Nous souhaitons rendre cela possible notamment par le développement des moteurs d'évaluations[7].

Dans la suite de ce mémoire, nous proposons un modèle théorique pour la création architecturale d'enveloppes structurales plissées basée sur le modèle de données et le modèle de processus issus de notre expérience.

[7] Cf. Chapitre 7.

OBSERVATIONS : Le bilan de cette expérience étaye les propos de l'architecte Peter Zellner lorsqu'il affirme que les processus de conception et de réalisation d'objets architecturaux issues des outils numériques, résultent d'un mélange entre l'architecture et la technologie[1]. De tels résultats prouvent que, lors de la conception d'architectures de forme libre, même dans les cas où elle se développe à travers des maquettes réelles, l'utilisation d'outils numériques demeure fondamentale. Même si au cours de cette expérience, le passage aux outils numériques a été relativement immédiat, une démarche « analogique » (un croquis, une maquette) dans le processus de conception numérique a été nécessaire (Figure 3.19). Dans l'exercice de la recherche de formes, l'approche traditionnelle (modélisation, esquisse) apparaît comme une action complémentaire du processus de conception numérique. Les représentations statiques telles que les esquisses et les maquettes deviennent pertinentes dans la mesure où elles figent un instant la recherche de formes. Ces actions sont indispensables au maintien de l'équilibre entre une approche imaginative et une approche constructive afin d'éviter une rupture entre ce qui est virtuellement possible et ce qui est réalisable.

[1] (Zellner, 1999).

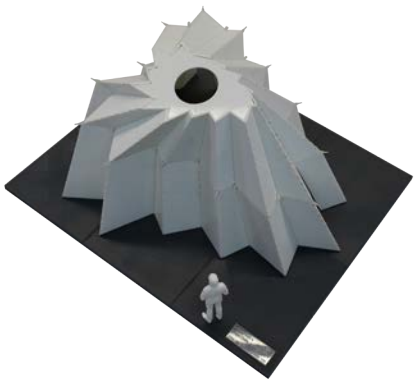


Figure 3.19 - Maquette de la New-Yourte réalisée par impression 3D. Le montage de la maquette a permis, entre autres choses, de décrire la cinématique de montage.

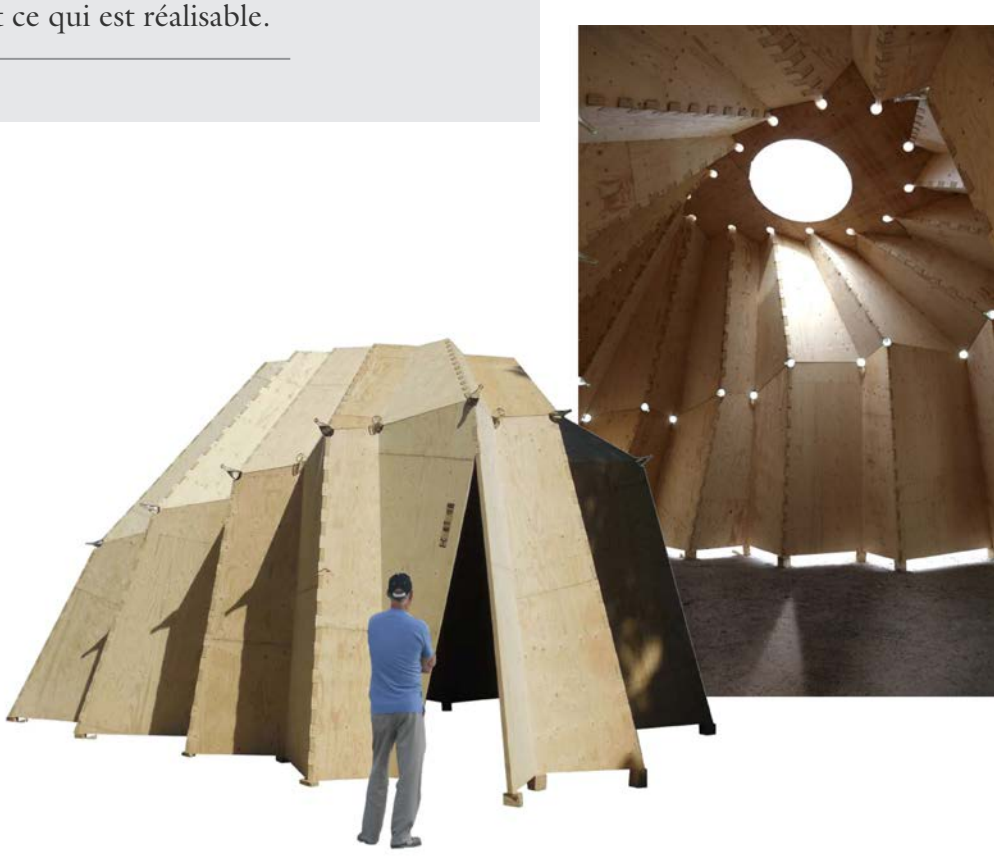


Figure 3.20 - Vue extérieure et vue intérieure de la New-Yourte.

Partie B

Proposition d'un modèle numérique

Chapitre 4

Présentation du modèle théorique

À partir de l'expérience décrite dans le chapitre précédent, nous proposons une méthode d'aide à la conception architecturale capable de générer une géométrie d'enveloppe structurale plissée prête à être fabriquée.

L'objet expérimental que nous avons réalisé nous a servi de « *générateur primaire* »[1]. En nous appuyant sur les travaux théoriques de Jean-Pierre Chupin[2], nous pouvons considérer que cette expérience a été utilisée comme un processus d'exploration dans lequel la solution préétablie par le concepteur est largement détachée de la problématique. Dans cette situation, ce ne fut pas la formulation du problème liée à notre contexte qui nous intéressait, mais bien plutôt la recherche de solutions qui a permis, pour paraphraser l'auteur, de « *structurer la perception même de la situation* »[3].

Ainsi, l'intérêt de notre expérience réside davantage dans les questions qu'elle soulève en tant que solution que dans la solution proposée elle-même. De cette manière, chaque supposition établie est une itération préférable à celle qui l'a précédée[4].

Notre expérience constitue donc une étape provisoire, mais primordiale dans la formalisation du modèle théorique. Elle a permis d'éprouver, en partie, des hypothèses définies préalablement et de faire apparaître des problèmes qui permettent de déterminer un modèle théorique optimisé.

---

[1] (Darke, 1979).

[2] (Chupin, 2007).

[3] Ibidem, p. 245.

[4] Cela fait référence à la citation d'Albert Einstein : « Il ne saurait pas y avoir plus beau destin pour une théorie [...] que d'ouvrir la voie à une théorie plus englobante au sein de laquelle elle continue d'exister comme cas particulier ». (Popper et al., 1999, p. 58)

4.1. Présentation préliminaire

À partir des résultats de l'expérience, nous avons scindé le processus de conception en deux parties : l'une traite de la conception (paramétrique) des enveloppes morpho-structurales, l'autre se réfère à la fabrication (robotique) de ces structures. Notre étude se concentre essentiellement sur la première partie. Néanmoins, nous verrons dans ce chapitre que la seconde n'est pas pour autant négligeable en raison des relations qui les unissent.

Nous proposons donc une méthode scindée en deux phases séquentielles principales : le « modelage » du plissage et sa « matérialisation ». Chacune de ces deux phases est accompagnée d'une succession d'opérations d'« évaluation ». L'objectif de cette démarche consiste à présenter, par un processus itératif, une solution acceptable en réponse à l'ensemble des besoins formulés par le concepteur. Ces deux phases sont par ailleurs décomposées en différentes étapes décrites dans les sections ci-dessous.

4.1.a. Le modelage

Cette première phase est destinée à la recherche de solutions morpho-géométriques plissées. Elle consiste à offrir au concepteur, un maximum de liberté créative tant sur la forme que sur les caractéristiques spatiales du plissage. Pour cela, trois étapes sont indispensables : la recherche d'une volumétrie générale, la définition du plissage et les modifications singulières effectuées sur la géométrie résultante.

4.1.a.1. La volumétrie générale

Le travail de modelage aurait pu se faire d'emblée au travers d'une modélisation réalisée directement avec des entités géométriques volumiques. Cependant, nous avons préféré démarrer ce travail de modelage par une modélisation surfacique plus rapide. Ce choix se justifie par une approche basée sur des constats issus des pratiques architecturales. En effet, on admet que l'architecte travaille par ajustements successifs d'une forme définie par son enveloppe avant d'arriver à une ou plusieurs solutions acceptables[5]. Avec

[5] (Wetzel, 2009).

ce postulat, nous abordons la phase de modelage par une abstraction du plissage s'appuyant sur cette enveloppe de référence[6]. En effet, l'utilisation de cette surface initiale garantit la recherche d'une volumétrie générale aucunement influencée par le plissage. Ce principe assure au concepteur une grande liberté d'action.
Il est nécessaire de remarquer qu'à ce stade les surfaces ne doivent pas présenter de rayons de courbure importants. Par exemple, un plissage unidirectionnel aux facettes planes ne peut pas s'ajuster à une surface de référence aux courbures prononcées et complexes. Ainsi, il est plus judicieux de la décomposer en plusieurs surfaces de référence possédant des rayons de courbure réduits.

4.1.a.2. Le plissage

La recherche d'une solution de plissage de la forme proposée dépend de deux situations : soit le concepteur possède une idée précise du plissage qu'il souhaite réaliser ; dans ce cas, il intègre directement les valeurs des paramètres liés à cette géométrie. Soit le concepteur n'a aucune intention particulière ; dans cette situation, il peut faire appel à des solutions prédéfinies dans le but d'initier des intentions. Ces dernières se précisant, le concepteur peut agir en conséquence sur les paramètres du type choisi.

Afin d'intégrer ces « patterns » nous avons mené un premier travail d'inventaire et de classification de différents types de plissage adaptés à une conception architecturale et structurale. Nous avons ainsi créé une bibliothèque de plissages présentant des profils prédéfinis.

Chaque plissage lié à sa surface de référence 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.

[6] Cf. Section 1.3

– **Le profil.** Il caractérise la nature des plis qui composent 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.

4.1.a.3. Les éléments singuliers

Lors de la modélisation d'une structure architecturale plissée, nous pouvons rencontrer plusieurs points singuliers. Un premier exemple nous est fourni par l'intégration de baies. La création d'une fenêtre ou d'une porte peut être pensée comme l'intersection d'une boîte volumique avec la géométrie du plissage. Elle peut être également imaginée comme la découpe partielle ou le retrait complet d'une facette du plissage. Dans les deux cas, il conviendra de gérer un enlèvement de matière.

Un autre exemple est celui de la définition des facettes en bordure du plissage qui nécessitent une modification géométrique. Cette modification peut être engendrée par une volonté de faire correspondre la bordure du plissage à une volumétrie existante ; par exemple, adapter le plissage à un sol plan.

Par ailleurs il peut être nécessaire d'ajouter des éléments connexes pouvant entrer en interrelation avec le plissage. C'est le cas de l'anneau de compression de notre projet « New-yourte », qui a servi par ailleurs de couvrement et de gabarit à la structure lors du montage. La nature des éléments connexes peut être variée, allant d'un élément de plancher, de cloison, voire de mobilier, aux éléments structuraux comme la nervure qui peut être disposée de manière temporaire, dans un scénario de montage, ou définitive, dans le cas d'un renforcement.

4.1.b. La matérialisation

La seconde phase de la méthode correspond à une « matérialisation » des solutions issues de la recherche de forme. 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 caracté-

ristiques du matériau et de la nature des assemblages. Cette phase de caractérisation intègre une notion d'échelle nécessaire à une validation du projet dans l'espace réel.

Trois étapes de cette phase permettent de répondre à deux questions primordiales : « quels sont les matériaux employés ? » et « comment sont-ils assemblés ? ». Elles caractérisent le matériau « produit », les assemblages et la gestion des nœuds.

4.1.b.1. Le matériau « produit »

Par les caractéristiques du pli et du plissage, le panneau s'est imposé comme le matériau de référence pour ce type de structure. L'approche menée dans le chapitre 2, concernant le matériau bois et ses produits dérivés, a montré que le terme de « panneau » peut désigner plusieurs produits différents : le plus courant est le panneau massif. Mais on rencontre également des panneaux composants du type caissons (ossature, alvéolaire...). Le point commun à ces deux produits est la géométrie globale de l'élément qui constitue une facette. Seule la composition interne diffère. Dans un premier temps, il convient donc d'en définir géométriquement « la volumétrie externe ».

Le choix du matériau impacte fortement la conception. Dans notre recherche, nous nous sommes tournés vers une utilisation de panneaux industriels plans. À l'instar des panneaux courbes qui permettent aux facettes du plissage de suivre précisément la surface de référence, les panneaux plans nécessitent, lors de la génération de l'enveloppe plissée, la création de lignes de brisis. Ces brisis diminuent l'écart entre la géométrie du plissage et celle de la surface de référence par un effet de discrétisation. Ce phénomène renvoie à la décomposition de la surface de référence évoquée dans l'étape de la « volumétrie générale ».

La matérialisation nécessite également une connaissance de la dimension des panneaux. La taille d'un panneau représentant une facette du plissage est conditionnée par divers critères : la contrainte de poids pour la manutention manuelle ou mécanisée ; la capacité d'accueil de l'espace de travail de l'outil d'usinage ; la réglementation du transport…

4.1.b.2. Les assemblages

Ils caractérisent la jonction des facettes du plissage suivant leurs « arêtes ». Le choix des assemblages est défini à différents stades de la conception. Il se justifie selon trois points de vue :

– **La stabilité.** La nature de la liaison définie par ses degrés de liberté bloqués doit permettre la stabilité de la structure et les assemblages associés doivent assurer le transfert des efforts d'un élément à l'autre. Cette propriété s'associe aux caractéristiques mécaniques inhérentes au matériau.

– **La fabrication.** La réalisation d'un assemblage, notamment par usinage, dépend de la nature du matériau utilisé ainsi que des capacités de l'outil d'usinage employé.

– **Le montage.** L'assemblage doit satisfaire les critères de la cinématique de montage. Tout d'abord, un « jeu » est introduit. Il doit permettre l'absorption des variations dimensionnelles liées au matériau bois pour garantir la connexion des éléments. Ensuite, la nature de l'assemblage doit garantir le positionnement de la facette.

Pour satisfaire ces trois points, le concepteur peut choisir, parmi des familles de liaisons (rotule, encastrement…), une technologie d'assemblage particulière (queue d'aronde, raines et languettes, coupe d'onglet…). Leur dimensionnement dépend de l'évaluation structurale et architecturale.

D'autres considérations peuvent intervenir pour le choix de l'assemblage. On prendra comme exemple la continuité de l'enveloppe à des fins thermiques ou acoustiques, ou sa discontinuité pour des raisons esthétiques de lecture ou de lumière.

4.1.b.3. La gestion des nœuds

Le nœud représente le regroupement ponctuel des divers sommets des facettes du plissage ; il correspond donc à l'intersection de plusieurs arêtes provoquant ainsi une singularité matérielle. Cette particularité est perceptible lors de la mise en épaisseur. Cette dernière a été définie selon deux méthodes d'extrusion distinctes : soit l'extrusion des nœuds, soit l'extrusion des surfaces.

Lors de la mise en épaisseur, nous souhaitons que la génération de la deuxième surface garantisse l'unicité des sommets conformément à la surface plissée servant de référence. Ce choix a été établi dans un souci de continuité architecturale et physique de l'enveloppe. Par ailleurs, l'usage des panneaux industriels en bois massif nous impose une géométrie des éléments à épaisseur constante.

La première méthode d'extrusion consiste à définir l'« image nœud » par déplacement du nœud de référence selon la direction moyenne des normales de chaque facette attachées à ce sommet (Figure 4.1.a). Cette technique ne garantit pas la condition suffisante à la création d'un élément d'épaisseur constante.
Pour satisfaire ce critère, il est donc nécessaire que l'intersection des plans bissecteurs (P_B) de chaque pli corresponde à une droite unique (Figure 4.1.b). Toutefois, cette situation-là se présente rarement.
La seconde méthode d'extrusion des surfaces satisfait systématiquement la condition d'épaisseur constante. Cependant, elle engendre, dans la plupart des cas, une démultiplication des « images nœuds ». La prise en compte de la discontinuité de la matière ainsi formée sera traitée ultérieurement dans le chapitre 6.

La méthode d'extrusion des nœuds s'avère la plus simple et la plus rapide et convient à l'utilisation des panneaux composants (l'autre méthode étant plus adaptée à l'emploi de panneaux massifs)

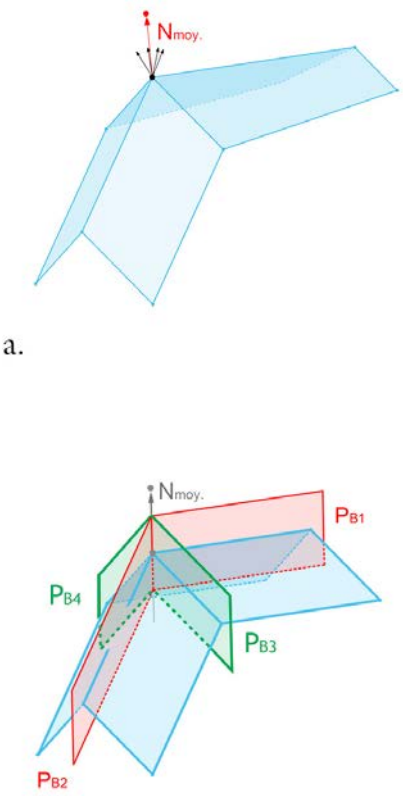


Figure 4.1 - Méthode d'extrusion des nœuds.
a. Recherche de l'«image nœud» par la normale moyenne.
b. Conditions nécessaires à la création d'une enveloppe plissée à épaisseur constante présentant une unicité des nœuds.

4.1.c. L'évaluation

Cette troisième phase intègre les « moteurs d'évaluation ». Les moteurs d'évaluations représentent un ensemble de règles permettant d'analyser le niveau de conformité de la configuration proposée à une exigence définie. Ils permettent de générer un rapport d'évaluation duquel une série de modifications, dans les phases de modelage ou de matérialisation, peuvent être déduites.
Le champ d'action des moteurs d'évaluations est vaste. Le plus important est certainement celui de l'évaluation structurale. Toutefois, d'autres évaluations peuvent s'avérer tout aussi importantes comme l'évaluation thermique et acoustique du bâtiment ; mais aussi l'évaluation technique vérifiant, par exemple, les possibilités de fabrication ou de montage et les aspects économiques et environnementaux.

L'analyse des différents champs de la réalisation d'une structure plissée doit permettre de conseiller le concepteur dans sa démarche conceptuelle. En raison de leur importance, les moteurs d'évaluations sont traités plus précisément dans la dernière partie de ce mémoire.

4.2. Organigrammes de la méthode

Par ces organigrammes, nous souhaitons montrer la dimension dynamique de la méthode, en soulignant les relations qui existent entre les éléments ainsi que leurs ordres de dépendance.

Dans le cadre d'un continuum numérique, nous avons cherché à créer une interaction entre les différentes étapes depuis la conception jusqu'à la fabrication. Bien que ne relevant pas de notre travail, la phase de fabrication ne peut être négligée. Elle est 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. Ce principe a été renouvelé pour la problématique de la cinématique de montage. Il a également été appliqué à la dimension structurale, à la dimension thermique et pourra être étendu à d'autres domaines comme l'acoustique par exemple.

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. L'utilisateur peut intervenir à tout moment sur les paramètres attenants au modelage et à la matérialisation dans un souci de modification d'idées ou de corrections liées à un rapport d'évaluation.

Dans cette méthode de recherche de forme, l'ajustement des paramètres permet une (re)configuration du pli physique de manière à atteindre, non pas une forme plissée optimale, mais une forme plissée acceptable qui satisfasse l'ensemble des contraintes du projet.

Le diagramme d'activité ci-après propose une vision globale de la méthode (Figure 4.2). Il fait état des principales opérations du processus de conception. Les deux phases — le modelage et la matérialisation — présentent un cheminement d'activité analogue. Elles

se décomposent suivant trois étapes (cf. section 4.1) 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.

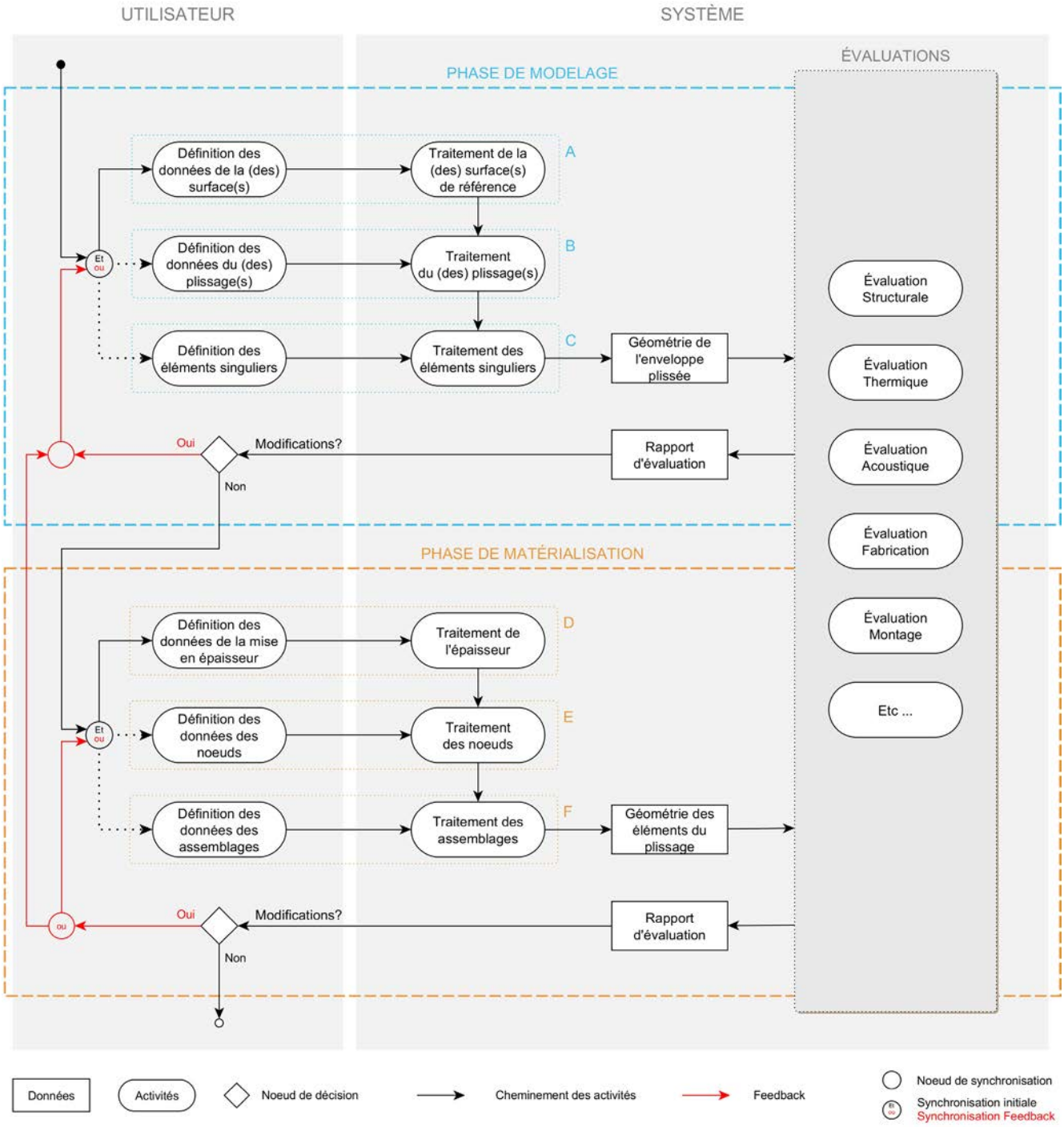


Figure 4.2 - Diagramme d'activité représentant les phases principales de la méthode reliées au dispositif d'évaluation.

Chaque géométrie est ensuite évaluée. Il existe plusieurs moteurs d'évaluation : en fonction de l'état d'avancement du processus, on n'évalue pas les mêmes besoins. Toutefois, plusieurs moteurs nécessitent une analyse des données à différents stades du processus de création. Par exemple, le moteur d'évaluation thermique peut aussi bien traiter la géométrie de la surface de référence afin d'obtenir une estimation globale, qu'analyser celle du plissage provenant de la phase de modelage pour des résultats plus précis. À l'issue de ces évaluations, un rapport informe de la validité du modèle géométrique. En fonction des résultats, l'utilisateur peut intervenir sur les différentes étapes du processus en modifiant les données d'entrées (feed-back). 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.

4.2.a. La phase de modelage

Nous avons fait le choix de restreindre notre méthode à un seul plissage par surface de référence. Ce choix a été motivé par plusieurs raisons. Premièrement, les nombreuses références architecturales que nous avons analysées font rarement appel à des plissages croisés, sans doute pour des raisons économiques. Deuxièmement, le croisement de deux plissages génère une géométrie complexe difficilement caractérisable qui nécessiterait une attention particulière.

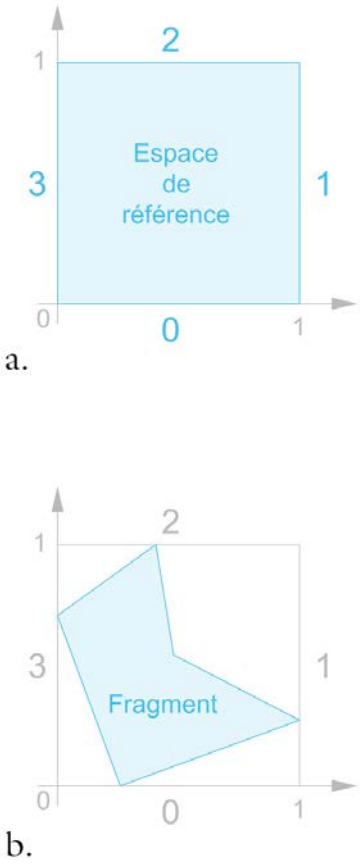


Figure 4.3 - État d'un fragment dans l'espace de référence du repère théorique.

Le processus que nous proposons débute donc par le traitement d'une ou plusieurs surfaces de référence proposées par le concepteur. Ensuite, ces surfaces doivent être caractérisées.
D'un point de vue théorique, l'espace de référence d'une surface quelconque est défini par quatre arêtes, dans un domaine référencé $x(0\,;1)$ $y(0\,;1)$ (Figure 4.3.a). Lorsque la surface étudiée ne dispose pas de quatre arêtes, elle est considérée comme un fragment de la surface théorique (Figure 4.3.b). Ainsi, nous pouvons introduire toutes les surfaces qui, définies dans un espace de référence, sont spécifiées de la sorte.

Le repère permet de numéroter les arêtes de zéro à trois. En tant que surface de référence du plissage, la première direction du repère théorique de cette surface représente la «propagation» du profil

du plissage ; cette direction est rattachée à l'arête zéro de la surface théorique. La seconde direction représente l'« orientation » de ce plissage. Celle-ci correspond à la diffusion du profil du plissage jusqu'à la limite opposée de la surface théorique : soit l'arête n 2. Dans ce modèle, le plissage se développe toujours entre l'arête zéro et l'arête n 2 (Figure 4.4).

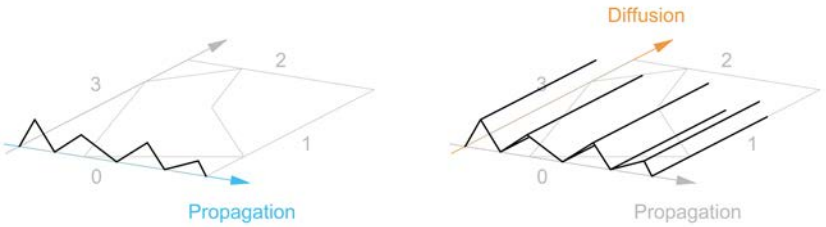


Figure 4.4 - Dénomination des directions du repère théorique.

Cet ordre des arêtes sert à définir la normale de la surface ; cet indicateur nous intéresse particulièrement. Rapportée à un contexte architectural, la surface scinde l'espace en deux parties, marquant un rapport entre « l'intérieur et l'extérieur » voire entre « le dessus et le dessous ». En accord avec les différentes théories physiques, nous avons choisi l'orientation de la normale pour caractériser le côté extérieur de l'enveloppe.
La diffusion représente une infinité de profils disposés les uns après les autres dans le domaine de référence de la surface. Le plissage est constant si le profil est dupliqué à l'identique. Dans les autres cas, les profils évoluent au fur et à mesure de leur diffusion : le plissage est alors variable. Des règles de simplification peuvent être apportées au processus de diffusion. Par exemple, une discrétisation du processus de diffusion permet de définir un degré d'interpolation introduit à la section 1.3.c.

La création du profil reprend les notions exposées dans le chapitre 2 : un pli est caractérisé par une période et une amplitude. Cependant, il est plus intéressant de distinguer le demi-pli dans la création du profil. Ainsi, nous nous intéressons à la notion d'intervalle et d'amplitude. Appliquée à un plissage, la somme de « n » intervalles correspond à la « fréquence ». Nous nous autorisons une digression sur le sens mathématique du terme puisque, dans la majorité des situations, les intervalles ne sont pas forcément identiques. De la même manière, l'ondulation correspond au nombre « n » d'amplitudes. Dans le cadre de notre modèle théorique, une troisième

notion vient enrichir le modèle du pli : le décalage. Contrairement à la somme des amplitudes qui génère une onde normale à la surface de référence, la somme des décalages crée une onde tangentielle appelée « balancement » du plissage. Ce balancement donne lieu à un profil en trois dimensions qui prend toute son importance lors de la jonction du plissage.

L'association d'un intervalle, d'une amplitude et d'un décalage sous la forme vectorielle désigne un sommet du profil. Ces valeurs peuvent être définies suivant l'origine du repère ou de manière relative par rapport au sommet précédent. Le regroupement de sommets, pour la création d'un profil, engendre un bloc de « données discrétisées » caractérisant un champ de vecteurs et sera traduit par une « table » de vecteurs. La fréquence, l'ondulation et le balancement constituent alors une intégration intellectuelle de ces données ponctuelles (Figure 4.5).

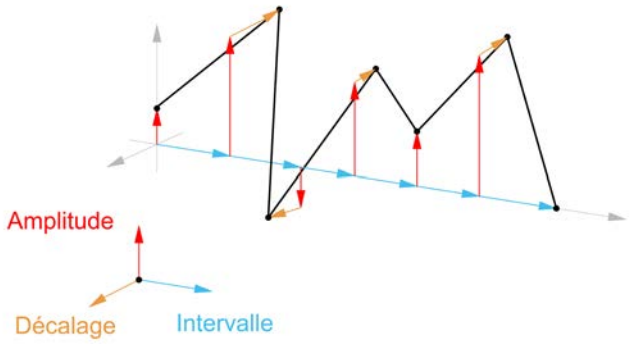


Figure 4.5 - Décomposition du profil du plissage selon l'intervalle, l'amplitude et le décalage.

Ce modèle permet de traiter plusieurs surfaces à la fois. Il génère alors un ensemble de plissages simples. Lorsque ces dernières disposent d'une arête commune ayant la même orientation, une jonction des plissages est alors possible. Cette jonction s'effectue à condition que les deux plissages possèdent un nombre de plis identiques. Dans ce cas, une modification du balancement de chaque plissage permet de les rejoindre. Cette action génère un brisis ; les deux plissages initiaux forment alors un plissage unique brisé.
Une fois la géométrie de l'enveloppe plissée définie, le concepteur peut y entreprendre des modifications. Il est libre de supprimer ou de modifier les facettes du plissage, voire de rajouter de nouveaux éléments. La géométrie de l'enveloppe plissée nouvellement obtenue est, après une série d'évaluations, prête pour la phase de matérialisation.

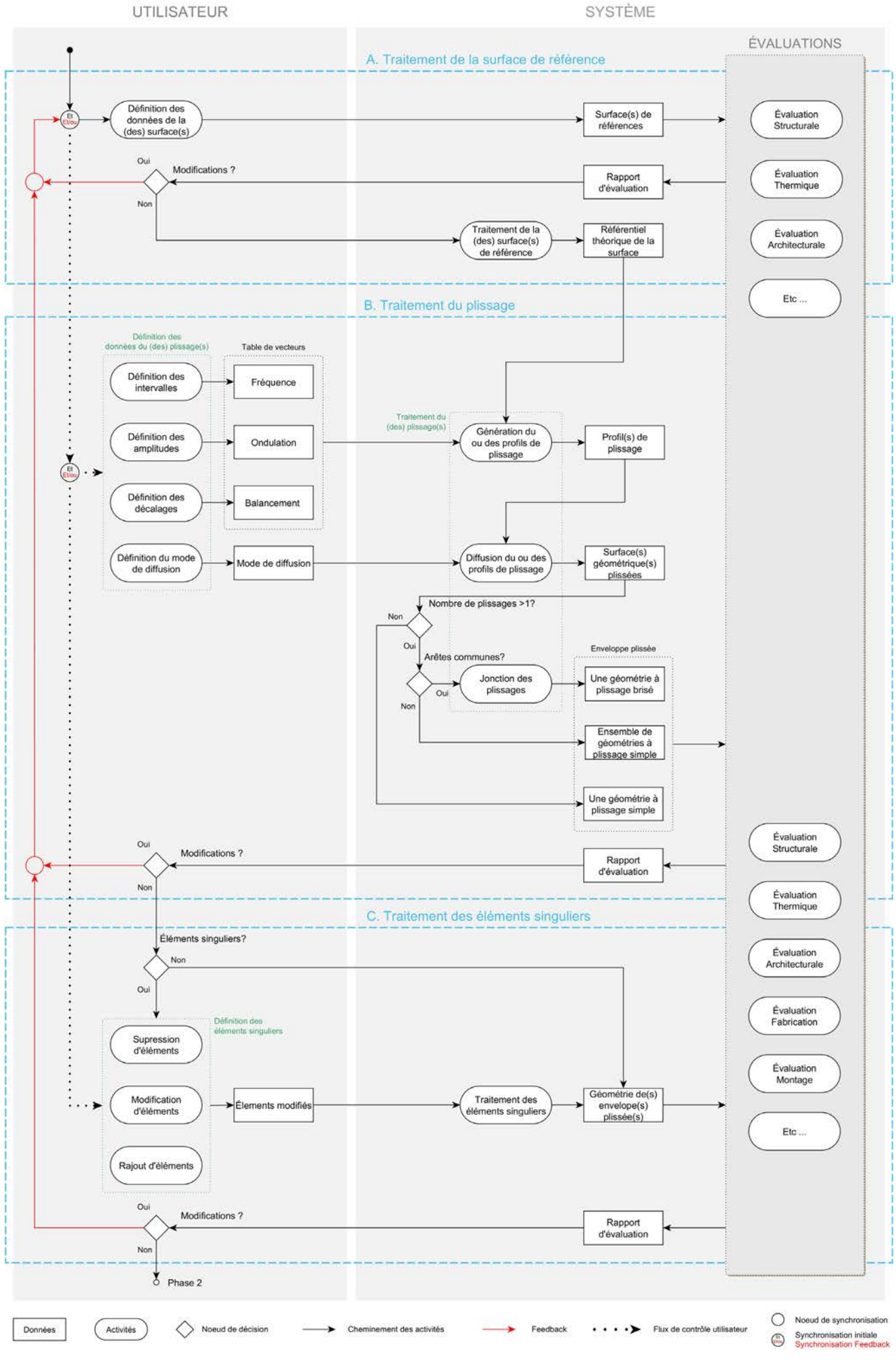


Figure 4.6 - Diagramme d'activité de la phase de modelage.

4.2.b. La phase de matérialisation

Comme nous l'avons exposé dans la section «4.1.b. La matérialisation», nous avons cantonné notre modèle à une mise en épaisseur régulière. D'un point de vue constructif, cela semble plus intéressant compte tenu des produits dérivés dont nous disposons généralement. Cependant, d'un point de vue géométrique, cette mesure est moins avantageuse quant à la gestion des nœuds.
Toutefois, nous proposons deux solutions pour résoudre cette particularité géométrique. D'autres solutions pourront être envisagées par la suite.

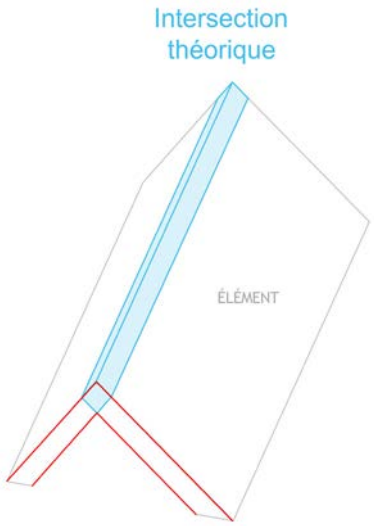


Figure 4.7 - Caractérisation de l'intersection théorique de deux éléments.

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 une solution intermédiaire.
Une fois l'enveloppe plissée dédoublée, un travail sur la définition du contour des éléments est indispensable. Par la mise en épaisseur de deux facettes consécutives, nous pouvons définir un volume correspondant à l'intersection théorique de ces deux éléments (Figure 4.7). Cette géométrie caractérise la zone de création de la géométrie des assemblages. Les zones restantes correspondent à la géométrie des éléments du plissage.

Le concepteur choisit une famille de liaison (rotule, pivot…), puis une technologie d'assemblage associée (queue d'aronde, onglet…) et enfin le pli où doit être appliquée la connexion.

Le travail sur les nœuds concerne principalement ceux constitués de trois sommets au minimum. En effet, un nœud composé de deux sommets correspond à un nœud situé en bordure du plissage et ne présente pas de complexité apparente. Pour les autres, le concepteur peut choisir la manière de les modifier. La méthode consiste à enlever de la matière au niveau du nœud. Cette soustraction de matière peut traverser l'épaisseur totale ou être diffuse à partir du nœud de la surface de plissage de référence.

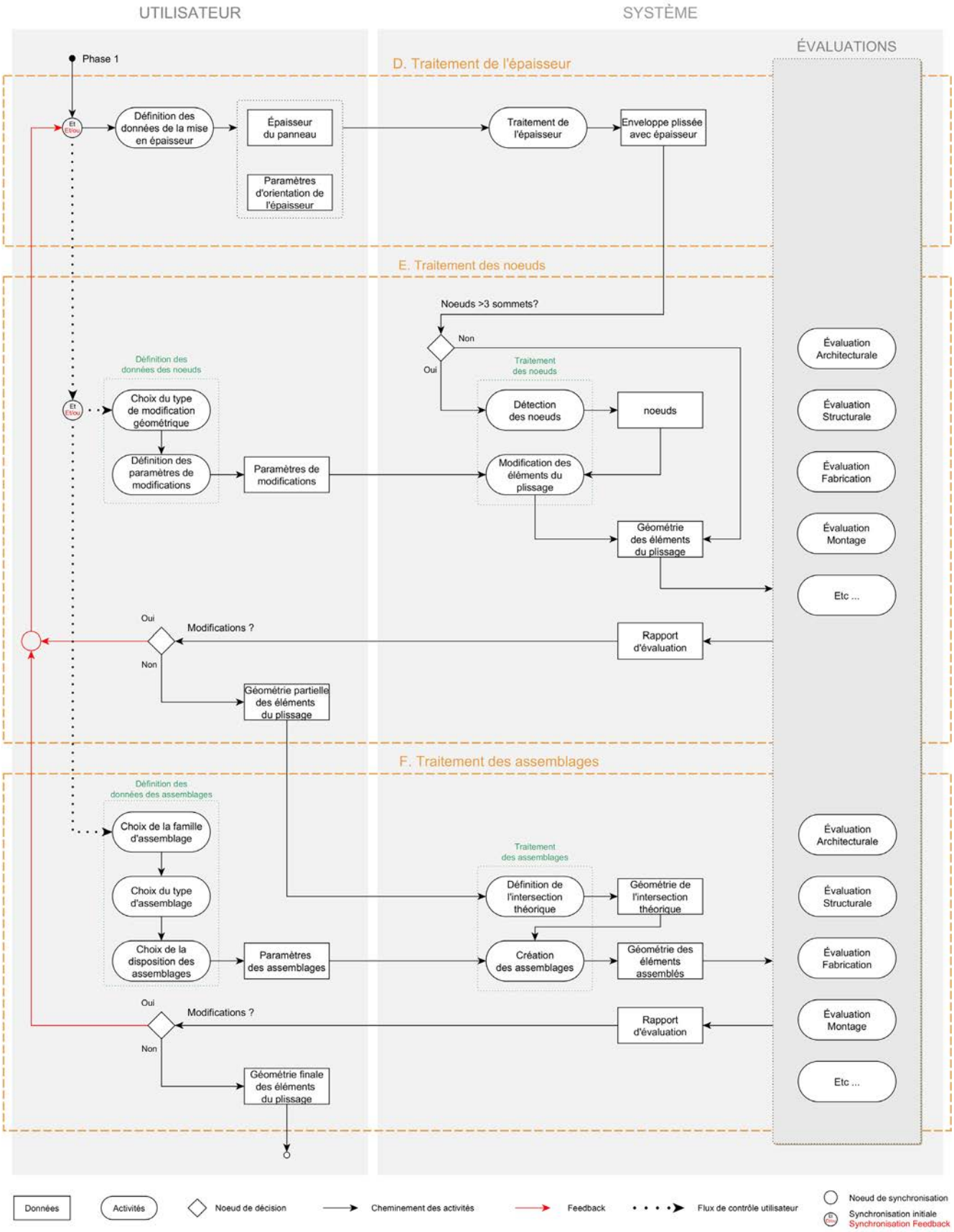


Figure 4.8 - Diagramme d'activité de la phase de matérialisation.

OBSERVATIONS : Dans le cadre du développement d'un continuum numérique, le choix d'un outil logiciel est primordial. Dans notre recherche, nous souhaitons associer l'idée du continuum numérique à l'utilisation d'un seul outil. L'intérêt de disposer d'un logiciel unique réside dans une meilleure gestion des maillons de la chaîne de conception numérique afin d'éviter tout risque d'incompatibilité.
Pour notre expérience, nous disposions du plug-in *Grasshopper®* pour la modélisation paramétrique et du logiciel *Castem®* pour l'évaluation structurale. *Grasshopper®* s'est avéré un outil adapté pour l'ensemble de la démarche, bien que certaines faiblesses soient apparues sur certaines étapes particulières comme le couplage vers d'autres outils existants qui n'ont pas leur équivalence dans *Grasshopper®*… Toutefois, ce logiciel a pour vocation de s'enrichir quotidiennement grâce à la contribution de sa communauté d'utilisateurs. Aussi, cette démarche semble tout à fait correspondre à nos attentes, notamment dans la possibilité de combiner toutes les opérations de notre processus dans un logiciel unique.

Chapitre 5
La modélisation géométrique

Dans ce chapitre, ainsi que dans le suivant, nous présentons les deux phases de notre méthode, implémentées dans l'outil de modélisation du plissage nommé « CARA(s)PACE » : Conception of Architectural Research Algorithm for Structural Pleated Approaches and Creative Envelopes.

L'éditeur d'algorithme graphique *Grasshopper®*, dépendant du modeleur 3D *Rhinoceros®*, a été choisi comme environnement pour l'implémentation de l'algorithme de définition géométrique des enveloppes plissées. Ce choix se justifie par plusieurs raisons.

Tout d'abord, cet éditeur d'algorithmes graphiques est un logiciel « Open source ». En vue de la recherche, ce libre accès au code source est très intéressant ; il offre tout le contenu d'une base géométrique indispensable dans un contexte de développement morphologique et permet également l'enrichissement de l'outil[1].

Ensuite, *Grasshopper®* permet l'intégration soit de passerelles vers d'autres logiciels, soit directement de « plug-in ». Ainsi, des applications avancées permettent, par exemple, une modélisation paramétrique pour l'architecture (plug-in *Ladybug®*, *Heliotrope-Solar®*,…), la structure (plug-in *Kangaroo®*, *Karamba®*,…) et la fabrication (plug-in *Woodpecker®*, *KUKA|prc®*,…).

Enfin, cet éditeur permet la création d'algorithmes selon une méthode graphique, sans exiger de connaissances avancées en informatique. Même si certaines opérations nécessitent toutefois des compétences plus approfondies en programmation textuelle comme la réalisation d'itérations, l'accès à la conception et à la manipulation d'objets paramétriques tridimensionnels en est simplifié et s'ouvre à un large public de concepteurs.

[1] Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que ce contexte est à l'origine de phases de développement et de mises au point régulières qui aboutissent à des fluctuations de l'outil en fonction de ses versions.

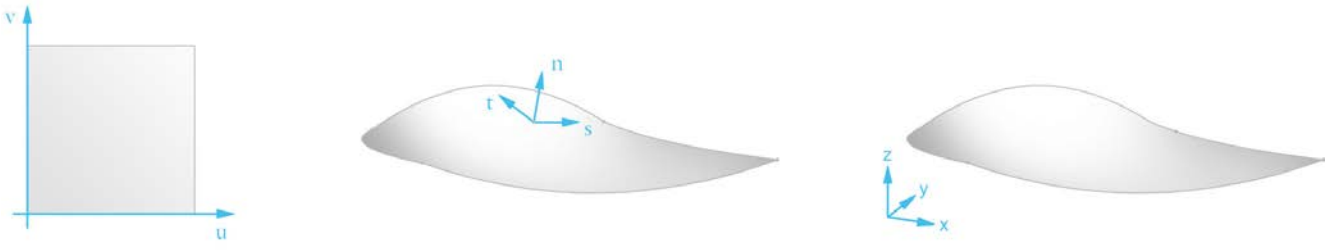
Dans le cadre du développement de l'outil CARA(s)PACE, nous avons choisi de reprendre le principe de généricité du logiciel *Grasshopper®*. Dans cette optique, nous avons fortement séquencé le processus de conception. Ce découpage a permis d'obtenir des familles de composants (ou clusters) suffisamment communs pour être employés en dehors de la création de structures plissées. De la même manière, ce séquençage permet d'introduire, dans la création de notre chaîne algorithmique, des composants natifs de l'outil de programmation visuel. Par ces actions combinatoires réalisées en fonction des besoins, cet outil offre une grande liberté de développement sous le contrôle du concepteur.

L'élaboration de ces composants se fonde sur deux méthodes distinctes. Soit le cluster est issu d'un regroupement d'opérateurs prédéfinis dans l'environnement de *Grasshopper®* qui produit une fonction nouvelle, soit il provient d'une programmation en Visual Basic (VB). Cette deuxième méthode est intéressante dans le cadre d'une opération de « bouclage » ou encore dans l'optimisation de la vitesse de calcul des opérateurs en utilisant des fonctions issues directement de la base de données *Rhinoceros®*.
Ainsi, chaque composant est caractérisé par une succession d'opérations mathématiques et surtout géométriques. Pour des raisons pratiques, elles sont décrites leur repère propre.
Nous distinguons trois repères principaux :

– le « repère théorique », mentionné dans le chapitre 4, correspond au repère (*u, v*) de la surface de référence (Figure 5.1.a).

– le « repère local » correspond au repère (*s, t, n*) spécifié en un point de la surface (Figure 5.1.b). Les directions *s* et *t* appartiennent à la surface et *n* est la normale locale.

– le « repère global » correspond au repère (*x, y, z*) de l'environnement de la structure (Figure 5.1.c).



a. Repère Théorique (T) b. Repère Local (L) c. Repère Global (G)

Figure 5.1 - Présentation des trois repères utilisés lors des opérations internes aux « clusters ».

Dans les sections qui suivent, nous présentons les familles de composants nécessaires à la phase de modelage. Elles représentent des thématiques précises définies à partir du modèle théorique. La première thématique est liée au traitement de la surface de référence. Les suivantes se rapportent à la création de plissages ainsi qu'à leur jonction (Figure 5.2).

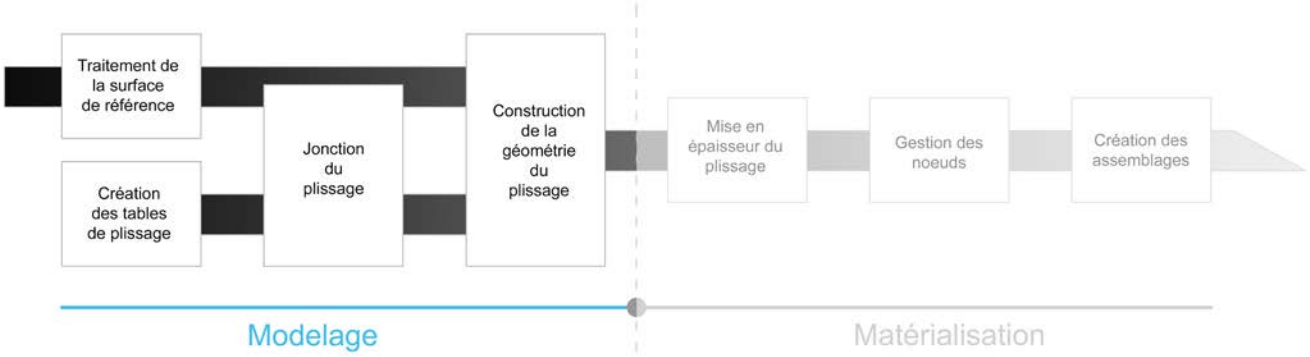


Figure 5.2 - Présentation chronologique des différentes étapes de la phase de modelage.

5.1. Traitement de la surface de référence

La méthode proposée dans cet outil permet un traitement simultané de plusieurs surfaces. Le processus de conception démarre donc avec la définition d'une ou plusieurs surfaces de référence de type Nurbs ou Brep. Cette liste de surfaces va parcourir l'ensemble des étapes de la phase de modelage.

D'après l'espace de référence théorique d'une surface, toutes les surfaces qui ne disposent pas de quatre arêtes sont considérées comme des fragments. Ce type de surface s'est révélé complexe[2] à traiter au fur et à mesure du processus de modelage dans l'environnement de *Grasshopper®* et *Rhinoceros®*. Pour l'instant, nous avons donc réduit les surfaces de références traitées à celles constituées par quatre arêtes.

Pour commencer, ces surfaces sont soit importées, soit construites dans l'environnement de *Grasshopper®* dans le but d'obtenir des surfaces paramétriques. Ensuite, elles sont soumises à deux traitements successifs : l'un assurant l'orientation de la normale, l'autre définissant l'ordre des arêtes.

[2] Ces complexités se sont révélées notamment dans la gestion des frontières du fragment.

5.1.a. Orientation de la normale

Comme nous l'avons déjà précisé dans le chapitre précédent, l'orientation d'une surface est primordiale dans un contexte architectural. Par défaut, la DAO définit le sens de la normale comme étant dirigé vers « l'extérieur » du volume ; or, dans notre méthode, nous ne travaillons pas avec une approximation volumique, mais bien surfacique (volume non fermé) qui ne présente pas de notion intérieur/extérieur : d'où une nécessité de la définir par une gestion de l'orientation des normales. Ainsi, le concepteur peut modifier le sens de la normale afin d'anticiper l'orientation du plissage.

Le composant « N_Controller » (Figure 5.3.a) permet de générer ces normales. Il reçoit en entrée, deux sources d'informations : une liste de surface et une liste d'index. L'index correspond à une valeur booléenne du type « vrai ou faux » (la valeur vraie correspond au retournement de la normale). Cette liste peut être créée manuellement par le concepteur. Nous proposons également un composant générateur de liste nommé « N_Indexer » (Figure 5.3.b). Son principe consiste à comparer le sens des normales de chaque surface par rapport à celle de la première surface de la liste. Lorsque le sens de la normale doit être inversé, l'indexeur attribue la valeur « vrai » dans la liste ; dans l'autre cas, le « faux » l'emporte.

Dans le cas où la normale servant de référence au « N_Indexer » n'est pas dans le sens voulu par le concepteur, un composant de traitement de liste « N_Reverser » (Figure 5.3.c) peut être inséré. Ce composant inverse l'ensemble des valeurs de la liste d'index.
Cette liste de valeurs est ensuite transmise au « N_Controller », qui va traiter chaque face en fonction de la valeur booléenne qui lui est attribuée. Il en ressort une nouvelle liste de surfaces « modifiées ».
Ce travail ne peut être effectué qu'à condition que le concepteur puisse, dès le départ et après transformation, visualiser la normale des surfaces. Cette fonction est assurée par le composant « N_Display » (Figure 5.3.d) qui affiche la normale provenant d'une liste de surfaces.

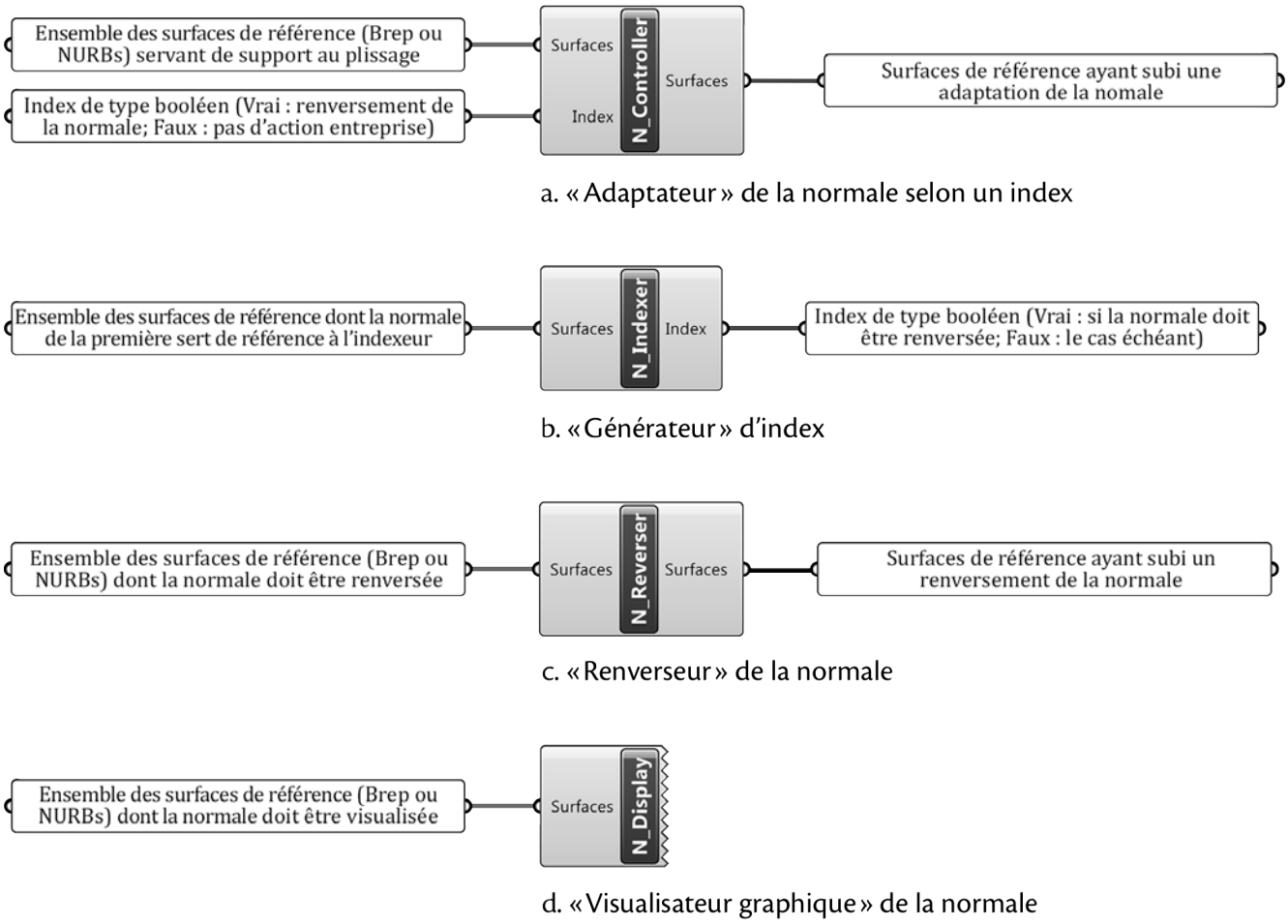


Figure 5.3 - Clusters de traitement de la normale des surfaces.

5.1.b. Ordre des arêtes

Il a été défini dans le repère théorique d'une surface que le plissage serait réalisé entre l'arête n° 0 notée (A_0) et l'arête n° 2 notée (A_2). Or, pendant la réalisation des surfaces, le concepteur ne maîtrise pas cette information. Cette absence de connaissance a deux répercussions. La première se définit simplement par un plissage qui peut ne pas être orienté suivant la volonté du concepteur. La seconde découle de la première : lorsque deux surfaces ont une arête commune, la jonction des plissages qui découle de ces surfaces ne peut être maîtrisée correctement que si ces plissages ont la même orientation (Figure 5.4).

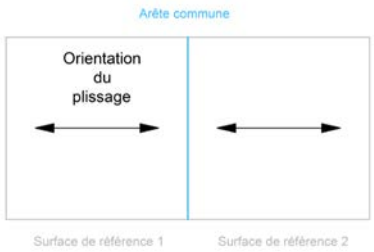


Figure 5.4 - Principe d'orientation de deux plissages destinés à être joints

Le concepteur doit donc être en mesure d'orienter chaque plissage à sa guise. Pour y parvenir, nous agissons sur l'ordre des arêtes de la surface dépendant du repère théorique. C'est le rôle du composant « E_Rotation » (Figure 5.6.a) ; il effectue « une rotation des arêtes » par une modification combinatoire des directions u et v de la surface afin d'obtenir le couplet (A_0, A_2) souhaité. Cette rotation est commandée par une valeur indexe numérotée de 0 à 3. Le chiffre indique le nombre de rotations du couplet (A_0, A_2) (Figure 5.5).

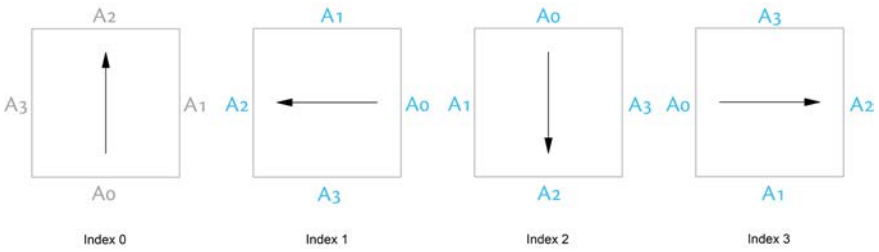
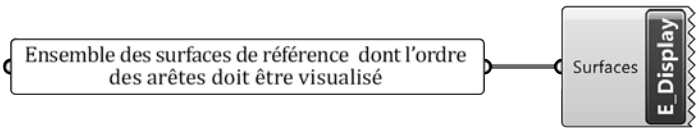


Figure 5.5 - Présentation des quatre possibilités de rotation du couplet (A_0, A_2).

Ainsi, ce composant reçoit une liste de surfaces à laquelle est associée une liste d'index. Il en résulte une liste de surfaces avec l'ordre des arêtes nouvellement définies. Le composant « E_display » (Figure 5.6.b) permet d'afficher le numéro des arêtes.

a. « Adaptateur » de l'ordre des arêtes selon un index



b. « Visualisateur graphique » de l'ordre des arêtes

Figure 5.6 - Clusters d'orientation des surfaces de référence par la gestion de l'ordre des arêtes.

5.2. Les tables de plissage

Nous avons défini le plissage comme la diffusion d'un profil sur une sur face de référence. Bien que d'un point de vue théorique cette diffusion corresponde à la juxtaposition d'une infinité de profils, ce processus peut être discrétisé en un nombre limité de profils. Pour notre outil, nous avons fait le choix de travailler avec deux profils par surface de référence. Ce choix s'explique par deux raisons. L'une s'appuie sur les arêtes (A_0) et (A_2) définies dans le domaine théorique de la surface de référence. L'autre dépend du fait que nous souhaitons générer une morphologie de plissage composée d'éléments plans. Ainsi, la diffusion du profil exercée entre deux arêtes opposées est limitée à une variation linéaire, c'est-à-dire à la connaissance de deux états qui sont les états extrêmes.

Dans l'outil CARA(s)PACE, le plissage est donc caractérisé par deux profils (P_0) et (P_2) rattachés respectivement aux arêtes (A_0) et (A_2) de la surface de référence. Une table de plissage contient ces deux profils nécessaires à la création d'un plissage :

Table (T) Rattachée à la Surface de référence	Profil (P_0) Rattaché à (A_0)
	Profil (P_2) Rattaché à (A_2)

Tableau 5.1 - Table de plissage (T). La caractérisation des profils ainsi que la création des listes de tables sont décrites dans les sous-sections suivantes.

5.2.a. La caractérisation des profils

Chaque profil est défini par une polyligne dont le repère de référence coïncide avec l'origine de l'arête. Les sommets de ces polylignes sont décrits par un vecteur à trois composantes : l'intervalle, l'amplitude et le décalage. Ce triplet de valeurs correspond aux coordonnées du vecteur de référence $(\vec{R})$ de chaque sommet.

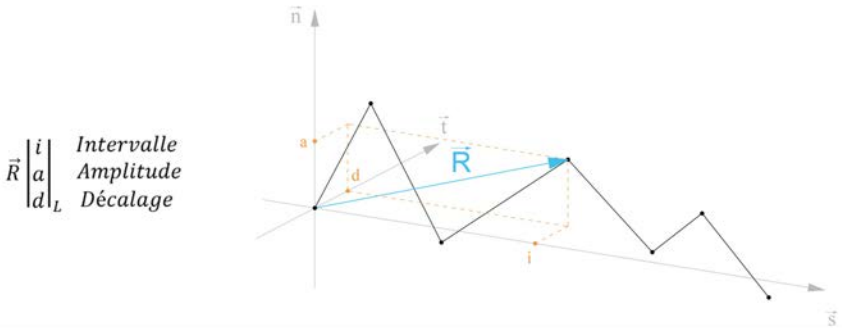


Figure 5.7 - Caractérisation d'un sommet du profil par le vecteur $(\vec{R})$.

Un profil (P) correspond donc à une liste de vecteurs ($\vec{R}$) désignant la position de chacun de ses sommets :

Tableau 5.2 - Caractérisation d'un profil.

Profil (P)	$\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots, \vec{R}_n$

5.2.a.1. Les grandeurs du profil

Les composantes de chaque vecteur ($\vec{R}$) définissent les grandeurs du profil ; elles correspondent à la fréquence, à l'ondulation et au balancement du profil. Elles sont définies sous la forme de listes contenant respectivement les valeurs des intervalles, des amplitudes et des décalages. Elles sont caractérisées ci-dessous :

– **La fréquence** : les valeurs des intervalles sont définies dans un domaine [0 ; 1] correspondant à la longueur de l'arête dans le repère théorique de la surface de référence. Le choix de cette méthode a été guidé par la volonté de simplifier la création et la modification éventuelle des tables de plissage. Pour atteindre cet objectif, la création des tables de plissage doit être indépendante des surfaces de référence. Par conséquent, le concepteur détermine un nombre d'intervalles voulus. Grâce aux composants d'aide à la création de liste, la valeur des intervalles est soit identique (composant « Regular_Inter », (Figure 5.8.a)), soit aléatoire (composant « Random_Inter », (Figure 5.8.b)). Toutefois, si le concepteur connaît la longueur réelle de l'arête, il peut la décomposer en une liste de valeurs d'intervalles réelles. Celles-ci sont rapportées dans le domaine [0 ; 1] par le composant « Exact_Inter » (Figure 5.8.c).

a. « Générateur » d'intervalles réguliers

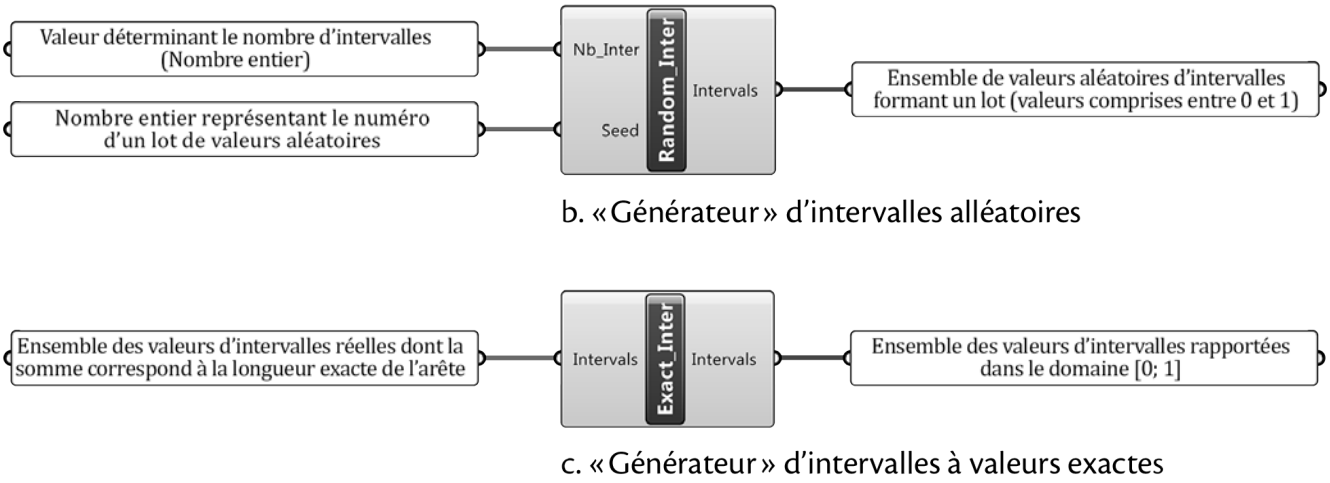


Figure 5.8 - Clusters de génération des valeurs d'intervalles.

– **L'ondulation** : Les valeurs des amplitudes sont données en vraie grandeur. C'est-à-dire qu'elles correspondent à l'échelle de dessin de la surface de référence. Pour définir ces valeurs, on utilise la même logique de composants. Le concepteur peut paramétrer une liste de valeurs exactes ou s'aider de composants de création de liste. Nous en proposons deux : le « Regular_Ampli » (Figure 5.9.a) et le « Random_Ampli » (Figure 5.9.b). Ces deux composants ont besoin d'une valeur d'amplitude minimale et maximale permettant de limiter le champ des valeurs. Une troisième donnée, correspondant au nombre d'intervalles, est nécessaire afin d'obtenir le compte exact d'amplitudes.

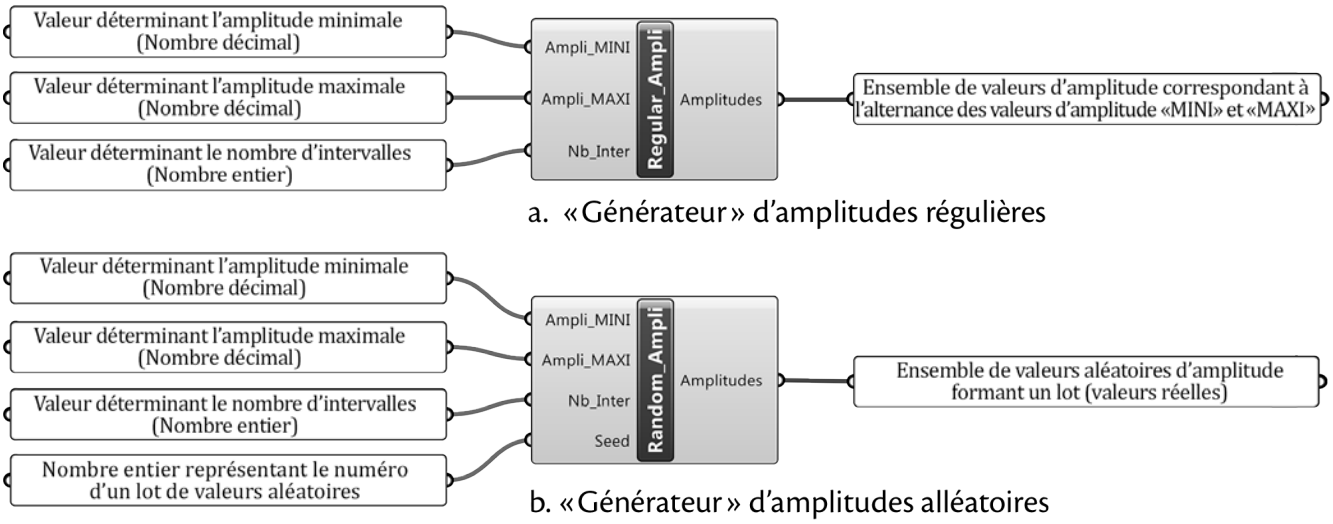


Figure 5.9 - Clusters de génération des valeurs d'amplitudes.

– **Le balancement** : le balancement d'un profil peut intervenir, dans notre processus de conception, lors d'une jonction de deux plissages, voire de l'adaptation d'une extrémité du plissage à une forme quelconque. La caractérisation de ces valeurs de décalage, au stade de la conception du profil, nous semble prématurée. En effet, il est difficile pour le concepteur d'anticiper le résultat d'un balancement du profil sur une arête curviligne de la surface de référence. Un travail complémentaire pourra être mené sur ce sujet. Pour l'instant, nous avons limité le profil initial à un balancement nul.

5.2.a.2. La génération des profils

Cette étape consiste à définir les profils du plissage sous la forme de listes de triplets. Ces derniers contiennent les valeurs d'intervalles, d'amplitudes et, par défaut, les valeurs nulles du décalage de chaque sommet du profil. Ces listes de triplets sont réalisées par les composants « G_Profil » et « P_Profil » (Figure 5.10) :

a. « Générateur » de profils

b. « Générateur graphique » de profils

Figure 5.10 - Clusters de génération des profils du plissage.

– Le composant « G_Profil » rassemble les listes d'intervalles et d'amplitudes spécifiées précédemment. Ce regroupement s'effectue selon un ensemble de conditions indispensables au bon fonctionnement de l'outil. La première dépend des données d'entrées. S'il n'existe aucune donnée d'entrées ou si elles sont partielles, le composant définit un profil par défaut qui représente « un pli ». Deuxièmement, le nombre des intervalles et celui des amplitudes doit être équivalent. Le composant réduit les listes par rapport à la valeur minimale comptabilisée. Troisièmement, la liste des inter-

valles commence toujours avec la valeur « 0 » et se termine avec la valeur « 1 » correspondant aux bornes du domaine de la surface de référence :

Profil (P)	$\vec{R}_1(0, a_1, d_1), \vec{R}_2(i_2, a_2, d_2), \ldots, \vec{R}_n(1, a_n, d_n)$

Par défaut, $d_n = 0$

Tableau 5.3 - Caractérisation d'un profil selon les composantes du vecteur $(\vec{R})$.

Pour une simplification du traitement des données, nous avons souhaité éviter des valeurs d'intervalles négatives. Une valeur négative intervient lors d'un pli de recouvrement si cette donnée est traduite en coordonnée relative (Figure 5.11.a). Afin d'éviter ce phénomène, les valeurs a d'intervalles sont retranscrites selon leurs coordonnées absolues (Figure 5.11.b).

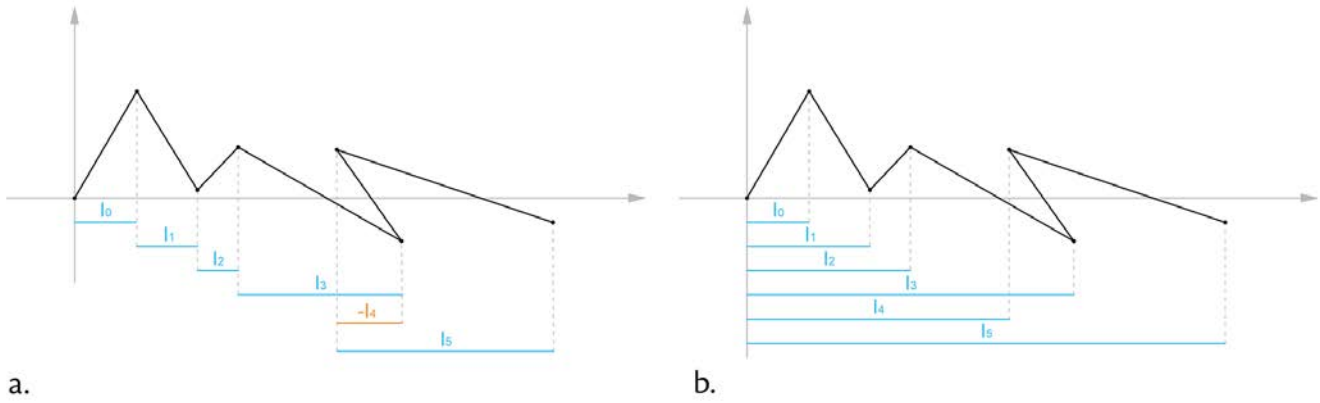


Figure 5.11 - Retranscription des valeurs d'intervalles : a. selon les coordonnées relatives ; b. selon les coordonnées absolues.

– Le composant « P_Profil » se base sur une méthode graphique. En effet, il utilise une polyligne 2D comme donnée d'entrée[3]. La polyligne présente plusieurs intérêts. Du point de vue du composant, elle représente un ensemble de sommets ordonnés faciles à traduire en une liste de valeurs. Ces dernières sont relevées sur les axes (X) et (Y) du repère global dans lequel la polyligne a été dessinée lorsque l'origine du repère se situe sur le premier point

[3] Si la polyligne est définie en 3D, il faudrait alors définir son plan moyen ou une surface curviligne moyenne afin de caractériser les décalages.

de la polyligne[4] (Figure 5.12). La somme des intervalles sur l'axe (X) est rapportée au domaine de référence [0 ; 1]. Cette remarque est importante puisque nous considérons que le plissage s'effectue sur la totalité de la surface de référence. Les amplitudes correspondent aux valeurs définies sur l'axe (Y) et les décalages sont nuls.

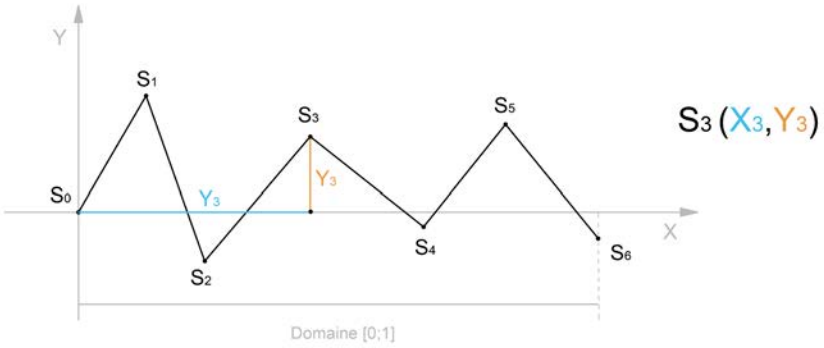


Figure 5.12 - Principe de relevé des coordonnées de chaque sommet de la polyligne.

Pour le concepteur, la polyligne est une représentation concrète du profil du plissage. La liberté de création d'une polyligne est importante. Elle peut être dessinée directement dans l'environnement numérique ou bien elle résulte d'une logique mathématique d'une série connue. Par exemple, la polyligne peut être définie par la discrétisation d'une fonction mathématique de type sinusoïde. On peut également imaginer le profil comme un fragment d'une onde acoustique… Ces vastes limites laissent au concepteur une entière liberté dans la création de profils.

5.2.b. Les listes de tables

Cette nouvelle étape consiste à générer une liste de tables de plissage en regroupant deux à deux les profils attribués à une surface. Elle est générée par le composant « G_Table » (Figure 5.13). Ce composant reçoit deux listes de profils. Chacune de ces listes est rattachée respectivement aux arêtes (A_0) et (A_2) des surfaces de références. Dans cette étape, une condition est également nécessaire au bon déroulement du processus : les deux profils destinés à une même surface de référence doivent posséder le même nombre de vecteurs ($\vec{R}$). Dans le cas où l'une des deux listes disposerait de vecteurs supplémentaires, le composant procéderait à un retrait des excédentaires.

[4] Dans le cas contraire, le composant repositionne automatiquement la polyligne.

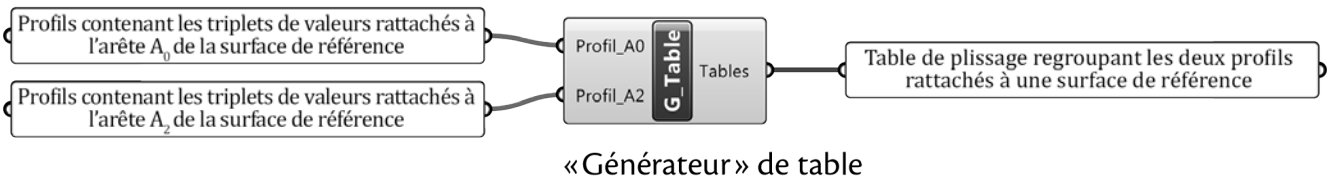


Figure 5.13 - C luster de génération des tables du plissage.

On obtient ainsi la liste de tables de plissage suivantes :

Tableau 5.4 - Tables de plissage.

T_1	P_0	$\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots, \vec{R}_n$
	P_2	$\vec{R}_1, \vec{R}_2, \dots, \vec{R}_n$
T_2	P_0	$\vec{R}_1, \dots, \vec{R}_k$
	P_2	$\vec{R}_1, \dots, \vec{R}_k$
T_i	P_0	$\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \dots, \vec{R}_m$
	P_2	$\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3, \dots, \vec{R}_m$

5.2.b.1. Notion de « vecteur de déplacement »

Lors d'une jonction de plissage ou de l'adaptation de l'extrémité du plissage avec une forme quelconque, les profils du plissage sont indubitablement modifiés. Le déplacement des sommets de ces profils entraîne une correction des valeurs d'intervalles, d'amplitudes et de décalage. De plus, lors d'une jonction de deux plissages, les tables correspondantes seraient inévitablement différentes bien que les deux nouveaux profils seraient morphologiquement identiques. En effet, chaque profil étant rattaché à une arête d'une surface, le travail de requalification des valeurs de chaque table dépend du référentiel de la surface qui leur est associée.

Pour des raisons pratiques et pour faciliter la mémorisation des états antérieurs, nous avons au moins maintenu constantes les valeurs d'intervalles et d'amplitudes tout au long du processus de conception. C'est pourquoi, dans la suite du travail, nous avons défini un vecteur ($\vec{P}$) de positionnement des sommets comme la somme du vecteur de référence ($\vec{R}$) et d'un vecteur décalage ($\vec{D}$) :

– Le vecteur de référence ($\vec{R}$) : les coordonnées d'intervalles et d'amplitudes sont constantes tout au long du processus et la valeur de décalage est considérée comme nulle. Il définit, dans le repère local (L), un profil « initial » de référence.

– Le vecteur décalage ($\vec{D}$) : il matérialise, dans le repère global (G), le « déplacement » des sommets entre le profil initial et celui nouvellement créé.

$$\vec{P} = \vec{R} + \vec{D} \qquad \vec{P}\begin{vmatrix} I \\ A \\ D \end{vmatrix}_G = \vec{R}\begin{vmatrix} i \\ a \\ 0 \end{vmatrix}_L + \vec{D}\begin{vmatrix} Dx \\ Dy \\ Dz \end{vmatrix}_G$$

Par conséquent, dans la suite du mémoire, les tables de plissage sont définies de la manière suivante :

Tableau 5.5 - Table de plissage. Le vecteur P est passé de trois composantes indépendantes à six composantes dépendantes.

T_i	P_0	$\vec{R}_1+\vec{D}_1$, $\vec{R}_2+\vec{D}_2$, ... , $\vec{R}_n+\vec{D}_n$
	P_2	$\vec{R}_1+\vec{D}_1$, $\vec{R}_2+\vec{D}_2$, ... , $\vec{R}_n+\vec{D}_n$

5.2.c. Opérations sur les tables de plissage

Par souci de travailler dans un esprit de généricité, l'outil CARA(s)PACE propose un ensemble d'opérateurs permettant de modifier, selon les besoins, les paramètres des tables avant la création du plissage.
Afin que le concepteur puisse utiliser un opérateur natif de *Grasshopper®* pour multiplier les valeurs d'une liste, nous permettons différentes actions sur les composantes des tables de plissages comme l'addition ou la fusion. Pour augmenter le potentiel de créativité, on pourra imaginer d'autres opérateurs comme la multiplication non linéaire des amplitudes ou encore la rotation, voire la symétrie d'un profil.

De manière générale, ces opérateurs agissent sur les données de l'intervalle, de l'amplitude et du décalage (vecteur déplacement) d'un profil.

5.3. La visualisation géométrique

À ce stade du processus de conception, nous disposons d'une liste de surfaces de références préalablement traitée, ainsi que d'une liste de table de plissage. Afin de traduire ces données numériques sous une forme géométrique plissée, un opérateur de dessin a été réalisé. Il se présente sous le composant « Display_Pleating » (Figure 5.14).

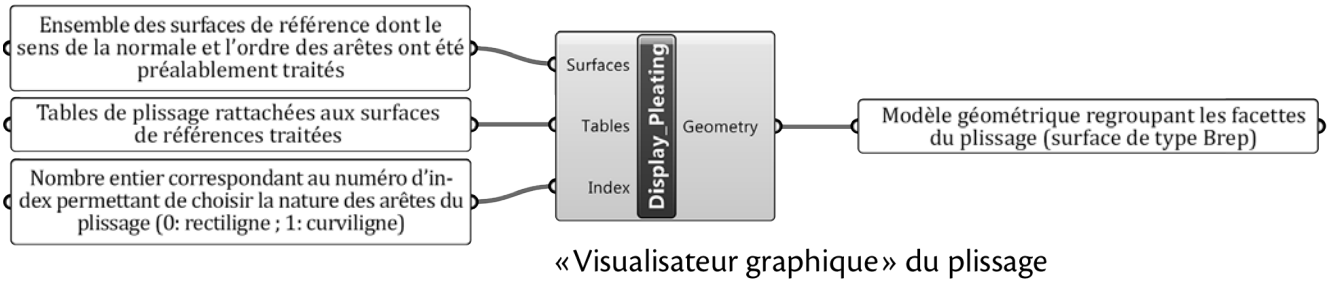


Figure 5.14 - Cluster de génération de la géométrie du plissage.

Ce composant associe une surface de référence à une table contenant les deux profils de plissage. Tout d'abord, il récupère les données de la surface de référence : le sens de la normale correspondant au sens positif des amplitudes et l'orientation des arêtes de la surface permettant de reconnaître l'arête (A_0) et l'arête (A_2). Ensuite, le composant distingue les deux profils de la table associée à la surface. Cette distinction s'effectue grâce au numéro d'index des listes. Par exemple, la première surface est associée à la première table. De manière identique, le premier profil contenu dans la table est associé à la première arête de la surface de référence (A_0) et ainsi de suite. Une fois que le composant dispose de toutes ces données, la construction géométrique du plissage peut s'effectuer. Elle est réalisée en deux étapes : la matérialisation du profil puis celle des facettes.

5.3.a. Matérialisation du profil

La matérialisation du profil consiste à positionner les sommets des profils sur les deux arêtes de la surface de référence. Cette opération est réalisée grâce à la somme des vecteurs $(\vec{R})$ et $(\vec{D})$. Le positionnement des sommets s'effectue donc en deux temps.

Tout d'abord, nous définissons les sommets du profil initial à l'aide des coordonnées du vecteur ($\vec{R}$) (Figure 5.15). Celles-ci sont spécifiées dans le repère local de la surface :

– la coordonnée (i) correspond à l'abscisse curviligne absolue liée au repère local de la surface de référence et définie dans un domaine (0 ; 1). Afin d'associer ces valeurs d'intervalles aux arêtes respectives (A_0) et (A_2), nous nous référons au repère théorique de la surface de référence. Dans ce repère, (A_0) correspond à l'ensemble des points d'abscisse du domaine de référence pour une ordonnée égale à « 0 ». De la même manière, (A_2) est définie pour une ordonnée constante et égale à « 1 ». Ainsi, nous pouvons définir l'origine (O_L) du repère local :

Pour (A_0), on a O_L (i_0, 0)
Pour (A_2), on a O_L (i_2, 1)

– la coordonnée (a) est donnée suivant la normale du repère local de la surface au point d'abscisse considéré. Leurs valeurs sont données en grandeur réelle.

Ensuite, nous définissons les sommets du profil final. Dans le repère global de la surface, nous appliquons les vecteurs décalages ($\vec{D}$) sur les sommets des profils initialement créés[5] (Figure 5.16.b).

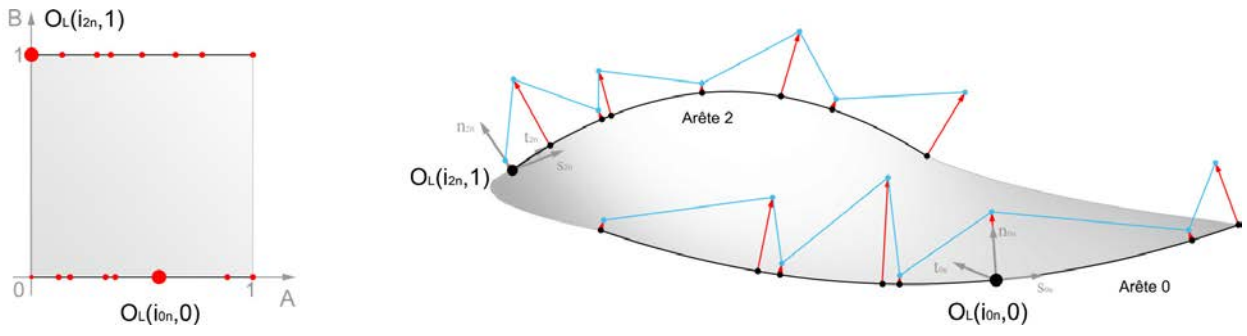


Figure 5.15 - Matérialisation du profil initial.

[5] Pour généraliser le problème en vue de possibilité future sur le travail des tables, nous avons considéré qu'il peut exister un vecteur déplacement non nul avant l'étape de jonction.

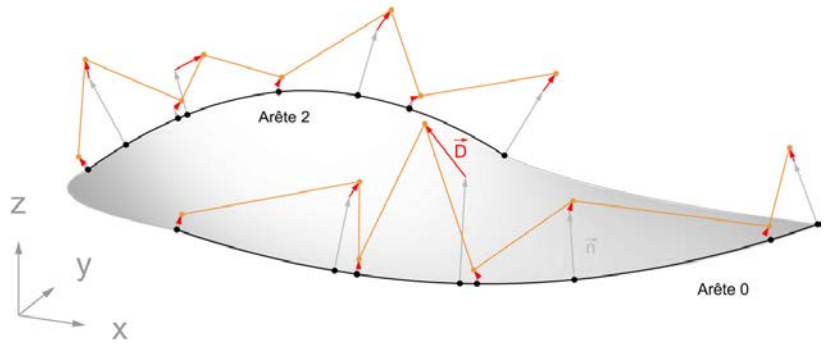


Figure 5.16 - Matérialisation du profil secondaire.

5.3.b. Matérialisation des facettes

Cette phase consiste à créer les arêtes du plissage en reliant les sommets des deux profils précédemment définis. Dans un premier temps, nous avons opté pour des arêtes curvilignes afin qu'elles s'ajustent au mieux à la courbure de la surface de référence. Pour ce faire, nous travaillons dans le repère théorique de la surface. En effet, dans ce repère et indépendamment de la nature géométrique de la surface de référence, les arêtes du plissage correspondent à une ligne droite : la variation des intervalles, des amplitudes et du décalage est donc linéaire. Pour les retranscrire sur la surface de référence, ces arêtes doivent être définies en un nombre de points suffisant. Ce nombre coïncide avec le « degré de précision » défini par le concepteur.

Au moyen d'une table des proportions, nous pouvons définir les coordonnées de ces nouveaux points (Figure 5.17).

$$\text{Pour} \quad \vec{P} = (\vec{R} + \vec{D})$$

$$\text{On a} \quad \vec{P} = [(1-\alpha)\,\vec{R}_1 + \alpha\vec{R}_2] + [(1-\alpha)\vec{D}_1 + \alpha\vec{D}_2]$$

$$\text{Avec} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

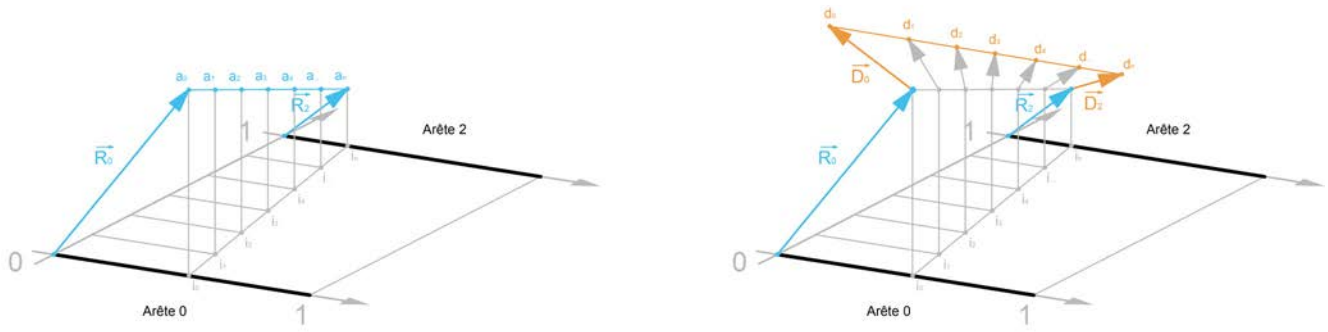
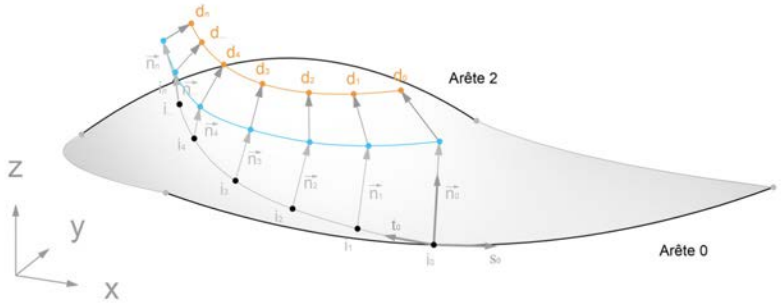


Figure 5.17 - Principe de la table de proportion dans le repère théorique.

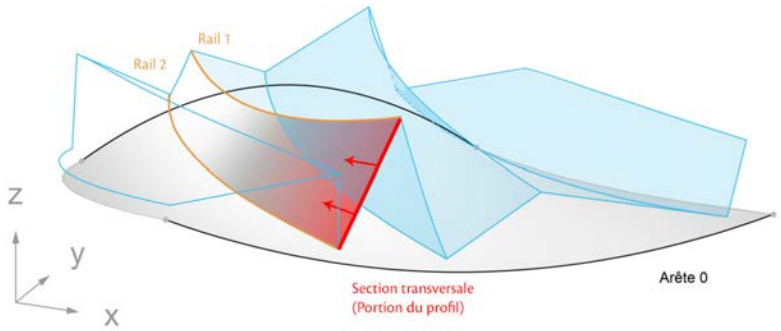
Ce nuage de point est ensuite reporté localement sur la surface de référence. Enfin, les arêtes curvilignes sont obtenues par une interpolation des points correspondant à une arête courbe de type « spline » avec un lissage de degré 3 (Figure 5.18).

Figure 5.18 - Matérialisation de l'arête sur la surface de référence.



Enfin, les facettes du plissage sont définies entre deux arêtes consécutives. Ces dernières constituent les deux « rails » nécessaires au balayage de la section transversale[6] correspondant à la portion de la polyligne définie entre deux sommets. Ainsi, la surface obtenue est du type « loft » linéaire (Figure 5.19).

Figure 5.19 - Matérialisation des facettes ; utilisation de la fonction « Sweep 2 rails ».



[6] Cf. la fonction « Sweep2 » dans l'environnement de *Rhinoceros*®.

À ce stade du processus, le concepteur peut choisir la nature géométrique des arêtes entre courbe ou droite. Cette option offre un premier rapprochement avec la morphologie des panneaux en bois. Dans cette situation, le composant relie deux à deux les sommets de chaque profil : la courbure de la surface de référence, selon la direction de l'orientation, n'a plus d'impact sur la morphologie du plissage (Figure 5.20.a). Ainsi, lorsque cette courbure est trop importante, l'amplitude des plis est fortement impactée ; il est alors intéressant de décomposer cette surface en plusieurs nouvelles surfaces de références afin d'éviter des écarts trop importants (Figure 5.20.b). Cette action est à l'origine de la création des brisis.

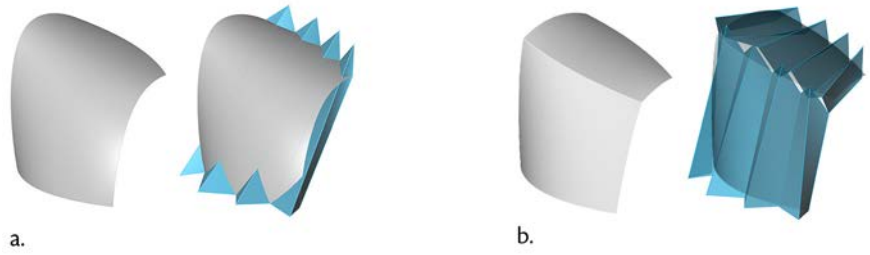


Figure 5.20 - Impact de la nature rectiligne ou curviligne des arêtes selon la morphologie de la surface de référence.

Les facettes du plissage forment l'enveloppe de référence du plissage et constituent une liste d'éléments géométriques utilisée comme données de sortie du composant « Display_Pleating ».

Il est nécessaire de préciser que les facettes obtenues présentent, sauf cas géométriques particuliers, une surface curviligne. Ainsi, un second rapprochement avec la géométrie des panneaux en bois peut être effectué en restituant des facettes planes. Cette action est accomplie par le composant « Planar_Facets » (Figure 5.21).

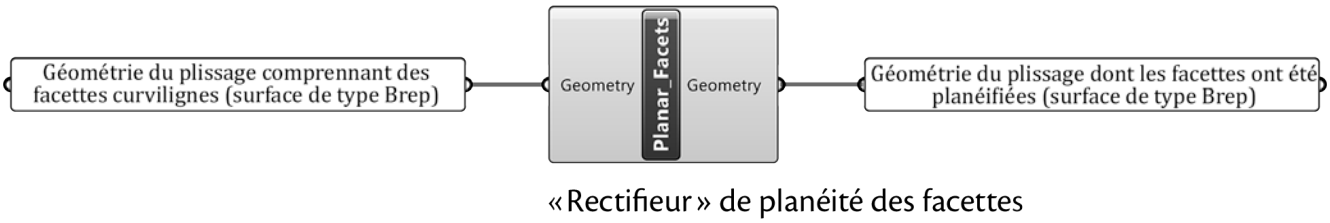


Figure 5.21 - Cluster de « rectification » de la surface des facettes du plissage.

Le procédé utilisé afin d'obtenir une facette plane, s'appuie sur l'unicité de la normale en tout point de la surface. Or, les facettes gauches disposent d'une normale ($\vec{n_i}$) différente à chacun de ses

quatre sommets. Ces quatre normales doivent concorder avec la normale unique de la future facette plane. Pour obtenir ce résultat, nous définissons une normale $(\vec{n})$ à la facette appliquée en son centre de gravité (G) et correspondant à la moyenne des normales $(\vec{n_i})$ (Figure 5.22).

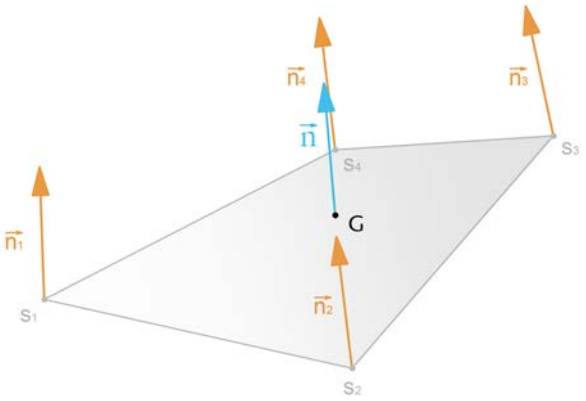


Figure 5.22 - Recherche de la normale moyenne de la facette.

Pour rendre les facettes planes, notre méthode consiste à déplacer ses sommets. Toutefois, ces derniers peuvent appartenir à plusieurs facettes. Ainsi, un sommet est pondéré d'un poids dont la valeur correspond au nombre de facettes qui lui est associé.
Afin de connaître le déplacement (a) d'un sommet (S) d'une facette, on réalise le produit scalaire entre $(\vec{n})$ et le vecteur $(\vec{v})$, $(\vec{v})$ étant défini entre le centre de gravité et le sommet étudié :

$$a = \vec{v}.\vec{n} = \|\vec{v}\| * \|\vec{n}\| * \cos(v,\vec{n})$$

Pour $\left\|\vec{n}\right\| = 1$ (normale unitaire de la facette), le produit scalaire correspond à la valeur de projection de $(\vec{v})$ sur $(\vec{n})$. Ainsi, on peut déduire la valeur du déplacement du sommet (S) dans la direction de la normale (Figure 5.23).

Nous avons $\vec{S} = a.\vec{n}$

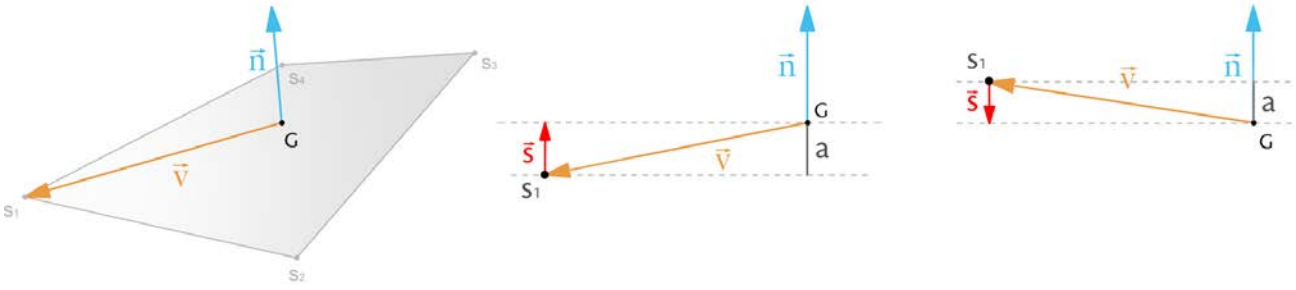


Figure 5.23 - Calcul du déplacement d'un sommet suivant la normale moyenne de la facette.

Sachant qu'un sommet peut être rattaché à un nombre (N_f) de facettes (maximum quatre), le déplacement final du sommet ($\overrightarrow{S_f}$) correspond à la moyenne des déplacements calculés pour ce sommet :

$$\overrightarrow{S_f} = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} \overrightarrow{S_i}}{N_f}$$

Cette étape est réalisée pour chaque sommet du plissage (Figure 5.24).

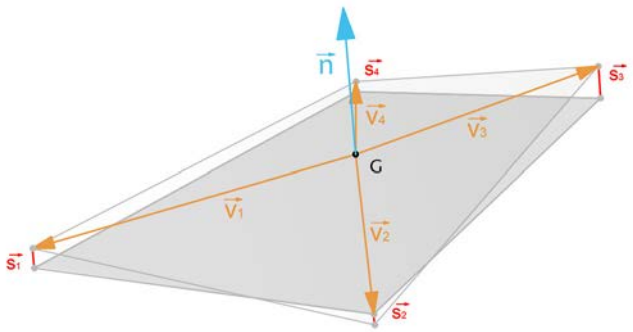


Figure 5.24 - Recherche de la planéité de la facette par le calcul du déplacement des sommets (S).

Théoriquement, la planéité des facettes est obtenue lorsque la valeur de déplacement des sommets est nulle. Dans le calcul numérique, cette valeur ne peut être qu'approchée. Sa précision dépend du nombre d'itérations effectuées pour le calcul de ($\overrightarrow{S_f}$). Pour cela, nous définissons une valeur résiduelle (Résidu) — égale à la somme des déplacements de tous les sommets — qui doit être inférieure à une valeur de précision (Précis) choisie par le concepteur :

$$\text{Résidu} = \sum \left\| \overrightarrow{S_f} \right\| < \text{Précis}$$

Tant que cette condition n'est pas vérifiée, il y a une itération du processus. Nous avons conscience que ce processus peut être long. Une des solutions envisagées consistera à « verrouiller » au fur et à mesure les facettes qui répondent au critère de planéité.

À la fin du processus, le composant génère de nouvelles facettes du plissage stockées sous la forme d'une liste.

5.4. La jonction du plissage

Cette fonction permet de relier deux plissages en modifiant l'un des profils de chacun de ces plissages afin de les confondre géométriquement. L'opération est réalisée par le composant « Link_Pleating » (Figure 5.25) dont la particularité consiste à modifier les vecteurs ($\vec{D}$) des profils à unir.

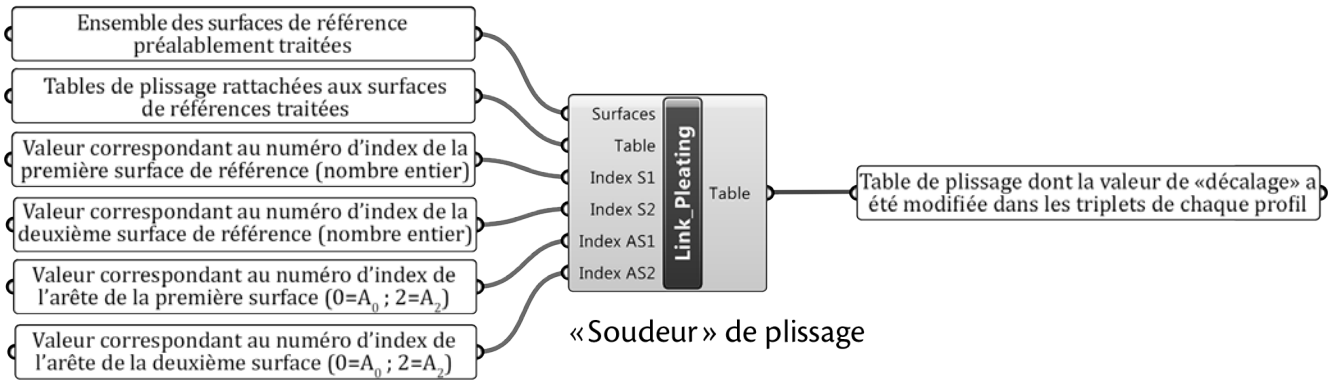


Figure 5.25 - Cluster de « jonction » du plissage.

Ce composant a la particularité de restituer des tables de plissages et non une géométrie. On peut ainsi préserver la liberté de travailler sur les tables avant de construire sa géométrie avec le composant « Display_Pleating ».

Pour entrées, le composant récupère la liste de surface, la liste des tables associées, ainsi qu'une série de paramètres spécifiés par le concepteur. Les deux premiers correspondent chacun à une liste d'index indiquant le numéro des surfaces de références des plissages qui devront être joints : le premier étant la liste d'index des surfaces initiales, le second étant une liste des surfaces associées. Les deux derniers paramètres spécifient le côté du plissage impliqué dans le processus de jonction en désignant le numéro d'arête correspondant au profil à modifier. Ainsi, le concepteur doit faire correspondre le numéro de l'arête considérée à chaque index de surface entrée dans le composant.

En ce qui concerne la méthode, nous commençons par mettre en rapport deux arêtes appartenant chacune à l'une des surfaces. Ainsi, nous obtenons quatre combinaisons possibles :

	Arête surface (S_1)	Arête surface (S_2)
1	A_0	A_0
2	A_0	A_2
3	A_2	A_0
4	A_2	A_2

Tableau 5.6 - Présentation des quatre possibilités de jonction de plissages par le choix des arêtes.

Lorsque toutes les données d'entrées sont renseignées, le composant reconstruit — selon le procédé implémenté dans le composant « Display_Pleating » — la partie géométrique nécessaire à chaque plissage pour générer le profil de jonction aussi appelé « ligne de brisis ».
Pour réaliser cela, la table de plissage de chaque surface doit présenter le même nombre de vecteurs ($\vec{P}$). Dans le cas contraire, la jonction ne peut pas avoir lieu ; le concepteur doit alors modifier les tables de plissage en amont.

La construction du profil de jonction peut varier selon les critères géométriques considérés. Une première solution consisterait à calculer la moyenne arithmétique entre sommets des deux profils. Cette méthode engendre des variations importantes de la morphologie des plissages initiaux (Figure 5.26.a). Nous avons donc opté pour une méthode moins évasive. Cette dernière permet de trouver un point moyen correspondant au milieu du segment le plus court reliant les deux arêtes des plis respectifs. Pour obtenir une plus grande précision du segment, nous générons une extension des arêtes. Le point (M) obtenu représente un des sommets du profil commun (Figure 5.26.b).
Bien que plus précise, cette deuxième méthode peut entraîner, en fonction de la nature curviligne des arêtes, des variations morphologiques importantes. En effet, l'extension d'une arête curviligne engendre facilement des approximations. D'une part, l'extension par l'équation de la courbe peut donner des résultats instables en dehors du domaine initial. D'autre part, l'extension par un segment ou un arc de cercle tangent à la courbe en son point d'extrémité peut se révéler trop approximative. À la suite de ces résultats, nous restreignons volontairement la recherche des sommets du profil de jonction par une comparaison entre des arêtes rectilignes.

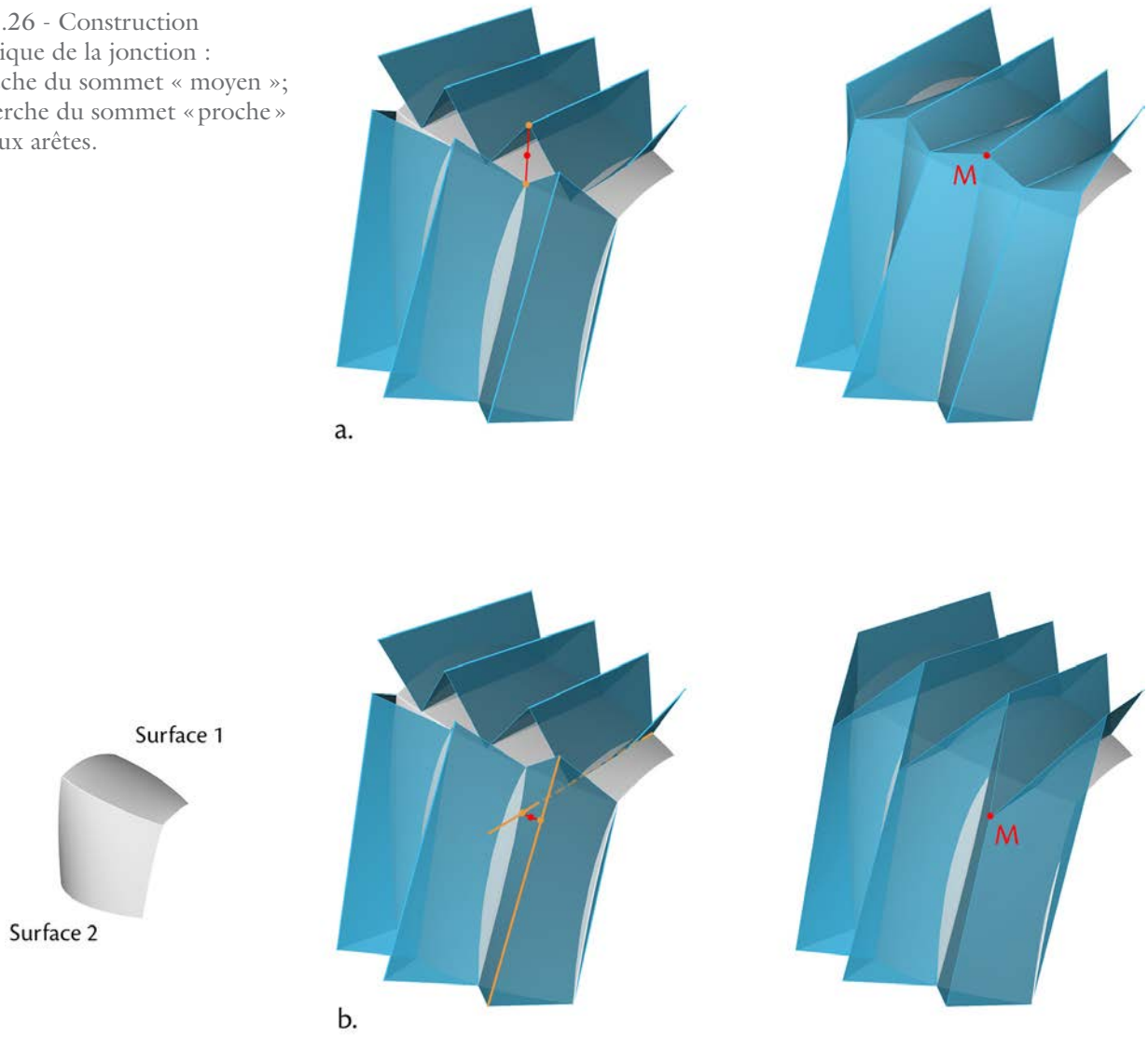


Figure 5.26 - Construction géométrique de la jonction :
a. Recheche du sommet « moyen »;
b. Recherche du sommet « proche » entre deux arêtes.

Le profil commun étant ainsi défini, il est donc essentiel de restituer les tables relatives aux nouvelles morphologies des plissages issus de cette jonction. Comme nous l'avons mentionné précédemment dans ce chapitre, nous souhaitons conserver les valeurs des intervalles et des amplitudes ; seul le vecteur $(\vec{D})$ est modifié. Il correspond au vecteur reliant les sommets du profil initial du plissage vers les sommets respectifs du profil de jonction. On a :

$$\vec{M} = \overrightarrow{P_1} = \overrightarrow{P_2}$$

Avec

$$\vec{M} = \overrightarrow{R_1}\begin{vmatrix} i_1 \\ a_1 \\ 0 \end{vmatrix}_{L_{A0}} + \overrightarrow{D_1}\begin{vmatrix} Dx_1 \\ Dy_1 \\ Dz_1 \end{vmatrix}_{G} = \overrightarrow{R_2}\begin{vmatrix} i_2 \\ a_2 \\ 0 \end{vmatrix}_{L_{A2}} + \overrightarrow{D_2}\begin{vmatrix} Dx_2 \\ Dy_2 \\ Dz_2 \end{vmatrix}_{G}$$

Nous soulignons un point particulier de ce dispositif. Dans le cas où un plissage possède un vecteur ($\vec{D}$) non nul avant l'opération de jonction, celui-ci est remplacé par le nouveau vecteur ($\vec{D}$) issue de l'opératon de jonction (Figure 5.27).

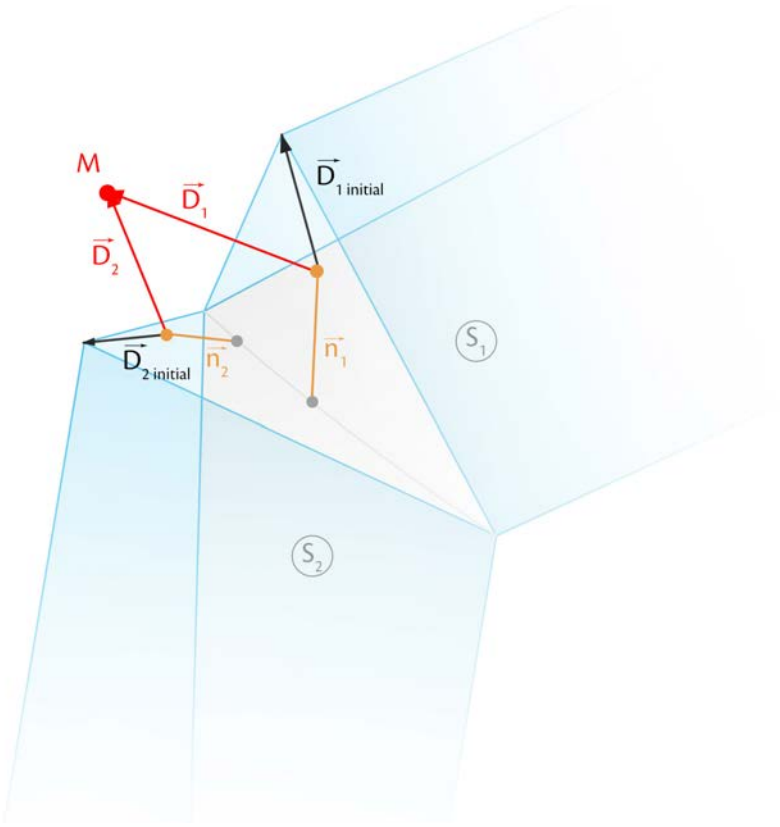


Figure 5.27 - Modificationduvecteur ($\vec{D}$) lors de la jonction de plissage.

Ainsi, les tables de plissage qui ressortent de ce composant ne présentent qu'une éventuelle variation du vecteur déplacement.

5.5. Les éléments singuliers

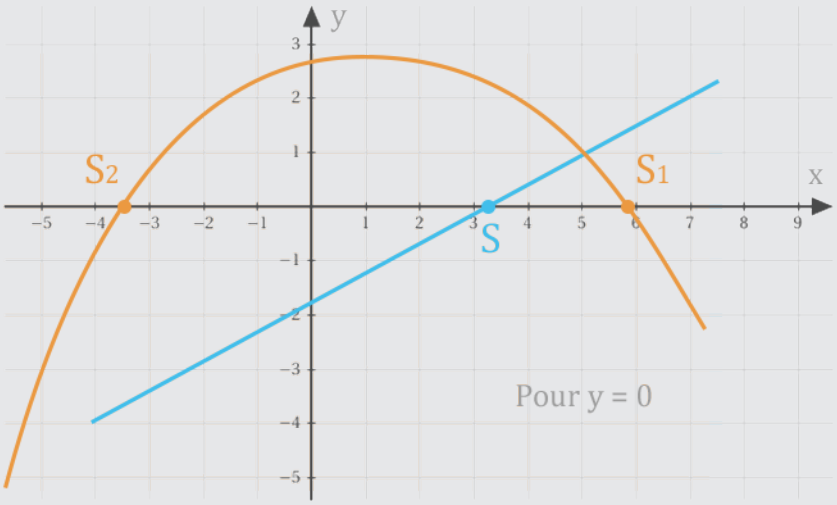
Les éléments singuliers représentent une modification de facette ou l'ajout d'un élément connexe. Actuellement, ces opérations dépendent exclusivement d'actions manuelles entreprises par le concepteur. À ce stade de la méthode, elles sont menées dès lors qu'elles sont liées à un processus d'évaluation. Par exemple, la création d'une baie, l'ajustement des bords du plissage ou l'ajout d'un renfort doivent être évalués structurellement. Pour les autres opérations, la modélisation peut intervenir à la fin de la phase de matérialisation.

Actuellement, quelques précautions d'usage sont indispensables, notamment la modification d'une facette ; celle-ci nécessite une attention particulière dans la manipulation des listes. En effet, la facette transformée doit être repositionnée dans la liste selon son index initial.

Un ensemble de composants pourra être pensé. Nous travaillons actuellement sur l'adaptation d'un plissage par rapport à une surface quelconque. Ce travail se base sur un composant déjà développé permettant d'accommoder l'extrémité d'un plissage sur une surface plane (adaptation au sol). Un autre composant encore est à l'étude et permettra de gérer la création automatique de baies.

Les possibilités sont variées et ne peuvent qu'enrichir l'outil.

OBSERVATIONS : Le travail mené jusqu'à présent a été réalisé dans un espace curviligne. Il est bien évident que cette prise de position peut aboutir, parfois, à des aberrations géométriques. En effet, contrairement au domaine linéaire qui présente une solution unique à un problème donné, il peut exister plusieurs solutions à ce même problème dans un espace curviligne. Nous pouvons illustrer simplement nos propos par la recherche de la solution qui annule une équation. Dans le repère ci-dessous, nous représentons une fonction linéaire et une courbe. La première présente un résultat unique alors que la seconde a potentiellement deux solutions. Dans cette situation nous considérons celle qui semble la moins éloignée de notre questionnement de départ.



Bien que nous cherchions à travailler actuellement avec des panneaux plans, nous avons tout de même fait ce choix de développer notre travail dans l'espace curviligne. En effet, nous souhaitons garder un large éventail des possibilités d'action de notre outil dans la perspective de développements futurs.

Chapitre 6

La matérialisation

La phase de matérialisation se présente sous la forme d'une suite d'opérations destinées à transformer « l'entité surfacique » représentée par la « facette » en une « entité volumique » appelée « élément ».
Cette expression de la volumétrie par une mise en épaisseur ne traduit pas à elle seule la notion de matérialisation. En effet, la phase de matérialisation doit permettre au concepteur de se consacrer aux préoccupations architecturales et matérielles attenantes aux caractéristiques constructives. Il est donc primordial de traiter la notion de jonction entre éléments ; cela se traduit par deux étapes supplémentaires correspondant respectivement à la gestion des nœuds et à la définition des assemblages.

Dans l'outil CARA(s)PACE, chaque étape de la matérialisation permet d'affiner la géométrie de l'élément de manière à ce qu'elle soit exploitable pour la phase de FAO.

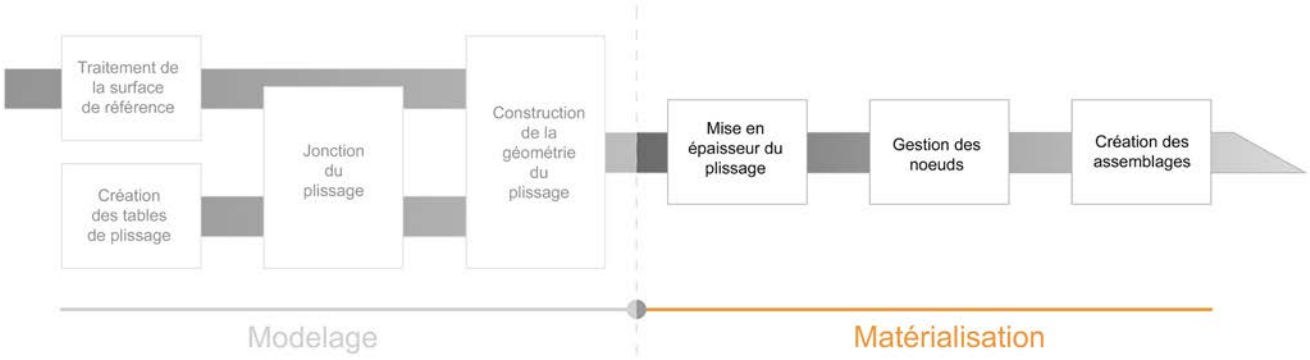


Figure 6.1 - Présentation chronologique des différentes étapes de la phase de matérialisation.

6.1. La mise en épaisseur

La mise en épaisseur est la première étape de création de l'entité volumique. Elle consiste, à partir de la surface plissée, à définir la troisième dimension relative à une quantité de matière ou à une portion d'espace envisagée.

La géométrisation des éléments s'effectue par la génération des deux surfaces externes de l'enveloppe du plissage dépendant de la surface plissée de référence. Dans un premier temps, nous avons considéré la facette comme la surface moyenne de référence pour la mise en épaisseur. Ainsi, la dimension de l'épaisseur (e) est répartie « au-dessus » et « en dessous » de cette facette.

La méthode employée consiste à diviser une entité (nœud, arête, surface…) en deux entités distinctes. Celles-ci sont positionnées selon une valeur (P) suivant la direction de la normale ($\vec{n}$) de la facette. L'écart dimensionnel entre (P_1) et (P_2) correspond à l'épaisseur (e) définie par le concepteur (Figure 6.2).

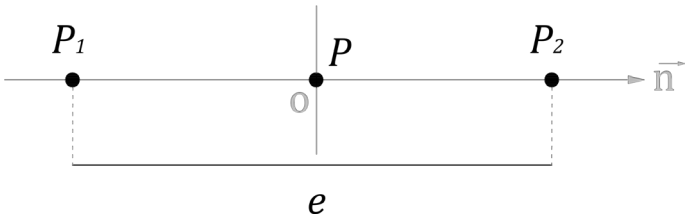


Figure 6.2 - Principe de décomposition de l'entité (E) selon l'épaisseur (e) définie par le concepteur.

Avec $P_2 - P_1 = e$

Mathématiquement, une coque physique est déterminée par sa surface moyenne. Cependant, d'un point de vue architectural, la surface de référence peut être la surface externe de l'enveloppe ou encore la surface interne. Pour cette raison, nous avons introduit une valeur de décalage (d) permettant de choisir la position de la facette de référence :

En postulant que $\overrightarrow{P_1} = \left(\frac{d-1}{2}\right)e$

– Avec $d = 1$, alors la facette de référence correspond à la « surface interne » de l'enveloppe.

– Avec d = -1, alors la facette de référence correspond à la « surface externe » de l'enveloppe.

–Avec d = 0, alors la facette de référence représentante la « surface moyenne » de l'enveloppe.

Ainsi,

Pour d = 1	Pour d = -1	Pour d = 0
$P_1 = 0$ et $P_2 = e$	$P_1 = -e$ et $P_2 = 0$	$P_1 = \frac{-e}{2}$ et $P_2 = \frac{e}{2}$

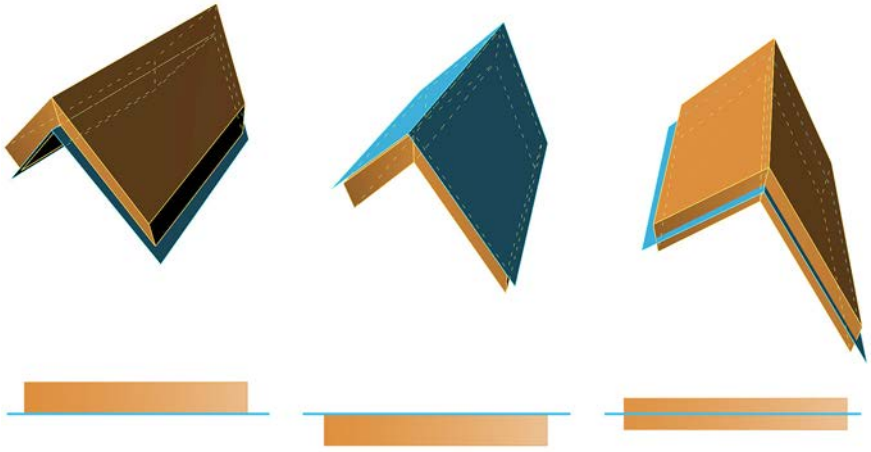


Figure 6.3 - Position de la facette de référence par rapport à l'élément selon la valeur de décalage (d).

Lorsque d <-1 ou d >1, la facette de référence se retrouve détachée de la volumétrie de l'élément créé. Actuellement, les possibilités géométriques engendrées par cette situation n'ont pas été quantifiées. Nous avons préféré « brider » la valeur de décalage (d) au domaine [-1 ; 1] pour des raisons pratiques ; toutefois une réflexion ultérieure pourra être menée à ce sujet.

La méthode que nous venons de présenter a permis la création d'éléments suivant deux procédés différents (détaillés dans les prochaines sous-sections) :

– La création d'éléments par le décalage des nœuds : il consiste à définir la position des nœuds du futur élément permettant de construire ses arêtes, puis ses faces. La particularité de ce procédé réside dans la création d'éléments à épaisseur variable.

– La création d'éléments par le décalage des surfaces : ce deuxième procédé assure une épaisseur constante de l'élément, mais présente des complications géométriques au niveau des nœuds.

À ce stade de la matérialisation, la définition géométrique des éléments nécessite un questionnement sur la jonction de ces éléments au sein de l'enveloppe plissée. Pour que la géométrie de l'enveloppe plissée puisse être exploitable dès l'étape de la mise en épaisseur des facettes, nous avons prédéfini pour les deux procédés cités précédemment, un « assemblage par défaut » sous la forme d'une coupe d'onglet (Figure 6.4).

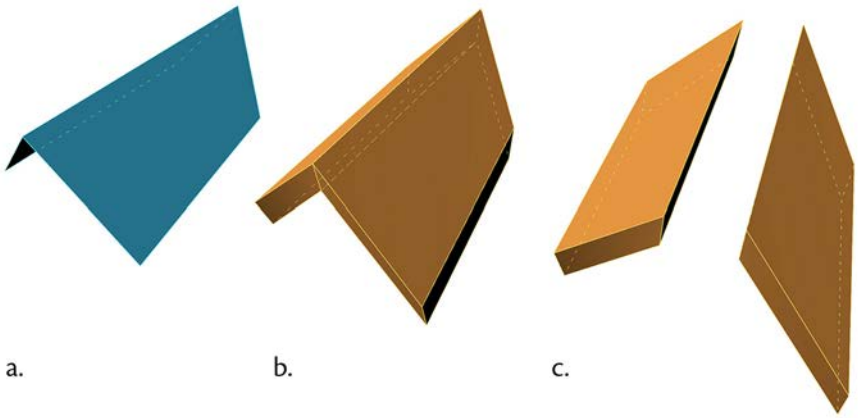


Figure 6.4 - Transformation des facettes de la surface plissée de référence en éléments de l'enveloppe plissée :
a. facettes ;
b. éléments assemblés ;
c. éléments dissociés le long de la coupe d'onglet.

Ce choix d'assemblage garantit des entités volumiques composées exclusivement de surfaces à quatre nœuds (hors éléments singuliers) et facilite le traitement des étapes ultérieures de la matérialisation.

Bien que nous nous orientions vers une géométrie adaptée à des panneaux plans, nous souhaitons également que notre méthode s'étende aux facettes curvilignes. Nous sommes conscients que cette réflexion peut nous éloigner a priori de notre sujet ; toutefois, nous estimons que cette méthode plus généralisée (englobant à la fois les panneaux curvilignes et les panneaux plans) facilite des perspectives de développement, notamment dans le domaine des panneaux précontraints.

6.1.a. Cas de l'épaisseur variable

Pour les mêmes raisons qui nous ont conduits à développer le processus de matérialisation sur des facettes curvilignes, nous nous laissons la liberté de définir géométriquement des éléments du plissage avec une épaisseur variable. Il semble évident que la fabrication de tels panneaux de bois massif peut s'avérer onéreuse. Cependant,

nous sommes persuadés que cette géométrie à épaisseur variable s'associe parfaitement à la préfabrication de panneau de type « composants »[1] et pourra faire l'objet de futures investigations.

La mise en épaisseur variable est effectuée par le composant « V_Thickness » (Figure 6.5). La méthode implémentée dans ce composant consiste à déterminer la position des nouveaux nœuds qui caractérisent la géométrie de l'enveloppe plissée. En fonction de la nature rectiligne ou curviligne des arêtes et de l'aspect plan ou gauche des facettes, la méthode varie sensiblement.

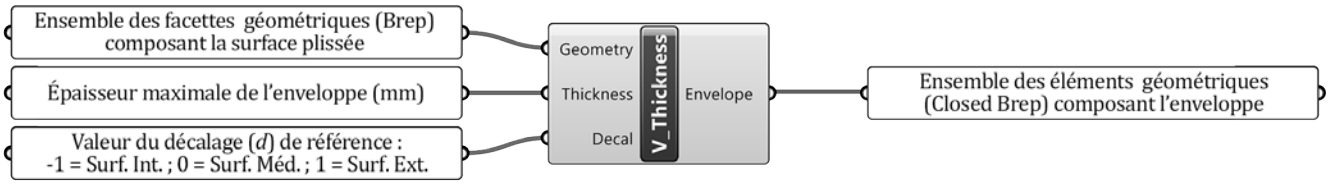


Figure 6.5 - Cluster du traitement de l'épaisseur par duplication et décalage des nœuds.

Dans le cas de facettes planes aux arêtes rectilignes, nous définissons une direction de translation de chacun des nœuds de la surface de plissage de référence. Cette direction est matérialisée par un vecteur ($\vec{S}$) égal à la somme des vecteurs normaux pour chaque facette qui présente un sommet appartenant à un même nœud (Figure 6.6).

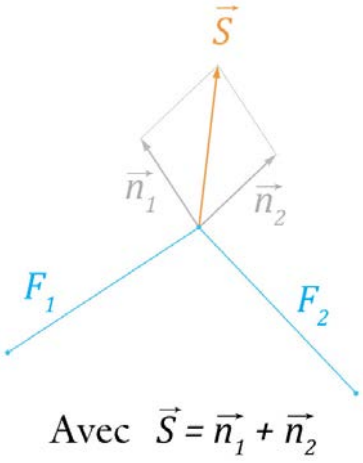
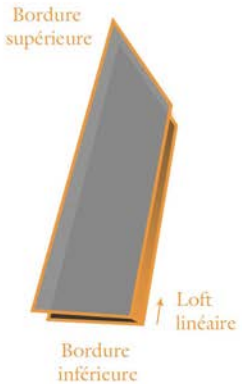


Figure 6.6 - Recherche de la direction de déplacement d'un nœud.

[1] Cf. sous-section «2.2.b. Les panneaux de bois», p85.

Lorsque le vecteur ($\vec{S}$), rendu unitaire, est établi pour chaque nœud, les valeurs de translation (P_1) et (P_2) sont appliquées. Elles déterminent la position[2] des nœuds de l'enveloppe plissée (Figure 6.7.b).

Enfin, les nœuds caractérisant l'enveloppe plissée sont reliés de manière à créer la géométrie des éléments qui la composent : les arêtes ainsi construites permettent de générer les faces supérieures et inférieures des éléments avant de créer une surface entre les bords de ces deux faces (« loft » linéaire). (Figure 6.7.c).



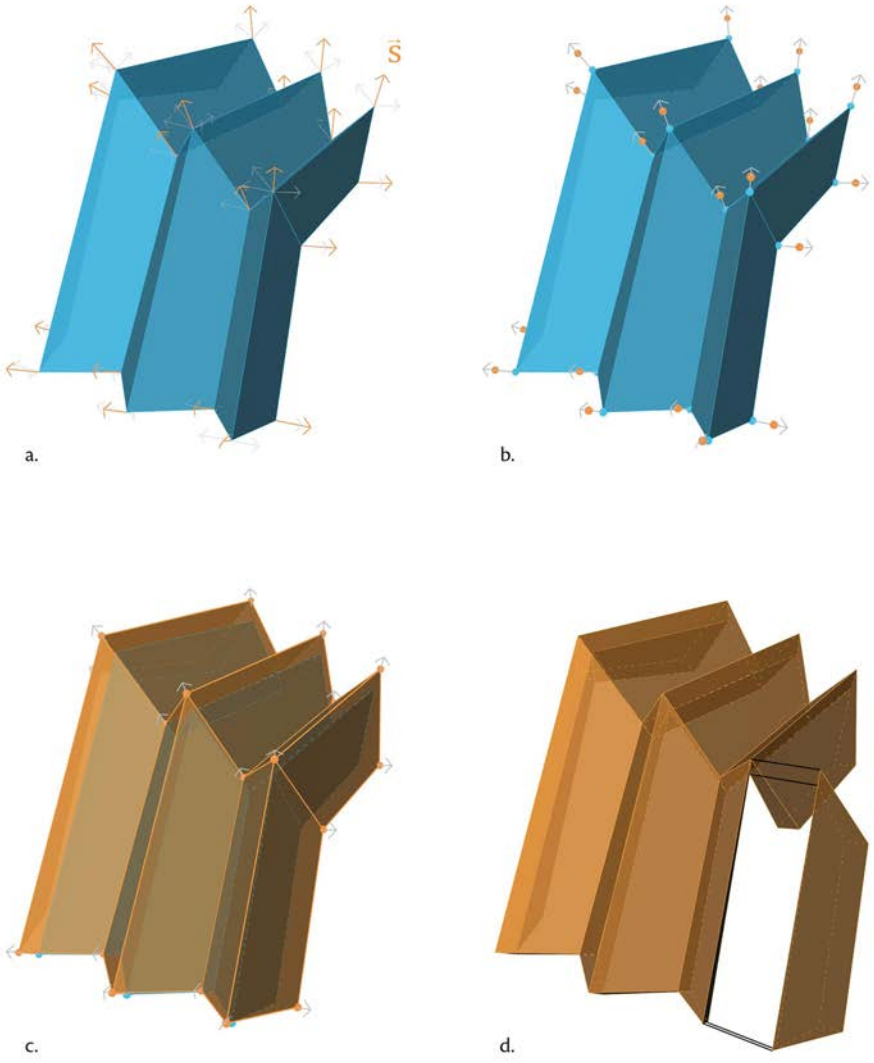


Figure 6.7 - Cas 1 : facettes planes aux arêtes rectilignes :
a. recherche du vecteur ($\vec{S}$) ;
b. décalage des sommets selon les valeurs (P_1) et (P_2) ;
c. création des éléments par reconstruction des arêtes ;
d. autonomie des éléments grâce à la définition d'un assemblage par défaut.

[2] Les valeurs de (P_1) et (P_2) définissent une épaisseur maximale et non minimale.

Dans le cas d'une surface plissée de référence composée d'arêtes et de surfaces curvilignes, des nœuds intermédiaires doivent être définis afin de respecter au mieux la courbure initiale. Ces nœuds sont disposés sur les arêtes des plis ; leur nombre dépend du degré de précision souhaité. Ensuite, la méthode utilisée est identique au cas précédent (Figure 6.8).

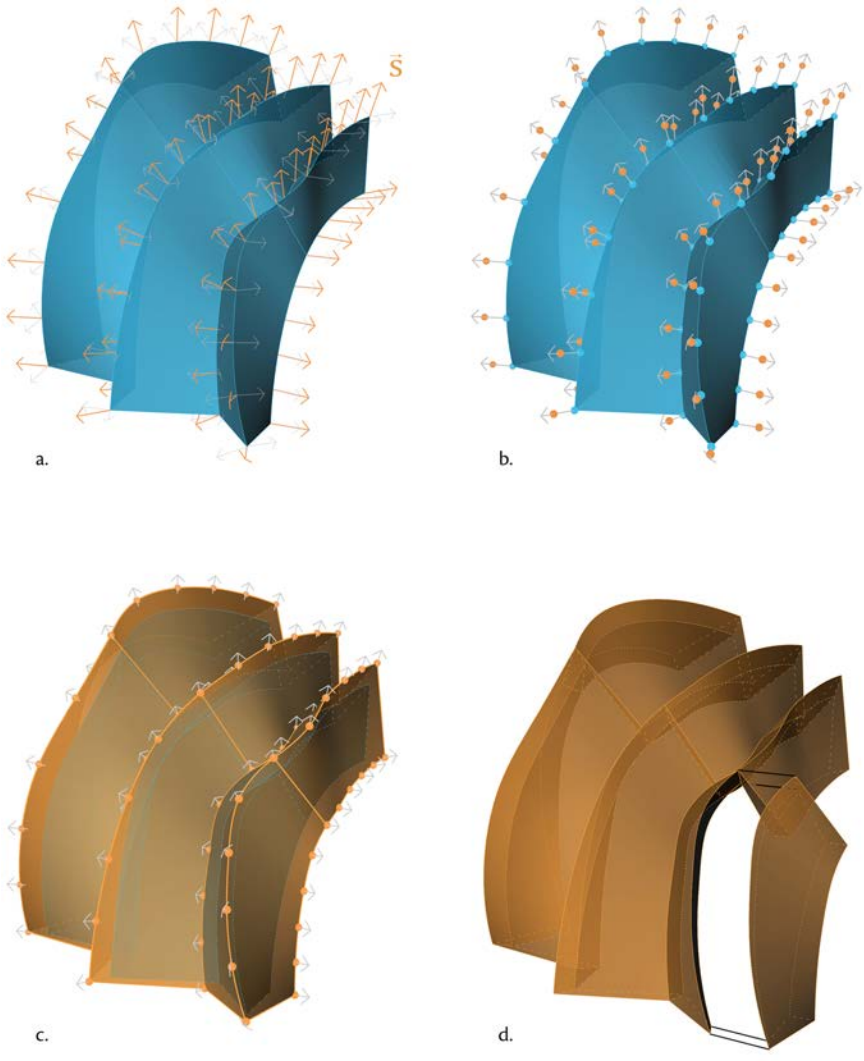


Figure 6.8 - Cas 2 : facettes gauches aux arêtes curvilignes :
a. démultiplication des nœuds sur les arêtes et recherche du vecteur ($\vec{S}$) ;
b. décalage des sommets selon les valeurs (P_1) et (P_2) ;
c. création des éléments par reconstruction des arêtes (interpolation de degré 3) ;
d. autonomie des éléments grâce à la définition d'un assemblage par défaut.

Dans un troisième cas, lorsque les facettes sont gauches et les arêtes rectilignes, nous pouvons utiliser l'une ou l'autre méthode présentée en amont, non sans conséquence sur la géométrie des éléments :

– La première méthode, qui se restreint aux quatre nœuds d'une facette, peut présenter, selon le degré de courbure de la facette, une variation importante de l'épaisseur de l'élément allant parfois jusqu'à la collision entre la face supérieure et la face inférieure. Elle permet toutefois de conserver les arêtes rectilignes.

– En utilisant la méthode des nœuds intermédiaires, la nature curviligne des facettes entraîne une variation des vecteurs $(\vec{S})$ calculés sur les nœuds intermédiaires ; elle est à l'origine du gauchissement de la nouvelle arête générée (Figure 6.9). Cependant, le risque de collision entre les faces d'un élément est fortement réduit.

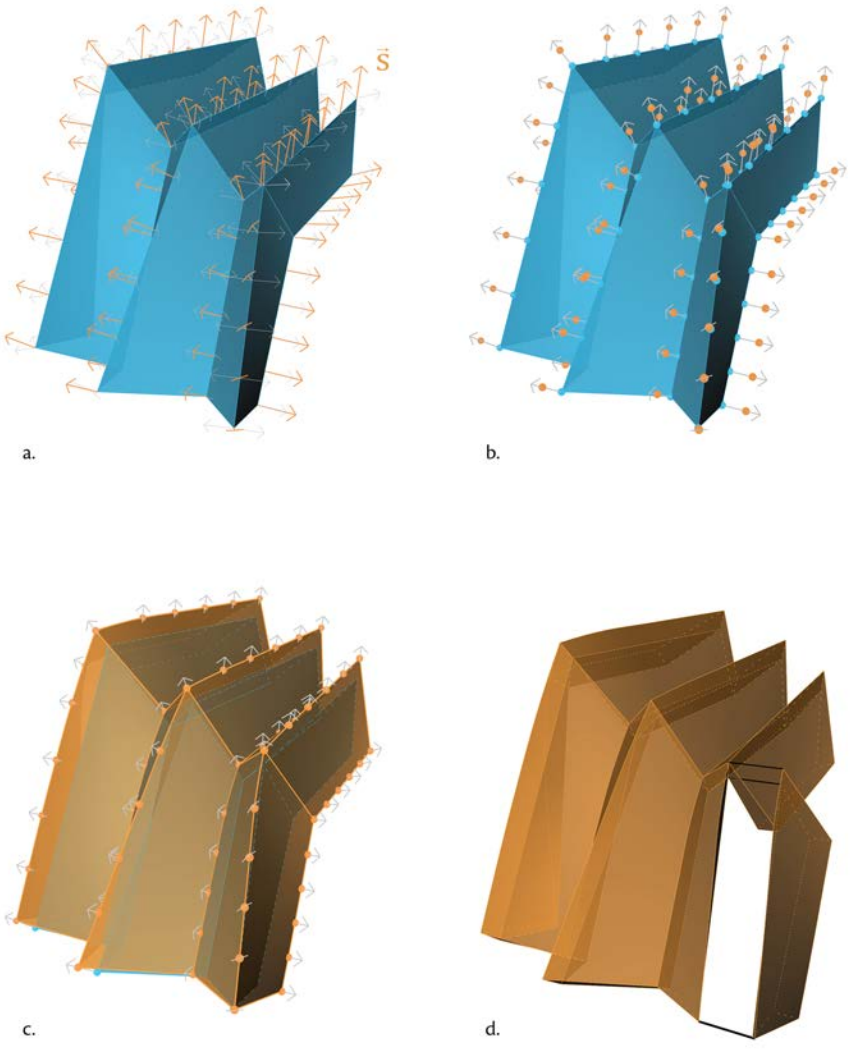


Figure 6.9 - Cas 3 : facettes gauches aux arêtes rectilignes :
a. recherche du vecteur $(\vec{S})$;
b. décalage des sommets selon les valeurs (P_1) et (P_2) ;
c. création des éléments par reconstruction des arêtes ;
d. autonomie des éléments grâce à la définition d'un assemblage par défaut.

Cette première approche concernant la mise en épaisseur des facettes assure un respect de la continuité de la surface intérieure et extérieure de l'enveloppe plissée : elle garantit la fusion des sommets des éléments en des nœuds uniques.
Rapportée au contexte des panneaux industriels en bois, seule une configuration géométrique de la surface plissée initiale présente un intérêt dans l'utilisation de l'une ou l'autre méthode. En effet, dans le cas d'un plissage « régulier », c'est-à-dire un plissage qui dispose de plans bissecteurs parallèles les uns aux autres (Figure 6.10), l'épaisseur générée est constante. Dans ce cas, l'approche développée garantit une rapidité d'exécution dans la construction géométrique de l'élément.

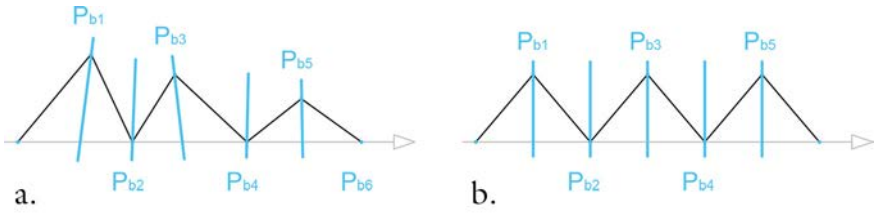


Figure 6.10 - Nature d'un plissage selon ses plans bissecteurs :
a. plissage irrégulier ;
b. plissage régulier.

Dans les autres configurations, nous sommes face à la création d'éléments à épaisseur variable. Cette caractéristique n'est pas appropriée à l'utilisation des panneaux industriels plans. Pour cette raison, nous avons mené nos recherches dans le développement d'un procédé garantissant l'épaisseur constante de l'élément, quelle que soit la morphologie de la surface plissée initiale.

6.1.b. Cas de l'épaisseur constante

Le processus qui permet de concevoir une géométrie d'élément avec une épaisseur constante est implémenté dans le composant « C_Thickness » (Figure 6.11).

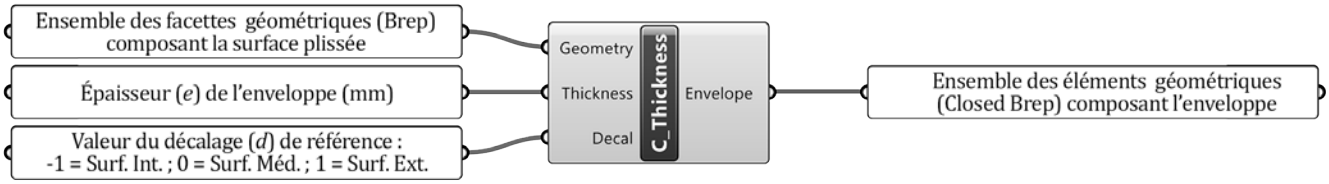
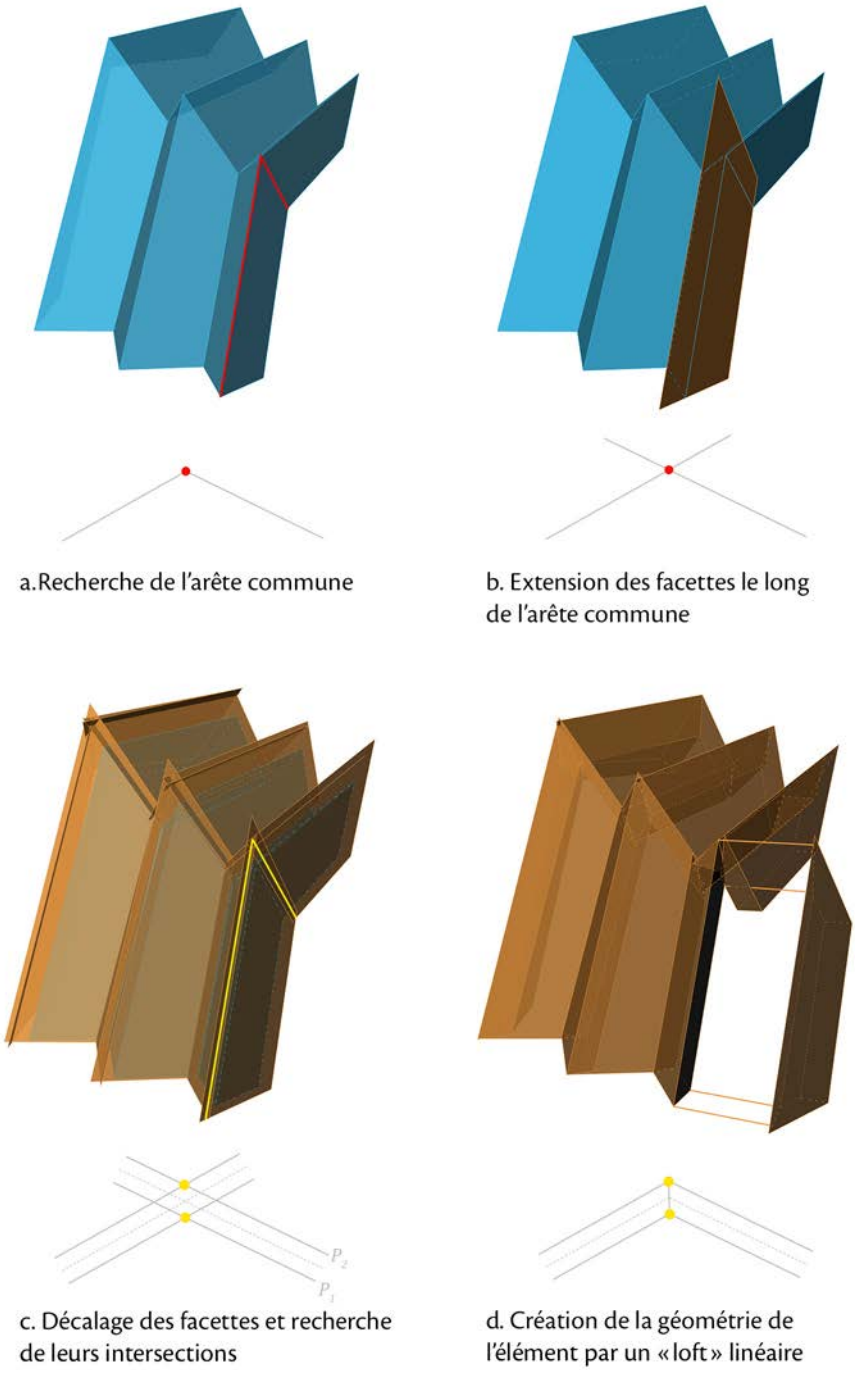


Figure 6.11 - Cluster du traitement de l'épaisseur par duplication et décalage des facettes.

Ce procédé ne prend pas en compte les nœuds de la surface plissée, mais ses facettes. Il repose sur trois étapes successives : l'extension et le décalage (offset) de ces facettes, puis la recherche des intersections entre les différentes facettes.
Tout d'abord, l'extension est pratiquée exclusivement sur les côtés de la facette qui présentent une jonction avec une autre facette (Figure 6.12.b). Cette sélection est réalisée par la recherche des arêtes communes (Figure 6.12.a).

Figure 6.12 - Procédé de construction géométrique d'éléments à épaisseur constante.



Ensuite, le décalage des facettes se base sur le principe des deux valeurs intermédiaires (P_1) et (P_2) associées à une valeur de décalage (d). Elle représente donc deux « offsets » de la facette étendue qui donne lieu à une épaisseur constante des futurs éléments.
Enfin, l'intersection des surfaces obtenues par le décalage permet de construire de nouvelles arêtes correspondant aux « bords » des faces qui composent un élément (Figure 6.12.c). La géométrie finale de ce dernier est également assurée par un « loft » linéaire entre les bords de ces nouvelles faces.
Cette méthode garantit donc une épaisseur constante de l'élément, mais aussi la caractérisation géométrique d'éléments autonomes reposant sur la morphologie de l'assemblage défini par défaut (coupe d'onglet) (Figure 6.12.d).

De plus, cette méthode s'est avérée relativement stable pour le traitement des surfaces plissées présentant des facettes planes aux arêtes rectilignes. Cependant des particularités de construction géométriques, liées aux facettes gauches, sont apparues. Dans ce contexte, nous avons observé que le champ de solutions produites par le composant « C_Thickness » était discontinu. En effet, au cours d'une opération d'extension géométrique gérée par les outils de DAO (spline, courbe de Béziers…) nous ne sommes pas en mesure de prévoir les réactions de la surface en dehors de son domaine initial. En fonction de la valeur d'extension définie, les variations de la surface peuvent être très importantes, au point d'engendrer des déformations morphologiques fortes ou simplement une absence de solution géométrique.
Aussi, pour créer des éléments avec une épaisseur constante, d'autres pistes pourront être envisagées comme la torsion des éléments de faible épaisseur. Par cette réflexion, nous envisageons d'orienter les recherches vers une simulation de la déformation élastique d'une plaque.

Par ailleurs, nous avons également constaté une singularité géométrique au niveau des nœuds. Comme cela a été spécifié dans la section 4.1.b, une mise en épaisseur constante engendre, dans le cas d'un plissage non régulier, une démultiplication de chaque nœud de la surface plissée. Cette particularité géométrique est incontournable ; aussi doit-elle être traitée afin de répondre à un contexte architectural au sens large du terme. Dans la section suivante, nous proposons plusieurs manières d'aborder cette situation.

6.2. La gestion des nœuds

Lors de la mise en épaisseur « constante » d'une surface plissée, un phénomène de collision entre les éléments apparaît dans la région des nœuds (Figure 6.13). Son origine, déjà énoncée dans le chapitre 4, dépend de la nature de l'intersection de tous les plans bissecteurs rattachés à un même nœud (Figure 6.14) : si l'intersection de tous les plans forme une droite unique, alors il n'y a pas de division du nœud (cas d'un plissage régulier). Dans tous les autres cas, un traitement s'impose.

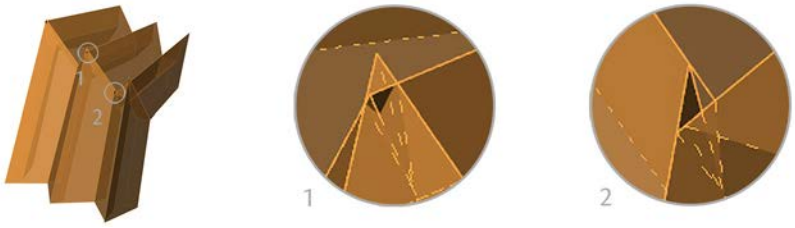


Figure 6.13 - Collision entre les différents éléments du plissage.

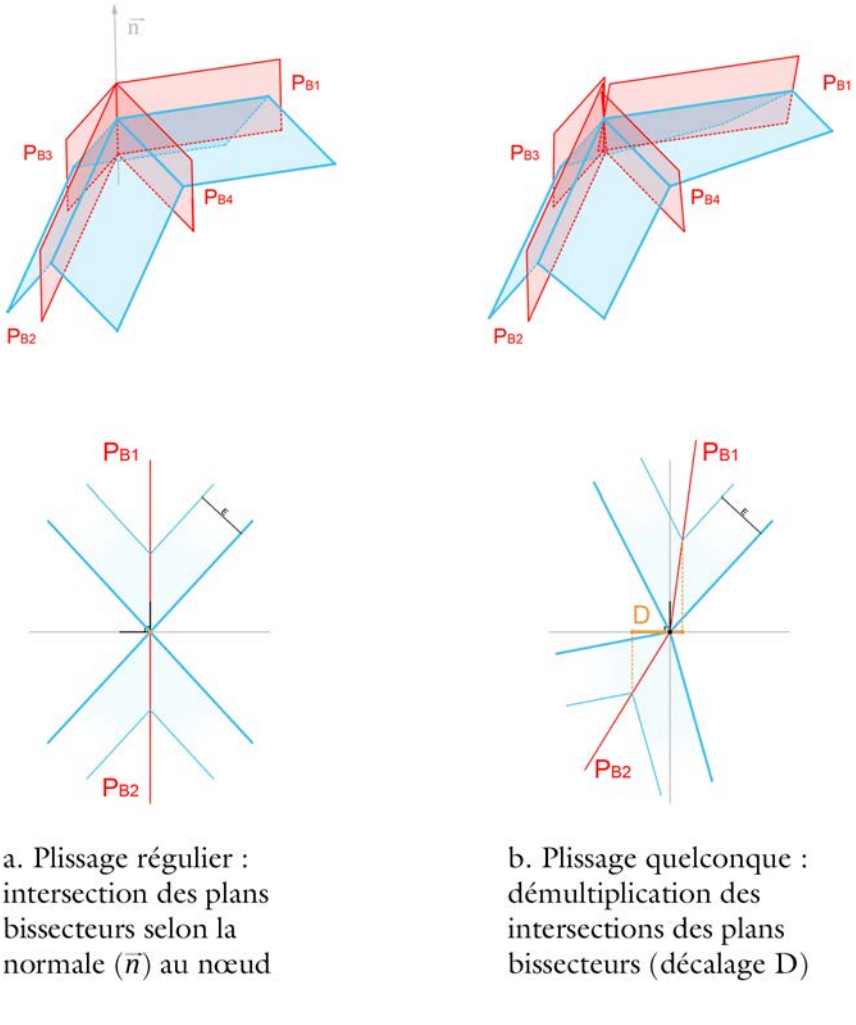


Figure 6.14 - Principe de « démultiplication » d'un nœud suivant la morphologie de la surface plissée.

a. Plissage régulier : intersection des plans bissecteurs selon la normale ($\vec{n}$) au nœud

b. Plissage quelconque : démultiplication des intersections des plans bissecteurs (décalage D)

La gestion du nœud renforce l'écriture architecturale de l'enveloppe plissée et ne doit pas être négligée par le concepteur.
Dans notre méthode, nous proposons diverses techniques permettant de « purger » la matière de la région nodale afin d'obtenir un évidement total ou partiel. Plusieurs actions peuvent être envisagées comme percer, tronquer, biseauter ou encore évaser…
Le résultat de chacune de ces actions présente des variantes formelles dépendant du processus de construction géométrique utilisé. Par exemple, le percement peut décrire un cylindre, une sphère ou encore un polyèdre ; de la même manière, nous pouvons imaginer un tronquage perpendiculaire ou angulaire, un biseautage régulier ou irrégulier et un évasement conique ou pyramidal (Figure 6.15).

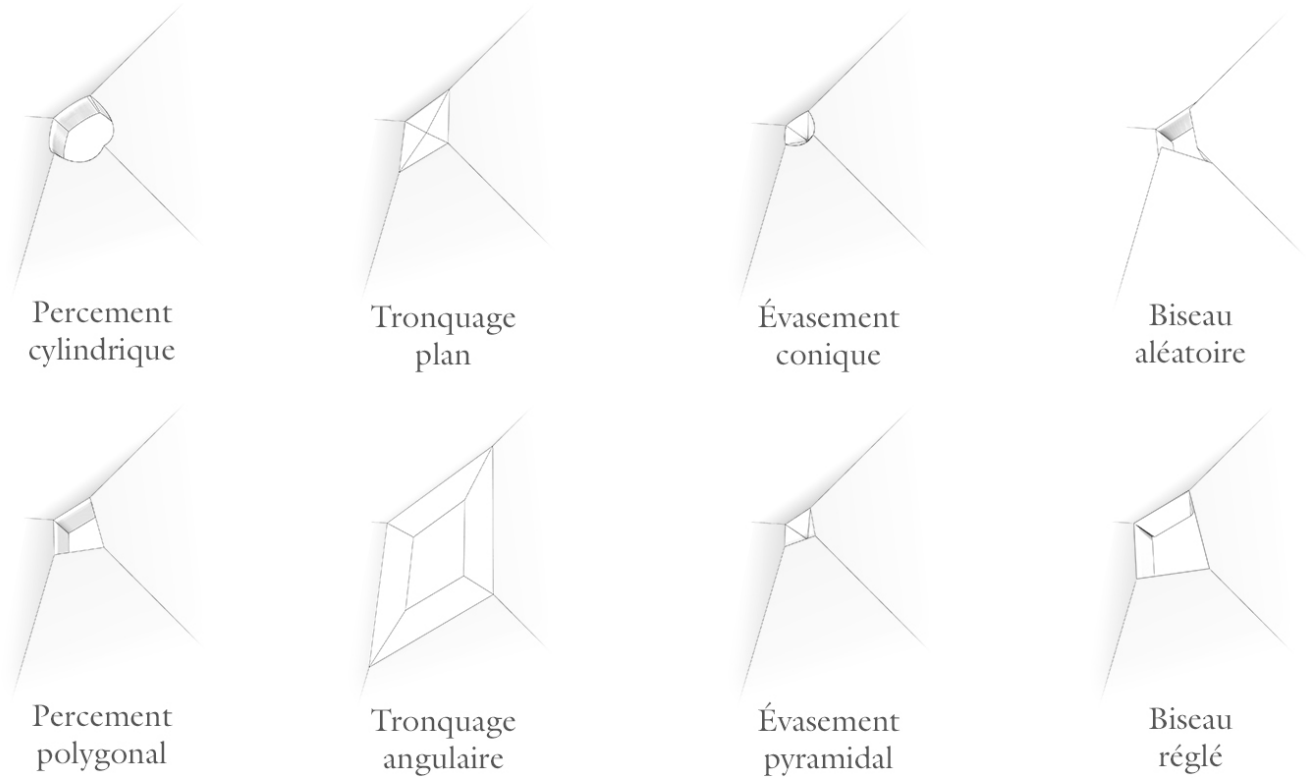


Figure 6.15 - Présentation non exhaustive de différents types de traitement des nœuds.

Selon la morphologie de la surface plissée initiale, les méthodes de traitement des nœuds proposées permettent d'aboutir à une infinité de solutions formelles ; par ailleurs, il se peut que certaines solutions provenant de différentes techniques soient sensiblement identiques. Pour l'utilisation de notre outil d'aide à la conception, nous ne souhaitons pas restreindre le domaine des possibilités de chaque action. Ainsi, l'évaluation et la validation des résultats

appartiennent au concepteur. Ce dernier va rechercher une solution répondant à des critères visuels (esthétique, plastique…), d'ambiance (apports lumineux, contraintes thermiques…) ou encore techniques (montage, étanchéité…).
D'un point de vue architectural, le critère visuel reste certainement le plus important. En fonction du processus de traitement choisi et des paramètres qui y sont implémentés, le résultat géométrique obtenu n'est pas forcement identique de chaque côté de l'enveloppe plissée comme l'illustrent parfaitement les solutions par évasement. Aussi, le concepteur doit pouvoir choisir si le résultat obtenu doit être maîtrisé du côté intérieur, médian ou extérieur de l'enveloppe[3]. Dans notre outil, ce choix revient à définir la position de la surface plissée initiale par rapport à l'épaisseur de l'enveloppe (notion du décalage *d* lors de la mise en épaisseur).

Le champ des possibilités de traitement des nœuds est donc vaste. Nous proposons ici deux exemples de composants traduisant une partie des possibilités issues des techniques de percement et d'évasement. Le principe appliqué à ces composants pourra être transposé ultérieurement aux autres techniques.
Le principe général de ces deux procédés consiste à définir un solide géométrique à la hauteur du nœud de référence afin de soustraire sa volumétrie aux éléments de l'enveloppe plissée.

Nous proposons deux composants : « Drilling_Nods » (Figure 6.16) et « Flaring_Nods » (Figure 6.17). Le premier génère une purge complète de la région du nœud par une forme cylindrique. Le second permet d'évaser le nœud de l'enveloppe plissée.

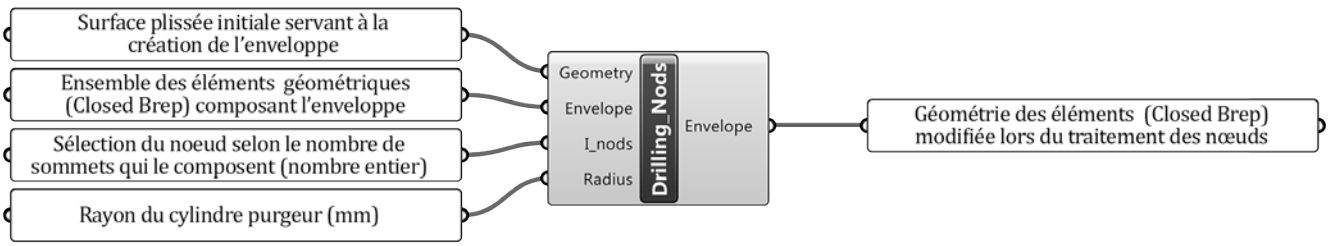


Figure 6.16 - Cluster du traitement des nœuds par percement.

[3] Un système combinatoire entre l'intérieur et l'extérieur est également envisageable.

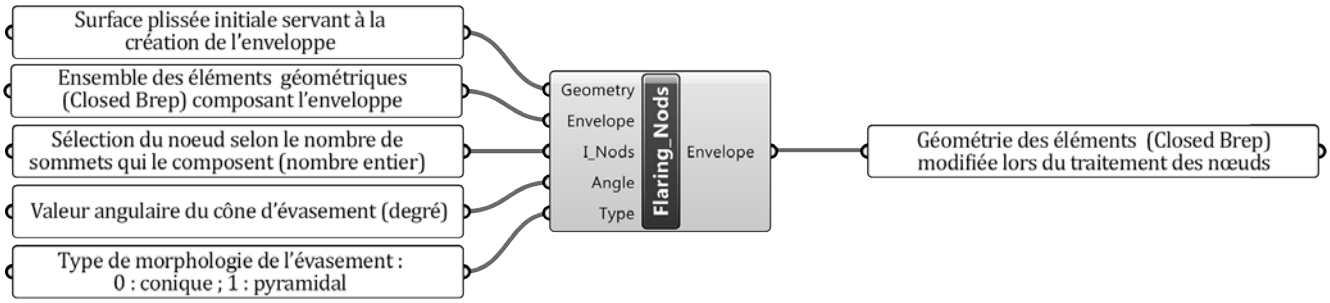


Figure 6.17 - Cluster du traitement des nœuds par évasement.

Le début de la méthode est identique aux deux composants. Elle consiste à définir les nœuds qui doivent être traités. Pour le concepteur, ce choix se traduit par un index appelé « I_Nods ». Ce dernier permet de sélectionner un nœud de la surface plissée de référence d'après le nombre de sommets qui y sont rattachés. Nous distinguons les nœuds périphériques du plissage généralement composés d'un ou de deux sommets et les nœuds issus du brisis composés de quatre sommets (Figure 6.18.a). Nous devons aussi prendre en compte les nœuds composés de trois sommets issus d'une modification ou d'une suppression des éléments. Une fois cette sélection établie, nous recherchons la normale moyenne pour chacun de ces nœuds (Figure 6.18.b). Celle-ci sert d'axe directeur au positionnement de la forme géométrique.

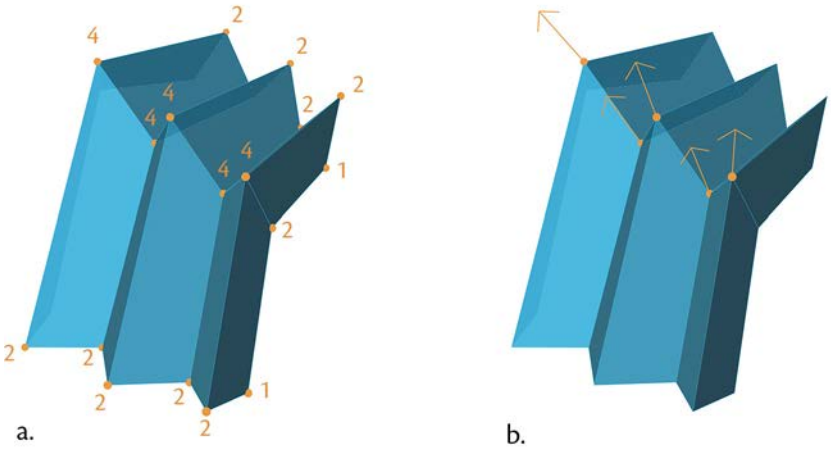


Figure 6.18 - Méthode de sélection des nœuds de la surface plissée initiale :
a. indexation des nœuds suivant le nombre de sommets qui les composent ;
b. sélection des nœuds à quatre sommets et calcul de la normale moyenne rattachée au nœud.

Dans le cas du composant « Drilling_Nods », la normale représente l'axe du cylindre « purgeur ». Il ne reste au concepteur qu'à définir le diamètre de ce cylindre avant de passer à l'opération de soustraction (Figure 6.19).

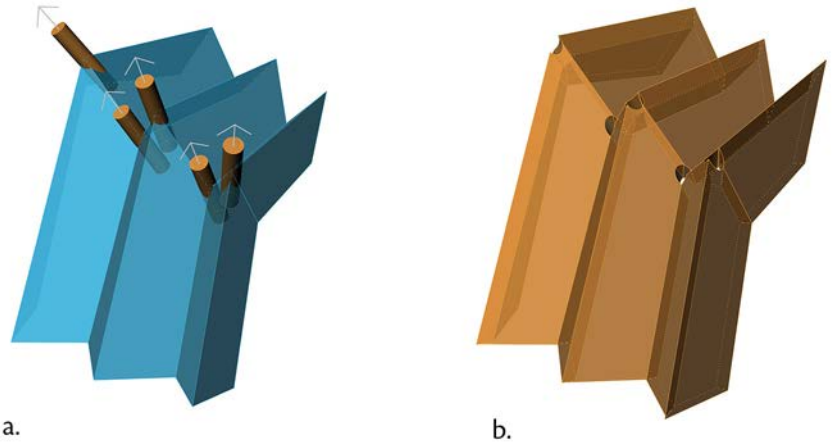


Figure 6.19 - Percement des nœuds :
a. dimensionnement des cylindres purgeurs ;
b. soustraction de la volumétrie des cylindres à la géométrie des éléments de l'enveloppe plissée.

Pour le composant « Flaring_Nods », la normale correspond à l'axe de révolution du cône nécessaire à la définition de « l'évasure ». Le sommet de ce cône correspond au nœud sélectionné de la surface plissée de référence et son angle d'ouverture est déterminé par le concepteur (Figure 6.20).

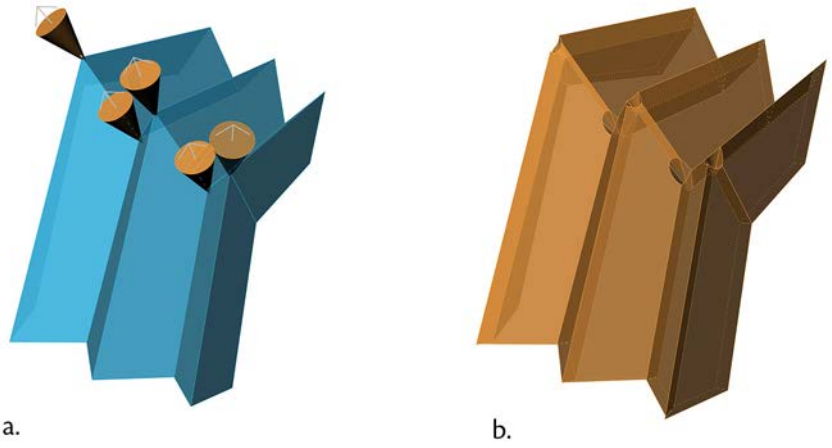


Figure 6.20 - Évasement conique des nœuds :
a. dimensionnement des cônes purgeurs ;
b. soustraction de la volumétrie des cônes à la géométrie des éléments de l'enveloppe plissée.

Le concepteur peut également choisir une morphologie pyramidale. Dans ce cas, la géométrie de la pyramide provient de l'intersection entre les arêtes des éléments et le cône préalablement défini (Figure 6.21).

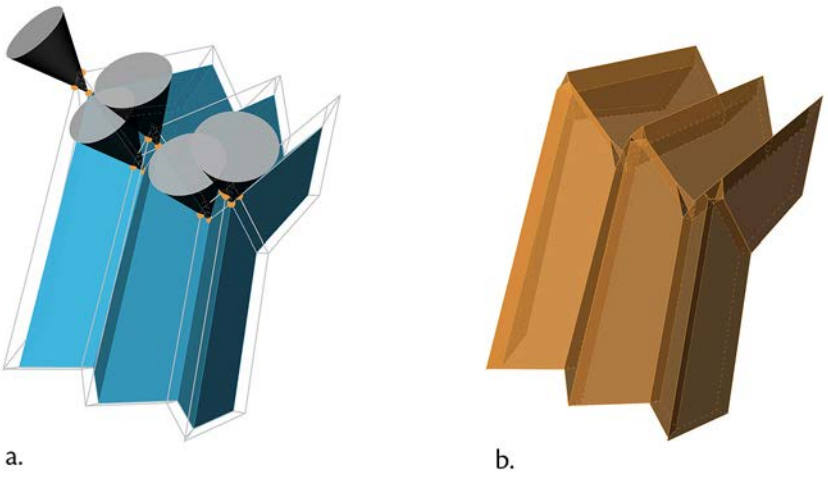


Figure 6.21 - Évasement polygonal des nœuds :
a. dimensionnement des cônes purgeurs et recherche des intersections arêtes/cônes ;
b. soustraction de la volumétrie de la pyramide à la géométrie des éléments de l'enveloppe plissée.

Nous rappelons que la surface plissée peut être définie comme une surface médiane de référence de l'enveloppe (avec d = 0). Dans ce cas, la mise en épaisseur peut se produire des deux côtés de la surface plissée de référence. Aussi, est-il nécessaire de répéter l'opération d'évasement de part et d'autre de la surface plissée de référence (Figure 6.22).

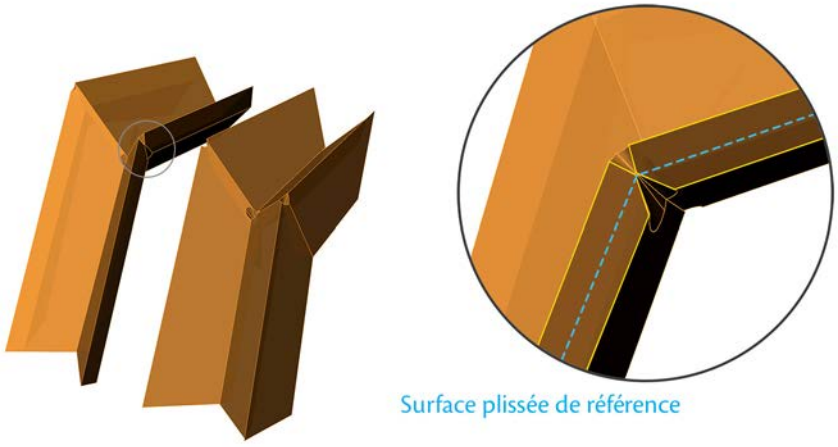


Figure 6.22 - Enveloppe construite selon une valeur de décalage (*d*) nulle. Afin d'éviter la collision de matière entre les éléments, le traitement du nœud doit s'effectuer de part et d'autre de la surface plissée.

Les composants que nous venons de proposer participent au développement de la pensée créative du concepteur. De surcroît, une réflexion peut être menée tant sur la forme que sur la fonction d'un nœud. Jusqu'à présent nous avons considéré le nœud comme une « abstraction » de matière. L'espace vide généré devient alors une volumétrie exploitable : par exemple il peut être comblé par un objet ayant une fonction d'éclairage (« bouchons »

translucides) (Figure 6.23) ou encore de support d'étanchéité (fixation de membrane). Cet objet peut également être conçu comme un connecteur assurant la liaison entre les éléments du plissage.

Il appartient donc au concepteur de mesurer l'intérêt architectural et structural que représentent les nœuds d'une enveloppe plissée.

Figure 6.23 - Diffusion de la lumière par les nœuds à l'intérieur de l'enveloppe plissée (percement comblé par une bouteille de verre remplie d'eau). Détail de la New-Yourte, Défis du bois 2014.

6.3. Les assemblages

L'expérience de la New-Yourte a révélé l'importance de la gestion des assemblages d'un point de vue constructif, architectural et structural. Nous rappelons que les facteurs décisifs de leur choix doivent répondre aux critères de stabilité de la structure, aux possibilités de fabrication, à la cinématique de montage, aux aspects architecturaux comme la visibilité des assemblages et également à des besoins particuliers garantissant par exemple un assemblage « montable/démontable », voire auto-stable.

Le champ des possibilités dans ces domaines est vaste ; toutefois, nous faisons appel aux familles d'assemblages existantes que nous avions mentionnées dans le chapitre 2 : la coupe biaise (coupe à onglet), la queue droite, la rainure et (fausse) languette. La morphologie de ces assemblages aboutit généralement à des usinages complexes[4] ; une définition précise de leur géométrie est alors essentielle dans le cadre de la fabrication robotique. C'est la raison principale pour laquelle nous avons développé des « assembleurs » sous la forme de composants.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'outil de création d'assemblage développé par Oskar GAMEZ. Dans le cadre de sa thèse[5] menée au sein du laboratoire MAP-CRAI, l'auteur propose de lier les différents panneaux de bois constituant une paroi cellulaire selon un procédé mélangeant l'assemblage à queues et celui à coupe biaise suivant des profils variables. Dans cette méthode, chaque cellule qui constitue la paroi est considérée comme une entité géométrique unique ayant une épaisseur constante (Figure 6.25.a). La création de l'assemblage débute par le choix du profil de l'assemblage (Figure 6.24). Ce dernier est ensuite adapté à la géométrie du cadre en tenant compte de paramètres dimensionnels contrôlés par le concepteur (Figure 6.25.b). Ensuite, le profil d'assemblage permet de « trancher » le cadre de la cellule

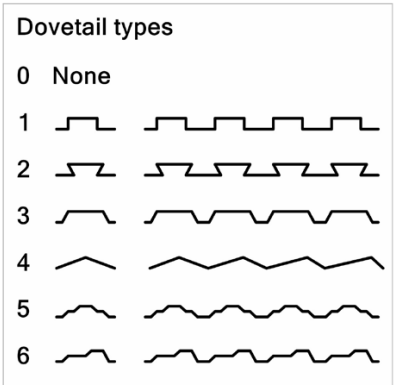


Figure 6.24 - Ensemble des profils proposés pour la création de la géométrie de l'assemblage. D'après (Ehrhardt, Ginefri, 2016).

[4] Un façonnage manuel de l'assemblage pourrait être envisagé si la « technique et la précision » ne devenaient pas des compétences rares.

[5] « N-sWArM, un outil paramétrique-générative pour le design de parois non-standards en bois à partir de tessellations régulières et irrégulières » (Gamez, 2017) et (Ehrhardt, Ginefri, 2016).

selon la direction des plans bissecteurs de chacun de ses angles. On obtient ainsi une décomposition géométrique de la cellule en une série d'éléments autonomes. (Figure 6.25.c).

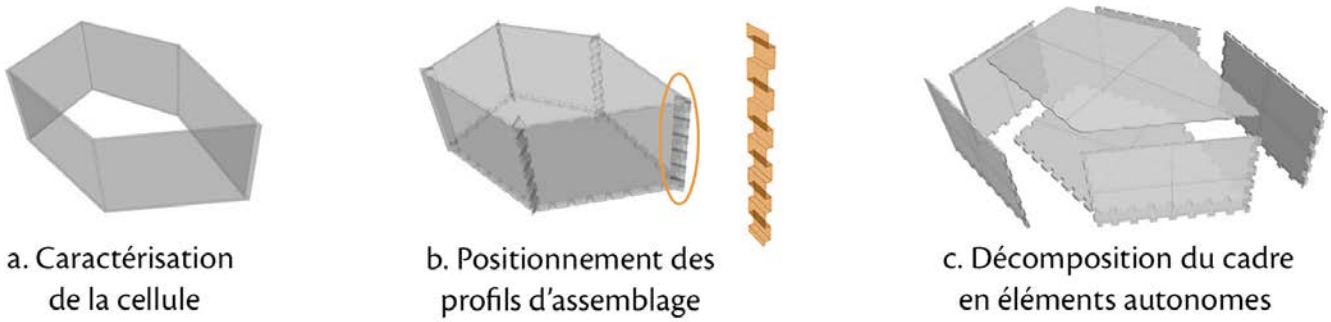


Figure 6.25 - Principe de construction géométrique des assemblages dans l'outil N-sWArM. D'après (Gamez, 2017).

L'utilisation de la technique du profil d'assemblage garantit :

– une adaptation à tout type d'angle

– une variation du « dessin » de l'assemblage

– une fiabilité et une rapidité d'exécution

Cependant, ce procédé ne permet pas de couvrir l'ensemble des variantes morphologiques adaptées aux enveloppes plissées. En effet, cette méthode a été développée pour des caissons composés de panneaux de faible épaisseur (environ une dizaine de millimètres). Dans ces conditions, le traitement d'assemblage par mi-bois ou rainure-languette est difficilement adaptable : la précision de l'usinage doit y être fortement accrue au risque de ne pas satisfaire les critères constructifs, architecturaux et structuraux.
Or, dans le cas des structures plissées, l'épaisseur de l'enveloppe peut varier plus fortement en fonction des projets, pouvant atteindre plusieurs centimètres ; cela représente suffisamment de matière pour y développer diverses géométries d'assemblage à emboitement. Ainsi, nous proposons une autre approche basée sur le concept de la « volumétrie englobante ».

Figure 6.26 - Identification de la volumétrie englobante selon une vue en coupe.

Cette approche consiste à définir un volume de matière susceptible d'appartenir aux deux éléments à rassembler afin d'y déterminer la géométrie d'un assemblage (Figure 6.26). Cela se traduit par la volumétrie issue de l'intersection de deux éléments qui constituent un pli.

Ensuite, l'ensemble du travail réside dans la manière de partager cette portion de matière entre les éléments du plissage. Par exemple, lorsque l'on scinde la volumétrie englobante selon le plan bissecteur du pli, nous pouvons obtenir un assemblage par coupe biaise (Figure 6.27.c). Partant de ce même principe, nous pouvons obtenir un assemblage à mi-bois, à queue droite, à rainure et languette, etc…

Pour cela, nous reprenons le concept du « Profil d'assemblage » que nous faisons évoluer vers la notion de « gabarit d'assemblage ». Cette distinction nous permet d'associer plusieurs profils lors de la création d'un assemblage. En fonction de la famille d'assemblage souhaitée, la nature du gabarit change ; des paramètres propres à chaque famille permettent d'adapter les caractéristiques dimensionnelles de l'assemblage (dimension de la languette, longueur des queues droites…).

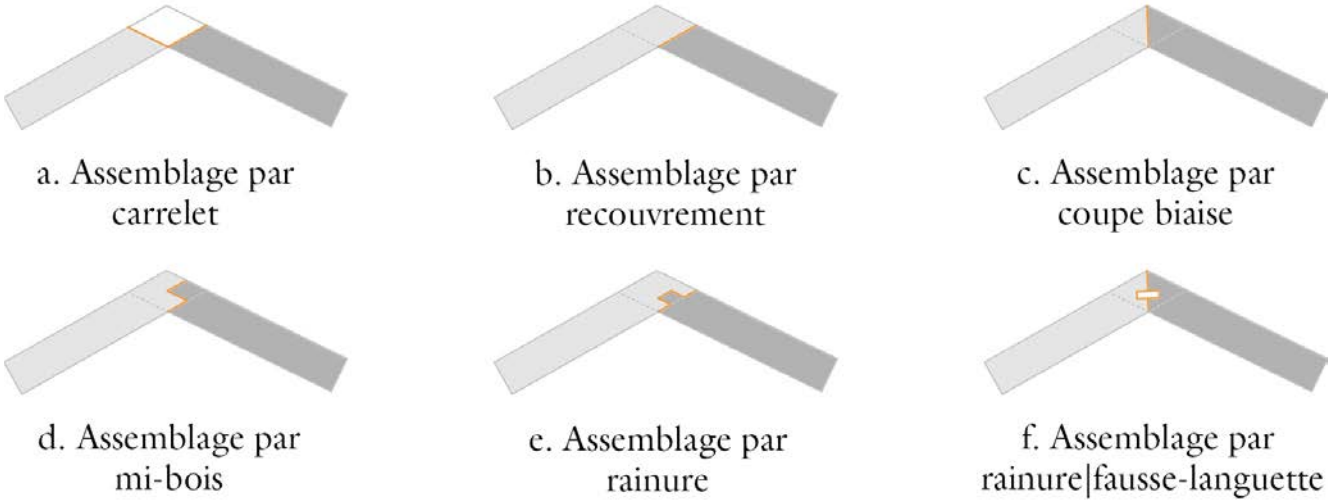


Figure 6.27 - Déclinaison non exhaustive des possibilités de répartition de la volumétrie englobante entre les éléments.

Par ailleurs, l'usage du gabarit d'assemblage présente un autre intérêt : en lui attribuant une épaisseur (Figure 6.28), nous pouvons gérer le « jeu d'assemblage » indispensable au montage des éléments. Ce jeu permet d'absorber les variations dimensionnelles de l'élément liées à la tolérance de l'usinage ou aux caractéristiques intrinsèques du bois et garantit le montage des éléments. Ainsi, nous obtenons un gabarit d'assemblage en trois dimensions.

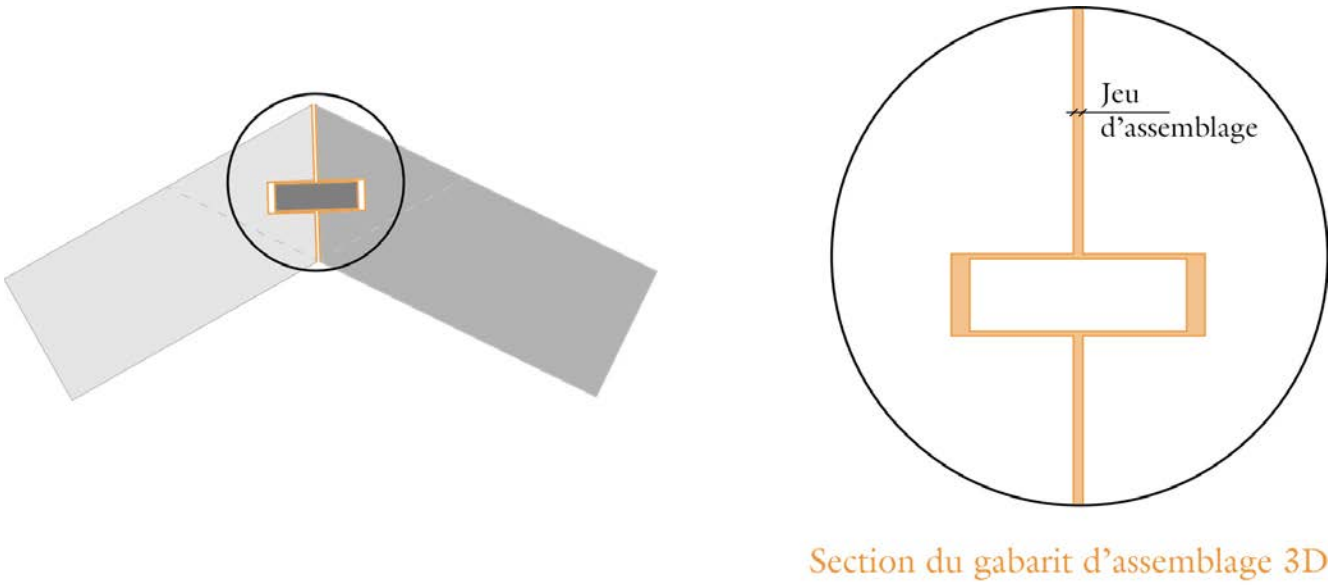


Figure 6.28 - Introduction du « jeu d'assemblage » lors de la découpe de la volumétrie englobante.

D'un point de vue théorique, notre processus de création d'assemblage se décompose en quatre étapes :

– La première sélectionne les « plis » de l'enveloppe où doit être défini l'assemblage entre les éléments.

– la seconde délimite la volumétrie englobante dans laquelle est inscrite la géométrie de l'assemblage.

– La troisième génère la géométrie de l'assemblage grâce à des gabarits.

– La quatrième réassocie les parties de l'assemblage à l'élément respectif.

Cependant, la réalité de notre contexte global de création d'enveloppes plissées implique, pour chacune des propositions d'assemblages définies précédemment, un développement géométrique particulier[6]. Celui-ci est lié à l'assemblage primaire (la coupe biaise) défini dès la mise en épaisseur ; il est donc nécessaire d'adapter le processus à chaque famille d'assemblage.

[6] Par exemple, la génération d'un assemblage par rainure et fausse languette sur coupe biaise ne nécessite pas la création d'une volumétrie englobante, puisque la coupe biaise a été définie comme l'assemblage par défaut lors de la mise en épaisseur des facettes.

Dans le cadre de notre travail, limité actuellement aux surfaces planes et aux arêtes rectilignes, nous nous intéressons plus particulièrement aux assemblages par emboîtement comme les queues droites et la rainure – languette. Chacun de ces procédés dispose d'avantages propres : le premier permet de réaliser des autoblocages et le second assure le montage / démontage de la structure. Ces assemblages forment un premier catalogue mis à disposition du concepteur et qui pourra être enrichi ultérieurement.

Ainsi, nous proposons deux composants : le « Dovetails_Joints » (Figure 6.29.a) pour des assemblages à queues droites et le « T&G_Joints » (Tongues & Grooves_Joints) (Figure 6.29.b) pour ceux réalisés sur le principe des rainures et languettes. Chacun de ces composants se réfère à la géométrie de l'enveloppe plissée comportant l'ensemble des éléments « assemblés » initialement selon une coupe biaise.

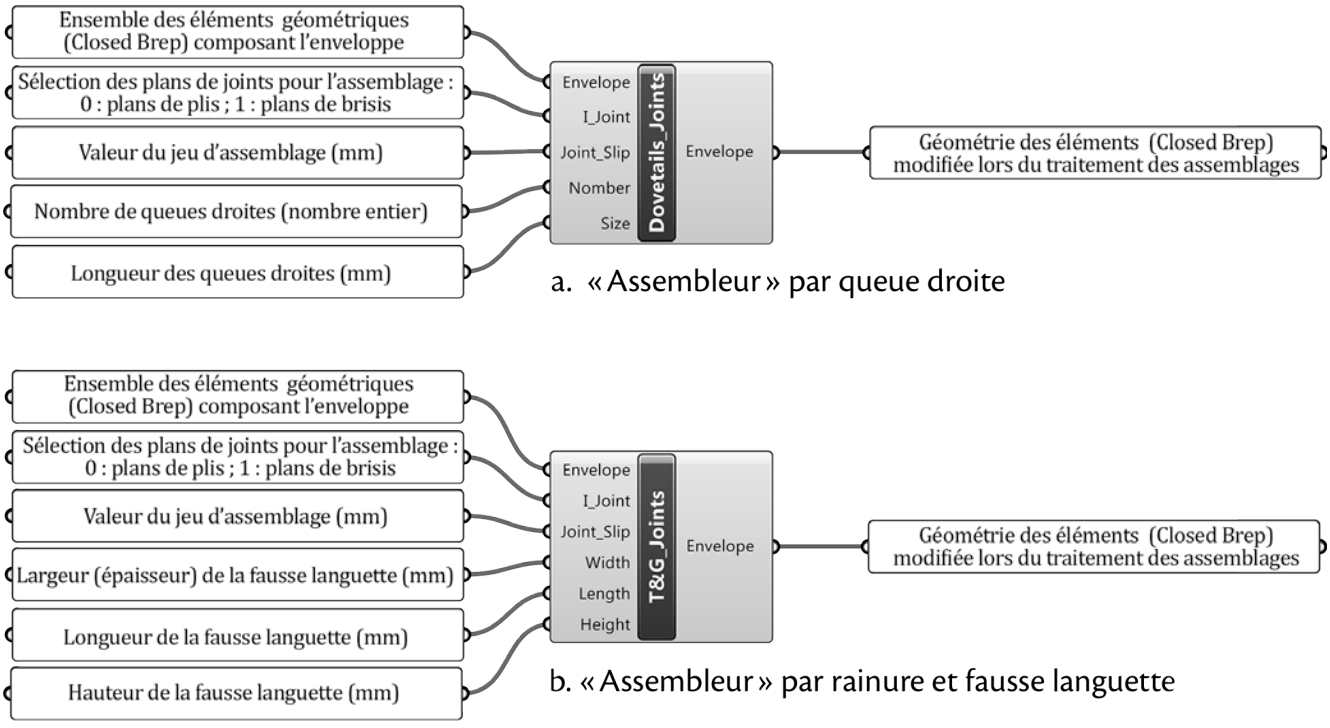


Figure 6.29 - Clusters de traitement des assemblages.

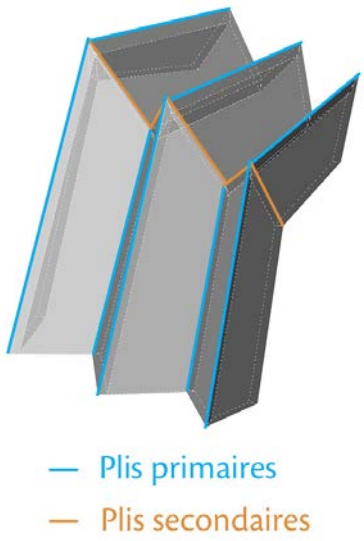


Figure 6.30 - Visualisation des plis primaires et secondaires d'un plissage.

La première étape du processus reste identique pour les deux composants : la sélection des plis de l'enveloppe peut être faite selon des critères architecturaux ou structuraux, mais elle doit avant tout répondre à une cinématique de montage. Actuellement, nous proposons une méthode de sélection simplifiée par un index (paramètre de gestion du composant nommé I_joint) ; le concepteur a le choix entre les plis primaires (valeur « 0 » de l'index) et les plis secondaires issus du brisis (valeur « 1 » de l'index) (Figure 6.30).

Les autres étapes du processus varient en fonction du composant étudié. Nous en faisons une description dans les deux sous-sections suivantes.

6.3.a. Cas de l'assemblage par queues droites

Le composant « Dovetails_Joints » suit les trois dernières étapes du processus théorique : la recherche de la volumétrie englobante, la définition de la géométrie de l'assemblage et la recomposition des éléments.

La volumétrie englobante. Elle est obtenue par une extension des faces internes et externes[7] des éléments de manière à couper pleinement l'élément en corrélation avec le choix des plis de l'enveloppe (Figure 6.31.a).

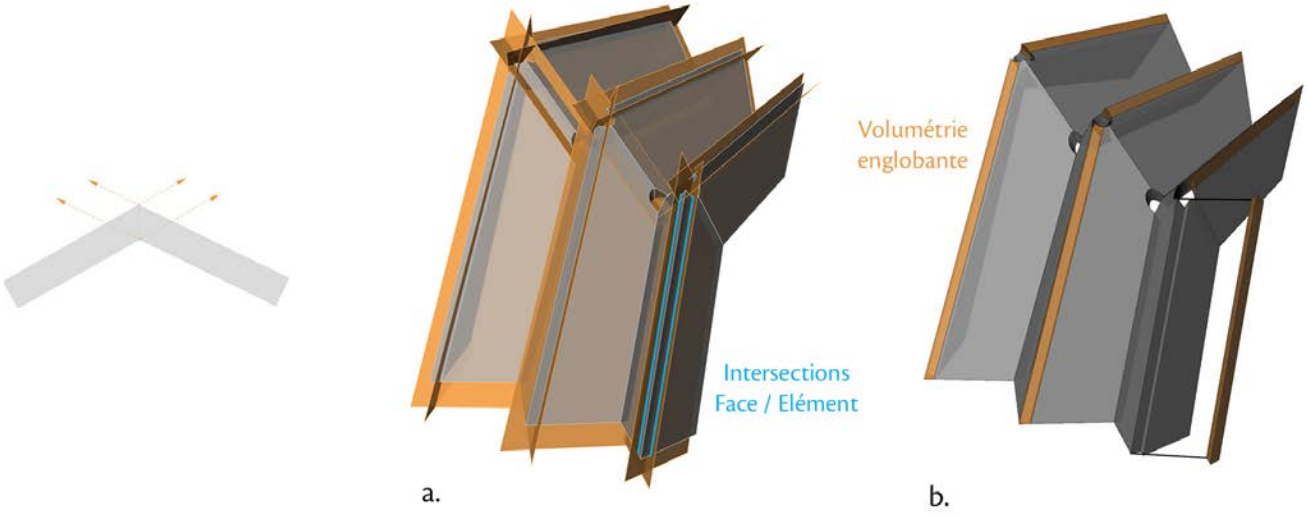


Figure 6.31 - Processus de caractérisation de la volumétrie englobante.

[7] Cette dénomination renvoie à l'orientation de la surface de référence selon sa normale.

La géométrie de l'assemblage. La volumétrie obtenue délimite la zone d'action pour la modélisation géométrique du plissage. Nous présentons un gabarit simple pour la création d'assemblage à queues droites. D'autres gabarits pourront être créés, intégrant notamment une géométrie plus élaborée du jeu d'assemblage.
Le gabarit présenté est composé d'une succession de prismes. Leur rythme est caractérisé soit par un nombre total de queues, soit par une longueur précise de la queue droite et qui soit répartie de part et d'autre du barycentre de la volumétrie englobante.
L'épaisseur des prismes correspond au « jeu » d'assemblage ; celui-ci est contrôlé par le paramètre de gestion nommé « joint_slip ». Cette épaisseur est donc variable et peut être ajustée à tout moment par le concepteur. Le volume de ces prismes est ensuite soustrait à la volumétrie englobante de manière à obtenir la géométrie des différentes parties de l'assemblage (Figure 6.32).

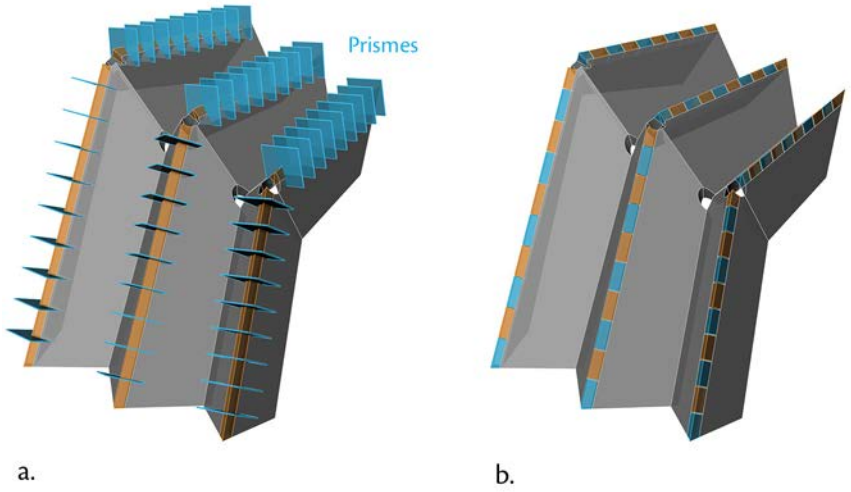


Figure 6.32 - Découpage de la volumétrie englobante :
a. caractérisation et positionnement du gabarit ;
b. association des «volumétries résultantes» aux éléments respectifs.

La recomposition des éléments. Chaque partie de l'assemblage est ensuite associée à l'élément du plissage par une union des volumétries respectives. Pour réaliser cela, une sélection préalable des prismes, issus du découpage de la volumétrie englobante, doit être établie. Pour cet assemblage, elle représente une alternance des queues droites dont la répartition entre les éléments est réversible.
En fonction des paramètres choisis, nous pouvons effectuer des variantes d'assemblage au sein de ce même composant. Par exemple, la géométrie d'un assemblage à queues droites (Figure 6.33.a) peut

aisément devenir un assemblage par recouvrement (Figure 6.33.b). Encore une fois, nous présentons une méthode simple mais celle de l'exemple proposé pourra être fortement développée et enrichie.

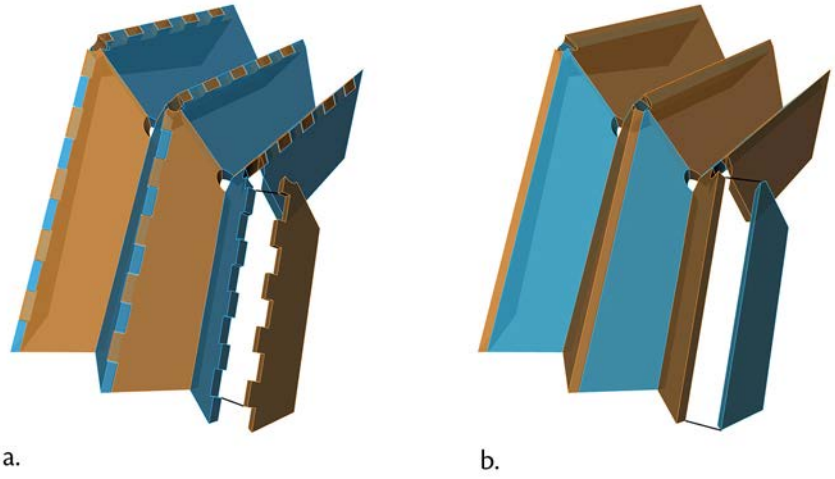


Figure 6.33 - Variantes de la géométrie d'assemblage à partir du composant « Dovetails_Joints » : a. assemblage par queues droites ; b. assemblage par recouvrement.

6.3.b. Cas de l'assemblage par rainures et languettes

La méthode théorique ne peut pas répondre à toutes les morphologies de l'enveloppe plissée. Nous rappelons qu'un pli est généré par une articulation de deux éléments le long d'une arête commune selon un angle non nul et non plat. Lorsque l'angle du pli tend vers ces valeurs limites, il est impossible de définir la volumétrie englobante (Figure 6.34). Par ailleurs, l'ouverture de l'angle entraîne une augmentation considérable des dimensions du panneau brut selon la grandeur « L » (Figure 6.35). L'assemblage de type queue-d'aronde est donc limité à un angle de pli (α) actuellement défini entre 3° et 177°.

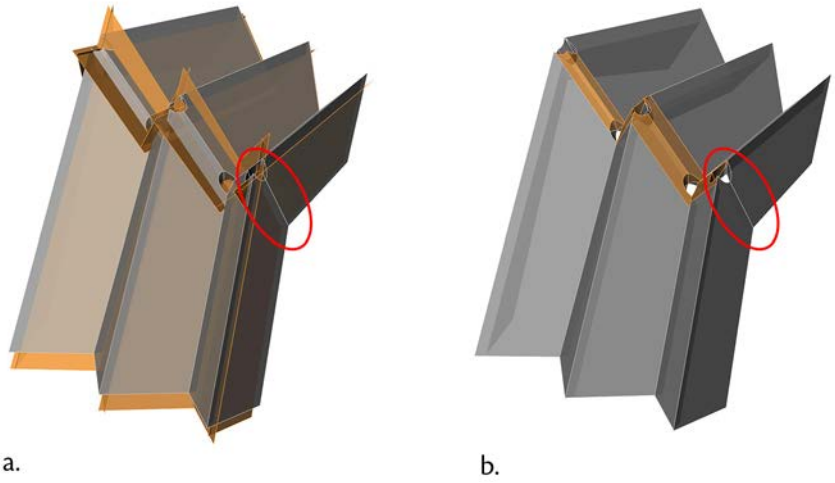


Figure 6.34 - Cas particulier de plis où la volumétrie englobante n'est pas définissable.

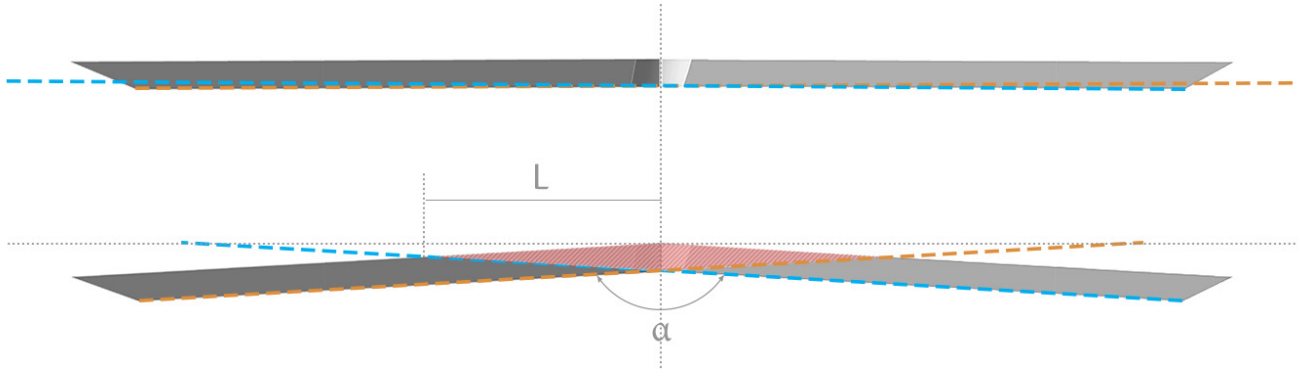


Figure 6.35 - Caractérisation de l'angle (α) assurant la création d'une volumétrie englobante.

Par conséquent, nous avons choisi un deuxième type d'assemblage dont le domaine d'action couvre l'ensemble des valeurs angulaires d'un pli. Cet assemblage s'appuie sur le principe de la rainure et fausse-languette[8].

Afin de déterminer la géométrie de cet assemblage, nous nous rapportons à la géométrie de l'assemblage à coupe biaise ; nous y définissons un plan de joint de référence qui se rapporte au plan bissecteur de l'angle formé par deux éléments de l'enveloppe plissée (Figure 6.36.a). Son origine est placée au milieu du segment correspondant à l'arête du pli formée par les faces inférieures de ces deux éléments. L'axe (x) du plan est orienté selon cette même arête et l'axe (y) est dirigé vers la surface supérieure de l'enveloppe plissée (Figure 6.36.b).

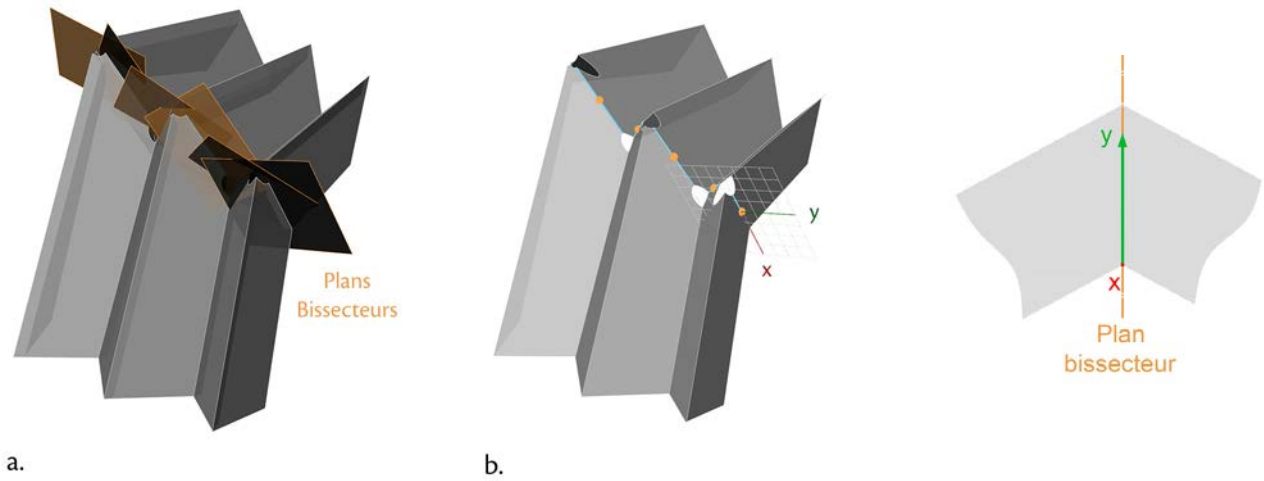


Figure 6.36 - Positionnement du plan de joint de référence pour la création des assemblages par rainures-languettes.

[8] Nous préférons la fausse languette à la languette, car nous pouvons maîtriser les caractéristiques de son matériau de fabrication (notamment le sens du fil lorsqu'elles sont réalisées en bois).

Ce plan permet de positionner et de dimensionner la géométrie du gabarit de la fausse-languette. D'une part, celui-ci contient la volumétrie de la fausse-languette construite selon une section rectangulaire ou une section dite « papillon »[9] (queues d'aronde symétriques). D'autre part, il contient la volumétrie représentant le jeu d'assemblage (Figure 6.37).

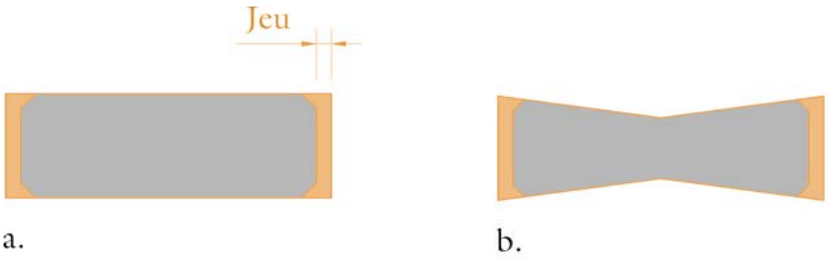


Figure 6.37 - Exemples de section de fausse-languettes :
a. section rectangulaire ;
b. section papillon.

Par défaut, le centre de gravité de la fausse-languette concorde avec l'origine du plan de joint. Elle est ensuite positionnée selon le repère (x, y) du plan (Figure 6.38.a). Ensuite la volumétrie du gabarit est soustraite à celle des éléments respectifs en tenant compte de la valeur du jeu d'assemblage (Figure 6.38.b).

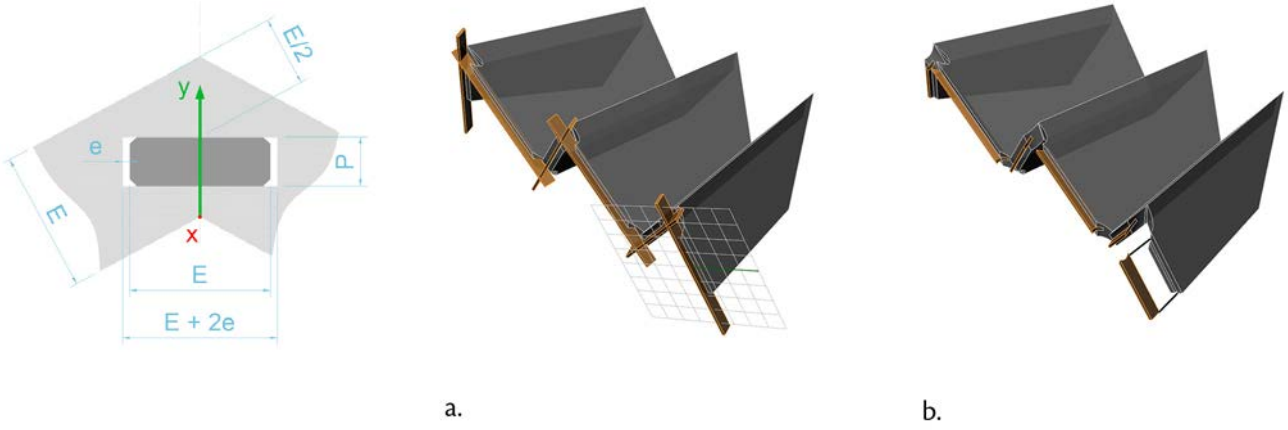


Figure 6.38 - Paramètre de positionnement de la fausse languette.

La technique des plans de joint ouvre un nouveau champ de possibilité dans la création des assemblages. Par exemple, sur le principe employé pour la modélisation des rainures et fausses-languettes, nous pouvons décliner la géométrie des assemblages du type tourillons ou encore tenons-mortaises (Figure 6.39).

[9] Dans ce cas, la cinématique de montage est fortement modifiée puisqu'elle nécessite un assemblage par « glissement ».

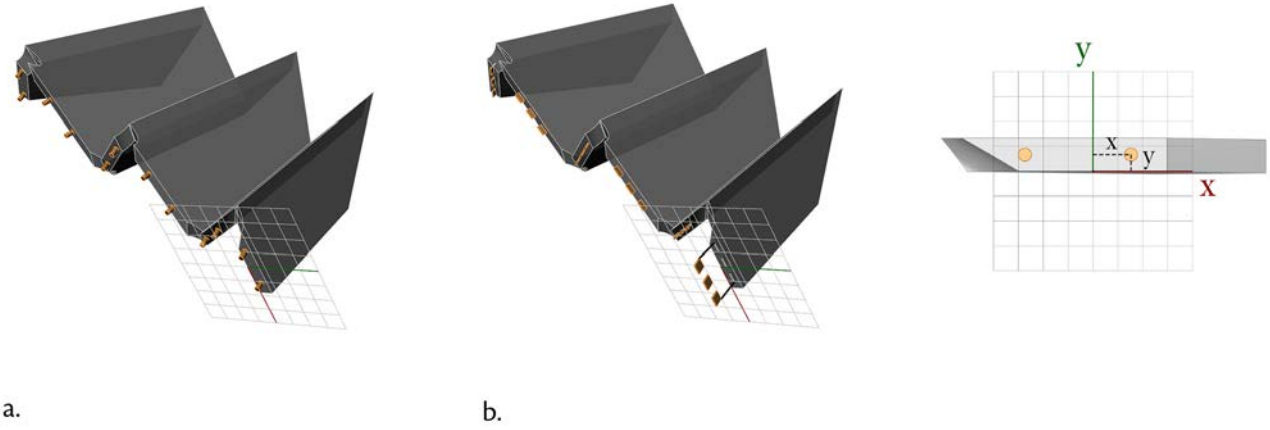
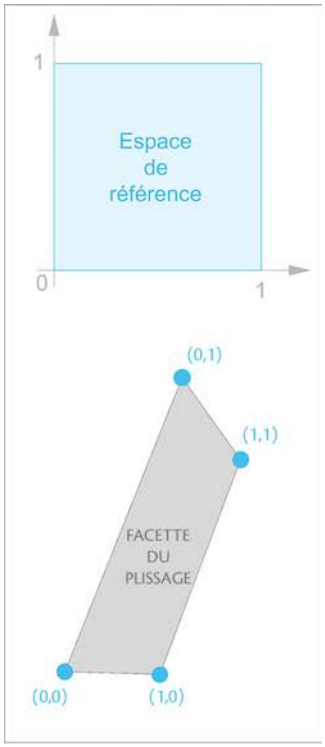
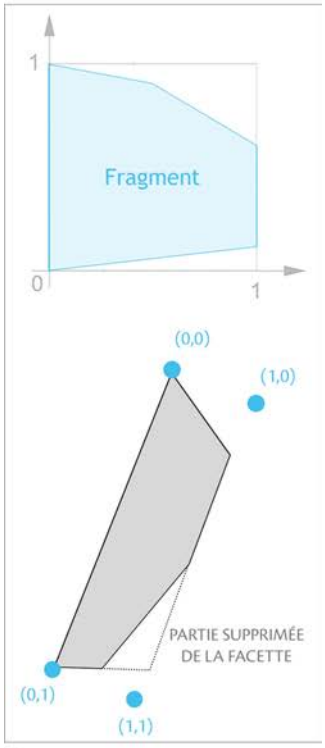


Figure 6.39 - Variantes de la géométrie d'assemblage à partir du composant « T&G_Joints » : a. assemblage par tourillons ; b. assemblage par tenons.

À l'avenir, d'autres modèles d'assemblage pourront être développés. Ils feront l'objet d'une analyse comparative afin de sélectionner les morphologies les plus adaptées à un environnement numérique de conception et de fabrication.
Pour aider le concepteur dans le choix d'une famille et d'un type d'assemblage, ces derniers devront être classés selon leurs aptitudes à répondre à des problématiques précises telles que les possibilités de montage/démontage, l'autoblocage de l'assemblage, la technique d'usinage ou encore sa visibilité/invisibilité…
L'ensemble de ce questionnement, qui traduit une réalité constructive, doit être mené par le concepteur afin de répondre aux besoins de la modélisation liée à la conception architecturale.



a.



b.

Figure 6.40 - État de la facette dans l'espace de référence du repère théorique.

OBSERVATIONS : La phase de matérialisation permet de définir la géométrie finale des éléments composant l'enveloppe plissée. Celle des éléments singuliers (cf. section 5.5) est traitée manuellement soit dans l'environnement de *Grasshopper®* afin de conserver l'aspect paramétrique de la modélisation, soit directement dans celui de *Rhinoceros®*.

Dans l'état actuel du processus, les facettes du plissage ayant subi des modifications du type percement ou suppressions partielles entraînent des complications géométriques dans l'automatisation du processus de matérialisation. Par exemple, le retrait d'une partie de la facette génère une surface dont le nombre de sommets est supérieur à quatre. Rapportée dans le repère théorique, cette surface devient un fragment de l'espace de référence dont nous ne maîtrisons pas le repositionnement dans le domaine [0,1] (Figure 6.40). Cette particularité entraîne souvent une variation morphologique importante en raison de l'absence de solutions géométriques.

Par conséquent, nous devons actuellement définir la géométrie des éléments singuliers en phase de modelage, dans le cas où ces derniers seraient concernés par une opération d'évaluation, puis la redéfinir lors de la phase de matérialisation afin d'obtenir la géométrie définitive de l'élément.

Dans la logique d'un continuum numérique, la phase de matérialisation est suivie d'une phase de fabrication numérique. Aujourd'hui, différents plug-ins concernant les étapes de fabrication comme le calepinage (plug-in Génération) ou la définition des trajectoires d'usinage (plug-in Kuka PRC) sont développés dans l'environnement de *Grasshopper®*.
Aussi, nous avons souhaité ne pas mener une recherche parallèle aux outils déjà existants dans le domaine de la fabrication, pour nous consacrer aux moteurs d'évaluations qui impactent les deux phases de modélisation (la phase de modelage et la phase de matérialisation). Ces moteurs d'évaluations font l'objet du dernier chapitre de ce mémoire.

6.4. Mise à l'épreuve de l'outil CARA(s)PACE

Pour valider notre travail, deux expérimentations ont été menées. Ces dernières questionnent l'aptitude de notre outil à produire une structure architecturale plissée conforme à un modèle existant. Dans ce travail, nous concentrons nos efforts sur la reproduction de plissages ; nous nous limiterons donc à une étude de la phase de modelage et de matérialisation sans traitement des assemblages. Dans le premier cas, nous nous penchons sur la restitution de la chapelle Saint Loup, modèle architectural de référence dans le domaine des structures plissées en panneaux de bois. Ensuite nous nous consacrerons à la reconstitution du modèle expérimental de la New-Yourte.

6.4.a. Reconstitution de la chapelle St Loup de Pompaples.

Le modèle géométrique du plissage de la chapelle Saint Loup fait référence à une morphologie de plissage basée sur les règles de pliage d'une feuille de papier. En effet, ce principe est utilisé dans la méthode développée par Hans Buri pour la conception morphologique de la chapelle. Cette méthode consiste à associer un « profil de section » (en rouge) à un profil d'ondulation (en bleu) pour le plissage d'une surface. En « extrudant » le profil d'ondulation le long du profil de section à partir des règles de l'origami, nous obtenons une surface plissée développable qui présente un « retournement » des plis à chaque ligne de brisis. Le patron de la surface développée est appelé un « crease pattern »(Figure 6.41).

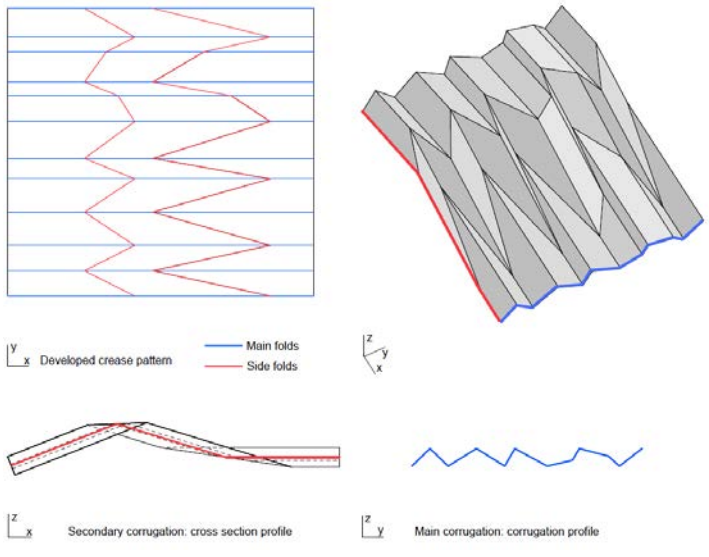


Figure 6.41 - Exemples de plissage réalisés selon la méthode de Hans Buri.
D'après (Buri, 2010, p. 131).

Cette méthode a donc été utilisée pour la conception de la chapelle. Afin d'en comprendre la morphologie, nous présentons deux phases de la conception.

Dans un premier temps, le concepteur a généré une surface plissée présentant une ondulation régulière à l'origine de plis parallèles (Figure 6.42.a). Cette étape a servi à une recherche géométrique pour l'élaboration de la chapelle satisfaisant à la fois un besoin spatial, mais aussi structural. Dans un second temps, une modification du profil ondulatoire a été réalisée créant une géométrie singulière : vus selon le pan de plissage supérieur, les plis convexes sont devenus obliques alors que les plis concaves sont restés parallèles(Figure 6.42.b).

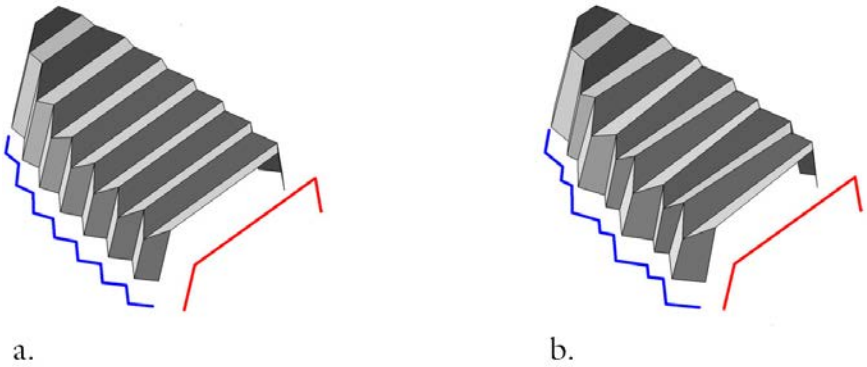


Figure 6.42 - Géométrie de la chapelle.
a. Plissage parallèle.
b. Plissage oblique.
D'après (Buri, 2010, p. 263).

L'intérêt de créer une géométrie de plis irréguliers réside dans une gestion tant de l'ambiance, notamment acoustique et lumineuse, que de la problématique constructive. Par exemple, l'introduction des plis obliques engendre (selon le principe de la surface développable) une inclinaison de l'arête des plis concaves en toiture : cette pente favorise l'évacuation des eaux de pluie. Cette géométrie favorise également une économie de matière lors du calepinage grâce à l'alternance des plis parallèles (Figure 6.43).

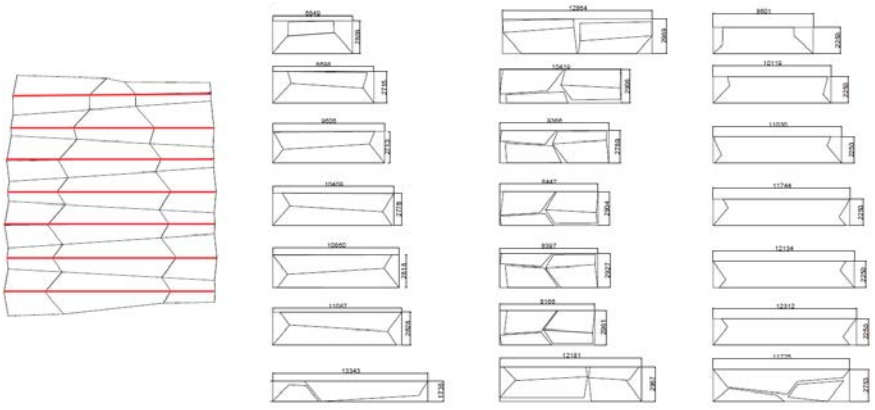


Figure 6.43 - Développé de la surface et calepinage des panneaux.
D'après (Buri, 2010, p. 266).

La modélisation de la chapelle par la méthode implémentée dans l'outil CARA(s)PACE a nécessité deux étapes importantes : l'une étant la création de la surface de référence et l'autre la création des tables de plissage.

D'une part, la surface de référence a été composée à partir des dimensions globales de la chapelle. Elle est constituée de trois surfaces initiales dont les arêtes communes matérialisent l'emplacement des brisis (Figure 6.44).

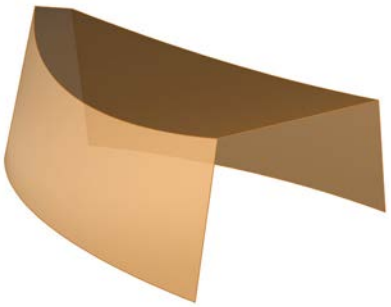


Figure 6.44 - Surface de référence.

D'autre part, pour définir les tables de plissage correspondant à la géométrie de la chapelle, nous devons rechercher les données relatives aux intervalles et aux amplitudes de chaque nœud. Cela peut se gérer soit manuellement, soit en utilisant la bibliothèque de clusters attitrés à la création des tables. La première solution est empirique et fastidieuse. Quant à la deuxième, elle ne présente qu'une approximation de la géométrie de la chapelle (Figure 6.45). En effet, les clusters proposés se sont révélés inappropriés pour définir précisément de la géométrie du plissage telle qu'elle a été conçue pour la chapelle.

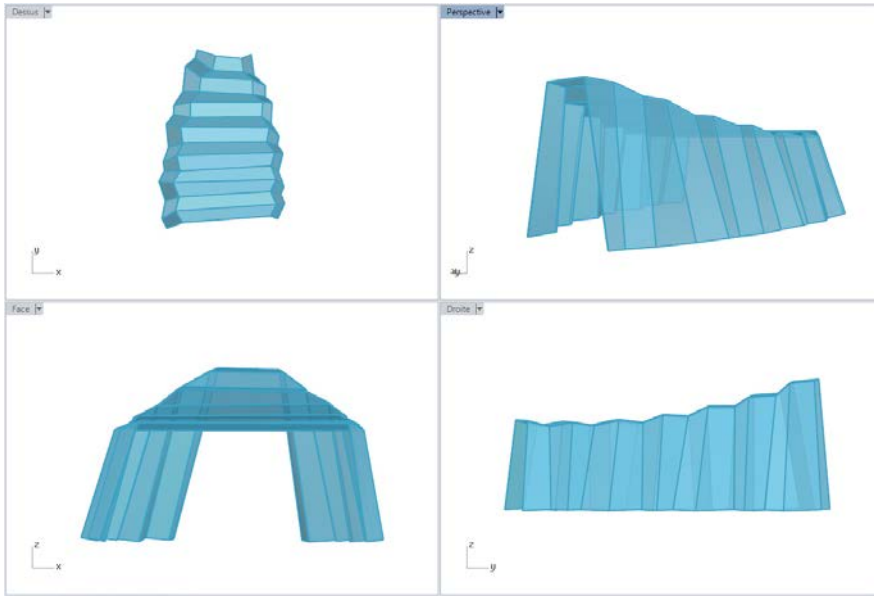


Figure 6.45 - Vues géométrales et vue perspective de l'enveloppe plissée.

Ce résultat met en évidence la nécessité de produire d'autres règles de création de plissage afin d'enrichir le potentiel de notre outil. Si nous nous référons à l'algorithme de plissage de la chapelle (alternance de plis obliques et parallèles), nous pouvons imager un cluster de génération de table capable d'introduire cette logique.

Ainsi, nous avons imaginé un cluster « S_Profil » capable d'intégrer cette particularité géométrique dans les tables (Figure 6.46).

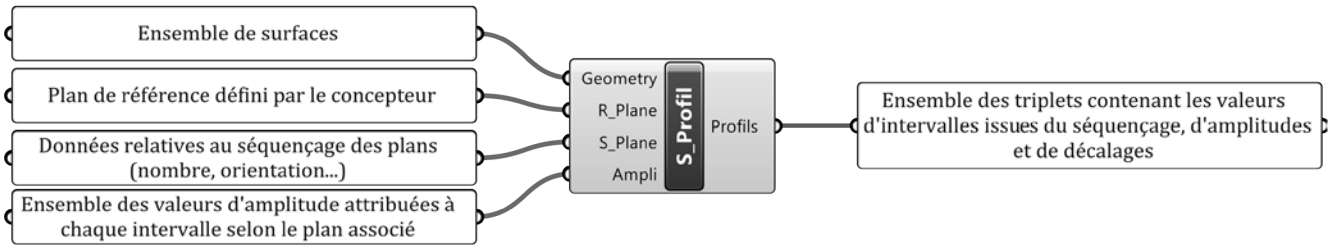


Figure 6.46 - Cluster de définition géométrique des intervalles.

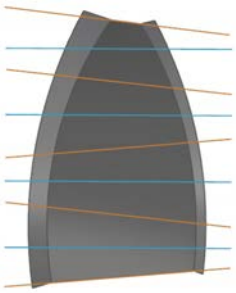


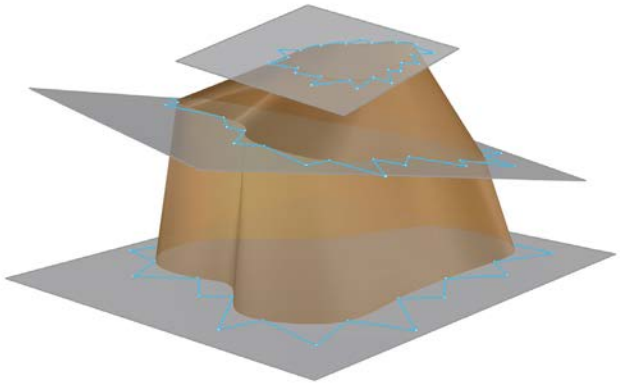
Figure 6.47 - Séquençage de la surface de référence par des plans orientés.

Pour y parvenir, nous nous basons sur le « séquençage » de la surface de référence par l'alternance de plans obliques et parallèles. Cette action donne lieu à une définition géométrique des intervalles dans l'espace global (Figure 6.47).
Ce cluster se classe dans une nouvelle famille de moteurs de création de tables construites sur la base de données géométriques.
Il marque le début d'un enrichissement de l'outil favorisant la créativité.

6.4.b. Reconstitution de la New-Yourte.

Aves les mêmes objectifs que ceux que nous nous sommes donnés dans la reproduction des caractéristiques morphologiques de la chapelle Saint Loup, nous nous attachons à « remodeliser » la New-Yourte. Pour cela, nous rappelons les deux principales règles qui déterminent cette géométrie (Figure 6.48) :

Figure 6.48 - Représentation des trois plans contenant les profils de plissage et le profil de jonction.



Tout d'abord, la surface de référence a été définie par trois courbes fermées inscrites chacune dans un plan.
Ensuite, les profils de plissage ainsi que le profil de brisis ont été spécifiés dans ces différents plans.

Si nous comparons ces besoins aux possibilités de notre outil CARA(s)PACE, nous pouvons émettre deux constats (Figure 6.49) : d'une part, l'amplitude n'est pas définie par rapport à la normale de la surface de référence, mais par rapport à un plan imposé ; d'autre part, la jonction du plissage n'est pas caractérisée seulement par le point le plus proche de deux arêtes, mais ce point doit également appartenir à un plan précis.

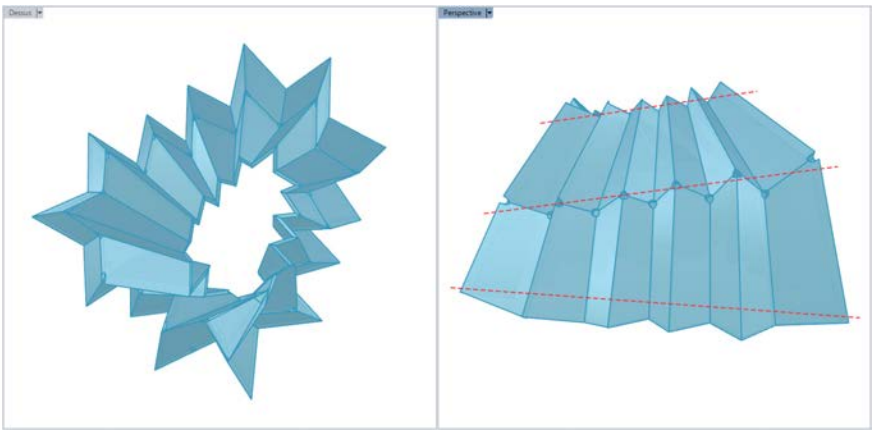


Figure 6.49 - Modélisation de la New-Yourte avec les fonctions initiales présentes dans l'outil CARA(s)PACE.

Ainsi, pour retrouver cette logique de création par les trois plans en utilisant notre outil, nous devons palier le manque de cette fonction en générant un nouveau cluster de création de tables et un cluster de jonction adaptée.

Pour imposer le profil du plissage non pas en fonction de la normale à la surface, mais par rapport à un plan donné, nous avons développé le cluster « P_Table » (Figure 6.50). En utilisant l'algorithme du visualisateur graphique « Display_Pleating », nous pouvons obtenir le profil de plissage selon la méthode initiale. Ensuite, les sommets de ce profil sont projetés sur un plan défini par le concepteur. Grâce au vecteur décalage, un nouveau profil et donc une nouvelle table peuvent être enregistrés.

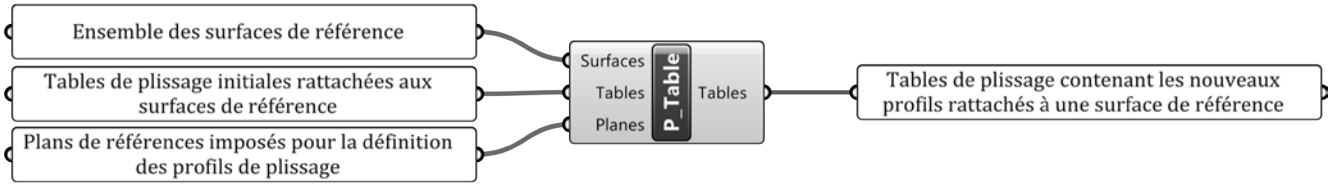


Figure 6.50 - Cluster de modification de table selon un plan imposé.

De la même manière, la modification du cluster de jonction consiste à rajouter une entrée contenant le plan spécifié par le concepteur. Ce cluster est nommé « P_Link_Pleating » (Figure 6.51). Il recherche le point le plus proche de deux arêtes appartenant au plan défini.

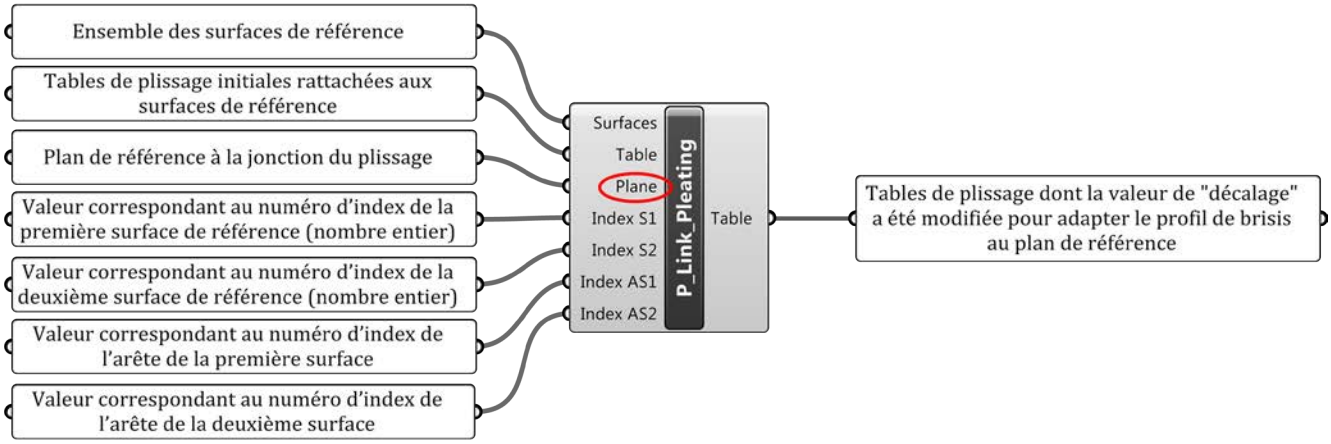


Figure 6.51 - Cluster de jonction selon un plan imposé.

Nous avons introduit ces plans dans nos clusters afin de répondre à une exigence géométrique de nos modèles de référence. Pour une plus grande souplesse de créativité, ces plans pourront être généralisés à une surface quelconque.

OBSERVATIONS : Chaque cas de création hors du contexte de l'outil CARA(s)PACE exige nécessairement à un développement particulier. Ce constat met en évidence un besoin d'enrichir et d'adapter l'outil à différentes méthodes constructives des plissages.
L'une des principales problématiques tient à la génération du profil de plissage dans des conditions variées. Par exemple, la méthode de définition de l'amplitude par la normale peut être un frein à la créativité. Bien que le modèle soit fonctionnel et acceptable, la morphogenèse se caractérise par une technique particulière de plissage, entraînant, pour l'instant, un champ trop restrictif des possibilités de plissage.
L'élaboration de clusters, comme ceux présentés précédemment, apporte des variations dans le processus de conception nécessaire à une stimulation de la créativité.

Chapitre 7

Les moteurs d'évaluations

Dans l'esprit d'une conception architecturale libre, l'outil CARA(s)PACE propose d'aider les concepteurs à faire des choix ou à valider des solutions proposées. Cette hypothèse semble envisageable dans la mesure où l'outil est capable d'interpréter les résultats d'une évaluation comme paramètres de conception. Nous proposons pour cela des moteurs d'évaluation susceptibles d'interagir sur différentes thématiques tout au long du processus de conception.

Les moteurs d'évaluation sont convoqués par le concepteur selon ses besoins : soit du côté de l'heuristique correspondant à une intégration des contraintes techniques du point de vue de la conception afin de découvrir de nouvelles solutions, soit du côté de la vérification déterminant l'état de la solution proposée.

Nous présentons dans ce chapitre deux exemples de moteurs d'évaluation[1] :

- Le premier est un moteur d'évaluation structurale. Ce choix nous semble primordial dans la mesure où ce moteur évalue la stabilité et le dimensionnement de la structure plissée. Il est donc indispensable à toute construction.

- Le second est un moteur d'évaluation thermique ; nous avons fait ce choix puisque la thématique « thermique » est rarement abordée dans le domaine des bâtiments plissés. Ce travail de recherche a été mené en parallèle de la thèse lors d'un stage master, effectué par Alice Labeye[2]. L'objectif de ce stage consistait à créer un moteur de calcul thermique capable d'évaluer une géométrie d'une enveloppe plissée en phase d'esquisse ou de conception. Une telle recherche a permis de distinguer les paramètres de plissage influant sur l'intérêt thermique de ce même plissage.

---

[1] Ce choix a été réalisé parmi de nombreux champs d'applications possibles tels que l'architecture, l'acoustique, la fabrication ou encore le montage.

[2] (Labeye, 2016).

7.1. Le moteur d'évaluation structurale

Le développement d'un moteur d'évaluation structurale nous permet d'analyser et d'évaluer la stabilité, la rigidité et la résistance du modèle géométrique d'une surface plissée (voire d'une surface de référence) figé à un instant (t) dans le processus de conception.
Tout d'abord, la stabilité se justifie par le choix des liaisons qui permet de sélectionner des familles d'assemblage que le concepteur peut utiliser.
Ensuite, la rigidité et la résistance servent au dimensionnement de la structure plissée qui, dans notre cas, se traduit principalement par une caractérisation de l'épaisseur.

Notre choix d'utiliser des panneaux dans la construction des enveloppes plissées entraîne deux approches mécaniques : l'approche volumique et l'approche surfacique.
L'approche volumique nécessite une modélisation « matérielle » de l'objet étudié ; celui-ci présente donc une géométrie exacte qui comprend par exemple des percements ou des entailles. Cette approche ne peut se faire qu'à l'état final du processus de conception. Cependant, l'aspect volumétrique apporte une « lourdeur » dans le processus de calcul et l'état actuel de nos connaissances est insuffisant pour y appliquer des critères de dimensionnement. Cette approche a donc été écartée de notre démarche.

Ainsi, nous nous tournons vers une approche surfacique. Elle correspond à l'univers des coques, choix qui implique une analyse par la méthode de calcul aux éléments finis. En se rapportant à notre méthode de conception définie au chapitre 5, le calcul surfacique peut s'effectuer à deux niveaux. D'une part, nous pouvons traiter la « surface de référence » de manière à obtenir des informations sur son inertie suffisante (informations essentielles à la caractérisation des plis). D'autre part, une analyse de la surface plissée permet de valider un état momentanément finalisé.

La méthode de calcul aux éléments finis implémentée dans le moteur d'évaluation structurale est décrite dans une première sous-section. Ce choix sera ensuite justifié par une analyse structurale de l'expérience de la New-Yourte. Cette analyse fait l'objet d'une deuxième sous-section.

7.1.a. La méthode de calcul aux éléments finis

La modélisation mécanique utilisant la méthode aux éléments finis appliquée à nos structures plissées en bois nécessite trois étapes importantes. Premièrement, la modélisation des panneaux ; deuxièmement, la modélisation des liaisons entre les panneaux, et troisièmement, l'analyse et le traitement des résultats. Ensuite, les besoins qui découlent de chacune de ces étapes ont permis de sélectionner un logiciel adapté.

7.1.a.1. La modélisation des panneaux

La modélisation de la structure plissée (ou non) requiert la définition d'un maillage, d'un ou plusieurs matériaux et de conditions limites d'utilisation tant cinématiques que statiques. L'approche retenue pour estimer le comportement mécanique de ce genre de structure demande l'utilisation d'éléments de type coques.

- **Le maillage.** Il correspond à une subdivision en éléments finis surfaciques de la surface de référence ou des facettes de la surface plissée selon le cas étudié.

- **Le matériau.** Il apporte des informations indispensables au calcul de la structure comme la caractéristique géométrique de son épaisseur (constante ou variable) et son comportement élastique[3]. Le comportement orthotrope élastique du bois est traduit par une « matrice de complaisance » ; celle-ci est composée de 3 modules de Young, de 3 coefficients de Coulomb et de 6 coefficients de Poisson (Figure 7.1).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_t \\ \gamma_{rt} \\ \gamma_{lt} \\ \gamma_{lr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_l} & -\frac{\nu_{rl}}{E_r} & -\frac{\nu_{tl}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{lr}}{E_l} & \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu_{TR}}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{lt}}{E_l} & -\frac{\nu_{rt}}{E_r} & \frac{1}{E_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{rt}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{lt}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_l \\ \sigma_r \\ \sigma_t \\ \tau_{rt} \\ \tau_{lt} \\ \tau_{lr} \end{bmatrix}$$

$\varepsilon_l, \varepsilon_r, \varepsilon_t$	:	déformations selon les trois axes
$\gamma_{rt}, \gamma_{lt}, \gamma_{lr}$	:	glissements selon les trois plans
E_l, E_r, E_t	:	modules de Young selon les trois axes
G_{rt}, G_{lt}, G_{lr}	:	modules de cisaillement selon les trois plans
$\nu_{lr}, \nu_{rl}, \nu_{tl}, \nu_{lt}, \nu_{rt}, \nu_{tr}$	:	coefficients de Poisson
$\sigma_l, \sigma_r, \sigma_t$	:	contraintes normales selon les trois axes
$\tau_{rt}, \tau_{lt}, \tau_{lr}$	:	contraintes de cisaillement selon les trois plans

Figure 7.1 - Matrice de complaisance élastique d'après (Natterer et al., 2004, p. 76).

[3] Dans le cas des panneaux de bois, nous nous conformons aux caractéristiques élastiques orthotropes.

Dans le cas de la théorie des coques, l'épaisseur n'est pas modélisée. Une simplification de cette matrice peut donc être envisagée en fonction de l'hypothèse choisie pour le traitement de l'épaisseur. Ainsi, d'un point de vue théorique, nous tenons compte de l'orthotropie du bois en suivant soit les trois dimensions (état de déformation plane), soit les deux dimensions provenant du plan du panneau (état de contrainte plane). Dans ce cas, nous pouvons limiter la matrice à 2 modules de Young, 1 coefficient de Coulomb et 2 coefficients de Poisson.
Il est intéressant de remarquer que, si le matériau se présente comme un « multi-couches », nous pouvons également introduire le comportement de chaque couche. Par exemple, chaque pli d'un panneau peut être introduit dans la méthode de calcul selon l'orientation de son orthotropie.

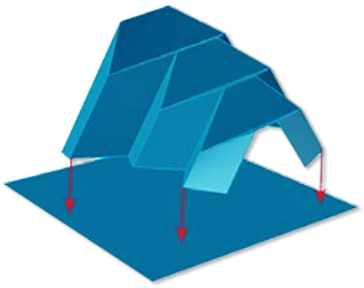
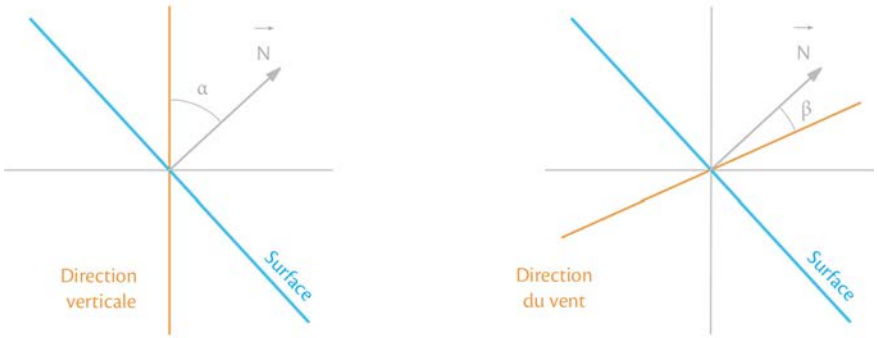


Figure 7.2 - Figuration des appuis au sol.

- **Les conditions limites cinématiques.** Celles-ci se spécifient par les appuis nécessitant une définition du sol et de la nature des liaisons avec ce dernier. Cela se traduit par un blocage de certains degrés de liberté en nombre suffisant des nœuds spécifiés (Figure 7.2).

- **Les conditions limites statiques.** Elles correspondent aux sollicitations telles que le chargement dû au poids propre et aux charges climatiques (neige + vents)[4]. Ces dernières sont liées à la normale de la surface étudiée. Dans le cas de la neige, nous étudions l'angle de la normale de la surface par rapport à la verticale (Figure 7.3.a). Dans le cas du vent, nous étudions l'angle de la normale par rapport à la direction du vent (Figure 7.3.b).

Figure 7.3 - Définition des sollicitations.
a. Si alpha < 60 °, la surface accumule de la neige.
b. Une pression s'exerce en fonction de l'inclinaison de la surface par rapport à la direction du vent.



a. Cas de la neige

b. Cas du vent

[4] Les charges d'exploitation n'étant pas définies pour l'instant.

7.1.a.2. La modélisation des liaisons entre panneaux

Pour la modélisation mécanique des structures composées de panneaux bois, il est nécessaire de prendre certaines précautions lors de la connexion des différents éléments telles que la continuité du maillage par la présence de nœuds en vis à vis et la prise en compte du comportement semi-rigide des assemblages en bois.

- **La continuité des plaques.** Nous avons vu dans le chapitre 5, que la création d'une surface plissée engendre un ensemble de facettes distinctes. La jonction de ces facettes présente donc une superposition de nœuds qui peuvent occasionner un problème de reconnaissance. Pour éviter cette situation, la première solution réside dans la fusion de tous les nœuds numériquement identiques en un nœud physique commun ; cette action génère une continuité parfaite de la matière (Figure 7.4.a). Afin de modéliser des assemblages semi-rigides, il est nécessaire de connecter les nœuds associés par des « boîtes à ressort » ou matrice de rigidité de manière à obtenir une entité numérique unique (Figure 7.4.b).

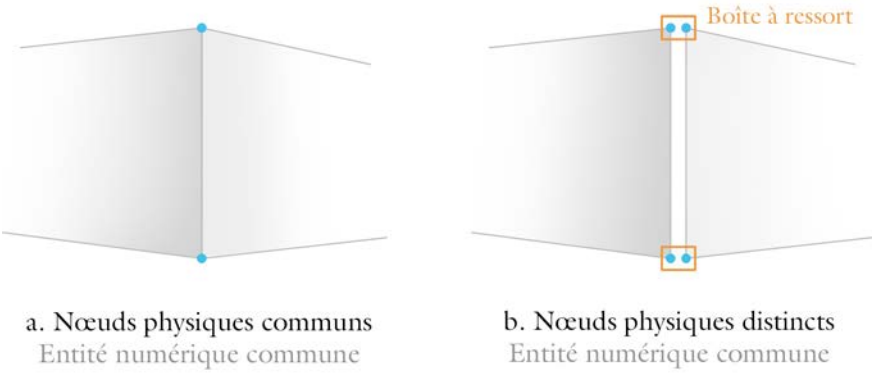


Figure 7.4 - Mode d'assemblage des facettes.

L'étape du maillage des facettes doit donc garantir une correspondance du nombre de divisions en éléments sur chacune des arêtes communes aux facettes afin d'assurer la correspondance des nœuds. Le « mailleur » proposé par *Castem*® permet cette opération (Figure 7.5). Un développement utilisant la méthode de Delaunay serait nécessaire pour introduire cette étape dans l'environnement de *Grasshopper*®.

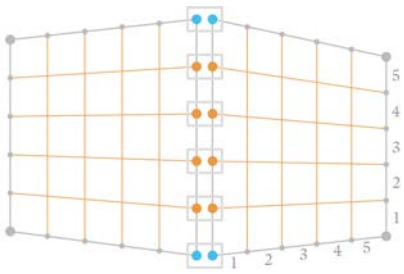


Figure 7.5 - Maillage des facettes du plissage par une division identique des arêtes de chaque facette.

- **La matrice de raideur.** La modélisation des liaisons entre les panneaux se rapporte au choix du mode d'assemblage. D'un point de vue théorique, ces liaisons correspondent, par exemple, soit à un encastrement (la raideur associée à tous les degrés de liberté de l'assemblage est infinie), soit à une rotule (la raideur des rotations est nulle).

Or, dans le cas des structures en bois, les assemblages étant considérés comme des liaisons semi-rigides, la prise en compte d'une matrice de raideur est donc primordiale. Elle est définie par des valeurs de raideur (k) finie provenant d'un couplage au niveau des six degrés de liberté (Figure 7.6).

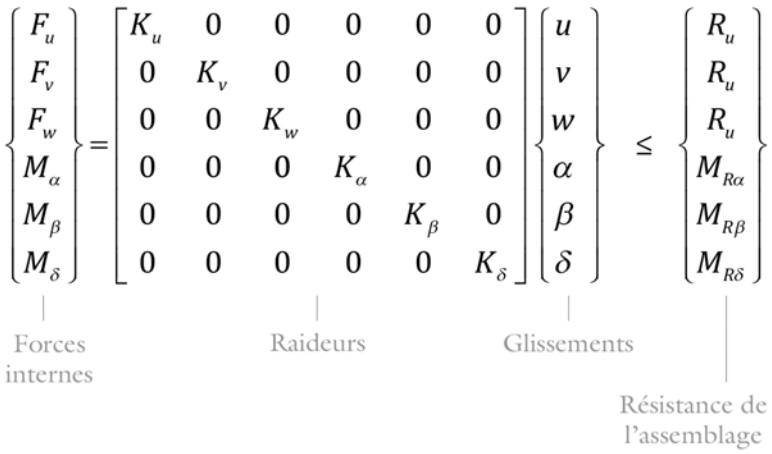


Figure 7.6 - Matrice d'assemblage définissant le couplage entre panneaux.
En tenant compte du glissement dans chaque assemblage, chaque liaison est modélisée par une matrice dans laquelle on qualifie les raideurs.

Ainsi, cette matrice permet de modéliser tout type d'assemblage souhaité (tenon-mortaise, rainure languette…) ; à titre d'exemple, un pivot linéaire se traduit par une valeur de la raideur significativement grande pour le couplage force-translation, une valeur proche de zéro pour la raideur du couplage moment-rotation.

Seule l'utilisation dans la modélisation des liaisons semi-rigides nous garantit une évaluation correcte du comportement de la structure bois. Cela sous-entend que la matrice de raideur doit être connue pour chaque assemblage ; c'est-à-dire une valeur de raideur pour les 6 degrés de liberté. Cependant, selon la famille d'assemblage convoquée, seule une des six raideurs est connue d'un point de vue normatif[5]. C'est pourquoi la validation de notre hypothèse effectuée au sein de la matrice de raideur a été évaluée par une analyse structurale de la New-Yourte (cf. sous-section 7.1.b).

[5] Dans les Eurocodes, cette raideur correspond au « k_{ser} ». Son intégration au sein de la matrice permet une approximation suffisante pour dimensionner correctement une structure en bois de type poteaux-poutre.

7.1.a.3. Le traitement des résultats

Le traitement des résultats permet d'apporter au concepteur une réponse impliquant d'éventuelles modifications à effectuer sur les paramètres de conception. Ces résultats sont visibles sous la forme de trois grandeurs inhérentes à l'évaluation structurale : la stabilité, les déplacements et les contraintes.

– **La stabilité.** Elle est définie par la matrice de raideur (globale) de la structure :

$$\{F\} = [K]\{Q\}$$

Avec
{F} : Ensemble de forces provenant des 6 degrés de liberté appliqués à chaque nœud.
[K] : Déterminant de la matrice de raideur de la structure.
{Q} : Ensemble des déplacements issus des degrés de liberté de chaque nœud.

La stabilité de la structure est assurée lorsque le déterminant est différent de zéro ; on dit alors que la matrice de raideur de la structure est non singulière.
Cette condition est atteinte en bloquant un nombre suffisant de degrés de liberté : elle dépend donc du nombre des appuis et de la nature des liaisons.

– **Les déplacements.** Ils sont liés à la raideur de la structure et à l'intensité des efforts imposés et spécifiés selon les critères de nuisance. Par exemple, le critère de nuisance caractérisant une flèche admissible ne doit pas dépasser 1/300e de la portée. Ce critère peut être rapporté à l'ensemble de la structure, car il est lié à une proportion de déplacement ; ainsi, l'évaluation de la structure peut être appliquée à l'élément disposant de la plus grande portée avant d'être vérifié sur chaque élément.

– **La contrainte.** Elle correspond au critère de ruine. La contrainte en tout point de la structure ne doit pas dépasser la résistance du matériau ; celle-ci équivaut à 10 MPa pour le matériau bois dans le cas d'un pré-dimensionnement. De la même manière, nous

pouvons évaluer les efforts critiques d'un assemblage afin de vérifier sa viabilité. De plus, une vérification de l'instabilité au flambement doit être réalisée sur chaque élément comprimé.

Les informations issues de ce moteur d'évaluation correspondent donc à ces trois grandeurs. Le concepteur est informé, au moyen d'une boîte de dialogue, de la stabilité de la structure et du respect des critères de nuisance ainsi que des critères de ruine.
Ces informations peuvent être résumées par une valeur globale comprise entre 0 et 1 (1 étant la situation optimale) permettant d'apprécier globalement et rapidement le comportement structural.

7.1.a.4. L'environnement numérique

Actuellement, nous disposons dans notre environnement de travail soit du logiciel *Karamba®* (plug-in de *Grasshopper®*), soit du logiciel « open source » *Castem®*. Le logiciel *Karamba®* reprend la logique « multi-cluster » dans la création du moteur d'évaluation. Cependant, *Karamba®* est limité aux matériaux isotropes et n'intègre pas une matrice de raideur des assemblages semi-rigides dans le couplage des panneaux. Par conséquent, son utilisation dans le cadre de notre étude sur le bois est inadaptée. Nous avons donc choisi de travailler avec le logiciel *Castem®*. Ainsi, une liaison avec *Grasshopper®* a été réalisée à travers un cluster programmé en Visual Basic qui convertit les données en codes éléments finis Gibiane (Figure 7.7).

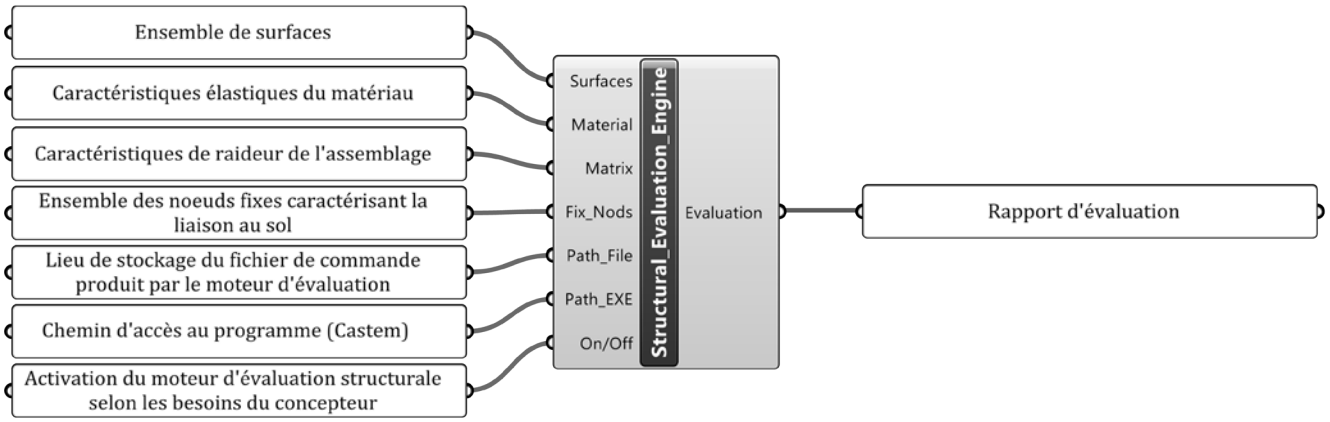


Figure 7.7 - Moteur d'évaluation structurale.

Le logiciel *Castem*® garantit un maillage performant des surfaces présentant un bord quelconque. Cela présente un avantage dans le traitement d'éléments singuliers comme ce fut le cas pour la couronne de la New-Yourte. Toutefois, ce logiciel n'est pas en mesure de mailler correctement un élément qui présente un évidement de matière en son sein. Dans ce cas, une décomposition en plusieurs éléments pleins s'impose.

Par ailleurs, des outils comme *Castem*® ou *Karamba*® sont capables de produire une image en couleur des « iso-contraintes » d'une surface. Cette particularité est intéressante notamment dans le cas d'étude des surfaces de référence en évaluant les zones nécessitant une plus grande inertie. Ainsi, cette analyse intervient comme une pré-étude dans le paramétrage du plissage : gestion de l'épaisseur et de l'amplitude. En effet, un moteur comme *Galapagos*® utilisant l'analyse des calculs permet d'agir sur les tables de plissage. Par exemple, l'amplitude des plis peut y être gérée en s'appuyant sur les résultats issus des iso-contraintes de la surface de référence.

7.1.b. Analyse de l'expérience

La méthode aux éléments finis implémentée dans le moteur d'évaluation a été testée sur le projet expérimental de la New-Yourte. Cette analyse structurale permet, par un raisonnement à l'inverse, de valider les hypothèses de calculs implémentées dans le logiciel *Castem*®.

Les paramètres introduits concernent les concepts fondamentaux nécessaires au calcul structural de l'enveloppe plissée :

– le maillage : il favorise la précision du calcul ;

– le matériau : il reprend les caractéristiques des panneaux de lamibois comme l'épaisseur ou ses propriétés élastiques ;

– les appuis (liaisons au sol) qui correspondent aux nœuds du plan z = 0 et les assemblages semi-rigides qui assurent la stabilité de la structure ;

– le chargement (principalement son poids propre) : il valide le dimensionnement de la structure.

Afin d'attester la justesse des paramètres, nous avons comparé le comportement numérique global de la structure (Figure 7.8) avec les résultats expérimentaux.

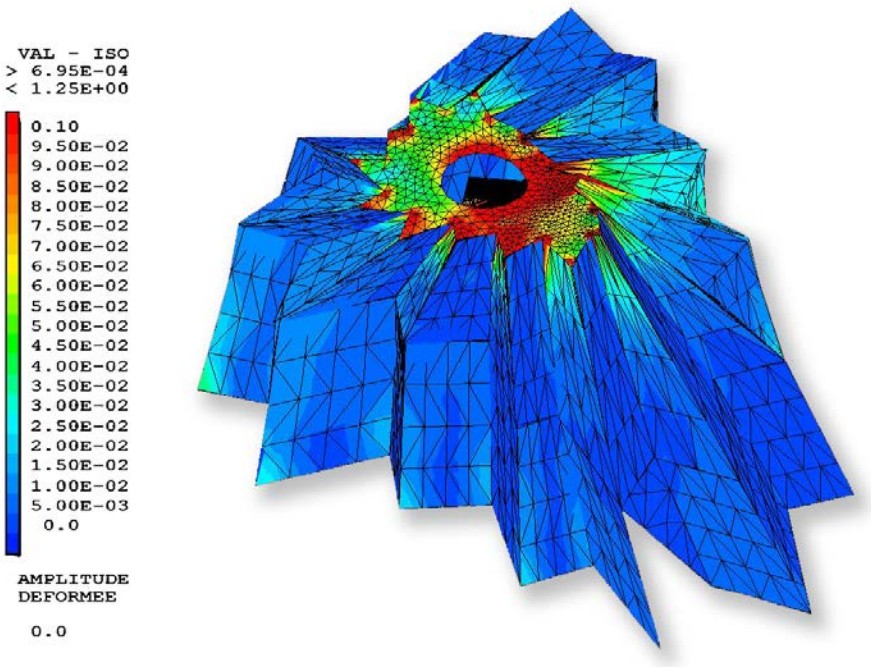


Figure 7.8 - Image de la «déformée» de la structure sous son poids propre produit par le logiciel *Castem*®. La couronne et la zone des panneaux autour des nœuds assurant la liaison au sol sont les plus sollicitées.

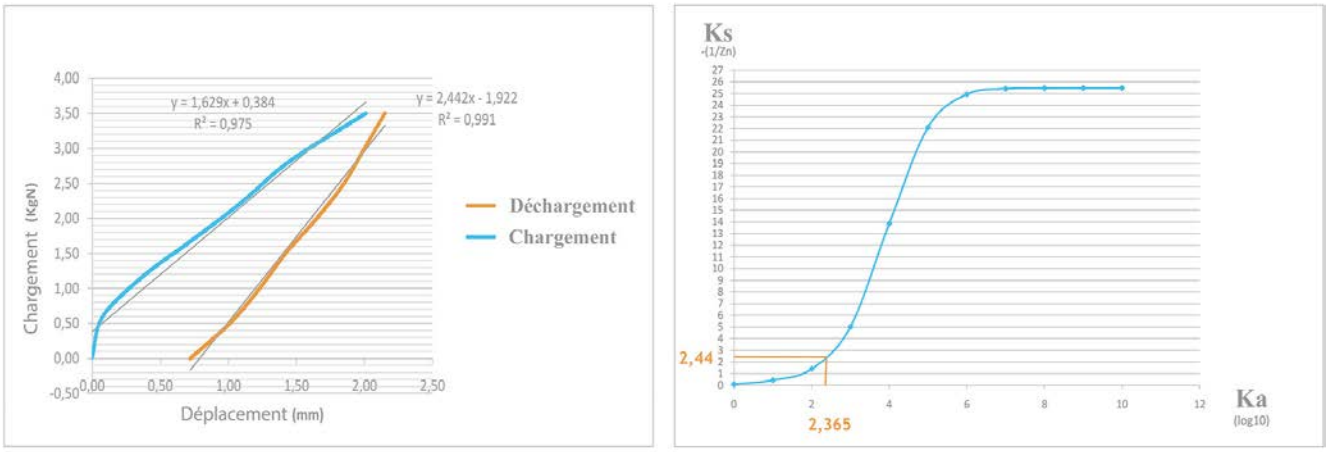
Figure 7.9 - Mesure expérimentale de la raideur en un point.

La recherche de la raideur structurelle expérimentale s'est faite par un chargement ponctuel au niveau d'un nœud de la couronne de la New-Yourte (Figure 7.9). Le chargement a été effectué par paliers successifs de 50 kg, pour lesquels nous avons mesuré le déplacement vertical du nœud (Figure 7.10.a).

Le comportement élastique est obtenu après un cycle d'accommodation. La raideur au point de chargement a donc été mesurée également lors du déchargement afin d'assurer un bon comportement élastique. En parallèle, ce chargement expérimental a été simulé sur le logiciel de calcul d'éléments finis de manière à déterminer une raideur élastique numérique de la structure (Ks). Cette raideur dépend des glissements d'assemblages modélisés. Nous avons réalisé plusieurs simulations pour différentes valeurs de raideur d'assemblage (Ka) comprise entre 0 et $+\infty$ (Figure 7.10.b). Nous constatons que la modélisation d'un assemblage donne une valeur

au moins dix fois supérieure à la valeur expérimentale trouvée[6]. Ce résultat valide la nécessité de prendre en compte le glissement des assemblages pour les structures en bois[7].

Après le report de la valeur expérimentale (*Ks*), nous pouvons estimer la raideur d'assemblage (*Ka*) réelle de la structure plissée (Figure 7.10.b). La valeur obtenue est relativement faible par rapport aux données trouvées dans la bibliographie, ce résultat est certainement lié au taux d'humidité important présent dans les panneaux de bois lors de l'expérience. Un travail important sur les assemblages reste à faire ; en jouant sur les différentes typologies et technologies d'assemblages (connecteurs, collage, etc.), on peut améliorer nettement la raideur des structures.



a. b.

Figure 7.10 - Graphiques des résultats.
a Recherche de la raideur structurelle (Ks) expérimentale.
b. Courbe expérimentale la raideur structurelle (Ks) numérique en fonction de la raideur d'assemblage (Ka) numérique.

[6] Cette valeur correspond à la pente de la droite issue des données mesurées lors du déchargement de la structure.

[7] Nous avons constaté que les assemblages réalisés correspondent au comportement d'un pivot linéique semi-rigide ; cf. (Bléron et al., 2001).

OBSERVATIONS : L'ajout d'un évaluateur structural, utilisant la méthode aux éléments finis du type coques (*Castem®*), permet de valider la stabilité de la structure et son dimensionnement. Le maillage (géométrie discrétisée), les matériaux et les conditions limites cinématiques (les appuis) et statiques (chargements) sont commandés par des clusters spécifiques (*Grasshopper®*). Le pli structural apporte de l'inertie à l'enveloppe, donne de la raideur aux grandes surfaces avec un minimum de matière et stabilise la structure par combinaisons tridimensionnelles. Ces trois principes mécaniques du pli sont considérés comme les critères d'évaluations de l'enveloppe structurale.
Toutefois, l'analyse structurale n'entraîne pas encore de modifications automatiques sur la morphologie de l'enveloppe. Les données sont à interpréter manuellement en agissant sur les différents paramètres présents dans le modeleur morphologique comme la gestion de l'amplitude et de la fréquence (l'inertie du plissage) ainsi que la modification de la ligne de brisis et des raideurs d'assemblage (recherche de la stabilité).

L'utilité première de ce moteur est la validation structurale d'une enveloppe plissée. La simulation de la New-Yourte a permis de définir une épaisseur minimale des panneaux qui la composent. L'expérience a été réalisée avec des panneaux de 40 mm d'épaisseur ; celle-ci aurait pu être diminuée de moitié, rapportant le volume global de bois à 1,55 m³. À première vue, cette quantité de matière est relativement faible[1] pour réaliser une enveloppe couvrant une superficie de 28 m² et d'une hauteur de 4,20 m; un intérêt économique est donc pressenti dans la réalisation d'une structure plissée.
Une étude plus approfondie pourrait être menée à ce sujet. On pourrait par exemple prendre en compte d'autres éléments de comparaison comme le choix de la volumétrie (parallélépipède, sphère, cylindre…), de la technique constructive (charpente traditionnelle, bois lamellé-collé…) ou encore des dimensions du projet. Ceci permettrait une vision plus globale de l'intérêt des structures plissées.

[1] Ce résultat se base sur une volumétrie nécessaire de bois de charpenterie traditionnelle (poteaux-poutres) pour couvrir une surface similaire au projet de la New-Yourte (en moyenne 2,2 m³).

7.2. Le moteur d'évaluation thermique

Les nombreux exemples de construction plissée que nous avons pu analyser (annexe 1 de ce mémoire) ne se préoccupent pas de la dimension thermique de leur enveloppe. Le type de bâtiment (temporaire, exposition, halle…) n'invitait pas à un questionnement particulier sur le comportement thermique. Le plissage y est utilisé à des fins majoritairement structurales et architecturales.

L'absence d'une optimisation thermique des enveloppes plissées pourrait avoir deux origines :

- La première semble provenir d'une opinion a priori défavorable quant à la performance thermique d'une enveloppe plissée. En effet, l'augmentation de la surface d'échange et du nombre d'arêtes généré par le plissage augmente les déperditions thermiques par les parois ainsi que les ponts thermiques linéiques, à l'origine d'une dégradation du confort d'hiver. Cependant, l'augmentation de la surface peut s'avérer propice au confort d'été grâce à un meilleur refroidissement du volume interne.

- La deuxième fait état d'un ensemble de logiciels thermiques inadaptés à l'évaluation énergétique des enveloppes plissées. Ce constat provient de l'incapacité à prendre en compte la problématique majeure du plissage qui réside dans l'ombre que la structure projette sur elle-même. Par exemple, certains logiciels comme *Passive House Planning Package®* ne permettent pas de calculer les ombrages et d'autres, comme *Pléiades®* présentent des difficultés dans la maîtrise des ombres portées sur l'enveloppe.

Dans ce contexte, nous avons choisi de développer un composant d'évaluation thermique (Figure 7.11). Son intérêt réside dans la capacité à établir rapidement un bilan énergétique suivant la composition de l'enveloppe et la position géographique du projet souhaité.

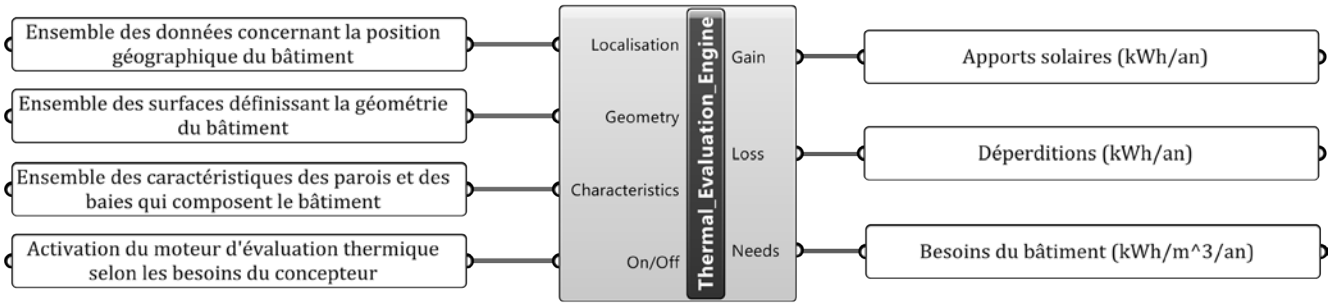


Figure 7.11 - Moteur d'évaluation thermique.

Ce bilan concerne uniquement les déperditions thermiques et les apports solaires liés à la morphologie du bâtiment ; ceux rattachés à l'usage sont peu dépendants de la forme. Nous sous-entendons par le terme d'« usage », les déperditions dues, d'une part, au renouvellement d'air et d'autre part, aux apports issus des activités humaines et matérielles (machine, lumière artificielle…). Ces données liées aux modes d'occupations du bâti, dépendant du cahier des charges sont considérées constantes dans le cadre de notre problématique et sont négligées à ce stade de la conception.

Dans les deux sous-sections suivantes, nous détaillons respectivement les problématiques liées aux déperditions thermiques et celles liées aux apports énergétiques.

7.2.a. Les déperditions thermiques

Dans cette partie, nous décrivons les calculs des déperditions thermiques liées au transfert de chaleur dans les matériaux qui composent les parois extérieures de l'enveloppe et également ceux des ponts thermiques associés (Figure 7.12).

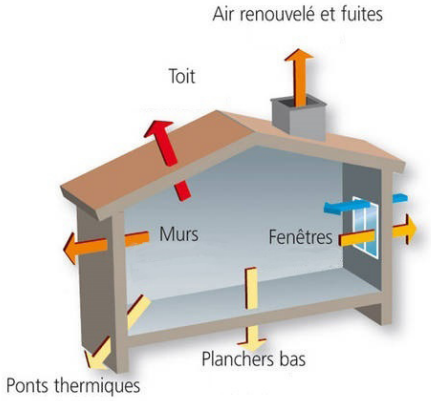


Figure 7.12 - Principaux postes de déperditions thermiques d'un bâtiment. Source ADEME.

- **Les déperditions par les parois.** Elles dépendent des propriétés physiques des matériaux qui la composent. Elles sont caractérisées par la surface (S) de la paroi, un niveau d'isolation (U) souhaité, ainsi qu'une différence de température (ΔT) entre l'environnement intérieur et extérieur. La perte de chaleur (P) qui en résulte est donnée par la formule suivante :

$$P = S \,.\, U \,.\, \Delta T \quad [\mathrm{W}]$$

avec :
S : surface de la paroi [m²]
U : coefficient de transmission thermique surfacique [W/(m².K)]
ΔT : différence de température entre l'intérieur et l'extérieur [K]

- **Les ponts thermiques.** Ils proviennent d'une rupture de la barrière isolante qui constitue l'enveloppe. Ils peuvent être de forme linéique ou ponctuelle selon la géométrie de l'enveloppe. Dans le premier cas, la perte de chaleur (P_{PTl}) dépend de la forme suivante :

$$P_{PTl} = L \,.\, \psi \,.\, \Delta T \quad [\mathrm{W}]$$

avec :
L : longueur du pont thermique [m]
ψ : coefficient de transmission thermique linéique [W/(m.K)]
ΔT : différence de température entre l'intérieur et l'extérieur [K]

Dans le second cas, la perte de chaleur (P_{PTp}) s'écrit :

$$P_{PTp} = \chi \,.\, \Delta T \quad [\mathrm{W}]$$

avec :
χ : coefficient de transmission thermique ponctuelle [W/K]
ΔT : différence de température entre l'intérieur et l'extérieur [K]

L'ensemble de ces données peut être estimé par le concepteur dès la phase d'esquisse ; elles sont donc implémentées dans le moteur d'évaluation thermique afin d'estimer les pertes énergétiques[8].

[8] La différence de température (ΔT) est établie sur la base des degrés jours unifiés (DJU) relatifs à 81 villes réparties sur le territoire français. Le DJU de chauffage d'un lieu donné équivaut à la somme des degrés jours (DJ) de chaque jour comptabilisé durant la « période de chauffe ». Aujourd'hui, les valeurs des DJU sont accessibles, pour l'ensemble du territoire, sur de nombreux sites Internet comme « http://www.infoclimat.fr/ » et « http://www.abcclim.net/ ».

7.2.b. Les apports solaires reçus par une surface vitrée

Les apports solaires retenus dans cette démarche sont les seuls apports externes liés à l'énergie solaire reçue par les parois vitrées. En effet nous ne prenons pas en considération les apports solaires des parois opaques ; nous avons montré que ces derniers étaient négligeables par rapport à l'énergie transmise par une baie[9] pour ce type d'approche[10].

Les apports thermiques solaires (AS) reçus par une surface vitrée s'écrivent selon la formule suivante :

$$AS = S \,.\, S_w \,.\, TL \,.\, R_t \,.\, F_{Ombrage,t} \qquad [W]$$

Avec :
S : Surface vitrée de la baie [m²]
S_w : Facteur solaire traduisant la transmission de chaleur par la baie
TL : Facteur de transmission lumineuse de la baie
R_t: Flux d'énergie surfacique apporté par le soleil à l'instant (t) sur une surface donnée [W/m²]
$F_{Ombrage,t}$: Facteur de réduction lié à l'ombrage à l'instant (t) [% de paroi éclairée par le soleil]

Le facteur de transmission lumineuse dépend des dimensions et de la géométrie de la baie, il n'est pas aisé de le déterminer lors de la phase d'esquisse. Pour cette raison, ce facteur n'est pas pris en compte dans cette première approche. Ainsi, nous choisissons de définir les ouvertures selon un pourcentage de surface vitrée par rapport à la surface totale de l'enveloppe. Cette définition restreinte des baies nous semble plus appropriée à la phase d'esquisse.
Afin de calculer l'apport solaire par les surfaces vitrées nous devons encore caractériser les grandeurs suivantes :

- Le rayonnement solaire représentant le flux d'énergie solaire « arrivant » sur les baies.

- Le facteur d'ombrage prenant en compte l'éclairement réel des baies.

Ces deux grandeurs sont présentées ci-après.

[9] Voir le mémoire (Landoulsi, 2015).

[10] Voir le mémoire (Labeye, 2016).

7.2.b.1. Le rayonnement solaire

Nous sous-entendons par rayonnement solaire, une quantité d'énergie reçue par une surface en un lieu précis[11]. Elle correspond à l'irradiation solaire, communément appelée l'ensoleillement[12] (Figure 7.13).

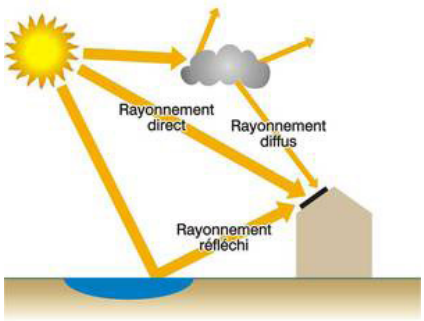


Figure 7.13 - Rayonnement direct, diffus et réfléchi.
Disponible à l'adresse : https://www.energieplus-lesite.be/ [consulté le 12 juin 2017]

Ce dernier se décompose en trois rayonnements distincts :

- **le rayonnement direct** : il correspond aux rayons du soleil incident sur une surface donnée ; ce rayonnement direct n'a donc rencontré aucun obstacle opaque entre la source et la surface réceptrice.

- **le rayonnement diffus** : il est caractérisé par la diffusion du rayonnement solaire à travers l'atmosphère terrestre, il est omniprésent dans l'air extérieur.

- **le rayonnement réfléchi** : rayonnement solaire renvoyé par réflexion au contact d'une surface telle que le sol ou les étendues d'eau (albédo).

La somme des trois représente le rayonnement global, mais seul le rayonnement diffus n'est pas affecté par l'ombre portée due au plissage.

La proportion de ces trois rayonnements varie en fonction de la position du soleil (rotation de la Terre autour du soleil et sur elle-même) ; elle est à l'origine d'une variation de l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée et de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la surface réceptrice. Ces facteurs influent fortement sur la quantité d'énergie solaire reçue par l'enveloppe extérieure d'un bâtiment ; il est donc nécessaire de connaître la position du soleil à chaque instant et en un lieu donné. Elle est définie par la hauteur du soleil et son azimut[13] (Figure 7.14).

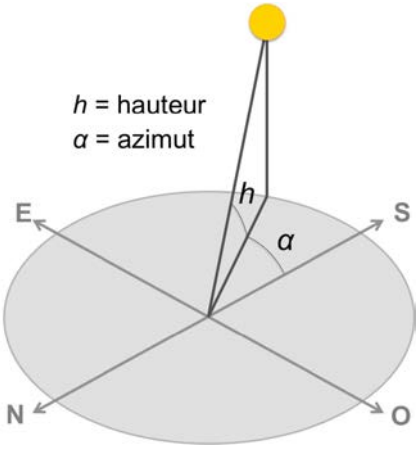


Figure 7.14 - Hauteur et azimut solaire (cf. Annexe 4).
Disponible à l'adresse : https://www.energieplus-lesite.be/ [consulté le 12 juin 2017]

[11] Quantité d'énergie donnée en [Wh/m²].

[12] L'ensoleillement correspond au flux d'énergie restant après que le rayonnement solaire (ou irradiance) a traversé l'atmosphère terrestre.

[13] Aujourd'hui, plusieurs outils en ligne permettent de calculer la position du soleil comme « https://www.sunearthtools.com/ ».

Pour le calcul des apports solaires reçus par une surface vitrée, nous aurions pu utiliser une base de données regroupant les valeurs mesurées de l'irradiation solaire[14]. Cependant, celles-ci sont tributaires des aléas climatiques (variation entre les jours ensoleillés et les jours couverts) qui entraînent, dans la méthode proposée à la sous-sous-section 7.2.b.3, des erreurs d'approximation importantes. Nous avons donc décidé de calculer le flux d'énergie solaire sans l'impact d'une couverture nuageuse et d'appliquer un facteur restrictif lié à l'effet annuel des nuages.

Ce calcul se base sur la valeur moyenne de l'irradiance (1370 W/m^2) à laquelle est substituée la perte d'énergie solaire issue de l'absorption atmosphérique[15]. Par cette méthode, le flux d'énergie surfacique (R_t) reçu par une surface en fonction de sa position géographique, son orientation et son inclinaison peut être calculé à tout instant.

7.2.b.2. Le facteur d'ombrage

Le facteur d'ombrage correspond au rapport de la surface de vitrage éclairée sur la surface totale[16]. Pour le calculer, il faut donc déterminer l'ombre portée sur les baies. Dans le cas de notre recherche sur le bilan thermique d'une structure plissée, nous nous sommes concentrés sur l'ombre que l'enveloppe produit sur elle-même. En effet, chaque facette du plissage se comporte comme un masque générant de l'ombre (Figure 7.15). Les autres masques, qu'ils soient naturels (arbres, montagne…) ou architecturaux (bâtiment avoisinant) ne dépendent pas du plissage et ne sont donc pas pris en compte.
Pour déterminer l'ombrage lié à la structure seule, une méthode dite du « lancer de rayons » a été établie[17].

---

[14] Par exemple, le site Internet « http://www.soda-is.com/ » héberge l'une des bases de données exploitables.

[15] Se référer aux formules de calculs provenant du site Internet « http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/index.htm ».

[16] (Labeye, 2016, p. 15).

[17] Une évaluation des ombres portées par la méthode du « lancer de rayon » a déjà été expérimentée sur des prismes complexes mais non plissés dans le cadre du projet de recherche ECOGEN mené en 2013 pour l'ANR par le MAP-CRAI et le MAP-ARIA (Marin et al., 2012).

Figure 7.15 - Ombres portées par l'enveloppe plissée de la chapelle Saint Loup sur elle-même.
© Claude Favre.

Elle fait suite à une méthode par création d'un « volume d'ombre » qui présente des limites géométriques lors d'étude de surface curviligne. Bien que cette première méthode soit rapide et précise, elle a été abandonnée.

La méthode du lancer de rayon consiste à modéliser les rayons entre la source lumineuse et la surface.
Tout d'abord, la direction de projection des rayons lumineux est définie par le calcul de la hauteur solaire et de l'azimut.
L'étape suivante consiste à trouver l'ensemble des rayons lumineux qui traversent la géométrie. Pour ce faire, la surface plissée est projetée sur un plan normal à la direction de projection. Ensuite un rectangle englobant la géométrie projetée est défini. Une grille de points, définissant l'origine des rayons, est appliquée sur ce rectangle. Seuls les points inscrits dans la projection sont pris en compte (Figure 7.16).

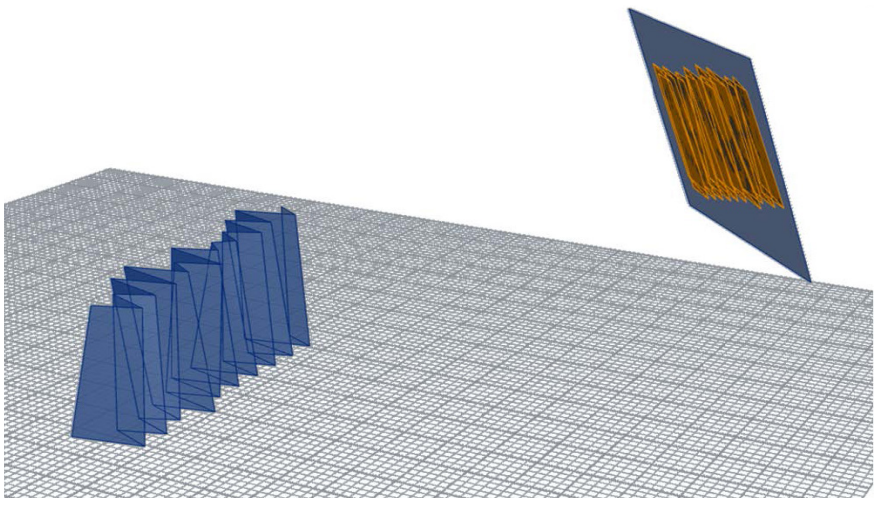


Figure 7.16 - Projection de la géométrie sur le plan solaire.

Pour chaque facette du plissage, nous distinguons le nombre de rayons incidents et le nombre total de rayons susceptibles de rencontrer la facette s'il n'existait pas de masques. Le rapport entre ces deux valeurs correspond au facteur d'ombrage de la facette (Figure 7.17).

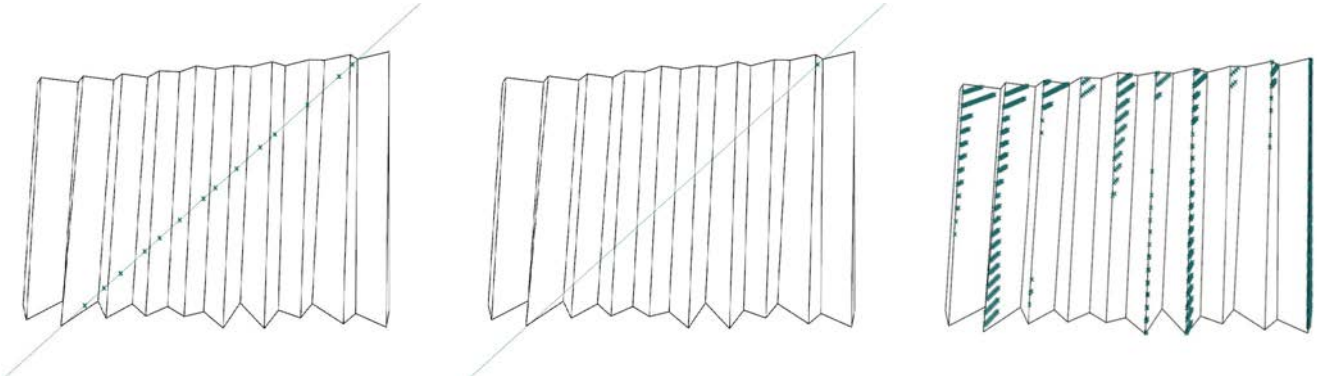


Figure 7.17 - Calcul des points d'intersection et du point actif pour un rayon, et calcul de tous les points actifs pour une géométrie donnée, dans le cas d'un pourcentage de paroi vitrée par surface de l'enveloppe.

Le nombre de points formant la grille est relatif à la précision du facteur d'ombrage, mais aussi au temps de calcul nécessaire. Il a été déterminé, par expérimentation, qu'une valeur de 10000 rayons offrait des résultats analogues à ceux obtenus avec le logiciel *DIALux®*.

Cette méthode offre donc la possibilité de calculer simplement le facteur d'ombrage. Néanmoins, le temps nécessaire à l'itération du calcul pour chaque instant de l'année est trop important. L'une des solutions envisagées consiste à calculer le facteur d'ombrage à différents instants préalablement définis afin d'estimer les apports solaires annuels dans un temps convenable pour un moteur d'évaluation.

7.2.b.3. Intégration des apports solaires

Les connaissances acquises pour le calcul des apports solaires et des déperditions énergétiques ont permis la création d'un moteur d'évaluation thermique capable de réaliser un bilan énergétique de la géométrie d'un bâtiment quelconque.

Ce moteur d'évaluation thermique nécessite différentes données d'entrées comme la position géographique (position du soleil, les DJU…), les caractéristiques des parois opaques et vitrées (coefficient de transmission thermique, facteur solaire des baies…) ainsi que la géométrie du bâtiment (Figure 7.18).

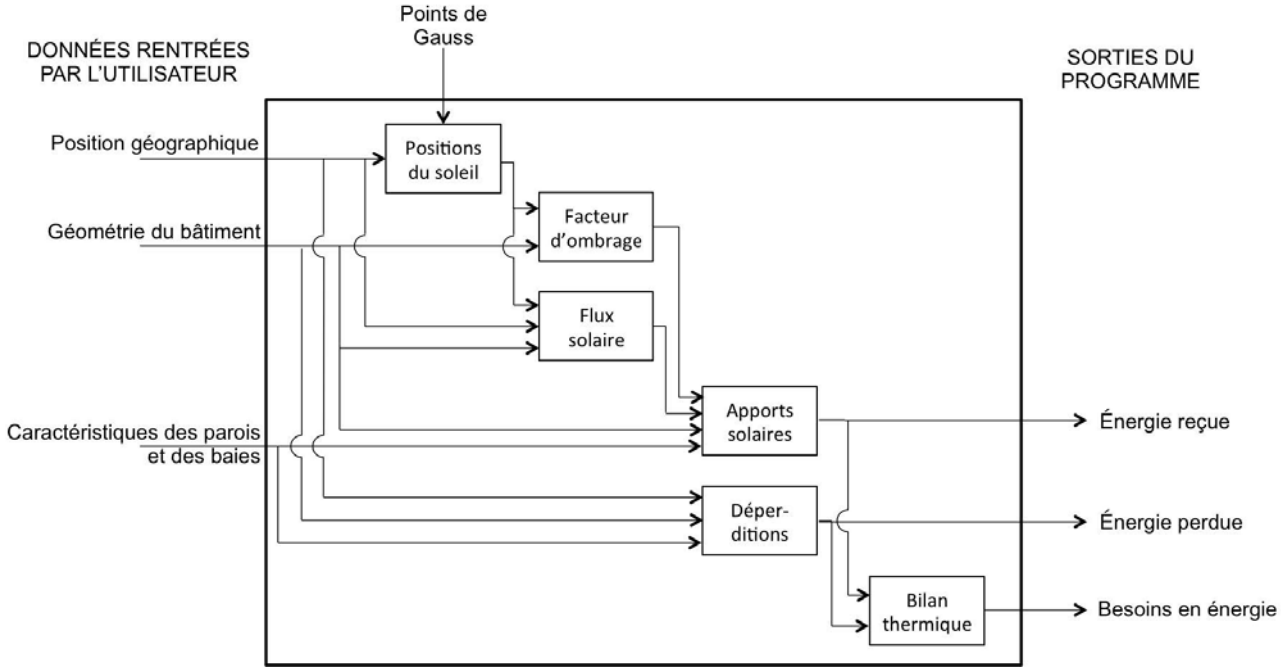


Figure 7.18 - Principe de fonctionnement du moteur d'évaluation thermique.

Il permet une évaluation des déperditions thermiques pour la période de chauffe ainsi qu'une évaluation des apports solaires durant l'année. En croisant les données résultant de ces évaluations, nous pouvons quantifier le besoin énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment.

Un bilan thermique annuel nécessite de prendre en compte la fluctuation des jours de l'année, mais également la variation journalière du lever au coucher du soleil. Les moteurs dits « classiques » répondent à cette exigence en réalisant un calcul tous les quarts d'heure. Ce processus est beaucoup trop long et trop lourd pour notre moteur d'évaluation. En effet, la méthode des rayons utilisée pour la recherche du facteur d'ombrage ne permet pas une telle

fréquence de calculs[18]. Afin de réduire le temps de calcul, nous avons décidé de réduire le nombre d'incréments de temps à quelques points singuliers de manière à estimer avec la même précision les apports solaires sur une année.

Comme l'apport solaire au fil d'une journée ainsi que l'apport moyen journalier sur une année varient de façon continue, ils peuvent être approchés par un polynôme. Ainsi, nous avons préféré orienter notre recherche vers une intégration des apports solaires selon la méthode numérique de Gauss-Legendre[19]. Celle-ci consiste à approcher l'intégrale sur l'intervalle [-1,1] d'une fonction continue par une somme pondérée de certaines valeurs prises par la fonction dans l'intervalle [-1,1]. Pour tout autre intervalle [a,b] que [-1,1], il est possible de réaliser un changement de variable.

Ainsi la formule de Gauss-Legendre pour une fonction f continue est :

– dans l'espace réel :

$$\int_a^b f(d)d \cong \frac{b-a}{2}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i f\left(\frac{b-a}{2}x_i+\frac{b+a}{2}\right)$$

– dans l'espace de référence :

$$\int_{-1}^{1} f(d)d \cong \sum_{i=1}^{n}\lambda_i f\,(x)$$

Avec x_i et λ_i définis par les polynômes de Legendre.
x_i : positions de temps
λ_i : poids affecté à chaque position

Pour une fonction polynomiale d'ordre inférieur ou égale à 2n-1, n points de Gauss suffisent à donner une valeur exacte de l'intégrale.

---

[18] Nous sommes conscients qu'il existe un autre moyen de déterminer le facteur d'ombrage de manière plus rapide. En effet, les moteurs de DAO déterminent le facteur d'ombrage ; cependant, nous n'avons pas encore trouvé le moyen de récupérer ces informations dans *Rhinoceros*®.

[19] Informations disponibles à l'adresse : https://pomax.github.io/bezierinfo/legendre-gauss.html [consulté le 23 mai 2017].

L'intégration des apports solaires est divisée en deux étapes : une première intégration de la quantité d'énergie reçue par jour est nécessaire avant de déterminer l'intégration de la quantité d'énergie solaire pour une année. Lors de ces deux étapes, le calcul des apports solaires est donc basé sur un nombre d'« instants donnés» déterminés par les solutions du polynôme de Legendre[20]. Afin d'éviter que les jours choisis soient fortement impactés par la météo (couverture nuageuse), nous utilisons des valeurs calculées et non mesurées du flux solaire[21].

Par cette méthode, nous sommes capables d'approximer rapidement les apports solaires afin de les intégrer au bilan énergétique réalisé par le module thermique.

[20] Ne connaissant pas le degré de la fonction représentant les apports solaires, nous l'avons intégrée en faisant varier le nombre de points de Gauss jusqu'à obtenir une approximation satisfaisante.

[21] Cf. la sous-sous-section « 7.2.b.1 Le rayonnement solaire ».

OBSERVATIONS : Il est important de remarquer que le facteur d'ombrage n'évolue pas de manière polynomiale. Ainsi, la méthode d'intégration numérique de Gauss-Legendre introduit un niveau d'erreur 1. Cependant, cette imprécision n'est pas impactante dans la mesure où l'on souhaite comparer des plissages entre eux. En effet, si l'on considère que les calculs de chaque plissage sont réalisés avec la même approximation, la précision de la valeur finale est moins importante que l'écart obtenu entre deux plissages.
Nous rappelons que ce moteur d'évaluation a été conçu pour la conception en phase d'esquisse ; son utilité est donc avérée dans une évaluation thermique rapide permettant de comparer différentes variantes de géométries plissées proposées par le concepteur afin de cibler la solution la plus adaptée à ses besoins.

Par la suite, nous envisageons de mesurer l'impact du plissage par rapport à la performance énergétique de sa surface de référence (non plissée). Cependant, nous savons qu'une comparaison rapide n'aboutit pas à un résultat unique et exploitable. En effet, en fonction de la géométrie du plissage et de son orientation, les résultats de l'évaluation s'avèrent très variés. Aussi la comparaison énergétique entre les deux enveloppes (plissée et non plissée) n'évaluera pas uniquement l'impact du plissage. C'est pourquoi cette réflexion demanderait une étude de cas spécifiques beaucoup plus large.
Toutefois, nous avons pu constater un phénomène intéressant grâce à l'analyse des apports solaires annuels pour une géométrie plissée donnée. Un plissage dont les facettes ne sont pas verticales semble générer moins d'ombres portées en hiver (position basse du soleil dans le ciel) qu'en été (position haute du soleil dans le ciel). Cela se traduit par une diminution des apports solaires entre la mi-printemps et la mi-été (Figure 7.19). Ce résultat peut également s'observer dans des constructions présentant de forts débords de toiture ou des brise-soleil. Ainsi, certaines configurations de plissages peuvent remplacer des dispositifs d'ombrage permettant d'améliorer le confort d'été.

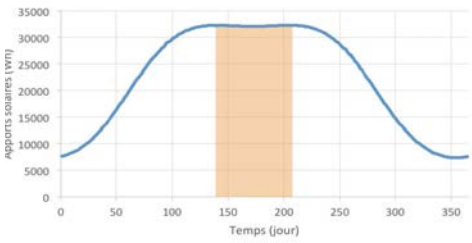


Figure 7.19 - Évolution des apports solaires journaliers au cours de l'année

[1] À partir de 8 points de Gauss pour la première étape d'intégration et 5 points de Gauss pour la deuxième, l'erreur mesurée ne semble pas dépasser les 3 %.

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire traite des questions liées aux enveloppes structurales plissées qui trouvent une résonance particulière dans le domaine de la conception architecturale et notamment celle qui met en œuvre des panneaux de bois.

Tout d'abord, nous nous sommes employés à décoder le langage des morphologies plissées afin d'en déterminer les enjeux. En parallèle, nous avons développé nos connaissances sur le matériau bois et les panneaux qui en sont dérivés pour mesurer le potentiel de leur utilisation dans les structures plissées. Ces deux premiers travaux ont été accompagnés d'une expérience « grandeur nature », nous permettant à la fois de valider certaines de nos hypothèses et de mettre à jour de nouvelles données indispensables à la compréhension et à l'instrumentation du processus de conception des enveloppes architecturales plissées.

Cette recherche s'inscrit également dans une dimension numérique qui participe activement à cette quête morphologique et constitue aujourd'hui une base pour la recherche architecturale. L'expansion du numérique dans toutes les activités qui concourent à la production d'un édifice rend aujourd'hui possible la mise en place d'un continuum numérique qui « dérange » les séquencements traditionnels. On peut donc envisager un processus continu depuis la phase de conception jusqu'à la phase de fabrication, intégrant des données de calcul, de simulation et de fabrication. On peut attendre de ce processus qu'il fiabilise le projet architectural d'un point de vue technique, économique et même environnemental. On peut également espérer que sécurisée, l'activité de conception devienne plus inventive.

Dans ce contexte, l'ensemble des connaissances préalablement acquises a permis d'aboutir à la proposition d'un modèle numérique de conception architecturale, d'enveloppes structurales plissées regroupant à la fois des moteurs morphologiques et des moteurs d'évaluations.

Pour répondre aux enjeux du processus de création des systèmes plissés, nous avons mené un travail d'analyse de ces systèmes. Ce travail a débuté par une analyse des systèmes naturels qui a révélé le plissage comme un facteur important de leur morphogenèse ; il a donc été essentiel de saisir l'intérêt du plissage pour en déterminer le rôle. Cette analyse a mis en évidence que la géométrie du plissage présente majoritairement une dimension structurale comme étant la réponse physique à l'évolution d'un corps dans un environnement contraint. Appliqué au contexte de l'architecture, l'intérêt du plissage s'élargit. Un rapport avec des valeurs humaines apparaît : la plasticité, la spatialité ou encore l'ambiance sont des dimensions indissociables du plissage architectural. Tout l'enjeu de la conception d'une enveloppe plissée repose sur un équilibre satisfaisant entre toutes les dimensions qui nourrissent le langage du plissage.

Au cours de notre étude, il s'est avéré que le matériau joue également un rôle important dans l'expression et la composition du plissage. Aussi, le choix d'un matériau dans notre recherche a été primordial. Nous nous sommes donc orientés vers les panneaux de bois. D'une part, ce choix participe au développement de la tectonique architecturale en bois : les propriétés physiques et mécaniques des panneaux sont à la base de nouveaux principes de conception architecturale intégrés dans une logique structurale, elle-même légitimée par une technologie de fabrication. D'autre part, les panneaux présentent divers avantages pour la réalisation d'enveloppes structurales plissées comme la préfabrication sur mesure en filière sèche grâce notamment à un bon comportement à l'usinabilité. Dans le cadre de notre recherche, nous nous sommes restreints à l'utilisation de panneaux industriels plans. Mais la réflexion entamée sur les panneaux composants devrait permettre un élargissement des solutions morphologiques du plissage.

Pour comprendre l'enjeu de la conception-fabrication d'une enveloppe structurale plissée en panneau de bois, l'expérience menée a été indispensable. Support révélateur à la fois des données supposées ou méconnues liées au continuum numérique et des paramètres de conception, cette expérience a permis également de discerner puis d'ordonner l'ensemble des opérations nécessaires à sa réalisation. L'observation la plus remarquable a été l'utilité d'un dialogue constant entre les étapes de conception, de fabrication et de mise

en œuvre. Cette condition s'est avérée contraignante dans une méthode de travail traditionnelle, nous orientant ainsi vers la mise en place d'un processus de conception intégré. En combinant ces résultats expérimentaux avec ceux issus de notre étude préalable, nous avons pu proposer un modèle théorique à la fois modèle de données et modèle de processus.

En nous appuyant sur ce modèle, nous avons essayé de définir une méthode d'aide à la conception en phase d'esquisse capable d'intégrer l'ensemble des paramètres du processus de modélisation dans le but de proposer des solutions architecturales favorables aux attentes du concepteur. À l'aide des résultats de l'expérience, nous avons pu caractériser l'ensemble de la démarche en trois phases. La première est une phase de modelage. Elle a pour objectif d'offrir au concepteur un maximum de liberté créative dans la recherche de solutions morpho-géométriques plissées. La deuxième est une phase de matérialisation. Elle assure la transition de la forme géométrique « abstraite » vers une réalité constructive. Enfin, la troisième phase est une phase de validation. Elle s'effectue en parallèle des deux premières phases en intervenant à différents stades de la conception selon les besoins du concepteur. Elle se singularise par l'action de moteurs d'évaluation. Ces derniers permettent de valider l'état d'une solution suivant des paramètres techniques, comme la stabilité et par la même occasion, ils orientent le concepteur dans ses recherches.

L'implémentation de la méthode dans l'outil CARA(s)PACE a révélé à la fois son potentiel et ses limites. Tout d'abord, nous évoquons les points forts de l'outil. Le premier relève de l'environnement numérique paramétrique employé pour sa construction : *Rhinoceros®/ Grasshopper®*. Il constitue l'élément clef du continuum conception-fabrication. En effet, il permet d'orchestrer un ensemble de données provenant d'environnements différents réunis au sein d'une même structure. Ainsi, ce dispositif favorise la rapidité du processus de conception. Le second concerne les tables de plissage qui sont considérées comme le centre névralgique de l'ensemble du modèle. Elles constituent la base de données nécessaire à la construction géométrique du plissage. Par conséquent, les actions liées à la recherche de forme du plissage se limitent à une modification des données contenues dans ces tables.

Ensuite, un ensemble de limites provenant aussi bien des moteurs morphologiques que des moteurs d'évaluations ont émergé. Dans le cadre de la recherche morphologique, nous avons observé les premières limites de l'outil lors des exercices de reconstitutions géométriques d'enveloppes plissées existantes. Deux raisons sont à l'origine de cette situation. La première provient de la méthode employée pour la construction géométrique du plissage. Par exemple, l'unique définition de l'amplitude par la normale à la surface de référence est restrictive. De la même manière, la méthode implémentée pour la jonction de deux plissages restreint les alternatives morphologiques possibles. La seconde, certainement la plus importante, est issue d'un nombre limité de fonctions attribuées à la configuration des tables de plissage. À ce jour, seules quelques tables élémentaires peuvent être générées automatiquement. Dans les autres cas, le concepteur configure les tables de manière empirique.
D'autres limites apparaissent également lors de la phase de matérialisation qui intervient dans le cadre du traitement des éléments singuliers comme les baies. La modification géométrique de ces éléments entraîne un changement automatique de leurs repères théoriques. Cette caractéristique implique un traitement manuel de ces éléments.
Enfin nous percevons des limites dans l'utilisation des moteurs d'évaluation. À ce jour, il n'existe pas encore de dispositifs de modifications automatiques de la morphologie du plissage faisant suite à l'évaluation des moteurs. En effet, les rapports d'évaluation actuels présentent un constat et non des directives à suivre. Bien que laisser l'entièreté de cette tâche au concepteur puisse être justifié, un manque de connaissances de ce dernier dans le domaine de l'évaluation du moteur peut alors enrayer le processus de recherche de solutions.
Ces quelques limites soulignent la nécessité de développer notre outil prototype CARA(s)PACE de manière à apporter des variantes possibles dans le processus de conception nécessaire à une stimulation de la créativité.

Nous espérons avoir montré tout au long de cette recherche que notre approche sur le plissage ne se limite pas à un simple dispositif de modélisation tridimensionnel numérique. Nous avons tout autant essayé d'explorer un processus heuristique. Les solutions

de plissage proposées, bien que limitées, ne sont donc que des moments possibles d'un processus de conception ouvert à l'intégration de nombreux paramètres. L'intérêt d'un flux dynamique de genèse morphologique, littéralement conféré à des structures complexes, réside moins dans la forme obtenue, que dans l'aptitude du processus à offrir plusieurs solutions. Ainsi, dans notre travail, nous avons tenté d'esquisser un premier outil numérique de conception, dans lequel les structures plissées résultantes sont considérées comme des « objectiles » architecturaux. Ils sont la représentation d'un état précis dans le choix tant des paramètres morphologiques, que des paramètres techniques (structure, fabrication montage et matériologie) qui intègrent dorénavant la genèse de conception architecturale grâce à l'association des moteurs d'évaluation.

Perspectives de la recherche

La méthode de conception adoptée dans cette recherche a soulevé une grande variété de questions, dont beaucoup restent encore à approfondir.

L'une des premières perspectives part du constat issu des deux reconstitutions présentées dans le chapitre 6. Elle concerne le développement de différentes méthodes constructives du plissage. Pour identifier les orientations de ces développements, l'outil CARA(s)PACE devra être éprouvé par des architectes et des ingénieurs (professionnels, étudiants…) en situation de conception. Ce travail permettra une quantification et une classification des différentes approches des concepteurs indispensables à l'évolution du moteur morphologique.

Une deuxième perspective concerne la multiplication des moteurs d'évaluations. Il serait alors possible de retranscrire dans le processus de conception des paramètres d'ambiance acoustique, de montage, de fabrication… Le couplage avec un moteur de calepinage de panneaux pourrait également donner un ratio de chutes qui serait très pertinent d'un point de vue écologique. Cette recherche pourrait également se tourner vers une automatisation des actions entreprises en fonction des résultats du rapport de ces évaluateurs.

D'autres perspectives de développement peuvent être envisagées dans le domaine des panneaux de bois. En effet, jusqu'à présent, nous nous sommes concentrés sur les panneaux plans issus de

l'industrie. Cependant, une étude pourrait être menée sur des structures plissées réalisées avec des panneaux précontraints. Ce champ de recherche, associé à une étude des combinaisons tridimensionnelles du plissage, permettrait certainement d'augmenter le potentiel architectural, structural, économique et écologique des enveloppes plissées.

Des perspectives sont encore à mener notamment dans le domaine du montage assisté par robot comme le suggèrent les travaux de Fabio Gramazio et Matthias Köhler[1]. Son utilité réside dans le développement de techniques de constructions alternatives assurant une transposition des technologies de fabrication industrielle en combinant les avantages de la préfabrication et de la production.

Une dernière perspective, tout aussi importante, consisterait à mener une réflexion sur l'enveloppe non plus en tant que système structural mais également en tant que système de couverture. Cela permettrait une mise en relation du travail morphologique avec les systèmes d'étanchéité dont on sait qu'ils peuvent conduire à des contraintes fortes sur le système de plissage.

Ces quelques perspectives évoquées devraient permettre d'enrichir l'architecture des enveloppes structurales plissées afin de proposer un système morphostructural répondant à une nouvelle tectonique architecturale.

[1] Cf. (Gramazio et al., 2014).

Bibliographie

ACHE, Jean-Baptiste, 1970. *Éléments d'une histoire de l'art de bâtir*. Paris : Éditions du moniteur des travaux publics.

BAIN, Ian, 1981. *The Miura-Ori map*. In : *British Origami Society* [en ligne]. 1981. [Consulté le 23 mars 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.britishorigami.info/academic/miura.php.

BARQUINS, Michel, 2004. *Le collage : un moyen ancestral, moderne et durable d'assemblage*, Laboratoire de physique et mécanique des milieux hétérogènes, ESPCI, Paris. octobre 2004.

BASCH, Lucien, 1978. Éléments d'architecture navale dans les lettres grecques. In : *L'antiquité classique*. 1978. Vol. 47, n° 1, p. 5-36. DOI 10.3406/antiq.1978.1880.

BEAUCÉ, Patrick et CACHE, Bernard, 2007. *Vers un Mode de Production Non-standard*. In : *Objectile Patrick Beaucé + Bernard Cache* [en ligne]. S.l. : Springer Vienna. Consequence Book Series on Fresh Architecture, 6. p. 40-45. ISBN 978-3-211-25238-3. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-211-69295-0_6.

BEAUCÉ, Patrick, CACHE, Bernard, OBJECTILE, 2007. *Objectile, Patrick Beaucé + Bernard Cache - Fast-wood: a Brouillon project*. Wien : Springer. Consequence book series on fresh architecture, 6. ISBN 978-3-211-25238-3.

BECKERS, Benoît et BECKERS, Pierre, 2010. *Comment calculer la déclinaison du soleil* [en ligne]. septembre 2010. [Consulté le 22 avril 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.heliodon.net/downloads/Beckers_2010_Helio_007_fr.pdf.

BIGNON, Jean-Claude et LAUSECKER, François, 1983. *La maison à ossature bois, fichier synoptique d'opérations*. Département Construction : École D'architecture de Nancy.

BIRNBAUM, Charlotte et SALLAS, Joan (éd.), 2012. *The beauty of the fold: a conversation with Joan Sallas*. Berlin : Sternberg Pr. On the table, 2. ISBN 978-1-934105-98-6.

BLÉRON, Laurent, BOCQUET, Jean-François, DUCHANOIS, Gilles et TRIBOULOT, Pascal, 2001. *Contribution to the optimization of wood assemblies performances in timber structure. Analysis of the embedment strength in assemblies of dowel type*. 2001. S.l. : 3rd International Rilem Symposium,Stuttgart, Germany.

BOSLEY, Edward R., 1992. *Gamble house : Greene and Greene*. London:Phaidon,1992.-{60} p. non pag.:élév. photogr. pl. ISBN 978-0-7148-2748-3.

BOURDIN, Vincent, 2014. *Calculs astronomiques simplifiés* [en ligne]. 2014. S.l. : Université Paris-Sud Orsay – Master PAM 2ème année – Energies renouvelables – Energie solaire thermique. [Consulté le 24 avril 2017]. Disponible à l'adresse : https://perso.limsi.fr/bourdin/master/Calculs_astronomiques_simples.pdf.

BUCKMINSTER FULLER, Richard, 1959. *Self-Strutted Geodesic Plydome*. US 2905113 A. 22 septembre 1959. New York, NY. 654,166

BURI, Hans, 2010. *Origami - Folded Plate Structures*. Lausanne : EPFL.

CACHE, Bernard, 1997. *Subjectiles et objectiles, vers un mode de production non-standard*. In : *Les cahiers de la recherche architecturale*. Parenthèses. 1997. p. 114-122.

CHUPIN, Jean-Pierre, 2007. *Analogie et théorie en architecture: de la vie, de la ville et de la conception, même. Gollion* : Infolio. ISBN 978-2-88474-575-8.

COQUE, Roger, 1977. *Géomorphologie*. Paris : Armand Colin. Collection U.

DARKE, Jane, 1979. *The primary generator and the design process*. In : *Design Studies*. Juillet 1979. Vol. 1, n° 1, p. 36-44. DOI 10.1016/0142-694X(79)90027-9.

DE BEAUNE, Sophie A., 2010. *Aux origines de la construction*. In : *Édifice et artifice*. Histoires constructives. Paris : Picard. 2010. p. 77-89.

DELAHAYE, Jean-Paul, 2015. *Les mathématiques de l'origami*. In : *Pour la science*. Février 2015. n° 448, p. 76-81.

DELARUE, Jean-Marie et BROSSIN, Jean-Francois, 1981. *Figuration graphique et recherche structurale. Constructions plissées. Rapport final*. ADRI, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Villemin. Ministère de l'Equipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports, direction de l'architecture et de l'urbanisme, sous-direction de l'architecture et de la recherche. CDU 32659

DELARUE, Jean-Marie, 1997. *Le pli, source de formes et de sens*. In : *Les cahiers de la recherche architecturale*. Parenthèses. 1997. p. 39-46.

DELEUZE, Gilles, 2005. *Le pli: Leibniz et le Baroque*. Nachdr. Paris : Éd. de Minuit. Collection critique. ISBN 2-7073-1182-0.

DESIDERI, Paolo, POSITANO, Giuseppe, JÜRISSEN, Hilla et MÜHLL, H. R. von der, 1982. *Pier Luigi Nervi*. Zürich : Verl. für Architektur Artemis. Studio Paperback. ISBN 978-3-7608-8112-6.

DREXEL, Reinhard, 2001. *Municipal Works Yard in Hohenems*. In : *DETAIL*. 2001. Vol. Roof Structures, n° 5, p. 886-891.

DUDTE, Levi H., VOUGA, Etienne, TACHI, Tomohiro et MAHADEVAN, L., 2016. *Programming curvature using origami tessellations*. In : *Nature Materials*. 25 janvier 2016. DOI 10.1038/nmat4540.

EHRHARDT, Thomas et GINEFRI, Guillaume, 2016. *Structures Cellulaires Non-Standards en Bois : Création d'un outil paramétrique d'aide à la conception et à la fabrication*. MFE. Nancy. MAP/ CRAI.

EYMA, Florent, 2002. *Caractérisation des efforts de coupe de différentes essences de bois à l'aide de leurs paramètres mécaniques*. Epinal/Nancy : Ecole Nationale Supérieure des Technologies du Bois (ENSTIB) - Université Henri Poincaré, Nancy 1.

FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, José Antonio, 1979. *Eugène Freyssinet*. Barcelona : 2 c. ISBN 978-84-300-1654-9.

FÈVRE, Anne-Marie, 2013. *Les Kroll, une utopie habitée*. In : *Libération.* fr [en ligne]. 11 octobre 2013. Disponible à l'adresse : http://next.liberation.fr/design/2013/10/11/les-kroll-une-utopie-habitee_938902 [Consulté le 2 juin 2017].

FORUM BOIS CONSTRUCTION (éd.), 2015. *Forum Bois Construction: [actes du] 5ème Forum International Bois Construction, Epinal-Nancy*, 15-17 avril 2015. Biel (CH) : forum-holzbau. ISBN 978-3-906226-07-1.

FRAZER, John, 2016. *Parametric Computation: History and Future*. In : *Architectural Design*. mars 2016. Vol. 86, n° 2, p. 18-23. DOI 10.1002/ad.2019.

FURUTO, Alison, 2012. *Lignum Pavilion / Frei + Saarinen Architekten.* In : *ArchDaily* [en ligne]. 28 septembre 2012. [Consulté le 23 mai 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.archdaily.com/274331/lignum-pavilion-frei-saarinen-architekten/.

GALLAS, Mohamed-Anis, 2013. *De l'intention à la solution architecturale. Proposition d'une méthode d'assistance à la prise en compte de la lumière naturelle durant les phases amont de conception.* Thèse. Sciences de l'architecture. Nancy : MAP / CRAI -École d'Architecture de Nancy - Université de Lorraine.

GÁMEZ, Oscar, MEYER, Julien, CLAUDE-BIGNON, Jean et DUCHANOIS, Gilles, 2015. *Interaction of analogic and digital workflows for architectural design and production*. Editora Edgard Blücher. novembre 2015. p. 77-85. [Consulté le 25 mai 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/22302.

GAMEZ, Oskar, 2017. *Un outil paramétrique-generative pour le design de parois non-standards en bois à partir de tessellations régulières et irrégulières*. Thèse. Sciences de l'architecture. Nancy : MAP-CRAI - Ecole d'Architecture de Nancy - Université de Lorraine.

GAUSS, Carl Friedrich, 2008. *Recherches générales sur les surfaces courbes Représentation conforme*. Paris : J. Gabay. ISBN 978-2-87647-293-8.

GERNER, Manfred et GENEVRIER, Marc, 1994. *Les assemblages des ossatures et charpentes en bois construction, entretien, restauration*. [Paris] : Eyrolles. ISBN 978-2-212-11828-5.

GLASNER, Barbara et OTT, Stephan, 2013. *Wonder wood: a favorite material for design, architecture, and art. Basel : Birkhäuser*. ISBN 978-3-0346-0674-5. NK9604 .G53713 2013

GRAMAZIO, Fabio, KOHLER, Matthias et WILLMANN, Jan (éd.), 2014. *The robotic touch: how robots change architecture*. Zurich : Park Books. ISBN 978-3-906027-37-1. NA2543.T43 R63 2013

GRAUBNER, Wolfram, 2002. *Assemblages du bois: l'Europe et le Japon face à face*. Dourdan : Vial. ISBN 978-2-85101-083-4.

GROSSMAN, Joan, 2012. *Drop City* [en ligne]. 2012. [Consulté le 2 juin 2017]. Disponible à l'adresse : https://www.dropcitydoc.com/about.

GUYONNET, René, 1999. *Les matériaux composites à base de bois rétifié. In : Revue des composites et des matériaux avancés*. 1999. n° 9, p. 73-85.

HAMAYON, Loïc, 2014. *L'acoustique des bâtiments*. Paris : Éd. le Moniteur. ISBN 978-2-281-11682-3.

HAMBURGER, Bernard et VÉNARD, Jean-Louis, 1977. *Série industrielle et diversité architecturale*. Paris : La Documentation française. Collection Plan construction.

HELFRICH, Kurt Gerard Frederick et WHITAKER, William (éd.), 2006. *Crafting a modern world: the architecture and design of Antonin and Noémi Raymond*. New York : Princeton Architectural Press. ISBN 978-1-56898-583-1.

HERZOG, Thomas, 2005. *Construire en bois*. Lausanne : Presses polytecniques et universitaires romandes. ISBN 978-2-88074-602-5.

HIRSHEN, Sandy, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA et SCHOOL OF ARCHITECTURE, 2003. *Toward an architecture of conscience*. Canada : School of Architecture, University of British Columbia. ISBN 978-0-88865-660-5.

HOBHOUSE, 2015. *Swimming Pool for a school in Beaconsfield*. In : *DETAIL* English. 2015. Vol. Roofs, n° 1, p. 28-30.

JACQUOT, Kévin, 2014. *Numérisation et restitution virtuelle des maquettes de la collection de Louis XIV - Le cas des fortifications bastionnées.* Thèse. Sciences de l'architecture. Nancy : MAP / CRAI - École d'Architecture de Nancy - Université de Lorraine.

JESKA, Simone et PASCHA, Khaled Saleh (éd.), 2015. *Emergent timber technologies: materials, structures, engineering, projects*. Basel ; Boston : Birkhäuser. ISBN 978-3-03821-502-8. TH1101 .N42213 2015

KLETT, Andreas, 1724. *Wohl-informirter Tafel-Decker und Trenchant.* Nuremberg : Buggel und Seitz.

KOCH, Peter, 1964. *Wood machining processes*. Cambridge : Ronald Press Compagny.

KOLAREVIC, Branko (éd.), 2003. *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. New York, NY : Spon Press. ISBN 978-0-415-27820-1. NA2543.T43 A724 2003

KRESLING, Biruta, 2012. *Origami-structures in nature: lessons in designing « smart » materials*. In : MRS Proceedings. janvier 2012. Vol. 1420. DOI 10.1557/opl.2012.536.

LABEYE, Alice, 2016. *Modélisation thermique des bâtiments à enveloppe structurelle plissée*. MFE. Nancy. Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, MAP - CRAI, ENSA Nancy.

LAHBARI, Noureddine, 2007. *Etude de la Stabilité des Plaques et Coques Métalliques par la Méthode des Eléments finis*. Université de Batna Faculté des Sciences de l'Ingénieur.

LANDOULSI, Qoods, 2015. *Evaluation du comportement thermique des structures plissées*. MFE. Nancy. MAP/ CRAI.

LANG, Robert, 2016. *Crease Patterns*. In : *Robert J. Lang Origami* [en ligne]. 2016. [Consulté le 25 juin 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.langorigami.com/crease-patterns.

LARTIGAU, Julie, 2013. *Caractérisation du comportement des assemblages par goujons collés dans les structures bois*. École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur. Université de Bordeaux 1.

LE GOVIC, Claude, 1995. *Les assemblages dans la construction en bois.* Paris : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. Comité National pour le Développement du Bois.

LEITNER, Katharina, 2004. *Tragkonstruktionen aus plattenförmigen Holzwerkstoffen mit der Textilen Fuge*. 1. Aufl. Aachen : Mainz. ISBN 978-3-928493-53-6.

LIENHARD, Julian, ALPERMANN, Holger, GENGNAGEL, Christoph et KNIPPERS, Jan, 2013. *Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process*. In : *GENGNAGEL*, Christoph (éd.), International Journal of Space Structures. septembre 2013. Vol. 28, n° 3-4, p. 187-196. DOI 10.1260/0266-3511.28.3-4.187.

LISTER, David, 1997. *Some observations on the history of paperfolding in Japan and the West –a development in parallel*. In : *Origami Science and Art*. Otsu, Japon : Miura. 1997. p. 511-539.

LISTER, David, 2003. *The Origin of Origami : Is the origin of origami chinese or japanese?* In : *British Origami Society* [en ligne]. 8 novembre 2003. [Consulté le 11 mai 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.britishorigami.info/academic/lister/origins_of_origami.php.

LISTER, David, 2005. *An Ancient Egyptian Map: The earliest known example of folding.* In : *British Origami Society* [en ligne]. juin 2005. [Consulté le 28 avril 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.britishorigami.info/academic/lister/egypt.php.

LYNN, Greg (éd.), 2004. *Folding in architecture*. Rev. ed. Chichester, West Sussex : Wiley-Academy. Architectural design. ISBN 978-0-470-09218-7.

LYNN, Greg, 2013. *Architectural Curvilinearity : the Folded, the Pliant and the Supple*. In : *The digital Turn in Architecture 1992-2012*, edited by Mario Carpo. S.l. : Wiley. 2013. p. 29-44.

MARIN, Frédéric, 2009. *Biominéralisation de la coquille des mollusques : origine, évolution, formation*. Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). S.l. : Université de Bourgogne - UMR CNRS 5561, Biogéosciences.

MARIN, Philippe, MARSAULT, Xavier, SALERI, Robert, DUCHANOIS, Gilles et BIGNON, Jean-Claude, 2012. *L'Eco-Conception Générative : Une illustration de la pensée complexe*. In : *SCAN12*. , École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette, France : s.n. 2012. p. 11.

MARTIN, Patrick et SALES, C, 1994. *Processus de coupe et la scie à ruban.* In : *Le Bois Matériau d'Ingénierie*. ARBOLOR. 1994. p. 289-309.

MCKENZIE, W.M, 1967. *The basic wood cutting process*. In : *2nd International Wood Machining Seminar*. University of Califomia, Richmond : s.n. 1967. p. 3-8.

MEISS, Pierre von, 2003. *De la forme au lieu: une introduction à l'étude de l'architecture*. 2. éd., et corr. Lausanne : Presses Polytechniques et Univ. Romandes. ISBN 978-2-88074-255-3.

MIKÓ, István, COPELAND, Robert S., BALHOFF, James P., YODER, Matthew J. et DEANS, Andrew R., 2014. *Folding Wings like a Cockroach: A Review of Transverse Wing Folding Ensign Wasps*. WICKER-THOMAS, Claude (éd.), PLoS ONE. 2 mai 2014. Vol. 9, n° 5, p. e94056. DOI 10.1371/journal.pone.0094056.

MINISTÈRE DE LA MARINE, 1859. *Instruction sur les bois de Marine et leur application aux constructions navales* ; publiée [en ligne]. Paris : Arthus Bertrand. [Consulté le 3 octobre 2016]. Ordre de S. Exc. le Ministre secrétaire d'Etat au Département de la Marine. Disponible à l'adresse : http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k96176120.

MITCHELL, William J., 2001. *Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds.* In : *Franck Gehry, Architect*. J. Fiona Ragheb (New York : Solomon R. Guggenheim Foundation). 2001. p. 352-363.

MONIER, Vincent, 2011. V*ers des structures non-standard en bois fondées sur l'utilisation de composants irréguliers*. MFE. Nancy. MAP/ CRAI.

MORNEMENT, Adam et HOLLOWAY, Simon, 2007. *Corrugated iron: building on the frontier*. 1st ed. New York : W.W. Norton & Co. ISBN 978-0-393-73240-5. NA4135 .M67 2007

MOUSSAVI, Farshid et LÓPEZ-PÉREZ, Daniel, 2009. *The function of form*. Barcelona : Actar. ISBN 978-84-96954-73-1.

MOUTEE, Mohssine, 2006. *Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage*. Québec : Faculté de foresterie et géomatique de l'Université de Laval.

MUTTONI, Aurelio, 2012. *L'art des structures: une introduction au fonctionnement des structures en architecture*. 2eme éd. Lausanne (Suisse) : Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 978-2-88074-980-4.

NATTERER, Julius, SANDOZ, Jean Luc et REY, Martial, 2004. *Traité de génie civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Matériau, technologie et dimensionnement - Construire en bois*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. ISBN 978-2-88074-609-4.

NATTERER, Julius, SANDOZ, Jean-Luc, REY, Martial et FIAUX, Maurice, 2000. *Construction en bois: matériau, technologie et dimensionnement*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN 978-2-88074-400-7.

ÓLAFSDÓTTIR, Ásdís, 1998. *Le mobilier d'Alvar Aalto dans l'espace et dans le temps: la diffusion internationale du design, 1920-1940*. Paris : Publications de la Sorbonne. Histoire de l'art, 10. ISBN 978-2-85944-353-5. NK1471. F54 A1836 1998

OXMAN, Rivka, 2006. *Theory and design in the first digital age.* In : *Design Studies*. mai 2006. Vol. 27, n° 3, p. 229-265. DOI 10.1016/j.destud.2005.11.002.

PARENT, Claude, 1962. *Auditorium de l'université d'Illinois*. In : *L'architecture d'aujourd'hui*. janvier 1962. n° 99, p. 26-27.

PERYSINAKI, Aliki-Myrto, 2014. *Évolution du processus de création en architecture face aux impératifs du développement durable*. Paris : Université Paris Ouest-Nanterre La Défense.

PICON, Antoine, 2010. *Culture numérique et architecture - Une introduction*. Basel : Birkhäuser. ISBN 978-3-0346-0261-7.

PIROOZFAR, Poorang A. E. et PILLER, Frank T. (éd.), 2013. *Mass customisation and personalisation in architecture and construction.* London : New York : Routledge, Taylor & Francis Group. ISBN 978-0-415-62283-7. NA2543.B84 M37 2013

POPPER, Karl R., LAUNAY, Michelle-Irène de et LAUNAY, Marc B. de, 1999. *Conjectures et réfutations: la croissance du savoir scientifique*. Paris : Payot. Bibliothèque scientifique. ISBN 978-2-228-13870-3.

PROUVÉ, Jean et STOULLIG, Claire, 2012. *Jean Prouvé*. Paris : Nancy : Somogy ; Musée des beaux-arts. ISBN 978-2-7572-0563-1. NA1053.P72 A4 2012

RAJEMISON, Andraina Hajamanalina, 2013. *Proposition d'essences de substitution aux bois précieux en épuisement par la connaissance des propriétés du matériau bois : Cas du Palissandre de Madagascar - Application en ameublement*. Thèse. Toulouse : Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier).

ROBELLER, Christopher, 2015. I*ntegral Mechanical Attachment for Timber Folded Plate Structures* [en ligne].[Consulté le 31 mars 2015]. Disponible à l'adresse : http://dx.doi.org/10.5075/epfl-thesis-6564.

ROBELLER, Christopher, NABAEI, Seyed Sina et WEINAND, Yves, 2014. *Design and Fabrication of Robot-Manufactured Joints for a Curved-Folded Thin-Shell Structure Made from CLT.* MCGEE, Wes et PONCE DE LEON, Monica (éd.), Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014 [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. p. 67-81. [Consulté le 1 juin 2016]. ISBN 978-3-319-04662-4. Disponible à l'adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-04663-1_5.

ROBELLER, Christopher, STITIC, Andrea, MAYENCOURT, Paul et WEINAND, Yves, 2015. *Interlocking Folded Plate: Integrated Mechanical Attachment for Structural Wood Panels*. BLOCK, Philippe, KNIPPERS, Jan, MITRA, Niloy J. et WANG, Wenping (éd.), Advances in Architectural Geometry 2014. S.l. : Springer International Publishing. p. 281-294. ISBN 978-3-319-11417-0.

RUDOFSKY, Bernard, 1977. *Architecture sans architectes : brève introduction à l'architetcture spontanée*. Paris : Chêne. ISBN 978-2-85108-150-6.

SALVADORI, Mario, 1976. *Structure et architecture*. Paris : Eyrolles.

SALVADORI, Mario, 2005. *Comment ça tient?* Marseille : Éditions Parenthèses. ISBN 2-86364-636-2.

SCHINEIS, Regina, 2004. *Gefalteter Klangkoerper Musikprobensaal Thannhausen /Thannhausen Rehearsal Room*. In : *10. Internationales Holzbau Forum (IHF). Garmisch-Partenkirchen* : Internationales Holzbau Forum. 2004.

SCHUMACHER, Patrik, 2013. *A New Global Style - Parametricism : A New Global Style for Architecture and Urban Design*. CARPO, Mario (éd.), The digital turn in architecture 1992-2012. Chichester : Wiley. AD reader. p. 240-257. ISBN 978-1-119-95175-9. NA2728 .D542 2013

SILVESTRI, Chiara, 2009. *Perception et conception en architecture non-standard.* Thèse. Mécanique Génie Civil. Montpellier : Université Montpellier II, Science et Technique du Languedoc.

SIMON, Herbert A et LE MOIGNE, Jean Louis, 1991. *Sciences des systèmes: sciences de l'artificiel*. Paris : Dunod. ISBN 978-2-04-019815-2.

STORCK, Justin J, 2002. *Dictionnaire pratique de Menuiserie-Ebénisterie-Charpente.* Dourdan : Vial. ISBN 978-2-85101-071-1.

TREBBI, Jean-Charles, 2008. *L'art du pli: design et décoration. Paris : Alternatives*. ISBN 978-2-86227-574-1. NK1582 .T74 2008

TROUY, Marie-Christine, 2015. A*natomie du bois: formation, fonctions et identification.* Versailles : Quæ. ISBN 978-2-7592-2349-7.

VASSEUR, Nadine, 2002. *Les plis. Paris :* Seuil. ISBN 978-2-02-049938-5. NC775 .V37 2002

VON VEGESACK, Alexander, 1986. *L'Industrie Thonet : de la création artisanale à la production en série : le mobilier en bois courbé.* Réunion des musées nationaux. Paris : Ministère de la Culture et de la Communication. Les dossiers du Musée d'Orsay.

WEINAND, Yves, 2006. *Des géométries complexes entre l'ingénieur et l'architecte*. In : *Matières*. 2006. n° 8, p. 12-19.

WESTERLUND, Lars, 2012. *En ny väg: Trästad 2012*. [Umeå] : Projektet Trästad 2012. ISBN 978-91-975246-8-1.

WETZEL, Jean-Paul, 2009. *Proposition d'un modèle et d'un outil dédiés à la conception morphologique architecturale en phase esquisse*. Thèse. Sciences de l'architecture. Nancy : MAP / CRAI - École d'Architecture de Nancy - Université de Lorraine.

WOOD, Dick Wood et LINN, Thomas Gray, 1942. *Plywoods - Their development, manufacture and application.* Edinburgh and London : W. & A. K. Johnston, Limited.

ZELLNER, Peter, 1999. *Hybrid space: new forms in digital architecture*. New York : Rizzoli. ISBN 0-8478-2203-6. NA2728 .Z45 1999

Filmographie

VIVES, François-Xavier, 2015. Un monde en plis - Le code origami. France 5, 3SAT, ERR, LRT, Ceska Televize, NC+, CHELLO TV, RTS. 2015.

Annexe 1

Références architecturales

Dans cette annexe, nous présentons un ensemble de références architecturales appartenant au domaine du plissage.
Classées en fonction de leur matérialité, ces constructions plissées témoignent d'une recherche plastique et spatiale combinée selon les cas à une capacité structurale.

Les édifices retenus ont constitué le corpus de notre étude. La liste n'est pas exhaustive mais elle nous semble suffisante pour comprendre les enjeux morpho-structuraux des géométries plissées et nous aider à définir un modèle théorique du plissage en architecture.

Le Béton

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Salle des congrès

Années de la construction :
1953-57

Dimensions globales :
L = 65 m ; l_{max} = 60 m ; H = 18 m

Matériaux :
Béton

Éléments concernés :
Couvrement et façades

Surface de référence :
Plan

Type de plissage :
Unidirectionnel régulier

Particularité :
Plissage brisé porté par une poutre centrale.

BIBLIOGRAPHIE

Abram, Joseph, *Pier Luigi Nervi, la résistance par la forme, la forme comme structure*, in Pier Luigi Nervi L'architecture comme défi, Silvana Editoriale, 2010, pp. 41-57.

Nervi, Pier Luigi, *Pier Luigi Nervi: constructions et projets*, Editions Vincent & Fréal, Paris, 1957, p118.

Bâtiment des congrès de l'UNESCO

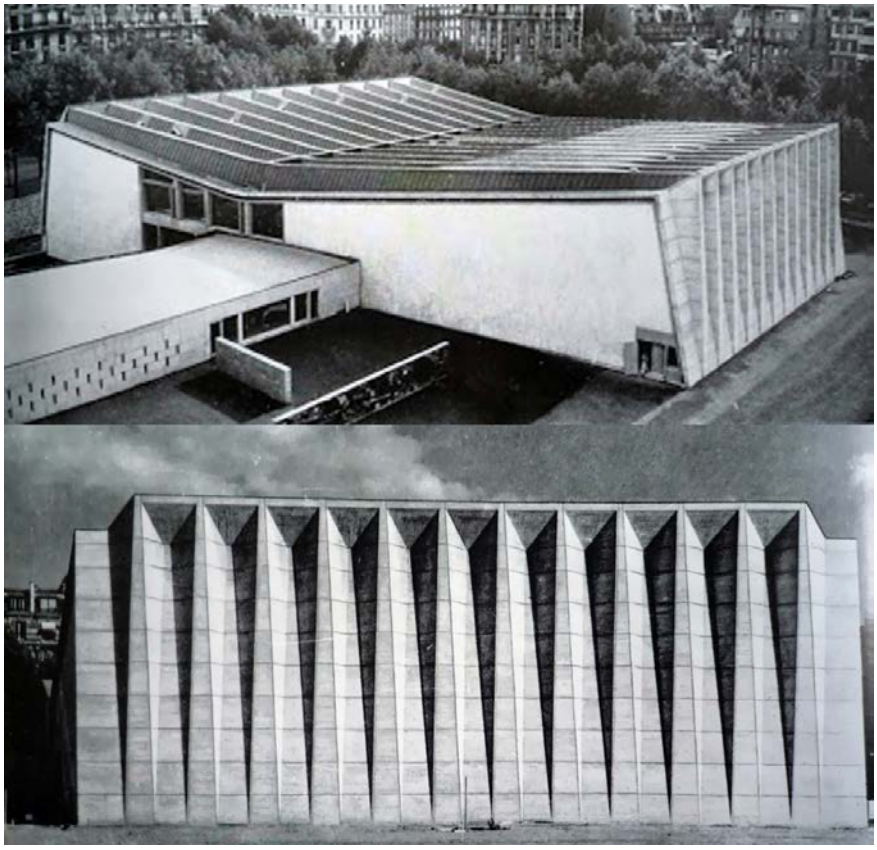
Localisation : **7 Place de Fontenoy, 75007 Paris, France**

Architectes : **Marcel Breuer, Bernard H. Zehrfuss**
Ingénieurs : **Pier Luigi Nervi**

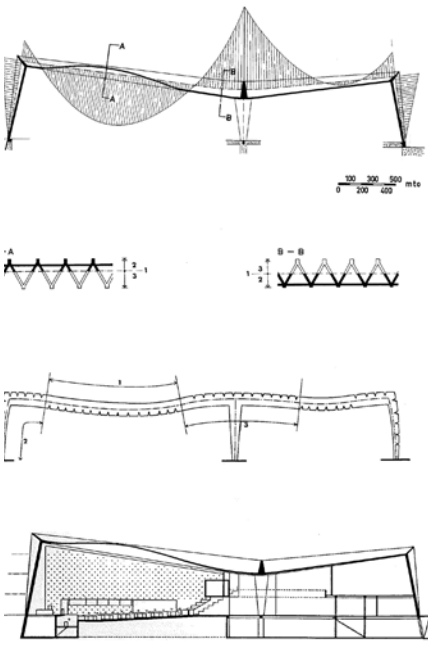
Le travail de P.L. Nervi illustre le dialogue entre forme et structure. En soumettant « l'informe à la forme », l'ingénieur italien a su allier, dans une harmonie incontestable, l'habileté de la structure et les qualités esthétiques. On peut percevoir cela comme une exaltation de la matière : le pli morphologique naît de la matière et, en retour, apporte à la matière une « performance insoupçonnée ». Le bâtiment de l'UNESCO, à Paris, est particulièrement intéressant pour sa structure architecturale. L'enveloppe de béton plissée apporte une réponse autant technique qu'architecturale. Structure et forme sont identiques : « La couverture du bâtiment des conférences est formée par un ouvrage plissé de béton armé, visible de l'intérieur comme de l'extérieur. Le raidissement est obtenu, au centre du bâtiment, par une poutre transversale reposant sur quelques supports. Dans la salle de conférences, la dalle qui passe entre les plissures est courbée vers le haut ce qui donne une solution spatiale extrêmement heureuse. » (Nervi, 1957, p 118).

La qualité structurelle du pli devient la qualité spatiale de la salle. L'enveloppe et l'habillage se confondent. Par ce système, on atteint un degré de pureté architecturale : tout ajout d'équipements devient alors parasitaire, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Le mouvement courbe de la dalle est issu du diagramme des moments (Image n° 2). Il nous renseigne sur les sollicitations internes produites par les charges verticales et le sens des forces de compression et de traction dans la construction. En suivant la direction des forces, la courbure de la dalle révèle et dissimule à la fois le plissage. Ce projet est à l'image des systèmes naturels où la nécessité technique génère une véracité esthétique. Il illustre cet ensemble de réalisations qui pratique avec justesse la technique du plissage.



1



2

3

4

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 3. http://archipostalecarte.blogspot.fr/2013_09_01_archive.html [consulté le 3 décembre 2016]
2. Nervi, Pier Luigi, *Pier Luigi Nervi: constructions et projets*, Editions Vincent & Fréal, Paris, 1957, p120.
4. http://archipostalecarte.blogspot.fr/2013/09/dehors-dedans-le-beton.html [consulté le 3 décembre 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Salle de spectacle

Années de la construction :
1955 - 61

Dimensions globales :
L = 70 m ; l = 60 m ; H = 18 m

Matériaux :
Béton

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Prisme droit à base trapèzoïdale

Type de plissage :
Unidirectionnel

Particularité :
Épaisseur du voile : 12 cm
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

- HELFRICH, Kurt Gerard Frederick et WHITAKER, William (éd.), 2006. *Crafting a modern world: the architecture and design of Antonin and Noémi Raymond*. New York : Princeton Architectural Press, pp. 238-243.

- VENDREDI-AUZANNEAU, Christine, 2012. *Antonin Raymond: un architecte occidental au Japon,* 1888-1976. Paris : Picard. Collection Architecture contemporaine, 8, pp. 142-145

Gunma Music Center

Localisation : **28-2 , Takamatsu-cho, Takasaki, Gunma, Japon**

Architectes : **Antonin Raymond**

Antonin Raymond est un architecte tchéco-américain ayant vécu et pratiqué aux États-Unis et au Japon. Sa collaboration pendant plusieurs années avec Frank Lloyd Wright a directement influencé son langage architectural. Il est l'un des précurseurs de sa génération, pour son dialogue entre la culture japonaise, qui porte une attention particulière aux cheminements des hommes dans leur environnement, et l'architecture de « béton » dont les formes épurées manifestent les recherches en Occident à cette époque.

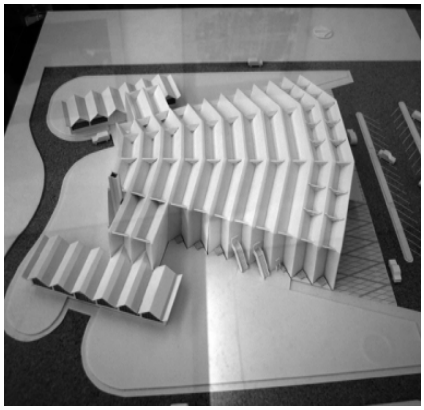
Ce théâtre traduit les principes de simplicité et d'économie voulus par le créateur : la réflexion menée sur le béton armé a permis à la fois de définir la forme structurale du bâtiment et de servir au travail de finition intérieur comme extérieur (Image n ° 1).

Le Gunma Music Center est réalisé par un voile plissé en béton de 120 mm d'épaisseur. Sa géométrie en accordéon se décompose en une série de poutres en « V » soutenues par deux portiques disposés perpendiculairement aux plis. Les plissages latéraux fonctionnent, quant à eux, comme des contreforts. L'association des poutres et des contreforts forme des arches plissées successives. Le pli de la première arche s'ouvre face au parvis comme pour accueillir le public (Image n° 5).

À l'intérieur, le plissage toujours présent offre une égalité des conditions de vue et d'acoustique à chaque spectateur, quel que soit son emplacement dans la salle. Après plusieurs années de mise en pratique, la qualité sonore du Gunma Music Center a été jugée très insuffisante. Pour cette raison, le béton brut a été recouvert d'un dispositif acoustique.

Dans cette réalisation, le plissage a montré des qualités qui semblent toutefois difficiles à maîtriser parfaitement. Précurseur, ce bâtiment ouvre une voie à la mise en application des propriétés du pli.

1



2

3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. https://potatoartviews.wordpress.com/2013/11/18/brutalist-architecture/ [consulté le 2 mars 2016]
2. et 5. http://archivoyagejapon.free.fr/carte.php?region=Kanto [consulté le 24 février 2016]
3. http://journal.rikumo.com/journal/2015/12/14/legacy-the-work-of-antonin-raymond [consulté le 2 mars 2016]
4. http://mds-arch.seesaa.net/article/205304417.htm [consulté le 24 février 2016]l

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Gymnase

Années de la construction :
1956 - 61

Dimensions globales :
L = xx m ; l = xx m ; H = xx m

Matériaux :
Béton

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Prisme droit à base trapèzoïdale

Type de plissage :
Mono-directionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

BAUR, Hermann et BASEL-STADT (SWITZERLAND) (éd.), 2011. *Hermann Baur: Sachlichkeit* in Beton: Allgemeine Gewerbeschule Basel = Objectivity in concrete. Sulgen : Niggli. Edition Archithese, 8. p229-230.

RAMSEY, Sarah, 2014. *SCHULE FÜR GESTALTUNG | Basel.* In : Postwar Concrete Postscript [en ligne]. 17 août 2014. [Consulté le 9 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.postwarconcretepostscript.com/2014/08/17/schule-fur-gestaltung-basel/.

Basel College of Art and Design and the Industrial Trade School

Localisation : **Vogelsangstrasse 15, Bâle, Suisse**

Architectes : **Hermann Baur, Hans Peter Baur, Franz Bräuning, Arthur Dürig**

La « Maurer Halle » est l'un des quatre bâtiments qui constituaient l'École Générale du Commerce. Employé à l'origine comme gymnase, il est aujourd'hui réinvesti par l'École Supérieure d'Art et de Design comme espace polyvalent.

Cette élégante structure plissée se détache de la forme parallélépipédique des bâtiments qui la côtoient. Elle est pensée comme une arche et deux grandes façades vitrées, dessinées finement par le quadrillage des menuiseries, laissent la lumière naturelle inonder le volume intérieur. Le béton brut visible sur chaque face révèle la sobriété du bâtiment. Seul un jeu de texture, marqué par l'empreinte des différents types de coffrage, dynamise le plissage (Image n° 1) : de fines stries horizontales, absorbant la lumière, viennent asseoir les plis muraux et s'opposent à l'aspect lisse de la sous-face.

Bien qu'il soit esthétique, le pli joue également un rôle structural. D'une part, les plis en toiture apportent l'inertie suffisante pour résister à la portée. D'autre part, les parois de verre n'ayant aucune fonction dans le contreventement, la stabilité du bâtiment est partiellement réalisée par le plissage. En effet, l'encastrement entre le mur et le couvrement est assuré par l'amplitude du pli qui génère une combinaison géométrique tridimensionnelle au niveau de la jonction. Ainsi le pli, inexistant au raz du sol, prend toute son importance à la hauteur de la ligne faîtière (Image n° 2).

En réalité, le bâtiment est composé par deux demi-portiques qui reposent, au point d'inflexion de la toiture, sur un système poteau-poutre (Image n° 3 et n° 4). L'inclinaison de chaque demi-portique participe à un effet visuel de stabilité.

La lecture du plissage amène à la compréhension structurale de l'ouvrage et répond à des questions architecturales tant pratiques, comme l'évacuation des eaux de pluie, que plastiques dans l'expression de la forme et du matériau.

1

3

4

2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 4. http://schoenstebauten.heimatschutz.ch/de/allgemeine-gewerbeschule-und-schule-fur-gestaltung-basel [consulté le 3 février 2015]
2. https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/04/f3/a8/04f3a8425f313b55278f07122c32f6f3.jpg [consulté le 3 février 2015]
3. http://www.photo-basel.ch/thumbnails.php?page_number=2html [consulté le 3 février 2015]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Palais omnisport

Années de la construction :
1958 - 63

Dimensions globales :
D = 121 m ; H = 38 m

Matériaux :
Béton

Éléments concernés :
Le couvrement

Surface de référence :
Dôme

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage gauche
Épaisseur minimale de 10 cm

BIBLIOGRAPHIE

- ANON., 1962. *Auditorium de l'université d'Illinois.* In : L'architecture d'aujourd'hui. janvier 1962. n° 99, p. 26-27.

- ANON., 1964. *Auditorium de l'université d'Illinois à Urbana.* In : L'architecture d'aujourd'hui. novembre 1964. n° 116, p. 42-43.

Assembly hall / State Farm Center

Localisation : **Université de l'Illinois, 1800 S 1st St, Champaign, IL 61820, États-Unis**

Architectes : **Harrison et Abramovitz**
Ingénieurs : **Ammann & Whitney**

L'université de l'Illinois, à la recherche d'un espace pour organiser des activités étudiantes, a commandé un dôme offrant une volumétrie intérieure libre de toute structure.
Ce bâtiment est issu d'une collaboration entre architectes et ingénieurs. Grâce à l'ingénierie, la recherche formelle à travers l'application de nouvelles structures a permis d'obtenir des « effets plastiques inhabituels ». Élément essentiel de la composition architecturale, la morphologie de la coupole de l'« Assembly Hall » apparaît comme le résultat heureux d'un calcul mathématique (Images n° 1 et n° 2).
Cette coque nervurée, donnant l'impression d'une superposition de différents schémas de plissage, traduit visuellement son comportement structural. Le plissage intervient comme un « libérateur des servitudes de la gravitation » dans une écriture architecturale séduisante. Structuralement, le plissage se compose de quarante-huit séquences de plis recourbés identiques disposés selon les rayons de la coupole. L'ensemble du dispositif s'équilibre grâce à la présence d'un anneau de compression au centre et d'une « ceinture périmétrale précontrainte » reprenant les poussées latérales. Les charges verticales sont reprises quant à elles par quarante-huit contreforts liés par une semelle annulaire. La coque a été réalisée par projection de béton sur un coffrage en bois, suivant un rythme de douze portions d'arc successives (Images n° 3). Grâce à cette méthode, le plissage a permis d'obtenir un voile de béton dont l'épaisseur a été réduite à une dizaine de centimètres.
À l'intérieur, l'éclairage artificiel révèle le plissage dont les lignes des arêtes entretiennent l'effet majestueux et céleste de la coupole (Image n° 5).
La salle de l'Assemblée est considérée comme une merveille d'ingénierie dialoguant avec une plastique architecturale forte.

1

2

3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. ttp://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=124532295 [consulté le 2 mars 2016]
2. et 3. http://archives.library.illinois.edu/archon/?p=digitallibrary/digitalcontent&id=8524 [consulté le 2 mars 2016]
4. et 5. http://www.news-gazette.com/multimedia/photogallery/2014-03-03/archives-assembly-hallstate-farm-center [consulté le 2 mars 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment cultuel

Années de la construction :
1962

Dimensions globales :
D = 30 m ; H = 30 m

Matériaux :
Béton

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Paraboloïde de révolution

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

Igreja de Santo Antonio da Polana

Localisation : **Avenida Kwame Nkrumah, Maputo, Mozambique**

Architectes : **Nuno Craveiro Lopes**

L'église Saint-Antoine, construite en 1962 à Maputo (Mozambique), est un bâtiment emblématique de l'architecture moderniste. Réalisée par l'architecte portugais Nuno Craveiro Lopes, la nouvelle église de Polana est un objet architectural audacieux : l'aspect massif, à première vue, s'efface au profit d'un effet de légèreté engendré par ses plis qui, comme des pétales d'une fleur retournée, reposent ponctuellement sur le sol (image n° 1).

La surface du béton qui ne présente ni rugosités ni aspérités au toucher ou au regard et la régularité du plissage rappellent les objets que sont les lampions de papier. L'édifice religieux est composé de seize modules disposés selon un plan rayonnant. La base de chaque module forme un porche triangulaire vitré (Image n° 3). Seul trois de ces porches font office d'entrée dans le bâtiment ; ils se distinguent par la présence d'un perron composé de quelques marches.

À l'inverse des églises traditionnelles sur plan basilical, la forme circulaire et « conique » de l'église Saint-Antoine en fait un objet non orienté qui amène une réflexion particulière quant à sa scénographie intérieure : seule la croix du Christ permet de trouver son chemin (Image n° 2). L'espace central se veut délibérément minimaliste. Il se caractérise par le choix minimal du matériau qui s'atténue, toutefois, avec les entrées de lumière : toutes les lignes du plissage guident le regard avec force vers le centre de la structure où les vitraux fendent les sommets des plis de béton de manière à générer une rose (Image n° 4).

Comme pour de nombreux édifices religieux réalisés à cette période, la géométrie du pli se prête facilement à la création de grandes volumétries libres qui, par une mise en scène symbolique et idéaliste dans la représentation des choses, sont empreintes de spiritualité.

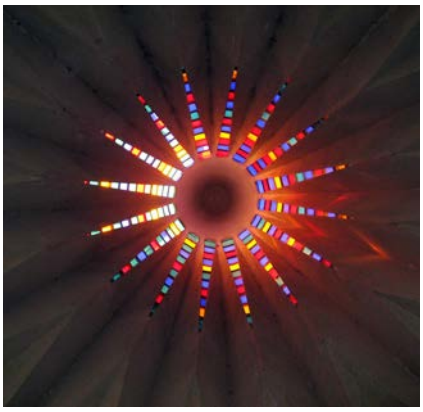
BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2015. *Igreja católica de Santo António na Polana, Maputo*. In : House of Maputo [en ligne]. 2015. [Consulté le 30 décembre 2016]. Disponible à l'adresse : http://houseofmaputo.blogspot.com/2015/10/igreja-catolica-de-santo-antonio-na.html.

ANON., 2016. *Santo António Da Polana Church*. In : Hidden Architecture [en ligne]. janvier 2016. [Consulté le 30 décembre 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.hiddenarchitecture.net/2016/01/santo-antonio-da-polana-church.html.

1

3



4

2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 3. https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/a1/6a/d0/a16ad01e9357a490a4ae06ba1d765606.jpg [consulté le 8 septembre 2016]
2. et 4. https://delagoabayworld.files.wordpress.com/2013/12/daniel_clements_photography_b0005304.jpg [consulté le 8 septembre 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Cinéma

Années de la construction :
1965

Dimensions globales :
D = 33 m ; H = 13 m

Matériaux :
Béton

Éléments concernés :
Couvrement, façade

Surface de référence :
Cylindre

Type de plissage :
Unidirectionnel

Particularité :
Plis ajourés
Surface de plissage gauche

BIBLIOGRAPHIE

BORGE, Anja Olea Gravningsmyr, 2011. *Kongsberg kino av arkitektene Ljøterud Ødegård : Et smykke av betong.* Master thesis. S.l. : Université de Oslo.

LJØTERUD &ODEGAARD Architects, plans, coupes et façades.

SURLIEN, Anne Jone, *Kongsberg Kino-en romoddyssé, Analyse av Kongsberg Kino fra et verneperspectiv,* Norsk Arkitecturhistore GK3, Novembre 2009.

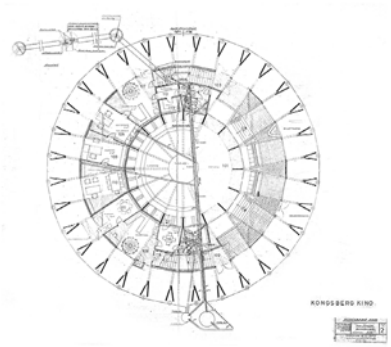
Ancien cinéma de Kongsberg

Localisation : **Place Nymoen, Kongsberg, Norvège**

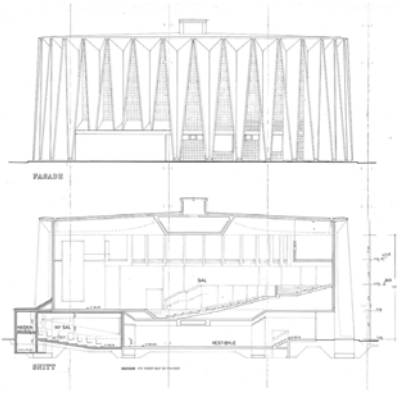
Architectes : **Ørnulf Ljøterud et Erik Odegaard**
Ingénieurs : **Sverre Jystad**

Le cinéma de Kongsberg est un bâtiment distinctif par sa forme cylindrique et par l'utilisation du pli dans sa structure et sa couverture. Il résulte d'une combinaison de plusieurs principes architecturaux couramment employés dans les années 1960 : l'aspect monumental des édifices accueillant des programmes publics, la rigueur mathématique de leur plan et l'utilisation de matériaux « bruts » souvent restreinte à l'acier et au béton.
La structure du bâtiment est faite de béton armé, coffré et moulé sur place. Le concept de base de ce projet réside dans une géométrie du plissage conçue de telle sorte que la forme sculpturale de l'édifice qui en résulte agisse aussi en tant que système constructif.
Trente-deux « colonnes » supportant la toiture forment un plissage qui enveloppe toute la périphérie du bâtiment. Par le geste subtil qui consiste à resserrer chaque pli à leur base, l'architecte a créé un plissage ajouré qui s'apparente à de longues tentures, rappelant elles-mêmes l'univers du spectacle (Image n° 1). Les lignes sommitales du plissage, ainsi ouvertes, laissent entrevoir le volume maçonné non porteur de la salle de cinéma. Entre les deux, un espace déambulatoire étroit permet de faire le tour de l'enceinte (Image n° 4).
La structure plissée de la toiture est coordonnée à celle des piliers. Inspiré de l'éventail japonais, le couvrement a été réalisé par des plis rayonnants précontraints qui assurent le transfert des charges. Vues de l'intérieur, la densité et l'amplitude importante des plis accentuent la vision circulaire de l'édifice (Image n° 5). Ces plis convergent vers un oculus où est logé le dispositif d'éclairage principal de la salle.
Le cinéma de Kongsberg combine un concept formel à la fois innovant par son inspiration de la culture orientale, et classique dans son plan circulaire, qui n'est pas sans rappeler les amphithéâtres gréco-romains.

1



2



3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. https://lokalhistoriewiki.no/index.php/Fil:Kongsberg_kino_1965.jpg [consulté le 8 septembre 2016]
2. et 3. Agence d'Architecture Ljøterud &Odegaard
4. et 5. http://dms09.dimu.org/image/012wWWy6TCVs?dimension=1200x1200 [consulté le 8 septembre 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Musée

Années de la construction :
2012-15

Dimensions globales :
D = 80 m ; H = 14 m

Matériaux :
Béton, acier

Éléments concernés :
Murs

Surface de référence :
Cylindre

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

Réplique de la grotte du Pont-d'Arc

Localisation : **Plateau du Razal, 07150 Vallon-Pont-d'Arc, (Ardèche), France**

Architectes : **Xavier Fabre, Vincent Speller, Atelier 3A**
Ingénieurs : **SOCRA-Campenon Bernard, Girus**

La « réplique » est l'un des cinq bâtiments qui font partie du pôle de la Caverne du Pont-d'Arc. Située au cœur du plateau du Razal, sur les hauteurs de la commune de Vallon-Pont-d'Arc, cette enceinte circulaire renferme une reconstitution partielle de la grotte de Chauvet. Les architectes ont su, au travers d'un plissage, établir une écriture architecturale emblématique qui s'intègre dans le paysage sans pour autant s'y effacer.
La géométrie du plissage reprend de façon abstraite la triangulation du relevé en trois dimensions de la grotte originale. Dans un souci d'apparenter visuellement l'enveloppe du bâtiment aux plis et aux fissures d'une roche, la dimension des triangles a été amplifiée (Image n° 1). Ainsi, le fort relief des plis, accentué par le jeu d'ombre et de lumière naturelle, s'intègre dans le paysage comme une « falaise reconstituée ».
En plus de la forme plissée, le béton projeté sur un support métallique renforce le caractère massif de la falaise qui entre en résonnance avec l'univers de la grotte (Image n° 2).
Dans ce projet, le pli accompagne et conditionne les visiteurs avant de pénétrer dans la grotte. Une rampe descendante mène ces explorateurs d'un jour vers l'entrée du bâtiment. Elle est d'abord bordée d'un plissage à l'amplitude légère formé de panneaux préfabriqués en béton (Image n° 4). Peu à peu, le plissage se renforce. La douceur des plis réguliers laisse place au tumulte des plis de la falaise. Ce changement rythmique a pour but de préparer le visiteur aux reliefs accidentés, aux espaces exigus et à la pénombre qu'offre la grotte.
Architecture « topographique » par son intégration au site, mais aussi architecture « scénographique » à l'image d'un « décor » au caractère monumental, ce projet a su utiliser les dimensions sensorielles du pli afin de créer un univers qui suscite l'émotion.

BIBLIOGRAPHIE

DANIEL, Jacques, 2015. *Copie conforme ! La Caverne du Pont-d'Arc, nouvelle grotte Chauvet.* In : Archeologia. Mai 2015. n° 532, p. 22-29.

SOLVEIG, Orth, 2015. *Restitution à l'identique de la Grotte Chauvet.* In : Construction Moderne. Décembre 2015. n° 146, p. 30-33.

1

3

4

2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://lacavernedupontdarc.org/la-replique/ [consulté le 14 octobre 2015]
2.http://concrete-hub.com/post/fabre-speller-architectes-caverne-du-pont-darc-ardeche/ [consulté le 14 octobre 2015]
3. et 4. http://www.stephanecompoint.com/41,,,40384,fr_FR.html [consulté le 14 octobre 2015]

La terre-cuite

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment cultuel

Années de la construction :
1952 - 58

Dimensions globales :
L = 35 m ; l = 21 m ; H = 8,6 m

Matériaux :
Brique

Éléments concernés :
Murs et couvrement

Surface de référence :
Prisme droit à base trapèzoïdale

Type de plissage :
Mono-directionnel

Particularité :
Épaisseur des murs : 30 cm
Épaisseur de toiture : 15 cm
Surface de plissage courbe

BIBLIOGRAPHIE

GRINO, Sylvia et PERSON, Bruno, 2000. *Eliado Dieste 34° de latitude sud.* In : Le Moniteur architecture. mai 2000. n° 107, p. 70-81.

PEDRESCHI, Remo, 2000. Eladio Dieste. London : T. Telford. *The engineer's contribution to contemporary architecture.*

TORRECILLAS, Antonio Jimenez, 1998. *Eladio Dieste.* Séville : Conseil des ouvrages publics et des transports. Direction Générale de l'Architecture et du Logement de l'Assemblée d'Andalousie.

Église du Christ Obrero

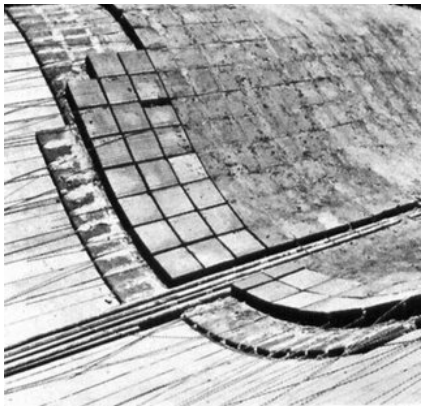
Localisation : **Avda. Monseñor Jose Orzali, Atlántida, Uruguay**

Architectes : **Eladio Dieste**
Ingénieurs : **Eladio Dieste**

Eladio Dieste, architecte, ingénieur et constructeur, est guidé par la « simplicité ». Ce terme exprime, dans ses réalisations, une logique structurale en accord avec une évidence architecturale. Le choix de la brique illustre cette démarche. Ce matériau présent en abondance dans cette région pauvre permet d'obtenir de faibles coûts de construction. En effet, cette technique ne demande pas de technicité particulière de mise en œuvre. Dans un contexte où les procédés numériques de conception n'ont pas encore remplacé les méthodes analytiques, Dieste a su exploiter le potentiel de la brique en effaçant la frontière entre ingénierie et architecture. Il utilise des plis ondulatoires comme un procédé répondant à la fois à une problématique économique (le coût), technique (la simplicité constructive et l'efficience structurale), esthétique (la forme et l'expression) et sociale (l'émotion).

D'un point de vue architectural, nous évoquons quelques exemples attestant de l'expressivité de la forme plissée. L'église est constituée d'un volume unique rythmé par un plissage ondulatoire. Vu de l'extérieur, le bâtiment est orienté. Son plissage débute par un pli ouvert pour accueillir les fidèles et se termine par un pli fermé. Par l'ondulation conique des murs, le bâtiment prend de l'ampleur avec la hauteur, défiant ainsi la gravité. Afin de ne pas interrompre l'effet du plissage, les fenêtres ont été décomposées en petites lucarnes verticales et horizontales regroupées dans la partie la plus ample des plis. Vues de l'intérieur, les ondulations offrent un jeu d'ombre et de lumière laissant le regard se perdre entre les vagues. Les ondulations de chaque mur définissent des pignons trapézoïdaux ; l'inversion du trapèze entre la façade avant et la façade arrière renforce l'effet de profondeur de la nef.

D'un point de vue structural, l'architecte-ingénieur emploie le principe de la « résistance par la forme ». Ainsi, la toiture se compose d'une série de coques identiques à double courbure assurant une résistance au flambement malgré leur faible épaisseur. En effet, le principe de la voûte gaussienne permet d'obtenir une coque conçue avec une seule couche de briques. L'ondulation des coques est reprise par les murs. Leur forme conoïde, basée sur une ligne droite au sol et une sinusoïde dans un plan horizontal à son sommet, génère une inclinaison du mur vers l'intérieur et l'extérieur. Cette géométrie a pour intérêt de réduire la portée là où la courbure de la coque est la plus faible, et inversement. La jonction entre la toiture et le mur est réalisée par le chaînage formant le débord de toit.
L'unité conférée par le plissage atteste d'une économie dans la construction, ainsi que d'une efficience structurale dont la forme qui en découle correspond à celle déterminée par l'expression architecturale. Par ces caractéristiques, cette église est sans nul doute l'un des bâtiments les plus remarquables dans la maîtrise du plissage.


1

2

3

4

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 3. http://c1038.r38.cf3.rackcdn.com/group5/building41935/media/txdg_muros_en_constr_iglesia_de_la_atlantida.jpg [consulté le 15 septembre 2016]
2. http://finspi.com/photo/church-in-atlantida-eladio-dieste-the-uruguayan-2706070 [consulté le 15 septembre 2016]
4. http://www.panoramio.com/photo/93672467 [consulté le 15 septembre 2016]

Le métal

Pavillon du centenaire de l'aluminium

Localisation : **Lille (1957/92), Villepinte (1999/2000), France**

Architectes : **Jean Prouvé**
Ingénieurs : **Jean Prouvé**

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Pavillon d'exposition

Années de la construction :
1954

Dimensions globales :
L = 150 m ; l = 16 m ; H = 7,6 m

Matériaux :
Aluminium

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :

Type de plissage :

Particularité :

Le travail de « mécanicien » du métal trouve, dans le pliage des feuilles de métal, un moyen d'associer continuité de la matière et rigidité de la forme. Mais chez Prouvé, plus qu'un renfort, le pli devient un élément plastique à part entière, une forme d'écriture. Cela se traduit notamment dans son projet du pavillon pour le centenaire de l'aluminium à Paris en 1954 (Image n° 1). L'édifice doit symboliser l'esthétisme et la simplicité technique de la préfabrication légère. Conçu sur un modèle poteaux-poutres, il se compose de 114 fermes identiques espacées chacune de 1,34 mètre.

Chaque poutre dessine une nervure qui rythme l'espace. Elle forme un arc discrétisé en trois parties : ces dernières représentent trois éléments en tôle d'aluminium pliée d'une épaisseur de quatre millimètres, avec un profil de « gouttière » au sens fonctionnel du terme. L'ensemble poteaux-poutres est assemblé à partir de connecteurs coulés en Alpax qui assurent la transmission des efforts (Image n° 3). Sa préfabrication en usine a permis d'assembler le pavillon d'exposition en seulement vingt et un jours (Images n° 2 et n° 4). Certaines des pièces assemblées entre elles, par seulement deux hommes, démontrent l'économie envisageable sur le coût de chantier pour des constructions en alliage léger et affichent les possibilités techniques et plastiques de l'aluminium.

L'article de P. Potié, à propos de la plieuse de J. Prouvé, nous éclaire quant à l'importance du choix de l'outil à façonner un pli et au rôle que la machine va finir par jouer dans la constitution d'un véritable vocabulaire.

L'ingénieur a employé un matériau jusque-là insoupçonné pour ce type d'usage : la feuille d'aluminium ainsi pliée peut offrir, grâce aux assemblages et à la technologie du formage, près d'une quinzaine de mètres de portée. Dans cette réalisation, Jean Prouvé a su associer une technologie industrielle à l'architecture.

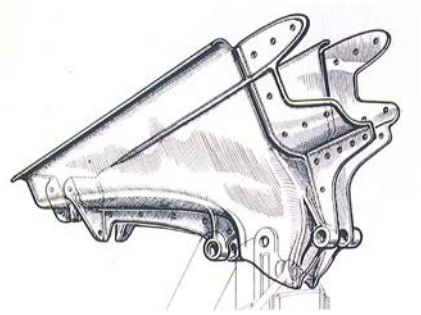
BIBLIOGRAPHIE

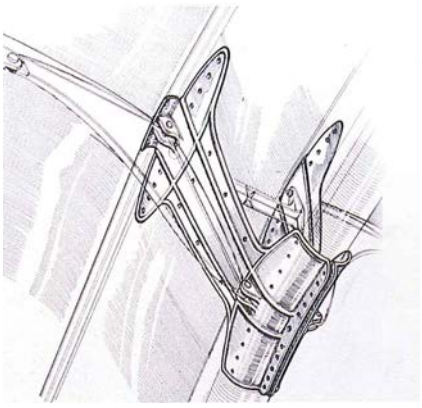
DUMONT D'AYOT, Catherine et REICHLIN, Bruno, 2006. *Jean Prouvé: La poetique de l'objet technique.* 1. ed. Weil am Rhein : Alexander von Vegesack. Vitra Design Museum. ISBN 978-3-931936-55-6.

PROUVÉ, Jean et STOULLIG, Claire, 2012. *Jean Prouvé.* Paris : Nancy : Somogy ; Musée des beaux-arts. ISBN 978-2-7572-0563-1. NA1053.P72 A4 2012.

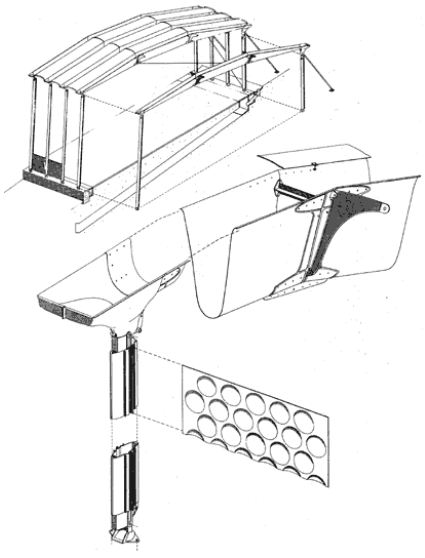
VÉNACQUE, Axel, 2001. *Jean Prouvé - Le pavillon du centenaire de l'aluminium.* Paris : J.-M. Place. ISBN 978-2-85893-603-8.

1

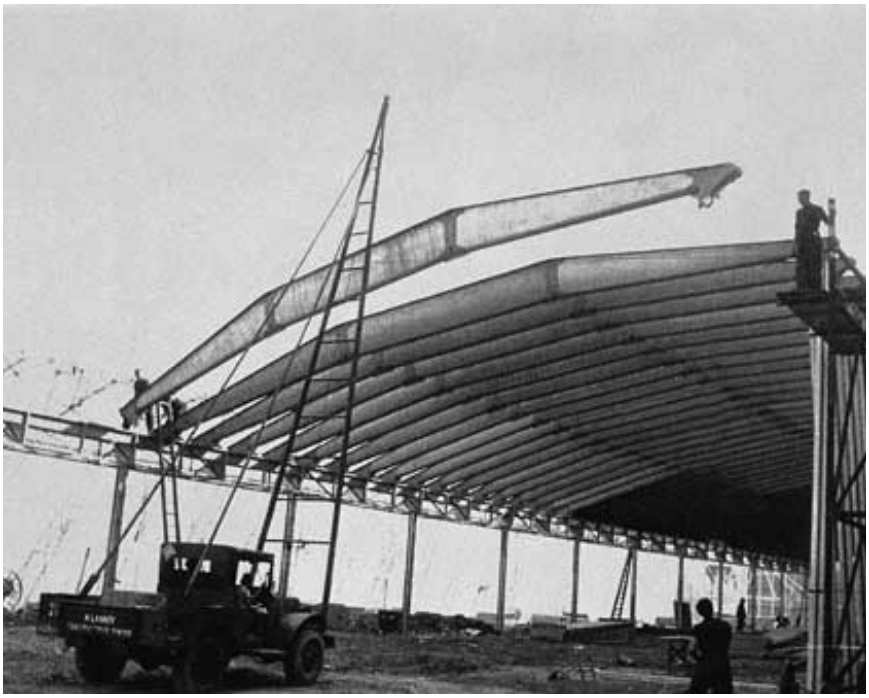




3



2



4

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. PETERS, Nils, 2006. *Jean Prouvé, 1901-1984: la dynamique de la création*. Paris : Taschen, p 69.
2. et 4. http://www.culture.gouv.fr/culture/dp/patrimoine-xx/pages/res_pavillon_alu.html [consulté le 14 mars 2015]
3. VÉNACQUE, Axel, 2001. *Jean Prouvé - Le pavillon du centenaire de l'aluminium*, Paris : J.-M. Place, p 9.

Chapelle des cadets

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment cultuel

Années de la construction :
1959 - 63

Dimensions globales :
L = 75 m ; l = 25 m ; H = 46 m

Matériaux :
Acier, aluminium et verre

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Prisme droit à base triangulaire

Type de plissage :
Multi-directionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

Localisation : **2306 Sijan Dr, U.S. Air Force Academy, CO 80840, États-Unis**

Architectes : **Walter Netsch (Skidmore), Owings and Merrill**

Ingénieurs : **Robert E. McKee, Inc. de Santa Fe, NM**

Par sa hauteur et son architecture volontairement moderniste, la chapelle des Cadets est le point culminant du plan directeur du campus de l'Académie de l'Armée de l'Air des États-Unis. Elle a été conçue pour accueillir les élèves, les professeurs, le personnel de l'école, mais aussi les habitants des environs immédiats dans la pratique de trois religions : catholique, protestante et juive.

Cette chapelle est souvent mentionnée dans les articles sur les structures plissées. Sa géométrie globale évoque sans conteste des plis aiguisés (Image n° 1). Plus en détail, la chapelle est formée par « tessellation » horizontale d'un prisme. Ce dernier peut être décomposé en deux tétraèdres assemblés dos à dos formant un module de base (Image n° 2). Ainsi, la structure est composée d'un treillis métallique en trois dimensions provenant d'une juxtaposition réglée du module. Il en résulte une série de dix-sept portiques pointant vers le ciel. La structure est ensuite recouverte d'une tôle d'aluminium offrant l'illusion d'un plissage rythmé (Image n° 5).

À l'intérieur, la géométrie du pli s'estompe. Elle laisse place à une abstraction des formes. L'ingéniosité de cet ouvrage repose sur la gestion de la lumière. Les modules sont visuellement détachés par la présence d'un bandeau de vitrail (Image n° 4). Cette dématérialisation de l'arête confère un effet de légèreté, comme si les modules étaient en « suspension » dans l'espace. Cette impression de légèreté est également accentuée par le dispositif d'ancrage du bâtiment : par un contact ponctuel entre les modules aux pieds de la structure et les plots de béton, la superstructure semble reposer délicatement sur le sol.

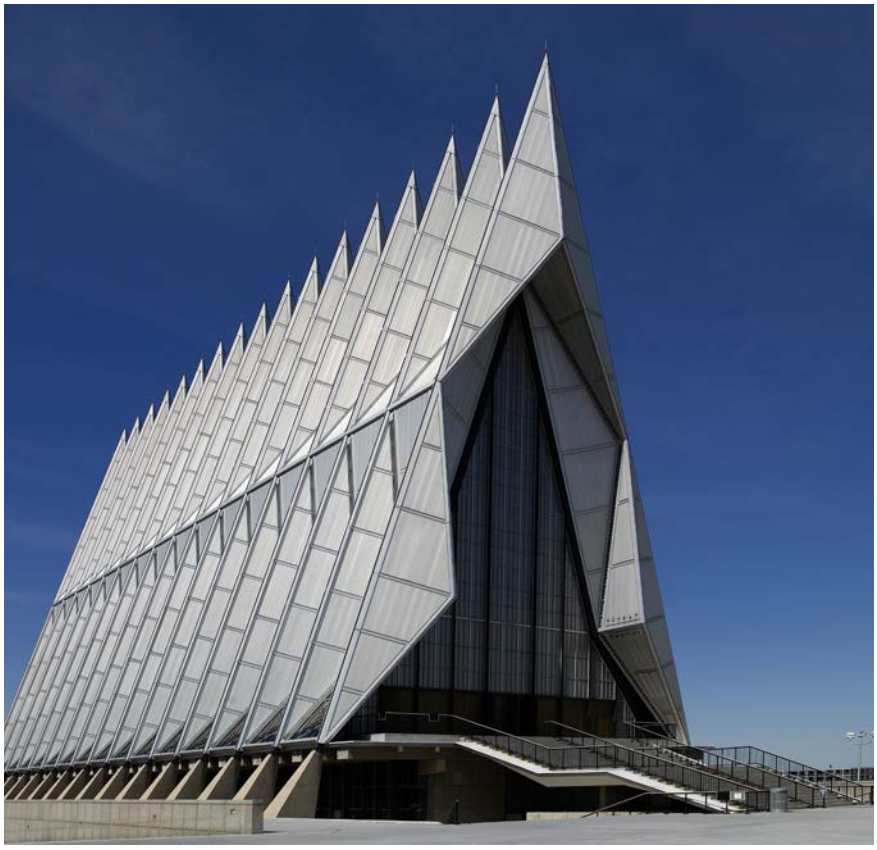
Par le jeu subtil de la mise en œuvre d'un prisme, les architectes ont su donner l'illusion d'un plissage. Ils en récupèrent ainsi une dimension esthétique et symbolique couramment utilisée pour les bâtiments cultuels à cette période.

BIBLIOGRAPHIE

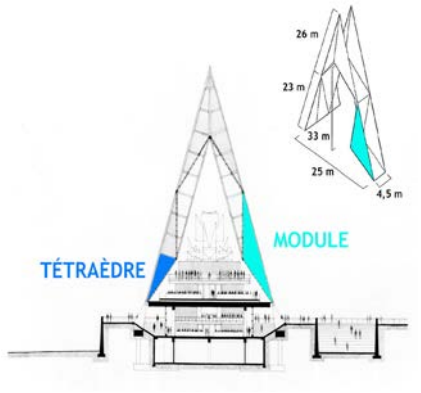
ANON., 1961. *Chapelle de l'académie de l'armée de l'air américaine, Colorado Springs, États-Unis.* In : L'architecture d'aujourd'hui. juin/juillet 1961. n° 96, p. 78-79.

MOUSSAVI, Farshid et LÓPEZ-PÉREZ, Daniel, 2009. *The function of form.* Barcelona : Actar. p387. ISBN 978-84-96954-73-1.

1



2



3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Air_Force_Academy_Cadet_Chapel [consulté le 1er mars 2016]
2. https://airforcechapel.wordpress.com/ [consulté le 18 août 2014]
3. http://p3-aitormartinez.blogspot.fr/2012/02/united-states-air-force-academy-som.html [consulté le 16 juillet 2014]
4. https://www.flickr.com/photos/grantloy/8042564969 [consulté le 16 juillet 2014]
5. https://airforcechapel.wordpress.com/ [consulté le 18 août 2014]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Équipement public

Années de la construction :
1968 -71

Dimensions globales :
L = 78 m ; l = 67,7 m ; H = 13,7 m

Matériaux :
Acier

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Plan

Type de plissage :
Unidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

COLLIN, Jean-Marie, *Piscine couverte olympique*, Archives départementales de Meurthe-et-Moselle, Fonds des architectes, Références 77 J, articles 509 à 515.

Piscine Olympique Alfred Nakache

Localisation : **Avenue Raymond Pinchard, 54000 Nancy, France**

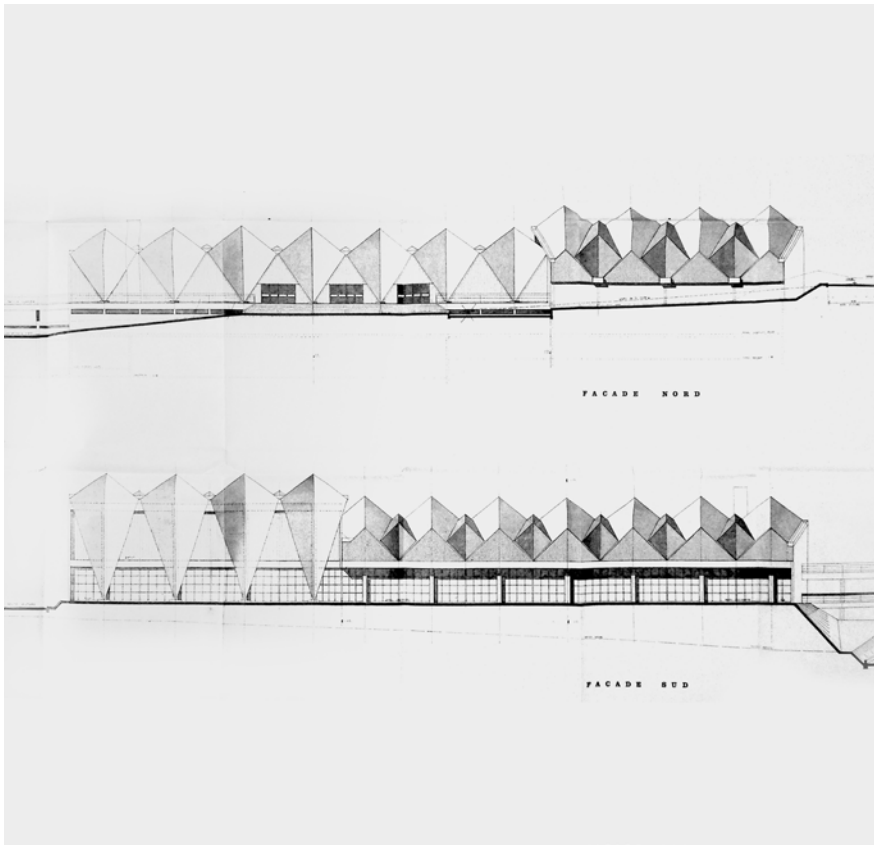
Architectes : **Jean-Marie Collin, Royer**
Ingénieurs : **SOCOTEC, Bureau Sécuritas**

L'originalité de la toiture de cette piscine réside dans l'enchevêtrement alterné de poutres treillis triangulaires. Elles reposent chacune sur trois appuis : si la première se trouve d'un côté sur deux appuis et de l'autre sur un seul appui pendulaire, la suivante est inversée. Ainsi, ce dispositif donne l'impression de deux plissages distincts qui, par leur inclinaison opposée, se fondent l'un dans l'autre (Image n° 2). Cette illusion est renforcée par le traitement des matières qui recouvrent la structure métallique. Le premier plissage de plus grande amplitude est recouvert d'ardoise. Cette texture opaque s'oppose aux surfaces translucides des plaques de polyester renforcé de fibre de verre qui recouvrent le deuxième plissage de plus petite envergure.

Cette alternance de plis opaques puis translucides est également visible depuis l'intérieur du bâtiment (Image n° 4). L'orientation nord-sud des fermes offre un éclairage naturel de chaque face du pli au cours de la journée. De plus, la forme tétraédrique des plis dirige fortement l'apport lumineux dans l'espace des bassins, passant d'une zone sombre à une zone plus lumineuse.

La géométrie du plissage a également un fort impact sur la nature des activités nautiques. Pour celles allouées à la découverte et à l'apprentissage, le plissage est perpendiculaire au bassin. Au contraire, pour le bassin olympique, le plissage est orienté selon la ligne d'eau et prend de l'amplitude comme pour affirmer un esprit de compétition. L'aspect « olympien » du grand bassin se lit également sur la façade sud du bâtiment. La structure treillis vient se replier de manière à reposer délicatement sur le sol. Initialement, l'architecte prévoyait de recouvrir l'ossature métallique afin de créer une « couverture latérale pour les visiteurs et spectateurs » (Image n° 5). Dans ce projet, les caractéristiques du plissage sont utilisées afin de hiérarchiser et de distinguer les différents espaces du programme.

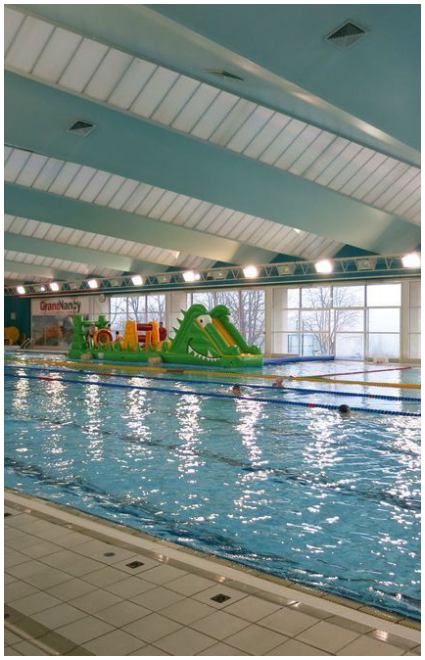
1



2

3

4



5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. Archives départementales de Meurthe-et-Moselle, Fonds des architectes, Références 77 J, article 513. [consulté le 8 Mars 2016]
2. https://www.google.fr/maps/@48.6974614,6.1393716,213a,20y,90h,41.6t/data=!3m1!1e3 [consulté le 6 janvier 2017]
3 et 5. Crédit photo : Julien MEYER
4. http://www.nageurs.com/piscine-nancy-gentilly/seances [consulté le 8 mars2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Salle de concert

Années de la construction :
1999 - 01

Dimensions globales :
D = 60 m ; H = 38 m

Matériaux :
Acier, béton

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Paraboloïde de révolution

Type de plissage :
Unidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage gauche

Le nouveau « Tempodrom »

Localisation : **Möckernstraße 10, 10963 Berlin, Allemagne**

Architectes : **Gerkan, Marg et Partner (GMP)**
Ingénieurs : **Krupp Stahlbau**

Le Tempodrom a été inauguré le 1er mai 1980 à Berlin-Ouest. Il a, par la suite, été contraint à changer plusieurs fois de lieu jusqu'en 1999, date à laquelle l'agence d'architecture GMP remporte le concours et réalise le bâtiment actuel.
Haut-lieu de la culture alternative musicale et théâtrale, cette arène de 3800 places est couverte d'une enveloppe plissée formant un paraboloïde composé de douze plis rayonnants. La forme symbolique de la toiture est une interprétation structurelle de l'expérience de l'espace de la tente, du chapiteau, des rideaux de scène, qui a façonné l'identité du Tempodrom et de ses visiteurs dans le passé.
L'illusion du chapiteau est assurée par une membrane blanche venant recouvrir l'édifice et formant une peau protectrice de la toiture (Image n° 1). Cependant, l'effet spectaculaire de chapiteau réside dans le rendu du plissage. D'un côté, l'épaisseur réelle de l'enveloppe structurale semble inexistante par confrontation avec les dimensions des plis. De l'autre, la mise en œuvre judicieuse des matériaux employés, comme la membrane de la face extérieure qui masque le béton ou le lattage en bois de la face intérieure, renvoient à l'idée de légèreté. À cela se rajoute l'homologie entre les plis courbes et la morphologie des toiles suspendues qui fléchissent sous leur propre poids (Image n° 2).
La forme plissée de la toiture contribue également aux qualités acoustiques de l'édifice. D'un point de vue technique, le chapiteau se compose d'une structure métallique revêtue de plus de trois cents dalles de béton préfabriquées (Images n° 3 et n° 4) assurant la loi « masse-ressort-masse ». En sous-face, des panneaux absorbants sont maintenus par le lattage en bois. Les sons émis sont absorbés entre les multiples faces aux inclinaisons variées du plissage.
Aujourd'hui, le Tempodrom est un repère visuel dans le tissu urbain de la ville de Berlin.

BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2003. *Interior Design, Entertainment venue*. In : The Architectural Review. septembre 2003. Vol. CCXIV, n° 1279, p. 80-83.

ANON., 2003. *Structtura e cultura, Tempodrom and Liquidrom, Berlin* (2001). In : L'Arca Plus. 2003. n° 39, p. 82-87..

VON GERKAN, Meinhard et MARG, Volkwin, 2001. *Neues Tempodrome*. In : gmp Architekten von Gerkan, Marg und Partner [en ligne]. 2001. [Consulté le 6 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.gmp-architekten.de/projekte.html.

1

3

4

2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://www.dailyicon.net/2008/07/light-and-sound-at-liquidrom-therme-berlin/ [consulté le 1er mars 2016]
2. http://www.gmp-architekten.de/projekte/neues-tempodrom.html [consulté le 1er mars 2016]
3. et 4. http://m.blog.daum.net/simcity6000/4497301 [consulté le 1er mars 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Abri de bus

Années de la construction :
2014

Dimensions globales :
L = 4,6 m ; l = 3,4 m ; H = 3,5 m

Matériaux :
Acier

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Prisme

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2015. *Une autre ville est possible. Projet BUS : STOP à Krumbach.* In : EcologiK. septembre 2015. n° 46, p. 98-99.

GRIFFITHS, Alyn, 2014. *World famous architects design bus stops for an Austrian village.* In : Dezeen [en ligne]. 16 mai 2014. [Consulté le 5 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : https://www.dezeen.com/2014/05/16/bus-stop-project-fujimoto-shu-radic-austria/.

Arrêt de Bus « Avril »

Localisation : **Krumbach, Autriche**

Architectes : **Architecten De Vylder Vinck Taillieu**
Ingénieurs : **Gbd Dornbirn**

Afin de stimuler le tourisme local, l'association culturelle du village autrichien de Krumbach a eu l'idée de réaliser sept arrêts de bus « originaux » pour son village. Divers architectes internationaux ont accepté et collaboré avec plus de 200 designers et artisans locaux pour ériger chaque structure distincte.

Nous nous intéressons à l'arrêt de bus dessiné par l'agence belge Architecten De Vylder Vinck Taillieu (DVVT). Ce projet reflète l'environnement dans lequel il prend place : la forme triangulée et l'aspect extérieur blanc de l'émail rappellent les sommets enneigés des Alpes. L'abri évolue en fonction de la luminosité naturelle qui se reflète dans ses parois émaillées. À l'envers, la teinte sombre de l'intérieur et l'espace affiné par l'enveloppe renforcent l'impression d'un lieu protecteur (Image n° 1).

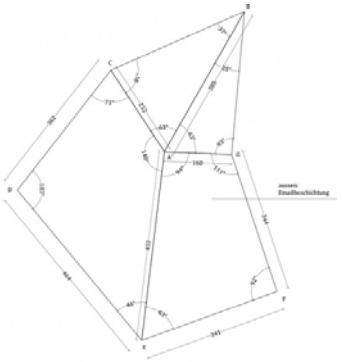
L'effet de rabattement d'un des sommets de l'enveloppe de manière à effleurer ponctuellement le sol, donne toute la force et l'équilibre à ce projet (Images n° 3 et n° 4). À l'instar de l'expérience One Fold (cf. fiche) où l'abri est constitué d'une seule feuille métallique pliée, l'arrêt de bus n'en offre que l'illusion. En effet, la dimension et l'épaisseur de la plaque ne permettaient pas d'envisager un pliage manuel. Ainsi, la morphologie plissée est obtenue par une juxtaposition de plaques découpées et soudées entre elles (Image n° 5).

Pour ce projet, DVVT a déclaré : « Un détail d'assemblage unique décide à la fois des mécanismes et de l'esthétique, ce qui entraîne des processus de construction qui peuvent se matérialiser en de nombreuses formes ambiguës, entre la sculpture et l'habitable » (Griffiths, 2014).

Ce projet se présente comme une interprétation possible du processus de conception par le pli. Abri délibérément minimaliste et objet autonome flirtant avec l'œuvre d'art, il remet en question la légitimité d'une telle forme au détriment des conditions d'usage.

1

2



3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://unusualplaces.org/weird-bus-stops-in-krumbach-austria/ [consulté le 3 mars 2016]
2. ; 3. et 5. http://www.designboom.com/architecture/sou-fujimoto-architects-bus-stop-krumbach-austria-05-19-2014/ [consulté le 3 mars 2016]
4. http://www.citylab.com/design/2014/05/a-tiny-austrian-town-has-coolest-bus-shelters-weve-ever-seen/371078/ [consulté le 28 janvier 2015]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Pavillon d'exposition

Années de la construction :
2014

Dimensions globales :
L = 3,5 m ; l = 1,5 m

Matériaux :
Acier inoxidable

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Plan

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage gauche

One Fold

Localisation : **British Columbia, Vancouver, Canada**

Architectes : **Patkau Architects**

One Fold est une expérience plastique chargée d'explorer le potentiel spatial et structurel d'une feuille d'acier inoxydable pliée. Le but de cette expérience consiste, pour l'agence d'architecture canadienne Patkau Architects, à créer une structure autoportante à partir d'une seule feuille d'acier.

Ce projet trouve son inspiration dans un défi lancé à l'artiste anglais Paul Jackson : faire une sculpture en papier avec un seul pli (Image n° 3). John Paktau a tenté de relever ce défi à l'échelle de l'espace habitable (Image n° 1). Ce changement d'échelle exige un changement de matériau, du papier à l'acier, mais également de technique. Les feuilles d'inox plus grandes et plus épaisses ne se comportent pas comme le papier ; une fois soumises à l'action du pli, ce dernier est quasiment impossible à briser. Paktau a alors inventé une machine pouvant manipuler des feuilles d'acier de plus en plus grandes en combinant le pliage et la flexion en un seul mouvement mécanique (Image n° 2). Par ce processus, les contraintes internes de la matière sont diffusées vers les bords de la feuille de métal.

Cette méthode constructive ne permet d'envisager qu'un abri aux dimensions modestes (Image n° 4). Ce refuge, telle une voûte « brisée », est une structure autoportante réalisée avec un minimum de matière et d'énergie. Il présente donc de nombreux avantages techniques comme une résistance élevée au regard de son poids et une grande facilité de fabrication. L'intérêt de cette expérience est également architectural par l'impression minimaliste de l'objet final, par la grâce et le dynamisme présents dans la juxtaposition de lignes droites et courbes et par les jeux de réflexion de lumière sur les parois d'acier inoxydable qui multiplient les ambiances.

À ce jour, certains problèmes de logistique liés à la grande dimension des feuilles d'acier inoxydable engendrent des difficultés de transport.

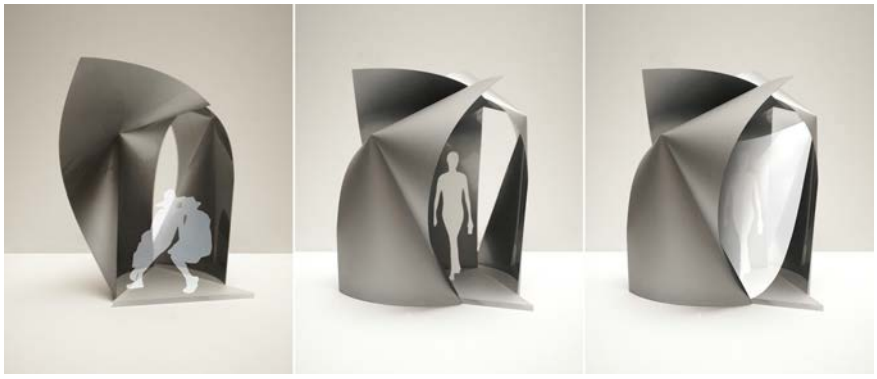
BIBLIOGRAPHIE

CANADIEN ARCHITECT, 2015. *RAIC Awards - Innovation in Architecture.* In : Canadian Architect [en ligne]. Mai 2015. [Consulté le 5 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : https://www.canadianarchitect.com/features/raic-awards-innovation-in-architecture-3/.

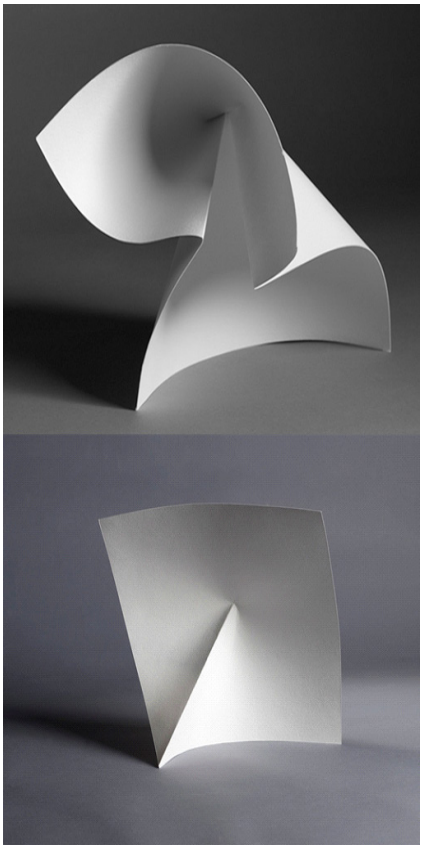
PATKAU, John et PATKAU, Patricia, 2014. *One Fold - Einfache Faltung.* In : Détail. déc 2014. n° 12, p. 1364-1370.

SHAPIRO, Gideon Fink, 2014. *Award: One Fold.* In : Architect [en ligne]. 24 juillet 2014. [Consulté le 5 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.architectmagazine.com/awards/r-d-awards/award-one-fold_o.

Cependant, le potentiel de ce procédé est loin d'être épuisé et les possibilités d'applications continuent d'être explorées. Dans la longue ambition architecturale de réaliser des structures toujours plus résistantes pour un minimum de matière et d'énergie employée, One Fold est une étape importante. Il représente une attention particulière à la matière qui trouve sa beauté dans sa structure et inversement, sa structure dans l'esthétique de ses courbes et contre-courbes. One Fold est, en ce sens, une solution, mais aussi une incitation à repenser notre relation aux matériaux et à leurs applications.

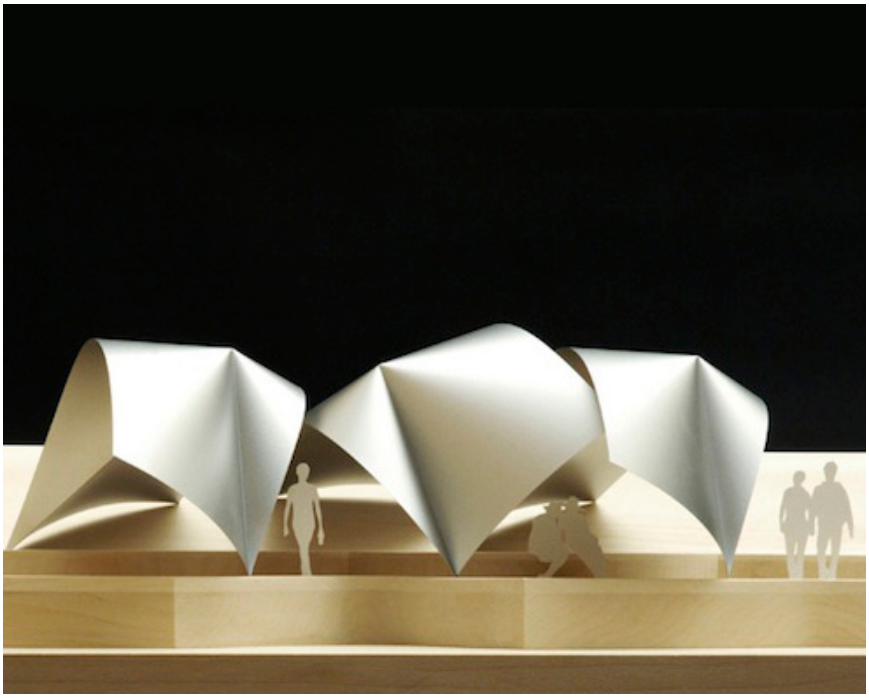


1



3

2



4

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 2. https://www.raic.org/awards/awards-excellence-%E2%80%94-2015-recipient-4 [consulté le 30 janvier 2015]
3. http://www.bapq.net/summer-11/origami-art_paul-jackson.asp [consulté le 30 janvier 2015]
4. http://www.patkau.ca/project/onefold.htm# [consulté le 30 janvier 2015]

Origami Coop

Localisation : **Stroud, Australie**

Architectes : **Chris Mullaney**

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Poulailler

Années de la construction :
2011

Dimensions globales :
L = xx m ; l = xx m ; H = xx m

Matériaux :
Grillage acier

Éléments concernés :
Enveloppe structurale

Surface de référence :
Parallélépipède rectangle

Type de plissage :
Unidirectionnel constant

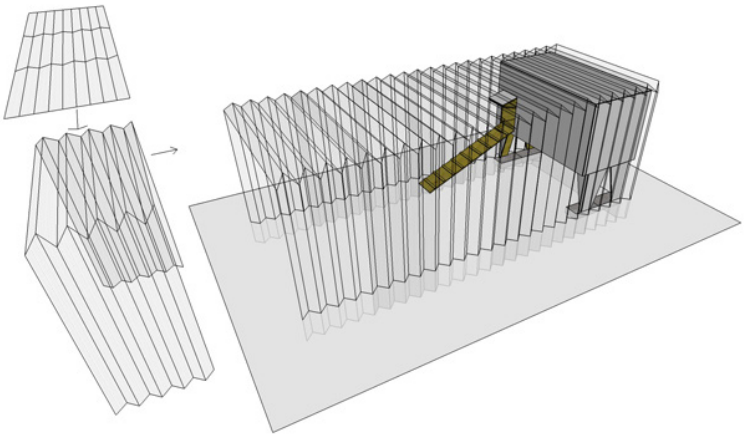
Particularité :
Surface de plissage plane

« L'origami Coop » fait partie de ces expérimentations à petit budget qui, dans leurs ingéniosités, révèlent tout l'intérêt de leur existence. La réalisation de ce poulailler expose les principes mêmes du pli structural tout en y associant une expression architecturale.
La singularité première de ce projet provient de l'absence de cadre structural traditionnellement présent dans ce genre de réalisations, sans pour autant se priver de son matériau emblématique : le grillage. Pour ce faire, une série d'expériences par pliage a été menée avec un maillage en acier du commerce. La conception qui en résulte est une cage en acier galvanisé autoportante composée de neuf portiques juxtaposés. L'intérêt du portique réside dans la possibilité d'étendre le poulailler selon les besoins en conservant le principe constructif.
Par ailleurs, ce plissage apporte un jeu de transparence et de densité lié au treillis métallique (Images n° 3 et n° 5). En fonction du point de vue, les plis apparaissent puis disparaissent successivement offrant un effet de légèreté à cette enveloppe grillagée.
La nature relativement petite du projet offre la possibilité de transposer les effets structuraux du plissage issu de la maquette en papier (Image n° 4) directement au modèle en grillage à l'échelle réelle. Ce rapport d'échelle est également conservé dans le procédé « origamique » qui consiste à réaliser des plis dans une « feuille » de matière continue. Toutefois, la réalisation du pliage de la résille métallique s'est avérée plus difficile que celle du modèle en papier réalisé au 1:10 ; c'est la raison pour laquelle le concepteur a utilisé une matrice en bois pour former les éléments grillagés.
La porte pivotante et le nichoir viennent clôturer chaque côté de ce tunnel grillagé plissé tout en étant totalement désolidarisés de cette structure. Cela met en exergue l'efficacité matérielle et structurale de ce concept.

BIBLIOGRAPHIE

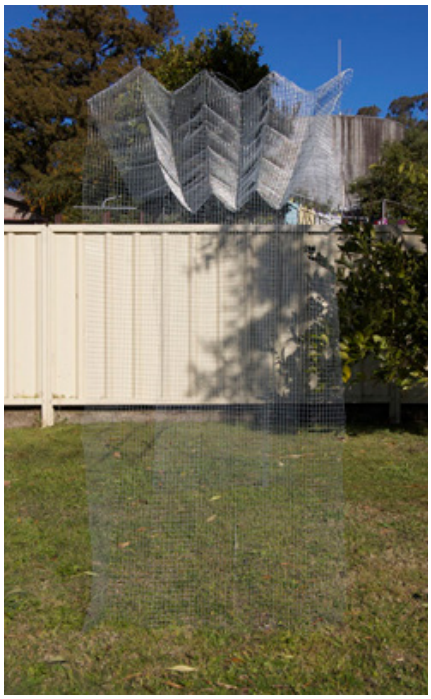
FUROTO, Alison, 2012. *Origami Coop / Chris Mullaney*. In : ArchDaily [en ligne]. 10 mars 2012. [Consulté le 30 décembre 2016]. Disponible à l'adresse : http://www.archdaily.com/215329/origami-coop-chris-mullaney/.

MULLANEY, Chris, 2016. *Origami Coop*. In : CHRIS MULLANEY [en ligne]. 2016. [Consulté le 30 décembre 2016]. Disponible à l'adresse : http://chrismullaney.com.au/portfolio/origami-coop/.

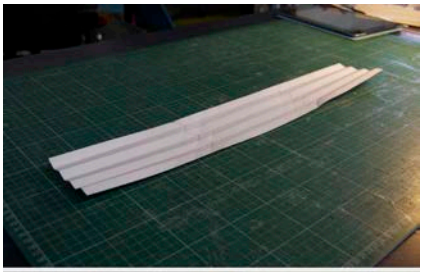


1

2



3



4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://chrismullaney.com.au/architecture/115/ [consulté le 5 février 2016]
2. et 3. http://chrismullaney.com.au/architecture/origami-coop-folding-mould/ [consulté le 5 février 2016]
4. http://chrismullaney.com.au/architecture/origami-coop-test-models/ [consulté le 5 février 2016]
5. http://chrismullaney.com.au/portfolio/origami-coop/ [consulté le 5 février 2016]

Le bois

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment cultuel

Années de la construction :
1959-61

Dimensions globales :
L = 35 m ; l = xx m ; H = 15 m

Matériaux :
Bois

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Prisme droit à base triangulaire

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Structure en contreplaqué

Independent Congregational Church

Localisation : **11370 Old Halls Ferry Rd, Florissant, MO 63033, États-Unis**

Architectes : **Manske & Dieckmann**

Les lignes de toit sont l'un des terrains stylistiques de l'architecture moderne nord-américaine, allant du toit « plat » aux géométries plus poussées comme les coques plissées.
Ce temple protestant rejoint les constructions de l'« A-frame », communément appelé bâtiment en « forme de tente » qui se sont popularisées dans les années 50. L'intérêt de cette géométrie structurale repose sur des coûts de construction très abordables tout en respectant les codes traditionnels de l'architecture religieuse à travers une écriture architecturale moderne.
En effet, la structure de type « A-frame » permet de créer un système de couvrement sans aucun élément structural intermédiaire comme la colonne, la poutre ou l'arc. Ainsi, ce bâtiment offre une grande volumétrie avec une importante hauteur sous plafond propice à un espace de méditation.
Cette toiture plissée est composée de plaques de contreplaqué reliées par des ferrures métalliques (Image n° 1). Son aspect grisé à l'extérieur renvoie à la texture du béton (Image n° 3). Les éléments qui attestent de l'utilisation de panneaux de bois comme les nœuds ou les jointures sont presque considérés comme une empreinte de coffrage (Image n° 5). Cet effet est créé par une membrane caoutchouc qui recouvre la totalité de la toiture.
À l'intérieur, la faible intensité lumineuse qui règne peine à révéler le plissage. Sa mise en valeur est alors réalisée avec l'aide d'éléments en bois massif qui matérialisent les arêtes et les facettes du pli sont orientées par les lignes de jointure des lambris. Contrairement à l'homogénéité de la surface extérieure, le travail de texture de la nef confère une lecture du plissage à une échelle humaine (Image n° 4).
La géométrie du plissage a permis à la fois la réalisation d'une structure légère et économique et la définition d'un espace répondant à la dimension spirituelle de ce type d'ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

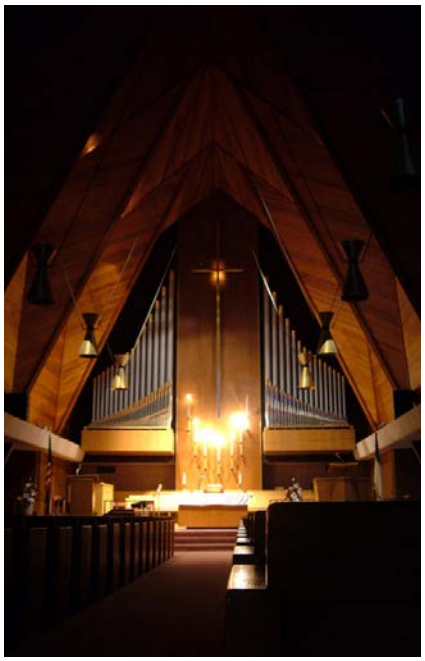
HAMILTON, Esley et MYERS, Catie, 2010. *MID-CENTURY MODERN CHURCH SURVEY, Religious Structures 1940 – 1970 in St. Louis County* [en ligne]. 2010. pp13 [Consulté le 7 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : https://dnr.mo.gov/shpo/survey/SLAS043-R.pdf.

WEISS, Toby, 2009. *Independent Congregational Church*. In : B.E.L.T (The Built Environment in Layman's Terms) [en ligne]. mai 2009. [Consulté le 7 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.beltstl.com/2009/05/north-county-mcm-independent-congregational-church/.

1

2

3



4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://news.stlpublicradio.org/post/reflection-home-and-church-remind-real-architecture-transcends-simple-utility [consulté le 23 mars 2015]
2. et 5. http://www.beltstl.com/2009/05/north-county-mcm-independent-congregational-church/ [consulté le 2 mars 2016]
3. et 4. http://www.builtstlouis.net/mod/mod24.html [consulté le 2 mars 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Salle de répétition

Années de la construction :
2002

Dimensions globales :
L = 16 m ; l = 10 m ; H = 5 m

Matériaux :
Panneaux contrecollés

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Parallélépipède rectangle

Type de plissage :
Unidirectionnel constant

Particularité :
Structure économique
Gestion de l'acoustique

Salle de répétition

Localisation : **Wiesenthalstrasse 4, 86470 Thannhausen, Allemagne**

Architectes : **Régina Schineis**
Ingénieurs : **Ludwig + Weiler Ingenieurgesellschaft Gmbh**

L'Association de musique de Thannhausen et la nouvelle école de musique ont commandé une extension pouvant accueillir un auditorium pour les répétitions. Un budget serré et des exigences acoustiques ont conduit vers une solution où les panneaux contrecollés d'une épaisseur de cent millimètres constituent une enveloppe structurale et présentent les fonctions acoustiques nécessaires. Ainsi, la salle de répétitions présente un plissage à période et amplitude constante. D'un aspect brut à l'intérieur, les panneaux sont recouverts d'une étanchéité et d'un bardage de cuivre sur l'extérieur. L'apport de lumière naturelle s'effectue par le vitrage des deux façades pignons, à l'est et à l'ouest. Afin d'éviter le phénomène de réverbération sur ces grandes surfaces de verre, des lames de bois, disposées horizontalement, permettent de rompre son incident aussi souvent que possible (Image n° 1).

La structure se compose de la répétition d'un « portique » d'une largeur de dix mètres fixé sur une dalle de béton. Le portique est formé par un module de deux panneaux quadrilatéraux assemblés selon la forme « V » qui repose sur deux poteaux de même composition. Ce pli monolithique assure, en ce qui concerne les angles du portique, le contreventement dans son plan médian. Le pli des poteaux reprend, quant à lui, les efforts transversaux (poussée au vent). La cohésion entre ces différents portiques garantit donc l'équilibre du bâtiment (Image n° 2 et n° 3).

La stratégie de préfabrication des modules assure une discrétion de l'assemblage. Vu de l'intérieur de la salle, chaque module présente un pli saillant qui correspond au collage sur coupe d'onglet de deux panneaux (Image n° 5). Cette technique rend invisible toute marque d'assemblage de vis et masque l'épaisseur du panneau. De la même manière, un pli rentrant n'expose pas le chant du panneau. Un assemblage traditionnel par recouvrement peut être utilisé ainsi

BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2003. *Salle de répétition, Thannhausen, Bavière (Allemagne).* In : L'architecture d'aujourd'hui. août 2003. n° 347, p. 88-90.

SCHINEIS, Regina, 2004. *Gefalteter Klangkörper Musikprobensaal Thannhausen.* In : Öffentlich genutzte Bauten « Weg und Raum ». Congress Centrum Garmisch-Partenkirchen : s.n. au 3 décembre 2004. p. 10.

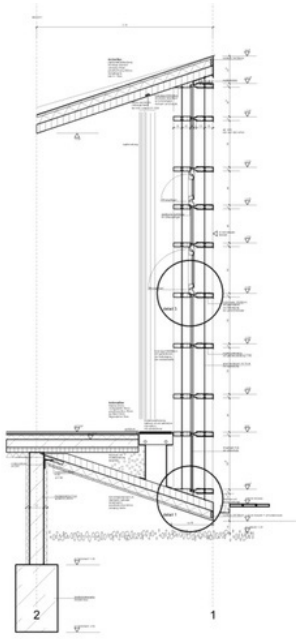
que l'emploi de vis : ainsi, tous les plis rentrants peuvent être fixés mécaniquement sur site. Ils correspondent aux plis formés par la connexion des modules.

L'architecte a su utiliser une technique qui tisse des relations discrètes entre le contenant et son contenu, une manière de plisser qui se justifie par son usage.

1

2

3



4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 5. http://hiendlschineis.com/projekte/spielen_lernen/musiksaal-_thannhausen/ [consulté le 2 mars 2016]
2. ; 3. et 4. http://divisare.com/projects/17636-Regina-Schineis-Architektin-Probensaal-Und-Musikschule-Thannhausen [consulté le 12 août 2013]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment cultuel

Années de la construction :
2008

Dimensions globales :
L = xx m ; l = xx m ; H = xx m

Matériaux :
Panneau contrecollé

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Polyèdre

Type de plissage :
Unidirectionnel variable

Particularité :
Faible coût de production. Rapidité de fabrication et de montage.

BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2010. *Structure plissée pour lieu de culte temporaire.* In : Séquences Bois. janvier 2010. n° 78, p. 21-23.

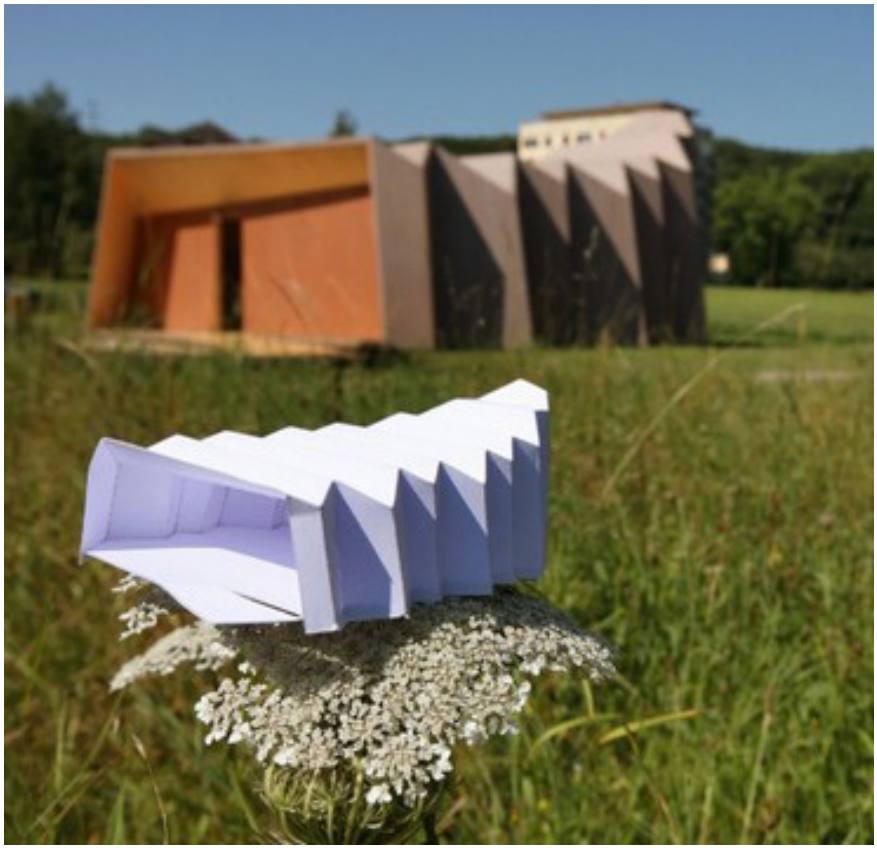
LOCALARCHITECTURE et MONDADA, Danilo, 2010. *A temporary Chapel for the Deaconesses of St-Loup-Pompaples,Vaud, Switzerland, 2007-2008.* In : A+U. 2010. n° 479, p. 56-59.

Chapelle « provisoire » de St-Loup

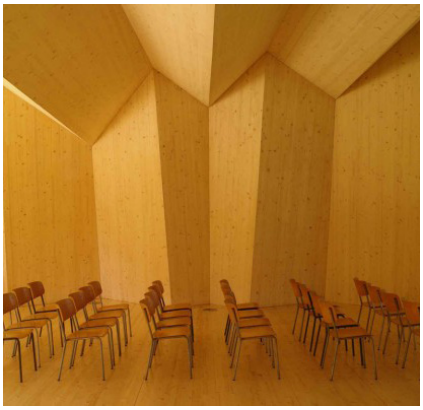
Localisation : **Communauté des Diaconesses, St Loup, Pompaples, Suisse**

Architectes : **Localarchitecture / Danilo Mondada**
Ingénieurs : **Laboratoire IBois - EPFL**

La chapelle St-Loup de Pompaples, conçue en 2008 par le groupement d'architectes Localarchitecture et Danilo Mondada est un des exemples emblématiques des structures plissées en panneaux de bois massif (Image n° 1).
Aux premiers abords, cette chapelle protestante suggère un plissage aléatoire. Elle fait pourtant appel à un « pattern » particulièrement judicieux. Une trame séquentielle est instaurée : vues de l'extérieur, toutes les arêtes des sommets des parois sont parallèles entre elles alors que les arêtes des vallées sont obliques. L'ensemble des plis est modulé par des amplitudes différentes permettant d'apporter une pente suffisante pour l'évacuation des eaux de pluie et d'accroître le confort acoustique et lumineux (Images n° 3 et n° 4).
L'analyse de l'enveloppe plissée révèle plusieurs couches, associées à des fonctions différentes. La première forme la structure porteuse. Elle est composée de panneaux de bois contrecollés de quelques dizaines de millimètres d'épaisseur. Les panneaux structuraux taillés numériquement sont ensuite assemblés au moyen de connecteurs métalliques cloués sous l'étanchéité. Cette dernière est constituée par un film bitumeux qui recouvre la totalité de l'enveloppe. Enfin, des panneaux « à pourrir » viennent protéger l'étanchéité. Ils sont fixés à joints ouverts sur des lambourdes afin de garantir l'écoulement des eaux de pluie.
Les concepteurs ont su mettre au point, au travers du plissage, une structure économique par son coût de production. L'emploi de logiciels a permis la conception, la réalisation des éléments préfabriqués et le montage de la chapelle en un temps record (Image n° 2).
Synthétisant à la fois des caractéristiques structurales et architecturales comme les contraintes spatiales, acoustiques et d'éclairement, cette forme plissée se présente comme une évidence morphologique.



1



3

4

2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://www.techno-science.net/?onglet=news&news=5622 [consulté le 12 août 2013]
2. http://www.detail.de/inspiration/kapelle-st-loup-in-pompaples-100366.html [consulté le 22 mai 2014]
3. et 4. http://www.archdaily.com/9201/temporary-chapel-for-the-deaconesses-of-st-loup-localarchitecture [consulté le 22 mai 2014]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Théâtre temporaire

Années de la construction :
2009

Dimensions globales :
L ≈ 15 m ; l ≈ 10 m ; H ≈ 5 m

Matériaux :
Panneau contre-plaqué, profils acier

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Pyramide tronquée

Type de plissage :
Unidirectionnel constant

Particularité :
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

ATZORI, Marco, 2010. *Urban Amenity*. In : C3. février 2010. n° 306, p. 114-153.

Aqua Metropolis pavillon

Localisation : **Nakanoshima Park, Osaka, Japon**

Architectes : **Ryuichi Ashizawa**
Ingénieurs :

Le théâtre en bois plissé est l'une des sept structures temporaires développées par Ryuichi Ashizawa dans le cadre de l'« Aqua Metropolis Osaka 2009 ». Par son plissage en « zigzag », ce pavillon se déploie sur la rive du Yodo-gawa. Du côté de la rivière, le pli se met à rayonner de manière à créer un large porte-à-faux au-dessus de l'eau (Image n° 1).

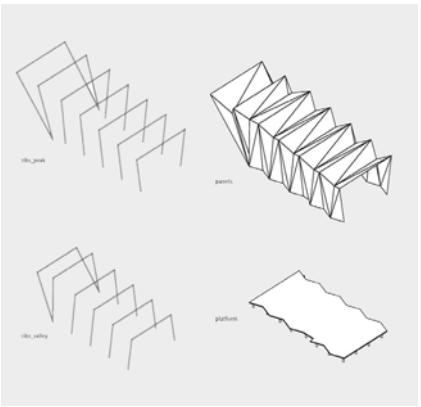
Même si, à première vue, ce pavillon s'inspire de l'origami, il ne reproduit pas les règles élémentaires de cet art ancestral comme la possibilité de développer le plissage sans le fracturer. Afin d'atteindre l'intérêt structural qu'offre le plissage, l'architecte a décomposé son pavillon en deux systèmes simples : une ossature primaire et une secondaire (Image n° 2). La première est un squelette formé par des portiques définissant, d'une part, les arêtes de sommets du plissage, et d'autre part, celles qui donnent naissance aux vallées. À partir de cet état, un remplissage par triangulation (afin d'obtenir des surfaces planes) s'opère entre les différents portiques. Cette ossature secondaire composée de panneaux contreplaqués vient contreventer les portiques et assure leur stabilité. Les panneaux recouvrent chaque côté de l'ossature, dans l'intention de garder une continuité surfacique à l'intérieur comme à l'extérieur.

La géométrie du plissage a permis d'obtenir une structure stable par la combinaison tridimensionnelle des plis. Toutefois, elle n'est pas sans conséquence sur l'écriture architecturale du théâtre. Il en résulte un espace rythmé où les plis convergent vers des nœuds qui focalisent le regard (Image n° 5). L'inclinaison alternée de chaque « strate » de pli accentue la perspective et l'effet de profondeur (Image n° 3).

Cet espace a été « mis en scène » par le plissage pour capter et diriger progressivement notre regard vers le spectacle de la rivière.

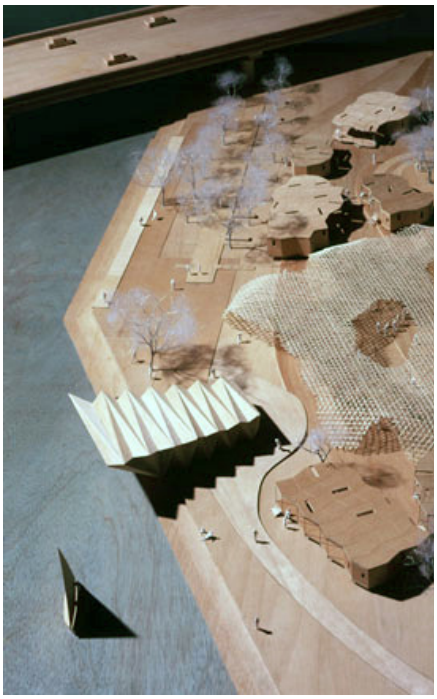
1

2



3

4



5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. ; 3. et 5. http://www.designboom.com/architecture/ryuichi-ashizawa-architects-bamboo-forest-and-huts-with-water/ [consulté le 12 août 2013]

2. et 4. http://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/hong_kong/hk_biennale_pavilion_h220210_2.jpg [consulté le 28 janvier 2015]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Piscine

Années de la construction :
2009-10

Dimensions globales :
L = 20,5 m ; l = 14,5 m ; H = 8 m

Matériaux :
Bois massif

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Parallélépipède rectangle

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

Alfriston School Swimming-pool

Localisation : **Penn Rd, Penn, Beaconsfield HP9 2TS, Royaume-Uni**

Architectes : **Duggan Morris Architects**
Ingénieurs : **Elliot Wood Partnership**

La piscine fait partie d'un programme d'extension des installations sportives de l'école des filles d'Alfriston. Sa volumétrie a été traitée comme un bloc sculptural destiné à être une expression contemporaine de l'architecture vernaculaire locale. En effet, les surfaces inclinées de manière alternée génèrent une morphologie de plissage adaptée aux géométries globales du site (Image n° 4) : le bâtiment existant présente une juxtaposition de pans de toiture inclinée qui forme une illusion de plissage. Le couvrement de la piscine se présente comme une série de trois pignons identiques brisés dans leur axe vertical comme s'ils étaient issus d'un rabattement des plis de la toiture. Afin d'éviter une amplitude trop importante du plissage des façades de pignons et d'assurer un renvoi vertical du plissage en correspondance avec le profil du socle en béton, une nouvelle ligne de brisis est introduite. Par conséquent, les pignons sont fracturés en plans triangulaires.

D'un point de vue constructif, la toiture a été pensée comme une coque reposant sur un ensemble de petits potelets métalliques insérés dans le soubassement en béton. Cette technique a permis aux architectes de désolidariser visuellement la toiture plissée de son soutènement, lui conférant ainsi un effet de légèreté (Image n° 1).

À l'intérieur, une structure nervurée en bois est révélée. Elle fait état d'un assemblage de panneaux à ossature bois composé de poutres, de solives et d'un panneau contrecollé assurant le contreventement. L'utilisation de la technologie CNC a permis la sophistication des éléments préfabriqués afin de dissimuler au maximum les assemblages (Image n° 2). La dimension des éléments a été définie en fonction des possibilités de transport et de levage.

Cette forme sculpturale sert également de déflecteur acoustique empêchant une forte réverbération du son à tel point qu'aucun amortissement sonore supplémentaire n'est nécessaire.

BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2014. *Duggan Morris design swimming pool with angular wooden roof.* In : Dezeen [en ligne]. 27 octobre 2014. [Consulté le 29 décembre 2016]. Disponible à l'adresse : https://www.dezeen.com/2014/10/27/alfriston-school-swimming-pool-duggan-morris-architects/.

ANON., 2016. *Origami Flottant, Beaconsfield.* In : SEQUENCE BOIS. septembre 2016. Vol. Assemblages, n° 111, p. 8-10.

WOODMAN, Ellis, 2014. *Origami Lesson.* In : The Architectural Review. septembre 2014. n° 1411, p. 56-64.

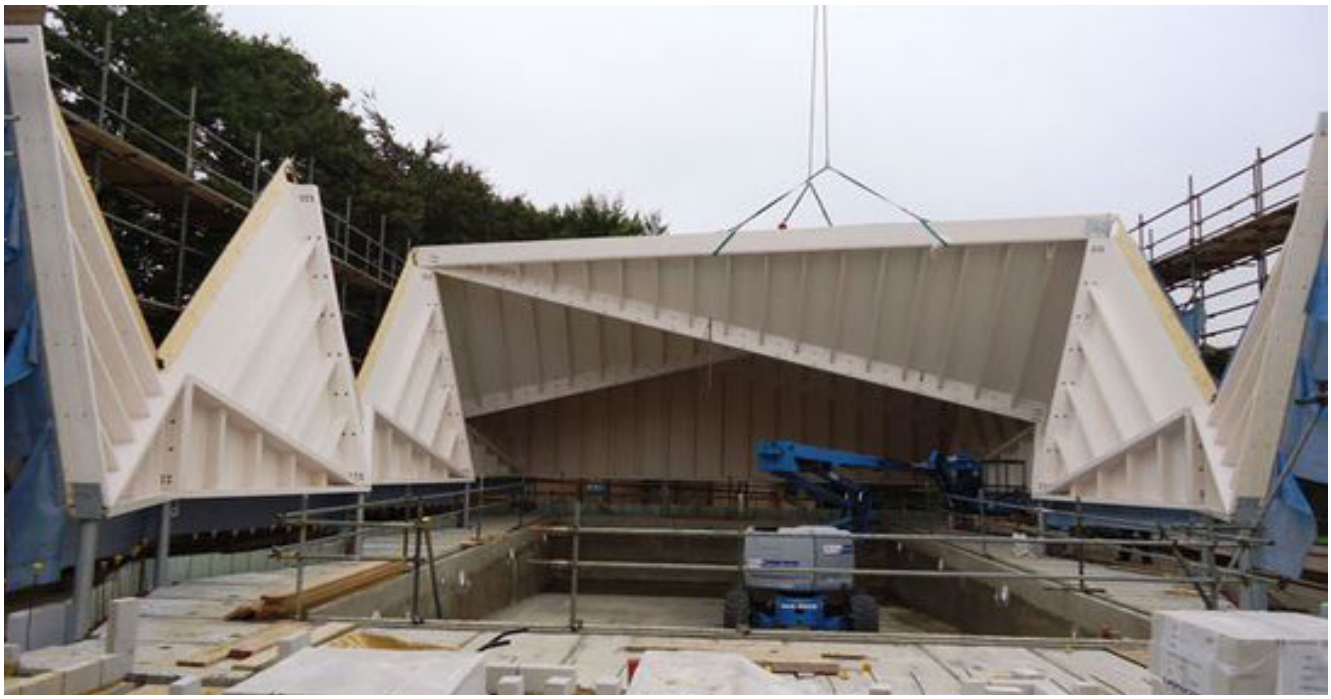
L'unité intérieure de la structure est rendue par une lasure blanche fournissant une surface chromatiquement neutre. Cette dernière augmente également l'effet du jeu d'ombre et de lumière sur le plissage.

Cette réalisation offre un lien fort entre la véracité d'un système constructif et la qualité de l'espace architectural qu'il produit. Par la sobriété du geste, l'architecte a livré un bâtiment qui combine une complexité de la forme avec une simplicité apparente de l'exécution ; l'effet y est des plus captivants.

3

1

4


2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. https://www.dezeen.com/2014/10/27/alfriston-school-swimming-pool-duggan-morris-architects/ [consulté le 3 février 2016]
2. http://www.elliottwood.co.uk/project/alfriston-school-beaconsfield-hp9/ [consulté le 29 Décembre 2016]
3. et 4. http://www.dugganmorrisarchitects.com/projects/src/year/2015/title/alfriston-school-buckinghamshire [consulté le 3 février 2015]

Les polymères

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment industriel

Années de la construction :
1966

Dimensions globales :
L = 24 m ; l = 10 m ; H = 5 m

Matériaux :
Résine polyster

Éléments concernés :
Couvrement

Surface de référence :
Demi-cylindre

Type de plissage :
Multidirectionnel

Particularité :
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

DINI, Massimo et PIANO, Renzo, 1983. *Renzo Piano: projets et architectures 1964-1983*. Paris : Electa Moniteur. Architecture monographies, pp 54-55.

ZABEL, Joshua, 2012. *Renzo Piano's 1966 Sulfur Extraction Facility*. In : Composites and Architecture [en ligne]. Mai 2012. [Consulté le 4 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://compositesandarchitecture.com/?p=100.

Structure mobile pour l'extraction et le traitement du soufre

Localisation : **Pomezia, Italie**

Architectes : **Agence Piano**
Ingénieurs : **Agence Piano**

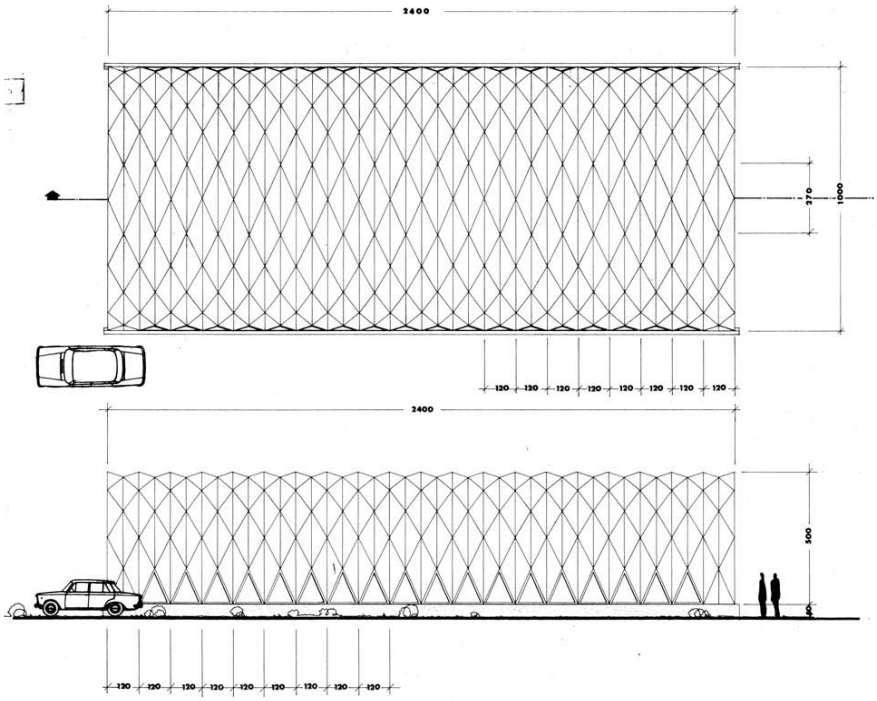
Dans ses travaux, Renzo Piano revendique une position d'architecte-constructeur. Il affirme que la pratique du projet est en lien direct avec l'art de la construction : « Il n'est plus possible de réduire l'aspect structurel, constructif, technologique, au rôle purement instrumental, dans la mesure où tous ces aspects interviennent dans tout le processus de conception et de construction suffisamment articulé, pour préciser et modifier les prémisses même du projet. » (Dini, Piano, 1983, p. 16).

Dans la structure pour l'extraction du soufre, tout comme dans celle de l'usine pour le traitement du bois réalisé à Gênes un an plus tôt, Piano a modelé un langage architectural propre aux potentialités physiques et mécaniques du matériau employé. L'utilisation du polyester translucide renforcé par des fibres a permis de répondre aux contraintes principales du projet qui prévoyait un espace lumineux délimité par une structure mobile et résistante à la corrosion due à l'extraction de soufre.

Cette structure mobile se compose de caissons rhomboïdaux assemblés assurant à la fois les fonctions d'enveloppe et de structure autoportante (Image n° 2). Leur association génère une voûte plissée révélée par des lignes de force : les lignes verticales proviennent d'un pli marqué au sein de l'élément, alors que les lignes diagonales sont matérialisées par leurs jonctions. Vus de l'intérieur, les bords des caissons fonctionnent comme un réseau de nervures qui forme une résille apparentée aux charpentes mises au point par l'architecte allemand Friedrich Zollinger.

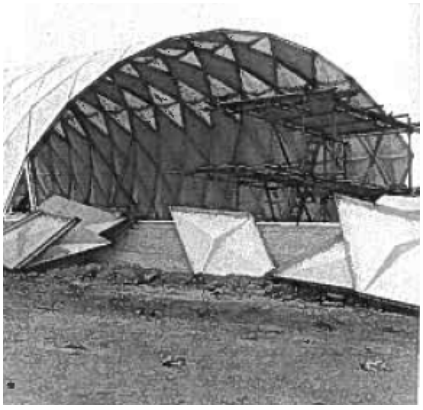
La mobilité de la structure est assurée par le démontage des caissons d'un côté de la voûte pour les réassembler de l'autre coté en suivant le tracé des fondations en béton (Image n° 4). Cet exercice est facilité par la légèreté des éléments ne pesant qu'une quinzaine de kilos.

Dans ce projet, le plissage est le résultat d'une recherche architecturale menée conjointement avec le développement d'un procédé constructif, qui tend à effacer la limite qui sépare ces deux domaines.



1

3



4

2

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. ; 2. ; 3. et 4. http://compositesandarchitecture.com/?p=100 [consulté le 18 janvier 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Abri temporaire

Années de la construction :
1967

Dimensions globales :
L = 6,4 m ; l = 5,2 m ; H = 3 m

Matériaux :
Kraft et mousse polyurethane

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Demi-ellipsoïde tronqué

Type de plissage :
Unidirectionnel constant

Particularité :
Épaisseur 10mm
Surface de plissage plane

Plydome

Localisation : **Harney Lane Flash Peak camp. Lodi, Californie**

Architectes : **Sanford (Sandy) Hirshen, Sim Van der Ryn et Herbert Yates**

Sandy Hirshen est un architecte dont les préoccupations sociales définissent la ligne de conduite. Engagé auprès des groupes de pauvres et vivant en marge de la société, son travail fait preuve d'une grande sensibilité à l'égard des gens dans le besoin. Il prône l'architecture comme une « idée culturelle puissante » susceptible de générer une société meilleure.
Sim Van der Ryn est un défenseur de l'architecture dite « Natural Design » qui prend en compte la complexité du processus lié au vivant, désireux de renouer un lien entre l'homme et la nature. Il dépeint l'architecture monumentale comme le symbole du « Progrès technique » vide de toute substance, de toute richesse.
En 1965, leur partenariat a permis de répondre à la demande de l'« Office of Economic Opportunity » visant à créer des camps pour les travailleurs agricoles immigrés de Californie. Le projet Flash Peak Camps dénombre trente-trois camps entre 1965 et 1974. Le cahier des charges prévoyait un abri pour les familles nombreuses, démontable à chaque fin de saison, résistant à la chaleur intense et aux vents violents de cette région pour une durée de cinq années maximum.
Le premier camp, à Linden, a connu un succès limité avec son implantation de tentes. En 1967 à Indio, la réponse de Hirshen et Van der Ryn associés à Herbert Yates fut une structure plissée. À partir d'un tracé traditionnel de pliage issu de l'origami, ces concepteurs ont su transformer une « feuille de papier » bidimensionnelle en un abri tridimensionnel où la géométrie met en corrélation structure et architecture. Les « plydomes » font partie des expérimentations pionnières dont les détails sont issus directement d'une mise à l'échelle du processus des modèles d'étude en papier.

BIBLIOGRAPHIE

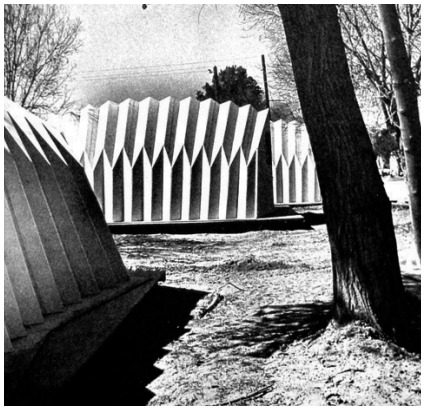
HIRSHEN, Sandy, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA et SCHOOL OF ARCHITECTURE, 2003. *Toward an architecture of conscience*. Canada : School of Architecture, University of British Columbia, pp 13-15.

VAN DER RYN, Sim, 1975. *L'avènement du Natural Design*. In : L'architecture d'aujourd'hui. Mai-Juin 1975. n° 179, p. 28-34.

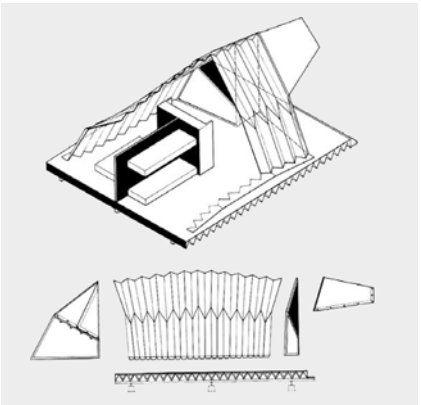
Herbert Yates a conçu une structure légère, étanche, isolée et stable à base de panneaux sandwichs composés d'un papier kraft enserrant un noyau de polyuréthane rigide d'une dizaine de millimètres d'épaisseur et revêtus d'un film de polyéthylène sur la face externe. Le pli est marqué dans l'épaisseur du panneau et la souplesse de la membrane plastique assure la fonction de charnière. Le tracé de pliage permet un ploiement/déploiement des structures, indispensable pour respecter les contraintes de transport : l'effet accordéon du plissage autorise une « mise à plat » compacte de l'enveloppe.

La structure se compose de deux demi-coques rattachées à la hauteur de l'arête sommitale et est ancrée sur un plancher préfabriqué en panneau de particules, lui-même lesté au centre par un « bloc-mobilier » de première nécessité (Image n° 2).

Par sa stabilité (une fois déployé) et sa facilité de transport (une fois replié), le plydome du camp Flash Peak à Indio est devenu un modèle évolutif pour les trente et un camps supplémentaires qui ont vu le jour en Californie.



1



2

3

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. http://www.graphics.com/article/art-folding [consulté le 23 février 2016]
2. et 3. https://duaneelverum.files.wordpress.com/2013/10/the-work-of-sandy-hirshen-ubc-monograph-4-web2.pdf [consulté le 9 mars 2016]

Cardborigami

Localisation : **Skid Row, Los Angeles, Californie, États-Unis**

Architectes : **Tina Hovspian**

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Abri temporaire

Années de la construction :
2007

Dimensions globales :
Variables

Matériaux :
Carton

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Demi-cylindre

Type de plissage :
Multidirectionnel constant

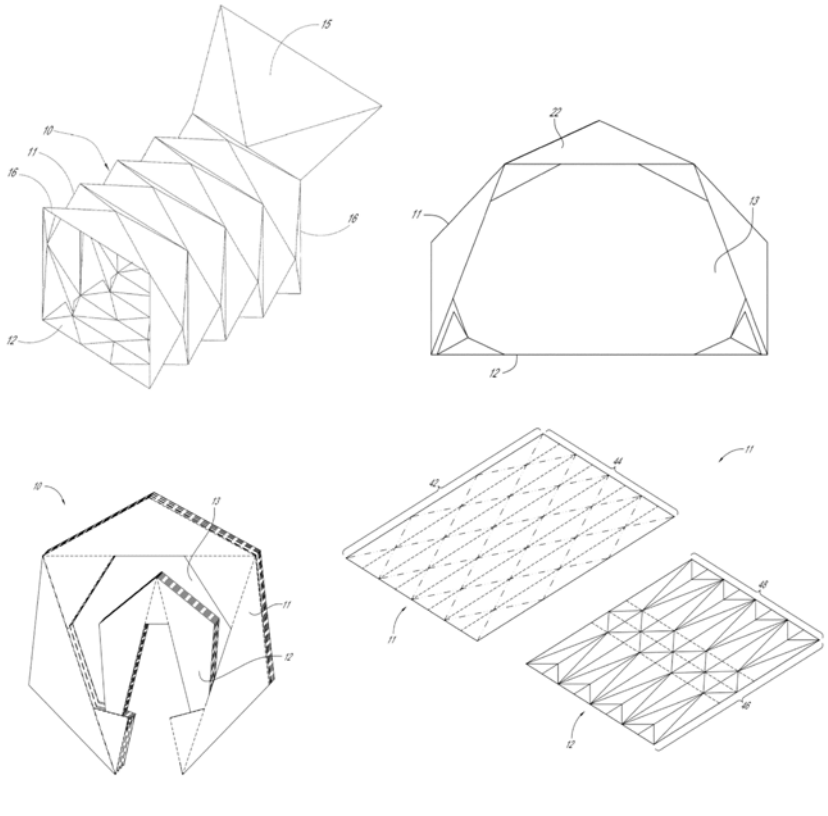
Particularité :

Imaginé par l'étudiante en architecture Tina Hovsepian, le « Cardborigami » est un abri d'urgence pour les nécessiteux. Inspiré directement de l'origami, ce logement de fortune, à base de carton, offre des caractéristiques intéressantes : une structure pliable et facilement transportable, un montage extrêmement rapide et une stabilité suffisante une fois déployé (Image n ° 5). Après plusieurs itérations expérimentales, elle choisit pour matériau le carton recyclé parce qu'il est bon marché, léger, durable et a des propriétés structurales. Pour faire face aux exigences de l'environnement extérieur, l'enveloppe du Cardborigami a été pensée de manière à être étanche à l'eau et résistante au feu. Après le traitement hydrofuge et ignifuge, le tracé du plissage est marqué mécaniquement sur les feuilles de carton pour assurer la construction uniforme qui aidera dans le processus de son déploiement (Image n° 1).
La solidité du pli « charnière » est assurée par la toile imperméable (en blanc sur les photos). Cette construction est autostable, mais ne supporte pas de lourdes charges (Chute d'objet, aléas climatiques). Par ailleurs, l'abri fait preuve d'ingéniosité en intégrant le « plancher » dans la structure. Il permet, d'une part, de maintenir la voûte plissée (agit comme un tirant) et d'autre part, d'assurer l'ancrage au sol par le lest effectif d'une personne ou d'objets à l'intérieur de l'abri. Garder l'espace vide pose donc un problème de taille. Aujourd'hui, plusieurs modèles ont vu le jour : de l'abri individuel au format familial plus grand (Image n° 2). La technique de plissage de l'origami montre bien une certaine aisance à passer à différentes échelles. Mais son processus de création reste encore délicat. Après fabrication des structures, des organismes vont sensibiliser les sans-abri au pliage et à l'utilisation de leur propre habitat.

BIBLIOGRAPHIE

GARCIA, Eduardo, 2014. *Cardborigami: The Shelter That Restores Pride and Dignity*. In : Science of the Time [en ligne]. 11 janvier 2014. [Consulté le 4 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://scienceofthetime.com/2014/01/11/cardborigami-the-shelter-that-restores-pride-and-dignity/.

MEINHOLD, Bridgette, 2010. *Cardborigami Unfolds Into a Portable Housing Shelter*. In : Inhabitat [en ligne]. septembre 2010. [Consulté le 4 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://inhabitat.com/cardborigami-unfolds-into-a-portable-housing-shelter/.



1

2

3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. HOVSEPIAN, Tina, 2012. *Portable shelter structure and manufacturing proces*, Brevet US8820005 B2, p. 2-17.
2. ; 3. ; 4. et 5. http://inhabitat.com/cardborigami-unfolds-into-a-portable-housing-shelter/ [consulté le 2 novembre 2016]

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Abri temporaire

Années de la construction :
2010

Dimensions globales :
L = 4,9 m ; l = 2,4 m ; H = 2,6 m

Matériaux :
Panneau de polypropylène

Éléments concernés :
Enveloppe

Surface de référence :
Parallélépipède rectangle

Type de plissage :
Unidirectionnel constant

Particularité :
Poids total = 90 kg
Surface de plissage plane

BIBLIOGRAPHIE

PENNER, David et WIEBE, Chris, 2013. « *Corogami Hut* » *case study*. In : Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges. S.l. : Cruz, Taylor & Francis Group. 2013. p. 1374-1380.

Corogami folding Hut

Localisation : **Winnipeg, Manitoba, Canada**

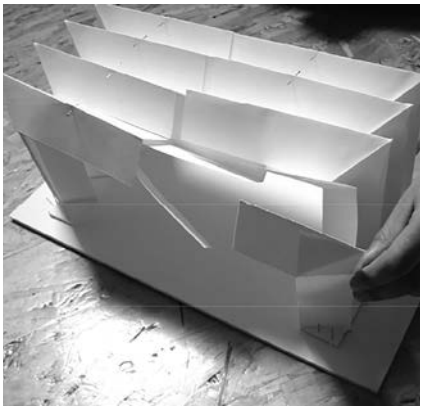
Architectes : **David Penner Architect**
Ingénieurs : **Wolfrom Engineering**

De la conception au montage, en passant par la fabrication, l'architecte David Penner a recherché dans son projet « Corogami Hut » l'efficacité et l'économie de la matière en réduisant au maximum le nombre d'éléments constructifs nécessaires à la réalisation de l'abri pour patineurs. Son approche repose sur la manipulation d'un matériau unique — la feuille de coroplaste® ou polypropylène extrudé — selon des techniques de pliage issues de l'origami. Le dimensionnement des plis provient d'une méthode empirique qui consiste à modéliser et tester différentes géométries du plissage avec des feuilles de papier (Image n° 2). L'analogie entre le papier et le coroplaste est remarquable. Il a été établi, lors des recherches, que le comportement structural et les performances physiques à l'échelle du prototype sont similaires à ceux du modèle en papier.

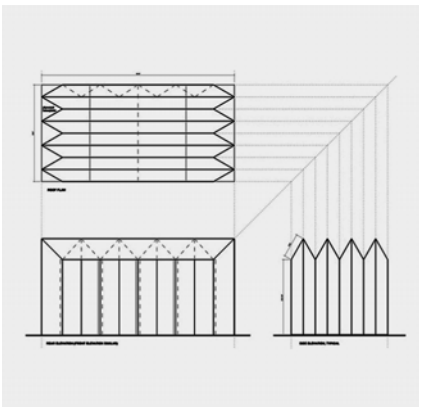
Cette stratégie permet de produire rapidement et à faible coût une enveloppe structurale résistante et légère. Le panneau extrudé (L = 2440 mm ; l = 1220 mm ; e = 4 mm ; p = 2,23 kg) constitue le module de référence. Une quarantaine de panneaux prédécoupés ont été utiles pour l'exécution de l'abri. Les assemblages ont été réalisés au moyen de bandes adhésives et d'attaches parisiennes pour les parties démontables. La liaison au sol a été créée par des lisses basses en contreplaqué mouillées avec de l'eau afin d'assurer leur cohésion au contact de la glace.

Ce projet exalte les capacités du matériau mis en œuvre. La prédisposition au mouvement de flexion répétitif du polypropylène garantit la fonction de charnière au niveau des plis. La légèreté des panneaux extrudés facilite le déploiement puis le rabattement de cet abri saisonnier. Une fois la structure repliée, son épaisseur ne dépasse pas les dix centimètres (Image n° 1). Toutefois, au cours de l'installation, les assemblages ont subi quelques dommages.

Après une semaine, les jointures, sous les contraintes de traction, ont commencé à se fissurer. Un renfort sous forme de gousset est ajouté et fixé à l'aide d'attaches parisiennes.
Qualitativement, ce matériau translucide offre une élégance simple par son jeu avec la lumière, mise en valeur sous l'action du plissage (Image n° 4 et n° 5).
Cette expérimentation montre tout l'intérêt d'explorer les potentialités d'un matériau afin que son implication dans le concept architectural et structural apparaisse comme une évidence.


2

1


3

4

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. ; 2. ; 3. et 4. PENNER, David et WIEBE, Chris, 2013. « *Corogami Hut* » *case study*. In : Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges. S.l. : Cruz, Taylor & Francis Group. 2013. p. 1374-1380.
5 http://www.mbarchitects.org/2010_prairie_design_award_winners_details.php?id=10 [consulté le 19 mai 2013]

Le verre

Bibliothèque de l'École de Droit

Localisation : **1111 E. 60th St, Chicago, Illinois, États-Unis**

Architectes : **Eero Saarinen & Associates**

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Bâtiment universitaire

Années de la construction :
1958-60

Dimensions globales :
L = 85 m ; l = 45 m ; H = 35 m

Matériaux :
Verre, acier

Éléments concernés :
Façade

Surface de référence :
Parallélépipède rectangle

Type de plissage :
Unidirectionnel constant

Particularité :
Surface de plissage plane

La bibliothèque de l'école de droit de l'université de Chicago est le bâtiment principal du programme d'extension qui a été conduit à la fin des années 50.
L'édifice est composé de six niveaux dont le rez-de-chaussée, formant un socle de pierre, est fortement en retrait. Les cinq autres niveaux sont, quant à eux, enveloppés d'un rideau de verre rythmé par un plissage régulier qui se propage sur l'entière périphérie de la bibliothèque. Le porte-à-faux de ces étages confère à cette façade de verre un effet de légèreté (Image n° 1).
Le travail sur le plissage est fortement élaboré ; la multiplication d'un pli rectiligne accentue la verticalité de l'ouvrage. Cette vision est également renforcée par la disposition d'un profil métallique sur le sommet des plis. Par ailleurs, aux extrémités hautes et basses du plissage, le pli est comme étiré au-delà de la toiture et de la sous-face : il en ressort un effet dentelé qui peut s'apparenter à une lecture moderne du toit des bâtiments néogothiques voisins.
Aux différents coins de l'édifice, le plissage est adouci par trois plis rentrants consécutifs (Image n° 3). Ce schéma rappelle fortement le modelage des façades présentes dans l'architecture de l'École de Chicago comme le Tacoma Building réalisé par les architectes Holabird & Roche en 1892.
À l'intérieur, chaque dalle est découpée selon le tracé du plissage. L'expression de la façade est également reprise dans la forme des piliers, dans la sous-face gaufrée des planchers et dans le mobilier, notamment dans la découpe des tables de travail qui viennent s'adapter parfaitement à l'angle des plis (Image n° 2).
En utilisant les différentes lectures possibles du pli, Eero Saarinen a voulu reproduire une image moderne du contexte architectural environnant. Il suffit d'imaginer le même bâtiment avec une façade lissée pour qu'il devienne un prisme de verre « lambda ».

BIBLIOGRAPHIE

ANON., 1961. *École de droit de l'université de Chicago, États-Unis, Eero Saarinen et ass., architectes.* In : L'architecture d'aujourd'hui. Juin/juillet 1961. n° 96, p. 94-95.

BARUCKI, Tadeusz, 1988. *Eero Saarinen.* Diapositives 51 à 53. Londres : World Microfilms Publications. 1988.

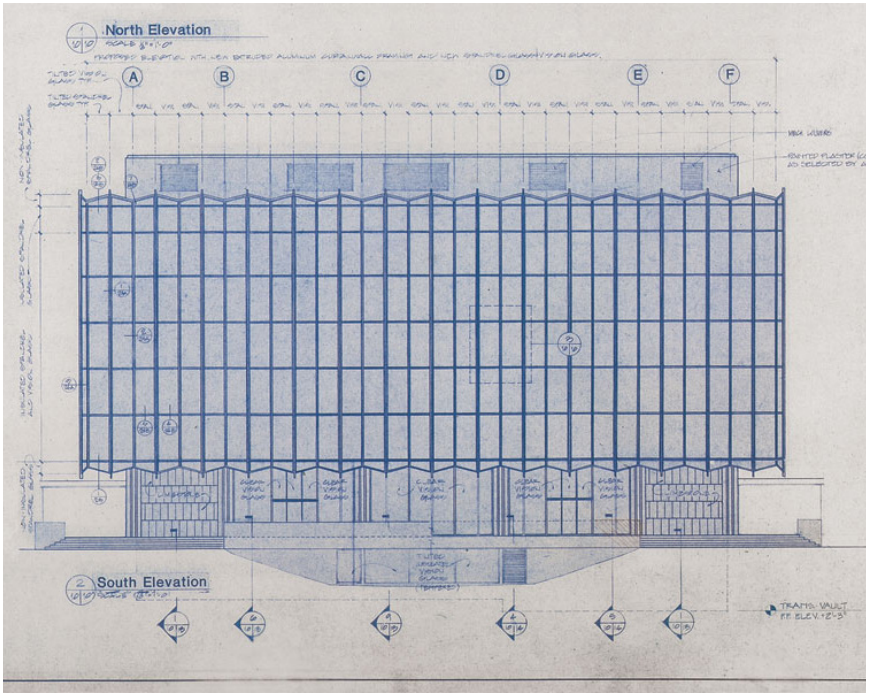
MERKEL, Jayne, 2014. *Eero saarinen.* Londres : Phaidon, p. 142-143. ISBN 978-0-7148-6592-8.

1

3

2

4



SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. et 4. http://www.law.uchicago.edu/node/2226 [consulté le 30 décembre 2016]
2. https://achicagosojourn.wordpress.com/2008/11/08/university-of-chicago-law-library/ [consulté le 30 décembre 2016]
3. http://www.flickriver.com/photos/ericejohnson/sets/72157629589928627/ [consulté le 30 décembre 2016]

Neo Solar Power Corporation (NSP)

Localisation : **Science Park Life Hub, Dong District, Hsinchu City, Taiwan**

Architectes : **J. J. Pan & Partners, Architects & Partners (JJPP)**

CARACTÉRISTIQUES

Type d'usage :
Institut de recherche

Années de la construction :
2007-09

Dimensions globales :
L = 85 m ; l = 45 m ; H = 35 m

Matériaux :
Verre, acier

Éléments concernés :
Façade

Surface de référence :
Plan

Type de plissage :
Unidirectionnel variable

Particularité :
Surface de plissage plane

Ce bâtiment, situé dans le parc scientifique de Hsinchu, constitue le siège de la société NSP, spécialisée dans la recherche et la fabrication de cellules photovoltaïques.
Pour les architectes, la façade de verre est un support d'expression pour transmettre une image symbolique des activités de l'entreprise. Au moyen de plis rectilignes non parallèles, qui se propagent sur toute la hauteur du bâtiment, ils expliquent leur désir de matérialiser l'idée de l'« ondulation » du courant électrique.
Cette métaphore est un prétexte conceptuel dont le plissage qui en découle n'est pas sans conséquence sur l'architecture.
Ce rideau de verre plissé, disposé sur la façade nord et une partie de la façade ouest, fonctionne, en tant qu'élément architectural singulier, comme une façade d'apparat.
Le plissage, facilement reproductible par l'intermédiaire d'une feuille de papier, génère un ensemble de facettes trapézoïdales regroupé en trois séquences différentes (Image n° 2). Ces portions répétitives du pli évoquent une volonté économique dans la conception et la réalisation de cette façade. Toutefois, le jeu de transparence et de reflet dû à la position du soleil masque ce rythme séquencé et maîtrisé au profit d'une vision plus hasardeuse (Image n° 5).
À l'intérieur, chaque plancher suit le profil du plissage (Images n° 3 et n° 4). Ces avancées offrent une multitude d'espaces irréguliers aux dimensions généreuses. Par la morphologie du pli, chacun des renfoncements privilégie une orientation unique sur la ceinture verte qui borde l'ouvrage. À chaque niveau, des stores mobiles occultant la lumière isolent la façade de verre : ce qui n'était alors que des « cavités » se transforme en loges où l'on se prête facilement à la détente, au recueillement ou aux conversations discrètes.
Dans cette réalisation, les architectes ont défini une échelle de plissage répondant à la fois à une symbolique et à un usage.

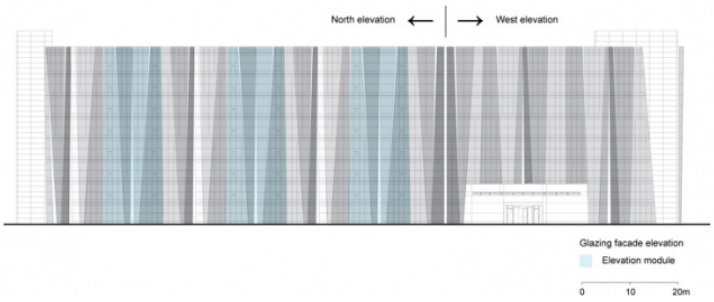
BIBLIOGRAPHIE

ANON., 2011. *Neo Solar Power Corporation / J. J. Pan & Partners.* In : ArchDaily [en ligne]. 25 janvier 2011. [Consulté le 11 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.archdaily.com/105668/neo-solar-power-corporation-j-j-pan-partners/.

J. J. PAN & PARTNERS, 2009. *Neo Solar Power Office Building Complex.* In : JJP Architects & Planners [en ligne]. 2009. [Consulté le 11 janvier 2017]. Disponible à l'adresse : http://www.jjpan.com/en/portfolio/neo-solar-power-office-building-complex/.

1

2



4

3

5

SOURCES ICONOGRAPHIQUES

1. ; 2. et 5. http://www.archdaily.com/105668/neo-solar-power-corporation-j-j-pan-partners [consulté le 29 octobre 2014]
3. et 4. http://www.jjpan.com/en/portfolio/neo-solar-power-office-building-complex/ [consulté le 29 octobre 2014]

Annexe 2

Les caractéristiques du bois

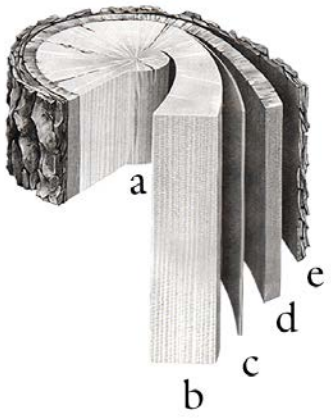


Figure A2.1 - Composition générale d'un tronc d'arbre :
a. Duramen (bois parfait), b. Aubier, c. Cambium, d. Liber (écorce interne), e. Suber (écorce externe). Adapté d'aprés http://www.la-varlope.fr/un-ami-de-l-homme-l-arbre/

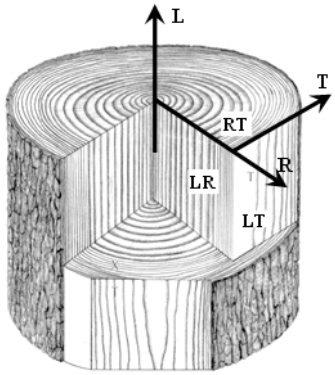


Figure A2.2 - Directions principales et plans de coupe d'une pièce de bois.
D'après (Moutee, 2006).

Le bois est la partie morte d'un être vivant qu'est l'arbre. Le terme d'« être vivant » renvoie au contexte de la biodiversité et plus précisément à des caractéristiques génétiques propres.
Un regard porté sur l'anatomie du bois permet une compréhension des particularités de ce matériau. La coupe transversale d'un tronc révèle une composition annulaire. Du centre vers l'extérieur, on distingue le « bois juvénile », le « bois parfait[1] » formant le corps de l'arbre, l'« aubier » assurant le transport des substances nutritives, le « cambium » permettant la croissance en épaisseur et de l'ensemble « liber » et « suber » formant l'écorce protectrice (Figure A2.1).
Afin d'exposer les propriétés du bois, il nous semble intéressant de les classer selon deux thématiques : les unes résultent directement de l'arbre sur pied (être vivant) et les autres, traitent des propriétés du bois dans son état « mort ».

A2.1. Propriétés liées à l'être vivant

L'anisotropie. C'est la propriété majeure du bois ayant un impact structurel, acoustique et thermique, mais aussi visuel. Quand on évoque le bois parfait[2], on parle de matériau orthotrope ; cette forme simplifiée de l'anisotropie se caractérise par deux plans de symétrie matériels : le plan (LR) et le plan (RT). Dans un repère cartésien, le plan (LT) est défini par défaut (Figure A2.2) . Ces plans forment un repère orthonormé auquel sont associées trois directions orthogonales : longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Cela se traduit par des propriétés physico-mécaniques différentes au moins dans les trois directions (L), (R) et (T). D'un point de vue de la physique, cela s'explique par la présence de fibres fusiformes orientées longitudinalement ; elles donnent le sens du « fil du bois ». Leur dimension est de l'ordre de 1 à 2 mm pour la longueur et de 1 dixième à 1 centième pour le diamètre. Cette caractéristique permet de qualifier le bois comme un matériau composite orthotrope. En effet, le rapport entre (L) et (R) est de l'ordre de 10 en raison de l'orientation des fibres et celui entre (R) et (T) est de l'ordre de 2 du fait de la présence de rayon ligneux. Cette singularité va se répercuter sur les propriétés :

[1] Lorsque le bois parfait est facilement à distinguer de l'aubier, il est appelé duramen.

[2] Élément de bois ne présentant aucune singularité.

Le premier exemple concerne les propriétés acoustiques solidiennes. La vitesse de propagation des ondes sonores dans le matériau est anisotrope avec un rapport de 1 pour 2. Elle varie entre 2400 m/s dans le sens perpendiculaire aux fibres et 5000 m/s dans la direction des fibres. Une bonne vitesse dans le bois traduit un matériau rigide.
Un second exemple concerne les propriétés élastiques. D'un point de vue purement mécanique, les caractéristiques du bois sont mesurées sur un échantillon purgé de toute singularité. Dans ce cas, le module d'élasticité ou module de Young (E) varie d'une direction à l'autre[3] :

$$E^T < E^R \ll E^L$$

De la même manière, la résistance[4] du bois diffère en fonction de chaque direction. Elle est dépendante du mode de rupture notamment lié à l'aspect fibreux du matériau. Il existe deux types de ruptures : l'une par tension et l'autre par compression. En tension, la rupture correspond à une fissure[5] (une « décohésion » des fibres) dans le plan fibreux (LR) ou (LT). Cela sous-entend que la résistance à la traction perpendiculaire est très faible par rapport à la résistance à la traction parallèle au fil. En compression, la rupture correspond au flambage des fibres creuses. Ainsi la direction (L) est la plus performante face aux sollicitations de traction/compression[6] (Figure A2.3).

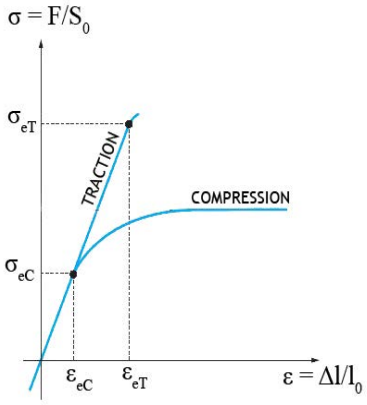


Figure A2.3 - Comportement global d'un échantillon de bois homogène (sans nœud) sous un effort de traction et de compression:
σ. contrainte, ε. déformation, e. élasticité, C. en compression, T. en traction.
Adapté d'après (Lartigau, 2013).
Pour l'exemple du chêne, la résistance moyenne à la rupture est de 100 N/mm² en traction axiale et de 50 N/mm² en compression axiale.

D'autres exemples encore peuvent attester des conséquences de l'orthotropie sur des propriétés comme la conductibilité thermique ou le coefficient de retrait du bois. Elles seront abordées dans les sections correspondantes aux propriétés en questions.

D'un point de vue architectural, l'orthotropie à une incidence visuelle selon les plans L, R et T d'un morceau de bois. Chaque plan confère une texture propre à une essence. Autrement dit, à chaque

[3] Le module de Young (E) relie la contrainte mécanique (σ) de traction ou compression à la déformation (ε) d'un matériau élastique. La rigidité d'un matériau équivaut à un module de Young élevé.

[4] La résistance mécanique d'un matériau est caractérisée par sa limite d'élasticité. Loi de Hooke : $\sigma = E\varepsilon$

[5] Le phénomène est également visible en cisaillement longitudinal.

[6] Cela justifie l'usage du bois massif dans un système poteaux-poutres.

anatomie correspond une composition fibreuse particulière. Pour une même essence, visualiser la fibre en bois de bout ou l'observer dans le sens longitudinal n'offre pas la même lecture du matériau (Figure A2.4).

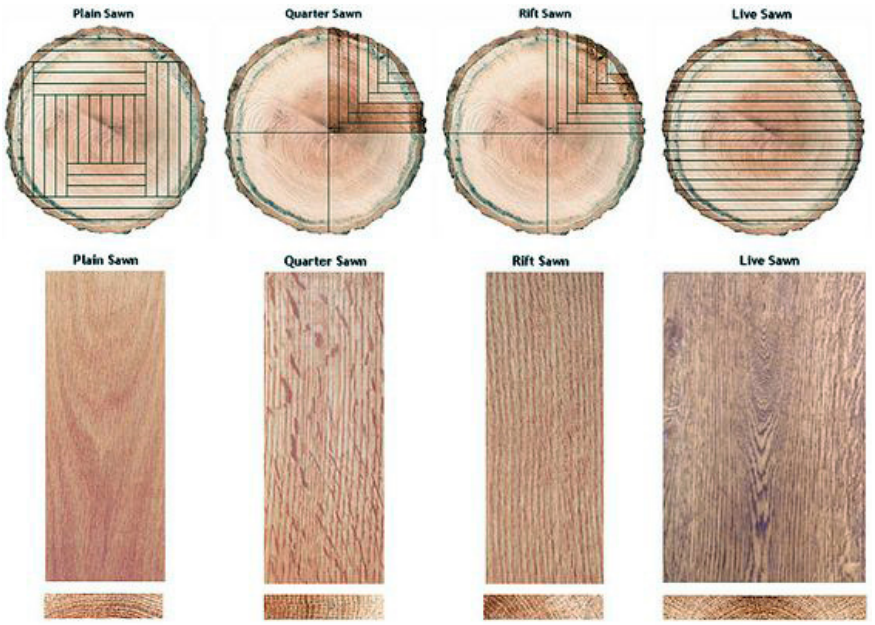


Figure A2.4 - Visualisation de la fibre selon le plan de coupe. Disponible à l'adresse : http://www.brodensupply.com/hardwood/ [consulté le 12 décembre 2016]

L'hétérogénéité. Nous allons nous intéresser aux singularités impactant le comportement du bois massif de construction. Il existe deux singularités essentielles liées aux besoins de croissance de l'arbre : les cernes et les nœuds. Elles sont présentées ci-après.
Le nœud représente l'impact des branches sur le tronc. Le nœud est formé d'un bois environ deux fois plus dense dont le sens du fil forme un angle jusqu'à 90 ° par rapport à la direction (L) du tronc. On distingue un nœud « mort » d'un nœud « vivant ». Le nœud mort s'est formé par la croissance de l'arbre autour d'une branche morte. Il se caractérise par une discontinuité matérielle : le nœud se détache de l'élément de bois. Le nœud vivant correspond à une croissance continue entre l'arbre et la branche : il est défini comme un nœud sain.
En règle générale, la rupture d'un bois massif a lieu autour d'un nœud. En effet, la naissance d'une branche au sein de l'arbre entraîne une déviation des fibres du tronc ; un nœud produit donc une déviation du fil du bois. Si l'on considère un élément taillé dans le droit fil comme une planche, le changement d'orthotropie attenant au nœud entraîne une faiblesse mécanique lors d'une solli-

citation dans la direction (L). Ce phénomène crée une traction perpendiculaire sur les fibres déviées entraînant leur décohésion. Le nœud est alors considéré comme un évidement au niveau de la planche (Figure A2.5.a).

Cependant, l'aspect physico-mécanique des nœuds ne représente pas forcément une faiblesse ; bien au contraire, un nœud en compression locale dans le sens (T) apporte une qualité structurale supplémentaire (Figure A2.5.b).

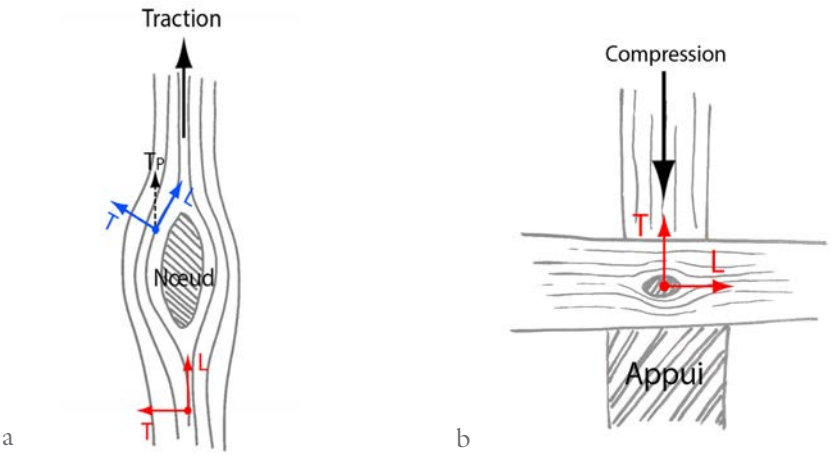


Figure A2.5 - Caractéristiques du nœud :
a) Faiblesse due au nœud en traction longitudinale.
b) Renforcement par le nœud en compression transversale.

Les cernes annuels dépendent d'un climat tempéré. Sur une année leur croissance est variable : elle est rapide au printemps puis ralentie en automne jusqu'à un arrêt de croissance durant la période d'hiver. Cet arrêt cause une faiblesse matérielle qui est à l'origine de ruptures appelées roulures. Cette réaction est très présente chez les essences à zone initiale poreuse (ZIP) comme le chêne ou le châtaignier (Figure A2.6). La ZIP se caractérise par des vaisseaux concentrés dans le bois initial (ou bois de printemps) dont les diamètres sont plus importants que ceux des fibres formés dans le bois final (ou bois d'été). Ce changement de porosité, dû à la croissance variable de l'arbre, confère une densité peu élevée au bois initial et élevé au bois final. Cette différence de densité au sein d'un cerne engendre un effet « bilame » à l'origine de la « déformation » des éléments en bois.

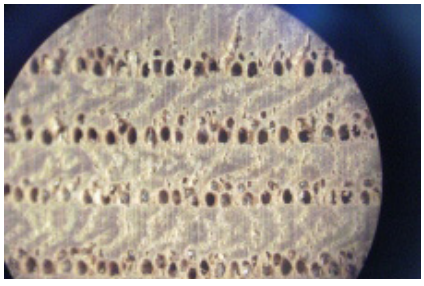


Figure A2.6 - Zone Initiale Poreuse (ZIP) du châtaigner.
Disponible à l'adresse : http://inforets.free.fr/article.php3?id_article=169 [consulté le 20 janvier 2017]

Par ailleurs, les cernes annuels sont définis dans un repère cylindrique. Néanmoins, le débit des éléments de constructions présente couramment des parallélépipèdes rectangles spécifiés dans un repère cartésien. La symétrie matérielle qui subsiste dans le repère cylindrique interfère avec les formes débitées décrites dans le repère

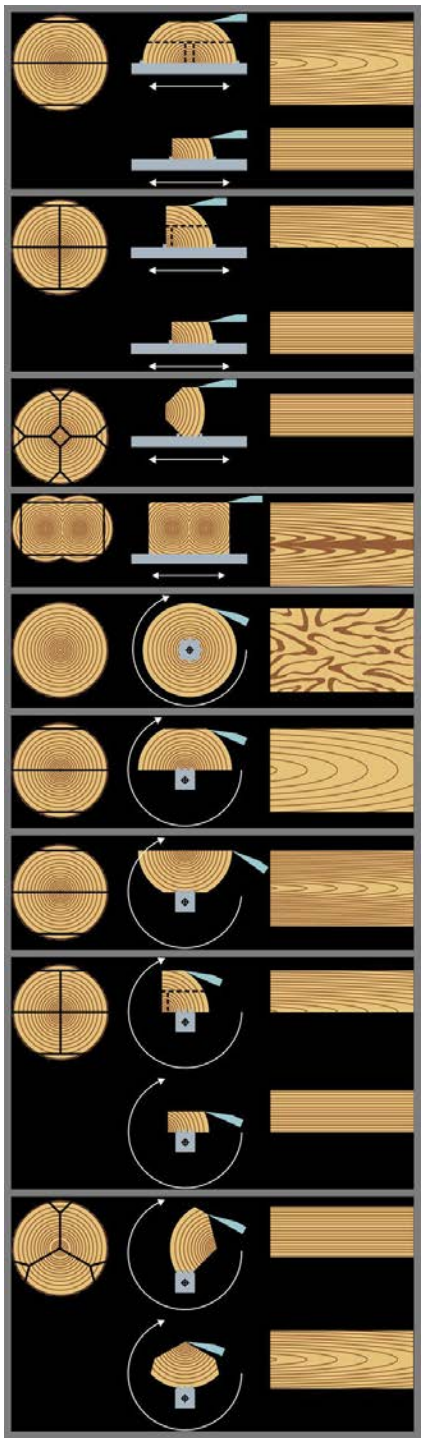


Figure A2.7 - Dessin des cernes en fonction du mode de débit. Disponible à l'adresse : http://www.woodline.lt/luksto-gamybos-budai.html [consulté le 25 novembre 2016]

cartésien. Les conséquences de cette situation sont notamment visibles lors du phénomène de retrait (voir le paragraphe sur l'hygroscopie).

Outre l'aspect physico-mécanique, les singularités confèrent un langage esthétique. Au même titre que les fibres apportent une texture, les cernes et les nœuds ajoutent à cette texture un graphisme unique.
Dans le cas des cernes, la variation de densité entre le bois initial et le bois final génère une différence de teinte due à une concentration de lignine différente[7]. Il est donc aisé de distinguer les cernes. Ainsi, nous pouvons lire un ensemble d'informations comme l'âge ou encore le mode de débit d'un bois tels que le « débit sur cœur », le « débit sur quartier » ou le « débit sur dos ». Ces derniers caractérisent un dessin de cerne qui leur est propre (Figure A2.7).
Quant au nœud, il évoque la mémoire de la branche et par extension celle de l'arbre : il agit, d'une part, comme un révélateur d'échelle et d'autre part, il personnalise ponctuellement le motif par la déviation des cernes qu'il occasionne.
Ces deux singularités génèrent un graphisme indissociable d'une dimension sensible, esthétique, voire symbolique. Un tel langage esthétique est à l'origine de choix architecturaux indispensables entre l'usage du bois massif ou celui d'un produit dérivé qui, par exemple, a été dépourvu de nœuds.

La densité. Il existe une logique fondamentale pour tous les matériaux : plus le matériau est dense, plus il est rigide et plus il est résistant. Pour un même volume, plus il y a d'atomes, plus il y a de liaisons atomiques. Cela se vérifie sur l'ensemble des essences de bois.
La densité de la matière ligneuse est une constante égale à 1,53. Il est donc impossible de trouver un bois qui dépasse 1530 kg/m3.
Plus exactement, il est inconcevable qu'un arbre atteigne cette densité puisque sa croissance dépend de la présence de pore nécessaire à la circulation de la sève. Le bois est un matériau poreux.

[7] Plus le bois est dense, plus la concentration en lignine est importante et plus la teinte s'assombrit.

De ce fait, la densité moyenne des bois varie entre 0,1 et 1,3 (Tableau A2.1). À titre d'exemple, le balsa à une densité moyenne de 0,15 et l'ébène de 1,05.

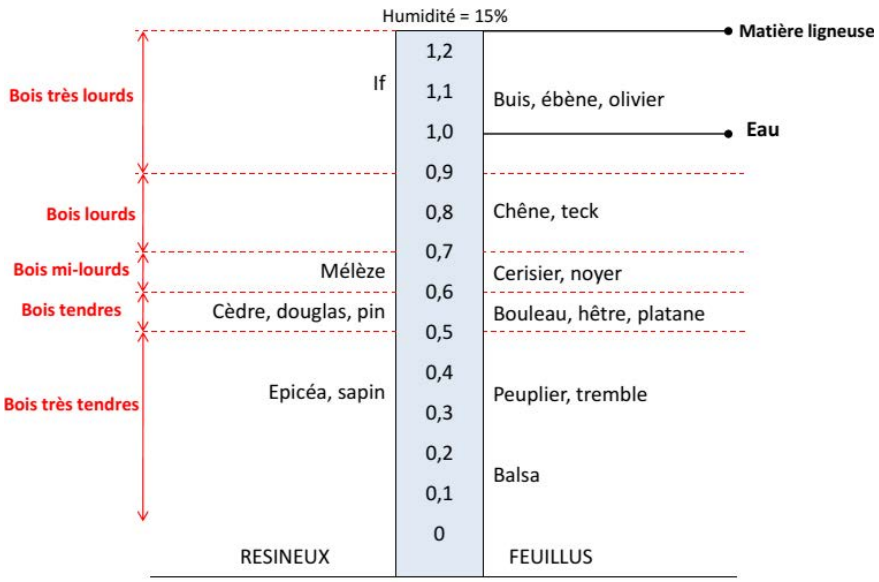


Tableau A2.1 - Valeurs moyennes de densité selon les essences.

La variabilité de la densité se constate au niveau « intra-arbre », « inter-arbre » (de même essence) et « inter-essence ». Dans un cerne annuel, la densité du bois initial commence entre 0,2 et 0,4 en fonction des essences et celle du bois final se termine généralement avec une densité supérieure à 1 (Figure A2.8).

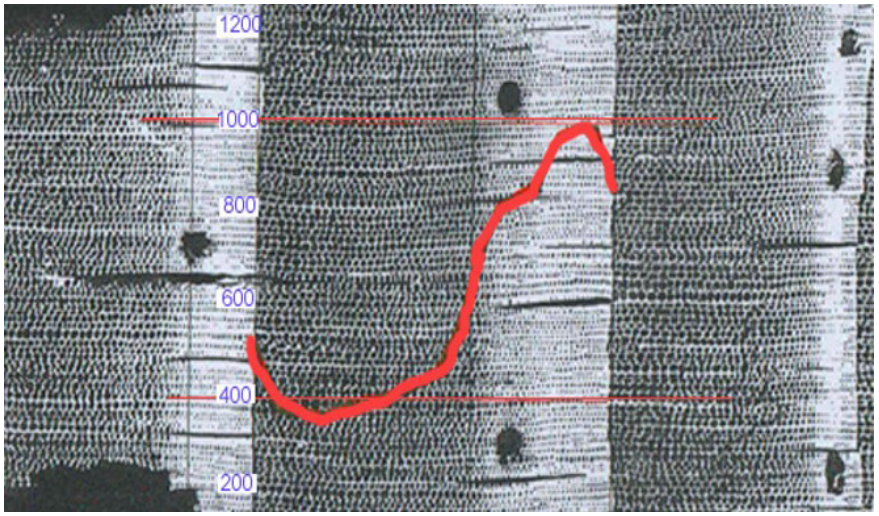


Figure A2.8 - Microdensitométrie d'un cerne (mesures de la densité du bois par absorption des rayons X).

En fonction des aléas environnementaux, la densité moyenne d'un cerne est changeante. En moyenne, il y a autant de variabilité dans un arbre que de variabilité dans une population (de même essence). Par exemple, la densité moyenne d'un épicéa peut varier de 0,3 à

0,7 en fonction du pays d'implantation. De la même manière, des échantillons prélevés à divers endroit de ce même arbre peuvent présenter de multiples densités. Cette variabilité de densité entraîne donc une variabilité des propriétés mécaniques. Cela montre que l'on ne peut pas créer des modèles très simples des propriétés du bois.

Il existe une relation entre les densités et les propriétés physiques telles que la rigidité, la résistance ou encore le retrait. De ce fait, la connaissance du poids des matériaux nous informe sur ses propriétés physiques globales. À ce stade, il est intéressant de faire la correspondance avec les autres matériaux. Nous comparons trois familles de matériaux : les végétaux (le bois) présentant une densité généralement inférieure à 1, les minéraux (le béton non armé) et les métaux (acier) (Tableau A2.2). Ce tableau est à titre indicatif, car dans chaque famille il y existe des variabilités de densité très grandes comme constaté chez les métaux entre l'aluminium (2,7) et l'acier (7,9).

Tableau A2.2 - Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques du bois, du béton et de l'acier à titre indicatif.
D'après (Le Govic, 1995).

Matériau	**Masse volumique** (kg/m³)	**Résistance** (MPa)		**Module d'élasticité** (MPa)
		Traction	Compression	
Béton	2 400	3	40	30 000
Acier	7 800	500	500	210 000
Bois	600	40	30	10 000

Selon leur grandeur spécifique (valeur de la grandeur physique ramenée à une densité identique), le comportement mécanique des végétaux est plus performant que celui des minéraux et qui est lui-même plus performants que celui des métaux. L'une des principales conséquences qui en résultent est l'utilisation des végétaux pour la réalisation de structures à grandes portées. Dans ce contexte, le poids propre de la matière devient le chargement primordial ; le bois présente donc un avantage. En effet, depuis la maîtrise du collage du bois, de grandes portées sont réalisables comme l'illustrent les poutres droites en lamellé-collé de 70 m de portée libre pour une hauteur de 4 m formant la toiture du centre Soccer de Montréal en 2015 ou encore la charpente du dôme Odate-shi de Toyo Ito présentant une portée de 174 m en1997 (Figure A2.9).

Figure A2.9 - Mise en place d'une des treize «méga» poutres en bois d'épinette noire du Centre de Soccer de Montréal.
Dimensions : 70 m de longueur, 4 m de hauteur et pèse 125 tonnes.

L'effet hygroscopique va entraîner plusieurs définitions de la masse volumique du bois. D'un côté, la densité « vraie » dépend du taux d'humidité du matériau. Afin de comparer les essences entre elles, cette densité est mesurée à un taux d'humidité de référence de 12 % pas toujours évidente à mettre en œuvre. De l'autre, l'infradensité correspond à la masse volumique du bois indépendante de la problématique liée à l'eau. L'infradensité est égale à la masse de bois anhydre (masse de la matière ligneuse sans eau) divisé par le volume de bois saturé en eau (volume stabilisé à ses dimensions maximales). Cette méthode permet d'obtenir une valeur plus stable de la masse volumique du bois.

La durabilité. Afin d'intégrer les êtres vivants tels que les arbres, la nature a mis en place des mécanismes de destruction favorisant le renouvellement. Le bois étant issu d'un être vivant, il existe donc des mécanismes naturels qui vont entraîner sa dégradation. Nous en distinguons deux principaux :
D'une part, ce sont les micro-organismes tels que les champignons lignivores qui se développent dans des conditions adéquates de température, d'eau et d'oxygène. D'autre part, les insectes tels que les coléoptères à larves xylophages qui se nourrissent du bois sec. Les arbres « sains » produisent alors des défenses contre ces attaques destructives. Pour se protéger, l'arbre se compose de minéraux tels que la silice, mais aussi de constituants organiques comme les « extractibles » (tanins ou résine) conférant une durabilité naturelle

vis-à-vis des insectes et des champignons. En fonction des espèces, le niveau de constituants varie : il y a donc naturellement des essences plus durables que d'autres.
Un classement s'effectue selon l'emploi du matériau en tant qu'élément constructif. Pour une même essence de bois, un chevron à l'abri des intempéries présente moins de risques de dégradation qu'une lame de bardage. En effet, si l'on dispose un bois non durable dans des conditions protégées (abrité de l'eau contre les champignons et des insectes) on peut assurer sa durabilité. Les « classes d'emploi » se caractérisent par les différentes expositions d'un bois suivant son affectation. Cette classification prévient des risques biologiques auxquels le bois est soumis :

– Classe d'emploi 1 : Situation dans laquelle l'élément de bois est utilisé en intérieur, non exposé aux intempéries (menuiseries intérieures, escaliers intérieurs, portes…).

– Classe d'emploi 2 : Situation dans laquelle l'élément de bois est sous abris et non exposé aux intempéries (charpentes, ossatures ventilées…).

– Classe d'emploi 3 : Situation dans laquelle l'élément en bois n'est pas en contact avec le sol et est exposé aux intempéries (bardage, fenêtre…).

– Classe d'emploi 4 : Situation dans laquelle l'élément en bois est en contact direct et permanent avec le sol et/ou une source d'humidification prolongée (poteaux, balcons, terrasses, coursives…).

– Classe d'emploi 5 : L'élément en bois est en contact permanent avec l'eau salée (piliers, pontons, bois immergés…).

Afin d'optimiser la pérennité des élément de bois, ils sont choisis selon leur durabilité. Elle se présente sous deux types : la durabilité naturelle et conférée[8]. La durabilité naturelle concerne généralement le bois parfait vis-à-vis de l'attaque des champignons lignivores et des insectes xylophages. Les essences de bois sont classées de « très durable » à « non durable ». Afin d'augmenter le potentiel des bois les plus sensibles, un traitement chimique peut être apporté. On parle alors de durabilité conférée. Cette dernière dépend de la

[8] Disponible à l'adresse : http://www.cndb.org/?p=durabilite_impregnabilite [consulté le 16 juillet 2016].

classe d'imprégnabilité des différentes zones du bois (bois parfait et aubier). Par exemple, le sapin blanc n'est pas durable naturellement et son bois parfait est peu imprégnable (Tableau A2.3).
Le choix du traitement doit être pris en compte dans une démarche architecturale : en effet, les protections conférées au bois comme les traitements chimiques par imprégnation d'oxyde de cuivre ou par dépôt d'une lasure, mais également les traitements thermiques comme le bois brûlé modifient l'aspect visuel du bois (texture, couleur…).

Nom commun	Nom scientifique	Origine	Masse volumique (fourchette et moyenne à 12 % d'humidité)	Durabilité naturelle				Imprégnabilité		Largeur de l'aubier
				Champignons	Capricorne	Vrillettes	Termites	Bois parfait	Aubier	
Douglas	*Pseudotsuga menziesii*	Amérique du Nord	510-530-550	3	S	S	S	4	3	2 à 5 cm
		Cultivé en Europe	470-510-520	3-4	S	S	S	4	2-3	2 à 5 cm
Épicéa	*Picea excelsa*	Europe	440-460-470	4	SH	SH	S	3-4	3v	non distinct
Pin maritime	*Pinus pinaster*	Europe du sud et du sud-ouest	530-540-550	3-4	S	S	S	4	1	supérieure à 10 cm
Pin sylvestre	*Pinus sylvestris*	Europe	500-520-540	3-4	S	S	S	3-4	1	2 à 10 cm
Sapin	*Abies pectinata*	Europe, Amérique du Nord	440-460-480	4	SH	SH	S	2-3	2v	non distinct
Châtaignier	*Castanea sativa*	Europe	540-590-650	2		S	M	4	2	2 à 5 cm
Chêne	*Quercus pedunculata et Quercus sessiflora*	Europe	670-710-760	2		S	M	4	2	2 à 5 cm
Hêtre	*Fagus sylvatica*	Europe	690-710-750	5		S	S	1	1	non distinct
Peuplier	*Populus spp.*	Europe	420-440-480	5		S	S	3v	1v	non distinct

Tableau A2.3 - Durabilité naturelle et imprégnabilité des essences d'après la norme NF EN 350-2.
- Champignons : 1 = Très durable, 2 = Durable, 3 = Moyennement durable, 4 = Faiblement durable, 5 = Non durable.
- Capricornes et vrillettes : D = Aubier durable, S = Aubier sensible, SH = Bois parfait sensible (essences à aubier non distinct)
- Termites (durabilité du bois parfait) : D = Durable, M = Moyennement durable, S = Sensible.
Imprégnabilité : 1 = Imprégnable, 2 = Moyennement imprégnable, 3 = Peu imprégnable, 4 = Non imprégnable.
La lettre «v» qui suit le chiffre signifie que l'imprégnabilité est variable.

La durabilité du bois peut également être mesurée en fonction de sa résistance face au vieillissement classique de tous les matériaux : le vent et son action abrasive ; l'eau et l'action du gel ; le soleil et l'action des rayons UV agissant sur le « grissaillement » du bois. Toutes variations de conditions (température, humidité…) fatiguent le matériau. Il est donc indispensable de bien comprendre la réaction du bois face aux agents biologiques ou physiques afin d'éviter toutes les situations pouvant entraîner sa dégradation précipitée.

OBSERVATIONS : L'environnement dans lequel évolue l'arbre est à l'origine d'une variabilité importante des caractéristiques de la matière bois (hétérogénéité, densité…). Par ses variabilités, chaque élément de bois est en quelque sorte « unique ». D'une part, elles jouent un rôle architectural important dans l'aspect visuel du bois : choix des essences en fonction de leur texture, de leur teinte, voire de leur mode de débit… D'autre part, ces variabilités ont un impact sur le comportement structural : le manque de connaissance actuel ne permet pas d'estimer précisément le comportement mécanique de chaque élément de bois. Par constat, ce comportement diffère entre un élément structural comme une poutre et un échantillon de bois quasi parfait. Il existe donc un effet d'échelle matériel lié à la dimension de l'élément de bois utilisé. Plus l'élément considéré est grand, plus il englobe de variabilités. Dans la construction, cette variabilité doit donc être contrôlée et classée.

De ce fait, des valeurs normatives, résultant de tests expérimentaux, caractérisent les bois en fonction de leurs dimensions d'emploi (Tableau A2.4).

Caractéristiques	Symbole	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
Propriétés de résistance en N/mm²										
Flexion	$f_{m,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	232	23	25	26
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	4.3	4.6	4.8	5.1	5.3	5.6	5.7	6	6.3
Cisaillement	$f_{v,k}$	1.7	1.8	2	2.4	2.5	2.8	3	3.4	3.8
Propriétés de rigidité en kN/mm²										
Module moyen d'élasticité axial	$E_{0,moy}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Module d'élasticité axial au fractile 5%	$E_{0,0.5}$	4.7	5.4	6	6.7	7.4	8	8	8.7	9.4
Module moyen d'élasticité transversal	$E_{90,moy}$	0.23	0.27	0.3	0.33	0.37	0.4	0.4	0.43	0.47
Module moyen de cisaillement	G_{moy}	0.44	0.5	0.56	0.63	0.69	0.75	0.75	0.81	0.88
Masse volumique en Kg/m³										
Masse volumique au fractile de 5%	ρ_k	290	310	320	340	350	370	380	400	420

Caractéristiques	Symbole	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriétés de résistance en N/mm²							
Flexion	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Traction axiale	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Traction transversale	$f_{t,90,k}$	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9
Compression axiale	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compression transversale	$f_{c,90,k}$	8	8.4	8.8	9.7	10.5	13.5
Cisaillement	$f_{v,k}$	3	3.4	3.8	4.6	5.3	6
Propriétés de rigidité en kN/mm²							
Module moyen d'élasticité axial	$E_{0,moy}$	10	10	11	14	17	20
Module d'élasticité axial au fractile 5%	$E_{0,0.5}$	8	8.7	9.4	11.8	14.3	16.8
Module moyen d'élasticité transversal	$E_{90,moy}$	0.64	0.69	0.75	0.93	1.13	1.33
Module moyen de cisaillement	G_{moy}	0.6	0.65	0.7	0.88	1.06	1.25
Masse volumique en Kg/m³							
Masse volumique au fractile de 5%	ρ_k	530	560	590	650	700	900

Tableau A2.4 - À gauche, le tableau de classement des résineux selon leurs valeurs caractéristiques; à droite, le tableau de classement des feuillus selon valeurs caractéristiques.

A2.2. Propriétés du bois mort :

La collecte du bois est engendrée principalement par les besoins en bois énergie et en bois de construction. Face à ce constat, le secteur de la construction semble offrir une plus grande valorisation de ce matériau.
Les deux risques majeurs de la construction sont l'eau et le feu. Il est donc important de connaître le comportement du bois « mort » quand il est exposé à ces deux éléments. Enfin, nous terminerons cette section en abordant une caractéristique essentielle qui a contribué à l'usage du bois en construction : son comportement à l'usinabilité.

Le comportement hygroscopique. Le bois est un matériau susceptible de faire varier, par restitution ou absorption, son « taux d'humidité ». En effet, ce matériau va rechercher un équilibre hygroscopique en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air ambiant. Le taux d'humidité, exprimé en pourcentage, correspond au rapport entre la masse d'eau et la masse de bois à l'état anhydre.
L'hygroscopie correspond donc à l'état physique de la présence de l'eau dans le bois. Trois stades se distinguent : l'eau libre, l'eau liée et l'eau de constitution (Figure A2.10). Ces trois stades sont atteints successivement lors du séchage du bois.
Dans un arbre sur pied, le bois est saturé en eau, c'est-à-dire qu'il présente de l'eau à l'état liquide dans ses pores appelée eau libre. Son taux d'humidité est généralement supérieur à 100 %[9] comme constaté chez le peuplier (jusqu'à 200 % d'humidité). Le séchage d'un bois débité entraîne un écoulement de l'eau libre. Aucun phénomène de retrait ou de déformation du bois n'a lieu durant cette phase de « ressuyage ».
Le passage de l'eau libre à l'eau liée se nomme le point de saturation des fibres (PSF) et s'effectue entre les taux de 20 et 50 % d'humidité selon les essences[10]. L'eau liée est imprégnée dans les membranes des cellules par l'association des molécules d'eau aux molécules constitutives du bois. Par conséquent, le départ de cette eau entraîne un changement volumique négatif nommé « retrait ».

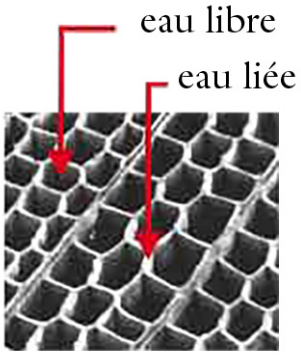


Figure A2.10 - Eau libre et eau liée dans le bois.
Disponible à l'adresse : http://www.crit.archi.fr/Web%20Folder/bois/index.html
[consulté le 25 novembre 2016]

[9] Le taux d'humidité peut atteindre les 300 % ; globalement, on peut avoir 1 à 3 volumes d'eau pour 1 volume de bois.

[10] Dans l'usage, cette valeur est définie à 30 % d'humidité.

Ces liaisons moléculaires étant réversibles, une variation du taux d'humidité jusqu'au point de saturation des fibres (≈30 % d'humidité en moyenne) provoque des phénomènes de dilatation et de retrait dimensionnels.
En dessous de 5 % d'humidité, seule l'eau de constitution est encore présente. Cette eau entre dans la composition chimique du bois. Ces liaisons étant irréversibles, la disparition de l'eau de constitution (T>100 °C) entraîne une modification de la structure moléculaire du bois. Ce phénomène est utilisé dans le procédé de rétification[11] des bois afin d'en assurer une meilleure stabilité dimensionnelle face aux variations hygroscopiques. Toutefois, ce traitement entraîne une réduction de la capacité structurelle du matériau et le rend plus fissible.

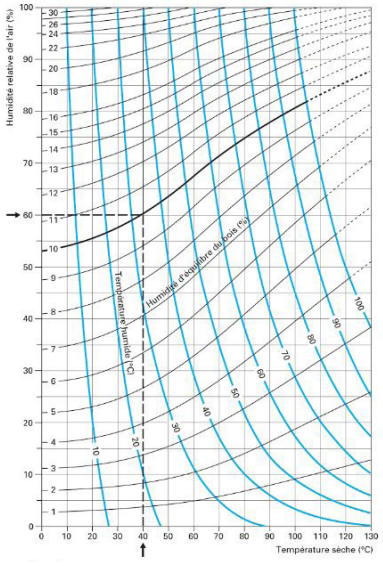


Figure A2.11 - Équilibre hygroscopique des bois.
Pour des conditions atmosphériques de l'ordre de 20 °C et 70 % d'humidité relative de l'air (HR), l'équilibre hygroscopique du bois est d'environ 13 %.
D'après (Natterer et al., 2000).

En fonction de la température et principalement de l'humidité de l'air ambiant, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre nommé « équilibre hygroscopique ». La figure ci-dessous permet de déterminer le taux d'humidité d'un bois en fonction de la température et du taux d'humidité de l'air ambiant (Figure A2.11).
La teneur en eau a une incidence directe sur le comportement mécanique du bois. De manière simple, un bois sec est plus résistant qu'un bois humide. Le module d'élasticité est au maximum pour un bois anhydre. Il tend à décroître jusqu'au point de saturation des fibres (≈30 % d'humidité) avant de se stabiliser. Cependant, les cycles successifs de retrait et de gonflement, dus à la variation de la quantité d'eau liée, engendrent une fatigue du matériau. En effet, le passage d'un état à l'autre se matérialise par une boucle d'hystérésis traduisant une consommation énergétique ; cela induit une fatigue hygroscopique.

Le retrait du bois correspond à la déformation ($\varepsilon = \Delta l/l$) mesurée entre deux états hygroscopiques, généralement entre l'état saturé et l'état anhydre. La variation dimensionnelle dépend du sens consi-

[11] Le principe de rétification développé par René Guyonnet à l'École des Mines de Saint-Étienne présente un matériau dont les propriétés physico-chimiques sont modifiées. Sous l'effet de la chaleur, une réticulation des chaînes de lignines produit un bois hydrophobe plus rigide et plus stable dans ses variations dimensionnelles (Guyonnet, 1999).

déré (L, R ou T). Quant à la variation volumique, elle correspond à la somme des trois variations dimensionnelles. Par exemple, le retrait transversal d'un épicéa est de l'ordre de 13 %.
La variation volumétrique est de nature anélastique. La loi de comportement de déformation anélastique[12] est définie comme suit :

$$\varepsilon^{H} = \alpha.\Delta H$$

Le coefficient de retrait ou de gonflement (α) caractérise les variations dimensionnelles d'une pièce de bois soumise à une variation d'humidité de 1 % selon chacune des trois directions.

$$\alpha^{T} = 2.\alpha^{R} = 10.\alpha^{L}$$

Par exemple, le coefficient de retrait longitudinal d'un résineux est de l'ordre de $0.0001 H\%^{-1}$. Ce coefficient est faible par rapport à celui radial ($0{,}001\,9\ H\%^{-1}$) ou tangentiel ($0.0036 H\%^{-1}$), mais il n'est pas négligeable pour autant .

Essence	α^{T} [$H\%^{-1}$]	α^{R} [$H\%^{-1}$]	α^{L} [$H\%^{-1}$]
Epicéa	0,0033 < **0,0037** < 0,0040	0,0017 < **0,0019** < 0,0022	0,0001
Sapin	0,0024 < **0,0033** < 0,0041	0,0012 < **0,0019** < 0,0024	0,0001
Pin	0,0028 < **0,0032** < 0,0035	0,0017 < **0,0019** < 0,0022	0,0001
Mélèze	0,0041 < **0,0044** < 0,0046	0,0022 < **0,0024** < 0,0026	0,0001
Chêne	0,0025 < **0,0032** < 0,0038	0,0015 < **0,0019** < 0,0023	0,0001
Hêtre	0,0036 < **0,0038** < 0,0040	0,0021 < **0,0022** < 0,0025	0,0001
Frêne	0,0034 < **0,0038** < 0,0039	0,0018 < **0,0021** < 0,0022	0,0001
Noyer	0,0028 < **0,0030** < 0,0033	0,0019 < **0,0020** < 0,0022	0,0001
Robinier	0,0028 < **0,0033** < 0,0037	0,0021 < **0,0024** < 0,0027	0,0001

Tableau A2.5 - Limites et valeurs moyennes du coefficient de retrait et de gonflement (α) selon chacune des trois directions.
D'après (Natterer et al., 2000, p44).

La valeur globale du coefficient α varie selon les essences. Plus le coefficient est élevé, plus la nervosité du bois est grande.
En mécanique, la déformation «vraie» ou la déformation totale (ε^{TOT}) est égale à la somme de toutes les déformations élastiques ($\sigma = E\ \varepsilon^{éla}$) et anélastiques[13]. Dans le matériau bois, cela équivaut à une déformation hygro-élastique :

$$\varepsilon^{TOT} = \Sigma\varepsilon = \varepsilon^{H} + \varepsilon^{éla}$$

[12] Les déformations anélastiques du bois sont liées principalement aux variations d'humidité (ε^{H}), mais proviennent aussi des variations de température (ε^{th}). Cependant, lors de la dilatation du bois sous l'effet de la chaleur, il y a un retrait plus important s'exerce, qui est dû à l'évaporation de l'eau liée. La déformation à l'humidité est prépondérante.

[13] Les déformations anélastiques du bois sont liées principalement aux variations d'humidité, mais proviennent aussi des variations de température.

À ce stade, il existe deux situations extrêmes :

– Soit la matière peut changer de volume : elle est libre de « respirer ». Il n'y a pas de contraintes élastiques : $\sigma = 0$.

$$\varepsilon^{TOT} = \varepsilon^{H}$$

La déformation est totalement anélastique. Le bois de construction doit faire l'objet d'une mise en œuvre adaptée, notamment dans la conception d'assemblages capables d'absorber des variations volumiques.

– Soit la matière ne peut pas changer de volume : elle est totalement bridée. Dans ce cas, la déformation est nulle :

$$\varepsilon^{TOT} = 0$$

Ainsi, la déformation hydrique (ε^{H}) est compensée par une déformation élastique :

$$\varepsilon^{H} = -\varepsilon^{éla}$$

Cette déformation élastique engendre des contraintes internes qui, si elles sont supérieures à la résistance du matériau, amènent à une rupture prématurée. Ces contraintes s'écrivent sous la forme :

$$\sigma = -\alpha E.\Delta H$$

Le couple (αE) traduit la pression dans la matière bridée qui subit une augmentation de 1% d'humidité[14]. Une pièce de bois totalement bridée génère une pression interne constante indépendante de la direction considérée dans le bois :

$$\alpha^{L}E^{L} = \alpha^{R}E^{R} = \alpha^{T}E^{T} = cste$$

$$(\text{d'où } \alpha^{T} > \alpha^{R} \gg \alpha^{L} \text{ et } E^{T} < E^{R} \ll E^{L})$$

Par exemple, un bridage longitudinal d'une solive entre deux murs peut aboutir à un flambement de l'élément bois ou au poinçonnage de ces murs si aucun jeu de montage n'est pris en compte. Dans cet exemple, on constate l'effet non négligeable du coefficient de retrait longitudinal.

[14] Dans des conditions de bridage, une augmentation de la température produit un phénomène analogue.

Un parallèle peut être fait entre la notion de bridage et le comportement des cernes annuels. Comme nous l'avons vu dans la section consacrée à la densité, un cerne présente un bois initial plus léger que le bois final. Sachant que le coefficient de dilatation (α) augmente avec la densité du bois, tous les cernes annuels composés de deux matériaux de densités différentes entraînent nécessairement un bridage matériel lié au changement d'humidité : le cerne agit comme un « bilame ». De ce fait, le bois final plus dense va se rétracter plus fortement que le bois initial pendant le séchage : le cerne va chercher à se « redresser ». C'est pourquoi une planche débitée dans du bois vert va « tuiler » durant la période de séchage (Figure A2.12). Un bois sans contraintes résiduelles n'existe pas. La maîtrise du séchage et le contrôle de l'humidité des bois de construction sont donc primordiaux.

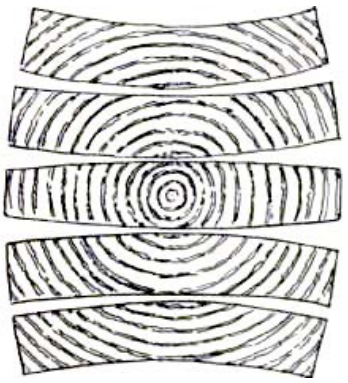


Figure A2.12 - Effet de tuilage de planches débitées dans la section d'un tronc après séchage. D'après (King, 2008).

Ainsi, l'aspect hygroscopique du bois doit être pris en compte dans la mise en œuvre des éléments de structure. Afin de maîtriser les déformations à l'humidité (ε^H), la solution consiste à limiter les variations hygroscopiques (ΔH) en « emballant » la structure. Toutefois, si ces variations existent, le ΔH peut être induit de deux manières différentes :

– Soit temporelle : le morceau de bois change d'humidité dans le temps de façon homogène. L'ensemble de l'élément en bois présente le même équilibre hygroscopique.

– Soit spatiale : le même morceau de bois est exposé a des conditions hygroscopiques différentes. C'est le cas d'une fenêtre qui sépare deux environnements aux conditions distinctes d'humidité et de température de l'air.

L'équilibre hygroscopique d'un élément de bois varie selon sa destination ; de 8 à 12 % pour un emploi intérieur et supérieur à 13 % pour un bois exposé aux intempéries. Afin d'éviter tous risques de déformation hygroscopique d'un bois de structure, son taux d'humidité au moment de l'usinage doit correspondre à l'équilibre hygroscopique dans sa situation définitive. Pour cela, un système normatif de « classes de service » a été défini. Ces classes tiennent compte de l'humidité de l'air et de la température qui conditionne le taux d'humidité du bois lors de sa mise en œuvre :

– Classe de service 1 : elle se définit par une température ambiante de 20 °C et une humidité relative de l'air qui peut dépasser 65 % quelques semaines par an. Dans ces conditions, la valeur moyenne à l'équilibre hygroscopique du bois est inférieure ou égale à 12 %.

– Classe de service 2 : elle se définit dans les mêmes conditions de température que la classe précédente et une humidité relative de l'air qui peut dépasser 85 % quelques semaines par an. Dans ces conditions, la valeur moyenne à l'équilibre hygroscopique du bois est inférieure ou égale à 20 %.

– Classe de service 3 : elle se caractérise par des conditions climatiques conduisant à une teneur en eau du bois supérieure à la classe de service 2. Dans ces conditions, la valeur moyenne à l'équilibre hygroscopique du bois est supérieure à 20 %.

OBSERVATIONS : Dans la mise en œuvre du bois en construction, l'usage des bois verts n'est pas perçu négativement, car la déformation du matériau favorise l'autoplacement des structures : cette qualité a été utilisée pour la réalisation de structures innovantes comme la résille du musée de Weald and Downland où une capacité de flexion était recherchée. Afin d'assurer la pérennité de ces structures, la technologie des assemblages utilisés doit pouvoir absorber la déformation volumétrique des bois lors du séchage.
Dans la construction en bois sec, le concepteur se confronte à deux points contradictoires :

– Soit, il souhaite éviter toutes les contraintes internes dans le matériau ($\sigma = 0$) qui, associées aux contraintes mécaniques de sollicitation, entraîneraient une rupture prématurée des éléments structuraux. Dans ce cas, un retrait libre (signifiant des contraintes internes nulles) est indispensable, mais il impose une déformation du matériau.

– Soit, le concepteur ne désire pas de variation volumique du matériau. Le bridage du matériau génère alors des contraintes internes.

Cette ambiguïté qui consiste à refuser les contraintes internes ainsi que les variations de volume aboutit à une recherche de situations intermédiaires à l'origine des produits dérivés.

Le comportement thermique. Les propriétés physiques du bois dépendent également de la température. De manière générale, une diminution de la température entraîne une augmentation de la rigidité et la résistance du matériau.

Trois degrés singuliers de température sont à préciser :

1. Le premier correspond à la température de changement d'état de l'eau en glace à 0 °C (pression atmosphérique normale). Cette situation engendre un risque de gel de l'eau libre visible dans l'arbre à l'image des gélivures. Dans le bois de construction, seuls les éléments exposés aux intempéries présentent un risque puisque d'ordinaire, ils ne contiennent pas d'eau libre.

2. Le deuxième est représenté par la température de « transition vitreuse » (Tg) qui classe le bois en tant que matériau polymère. La température Tg du bois correspond à la moyenne de celle de ses constituants comme la lignine (65 °C < Tg_{ligni} < 105 °C). Le passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique démultiplie la viscosité du matériau. La viscosité correspond à la vitesse d'« écoulement » de la matière ; elle dépend donc du temps. Cette échelle de temps peut être modifiée en fonction de la température, mais aussi du taux d'humidité du bois. Plus ces grandeurs sont élevées, plus la viscosité est activée. Cette dernière régit deux phénomènes physiques aux conséquences d'utilisation différentes :

– Le fluage : il correspond à une augmentation différée de la déformation du matériau soumis à une contrainte imposée et constante dans le temps. Le fluage atteint systématiquement la rupture du matériau (Figure A2.13). Toutefois, ce phénomène se produit à une échelle de temps très variable : de quelques secondes à des milliers d'années en fonctions des conditions thermiques et hygroscopiques. L'élévation de la température, lors d'un incendie par exemple, peut entraîner cette rupture par fluage. Plus simplement, un assemblage exposé au rayonnement solaire derrière une fenêtre de toit subit également des risques de fluage accélérés. En effet, le ramollissement du bois sous l'effet de la chaleur facilite le déplacement des connecteurs métalliques (platine, broche ou encore boulon) dans la matière. Afin d'éviter des dégradations structurales, une maîtrise du fluage est inévitable.

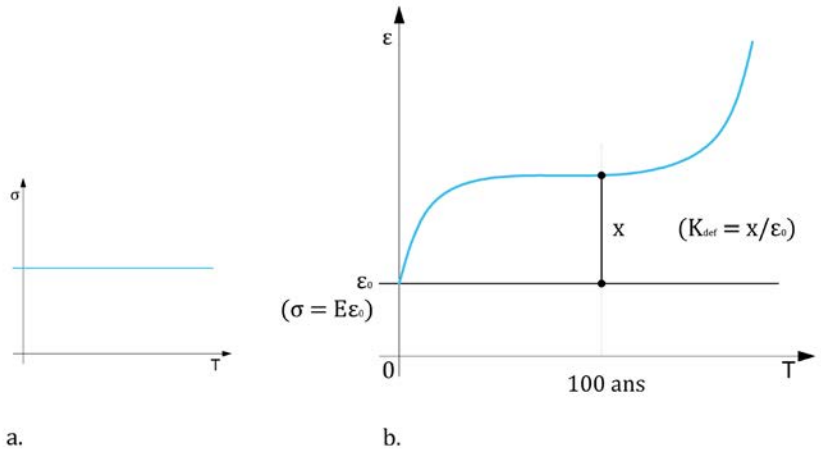


Figure A2.13 - Le fluage.
a.) La contrainte (σ) est imposée et constante dans le temps.
b.) La déformation commence toujours d'une valeur élastique (ε_0) ; selon la courbe, on s'aperçoit que le fluage amène à la rupture du matériau. La durée envisagée pour un bâtiment est d'une centaine d'années. Pour cette durée, la déformation due au fluage peut être estimé par le coefficient de fluage : Kflux = 1+Kdef (avec Kdef = x/ε_0).

– La relaxation : elle exprime une dissipation différée des contraintes internes du matériau due à une déformation imposée et constante dans le temps (Figure A2.14). La déformation entraîne un allongement de la matière par élasticité. Avec le temps, les liaisons internes vont « glisser » (effet de la viscosité) réduisant progressivement la déformation élastique et donc le niveau de contrainte. Cette propriété a notamment été employée dans les processus de réalisation des résilles courbes de Frei Otto, telles que la Multihalle de Mannheim. La forme de la résille a été imposée par le bridage des éléments en flexion. L'effet de cintrage impose une déformation qui crée un stress dans le matériau. Grâce à la viscosité du bois, ce stress peut être diminué, voire éliminé. En fonction de la vitesse de cintrage, la contrainte ne doit pas dépasser la limite de rupture du bois ; il est donc nécessaire d'accorder les conditions de température, d'humidité et de vitesse de déformation pour favoriser une relaxation suffisante.

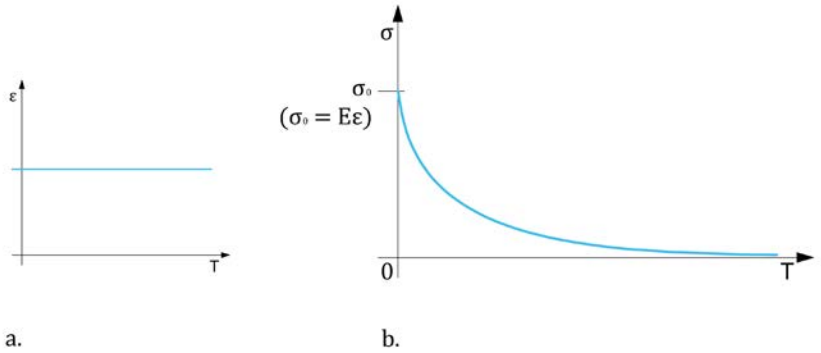


Figure A2.14 - La relaxation.
a.) La déformation est imposée et constante dans le temps.
b.) Cette déformation génère une contrainte (σ_0) qui tend à disparaître : on dit que la contrainte «sature à niveau».
L'augmentation de la chaleur est un moyen de relaxation, car elle augmente la viscosité.

3. Le troisième degré de température est associé à la température de pyrolyse[15]. Cette température (T_{pyro} = 300 °C) est utilisée dans les calculs de stabilité au feu d'un bâtiment. La tenue au feu du bois est rattachée à deux grandeurs physiques :

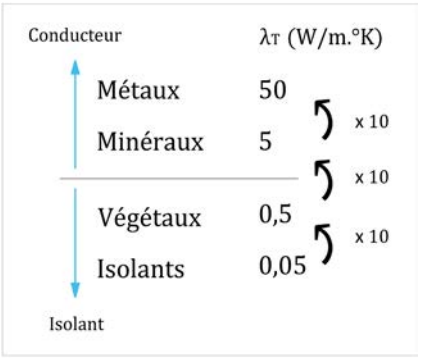
– La conductivité thermique (λ) : cette grandeur physique caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Dans le cas du bois, le (λ) est compris en moyenne entre 0,15 et 0,5 W/m. °K en fonctions des essences (feuillus et résineux confondus). Cependant, cette propriété physique dépend de l'anisotropie du bois. Dans la direction radiale, la continuité moléculaire n'est pas assurée. A contrario, les chaînes cellulosiques présentes dans le sens longitudinal, favorisent la conductivité thermique :

$$\lambda^T \cong \lambda^R < \lambda^L$$

(Dans le cas du chêne, λ^L =0.3 W/m.°K et $\lambda^T = \lambda^R$ = 0.2 W/m.°K.)

Comparé au (Tableau A2.6), le bois massif n'est ni un conducteur ni un isolant[16]. Il est donc indispensable de supprimer autant que possible les ponts thermiques, notamment en évitant de traverser l'enveloppe d'un bâtiment avec une pièce structurale. Sous la forme de produits dérivés tels que la laine, le bois peut être utilisé comme un matériau d'isolation, voire coupe-feu.
La faible conductivité thermique confère au bois une tenue au feu intéressante : lorsqu'une pièce de bois est soumise à une température de brasier, il faut compter plusieurs dizaines de minutes pour que la température à cœur dépasse la température de pyrolyse.

– La vitesse de combustion : la résistance au feu se base sur une isotherme de pyrolyse à 300 °C (Figure A2.15). Elle définit, en fonction du temps, une section résiduelle de bois « froid » mécaniquement résistant. Ainsi, la tenue au feu correspond à l'intervalle de temps entre le début de l'incendie et le moment où la section résiduelle rompt sous les sollicitations mécaniques. La vitesse de progression de la couche carbonisée est estimée à 0,7 mm/min et par face exposée.
Dans la législation actuelle, les coefficients de sécurité imposés dans le dimensionnement à « froid » majorent les sections de bois par rapport à la section de tenue au feu. Le dimensionnement normatif



Matériaux		λT (W/m.°K)
Chêne	∥ aux fibres	0,32
	⊥ aux fibres	0,21
Sapin, épicéa	∥ aux fibres	0,24
	⊥ aux fibres	0,15

Tableau A2.6 - Ordre de grandeur de la conductibilité thermique des matériaux couramment utilisés dans la construction.
Il existe en moyenne un rapport de 10 entre les différentes catégories.

[15] La pyrolyse correspond à la température de combustion du bois en l'absence d'air.

[16] Excepté le balsa qui possède un λ^L de 0,052 W/m.°K.

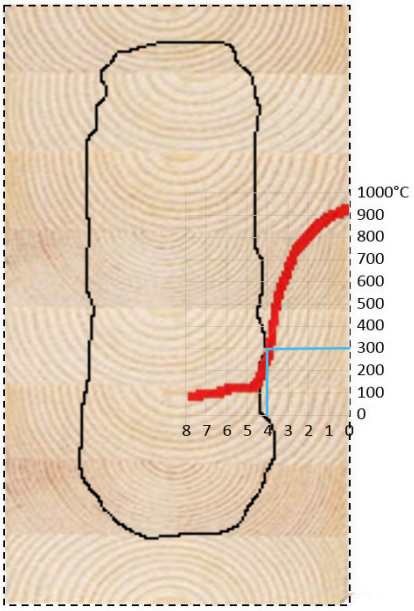


Figure A2.15 - Isotherme de pyrolyse à 300°C.
La température au centre de la poutre avoisine les 100°C.

à « froid » permet une tenue au feu d'une quinzaine de minutes environ. C'est la raison pour laquelle un bâtiment qui nécessite une tenue au feu d'un quart d'heure maximum ne dispose pas d'un dimensionnement au feu.

Comportement à l'usinabilité. Le terme d'usinabilité doit être entendu au sens générique : il fait référence au caractère transformable du bois par des processus de fabrication. On emploie plus aisément le terme de façonnabilité dans des processus artisanaux présentant un travail manuel qui rappelle sans conteste celui des charpentiers d'antan. Aujourd'hui, les nouvelles technologies s'invitent dans la gamme des outils de façonnage qui engendrent de nouvelles possibilités dans la mise en forme des pièces de bois. À l'heure actuelle, la maîtrise des propriétés hygroscopiques et thermiques du bois permet l'utilisation de nouveaux procédés comme le matriçage ou le cintrage. Toutefois, l'enlèvement de matière est certainement la méthode la plus répandue notamment par « coupe rotative »[17]. Elle correspond à des procédés d'usinage (sciage), de fraisage (défonçage, toupillage) ou encore de corroyage (rabotage, dégauchissage).
L'usinabilité d'un matériau se spécifie par une qualité géométrique au regard de l'ingénierie, mais également par une qualité de finition portant sur l'état de surface (visuel, toucher…). Ces deux caractéristiques restent néanmoins tributaires d'un contexte économique[18].

Les singularités du bois entraînent des spécificités d'usinage. L'anisotropie, l'angle de fil et les variations de densité dans les cernes ou dans un nœud sont les principaux facteurs agissant sur la qualité d'usinage. L'état de surface varie en fonction de chaque direction d'usinage (L), (R) et (T). Ces directions sont purement théoriques ; la déviation des fibres, notamment due à des singularités comme les nœuds, génère une variation des directions de coupe. Par conséquent, les conditions d'usinabilité sont changeantes dans une même pièce de bois.

[17] La coupe rotative est un procédé dérivé de la coupe orthogonale décrite dans l'ouvrage de Peter Koch (Koch, 1964). Elle est le principe le plus développé dans les centres d'usinage robotique.

[18] La vitesse d'usure des outils de coupe peut entraîner un surcoût d'un matériau à l'autre.

Cela entraîne un risque d'irrégularité dans l'état de surface. Ce dernier peut être déterminé par le degré d'ondulation de la surface (marque de l'outil) et le degré de « rugosité » (surface pelucheuse, fibres soulevées ou arrachées, marque de copeaux, poussières…). Ces deux facteurs sont dépendants d'une interaction entre le procédé d'usinage (rodage, tranchage, laser, jet d'eau…), les paramètres de coupe de l'outil (effort de coupe) et les propriétés du matériau (fil du bois, densité, humidité…)[19].

La mécanisation des procédés d'usinages contribue à une valorisation du bois. La qualité s'associe à une rapidité d'exécution.

En effet, la maîtrise de l'effort de coupe permet de pallier les difficultés d'usinage provoquées par les spécificités du bois. Il dépend des réglages de coupe comme l'angle des outils de coupe, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance ou encore le sens d'usinage (avalant/opposition), mais aussi des propriétés du matériau telles que l'infradensité[20] ou l'humidité[21].

Aujourd'hui, cette mécanisation évolue vers les centres d'usinage robotisés. Cet univers numérique commandé par des logiciels « paramétriques » augmente le potentiel de l'usinabilité du bois. Par exemple, une adaptation en temps réel des paramètres d'usinage face aux singularités rencontrées peut être envisagée. Par ailleurs, ces robots franchissent le cap de l'usinage linéaire vers un mode de « sculpture » en trois dimensions à l'image des panneaux de bois décoratifs réalisés par Bernard Cache en 1998 (Figure A2.16) ou encore les pièces à doubles courbures de la charpente du centre Pompidou de Metz. Cette évolution est issue d'une maîtrise des systèmes d'ablocage, du repère spatial et de l'intégration des paramètres d'usinage.

Figure A2.16 - Panneau de bois usiné avec une machine à commande numériques. D'après « Objectile » de Bernard Cache et Patrick Beaucé (Beaucé et al., 2007).

Sans l'atout d'être façonnable et usinable, la présence du bois dans la construction, mais aussi dans l'ameublement et la décoration ne seraient pas aussi évidentes. Dans un contexte où un savoir-faire manuel devient de plus en plus coûteux, une mécanisation ou une

[19] (Rajemison, 2013).

[20] Les efforts de coupe varient en fonction de l'infra densité. La plupart des recherches présentent un rapport linéaire (Martin, Sales, 1994). Cependant, certaines études comme celle de Peter Koch nous rapportent de nombreuses infractions vis-à-vis de cette règle (Eyma, 2002).

[21] Les efforts de coupe sont soumis aux propriétés mécaniques du bois lors de la production de copeaux (cisaillement, compression, flambement) ; ces propriétés sont fortement influencées par le taux d'humidité du bois (McKenzie, 1967).

robotisation des processus offre un résultat équivalent ou supérieur en termes d'économie de temps et d'argent. À ce jour, on peut retrouver dans l'architecture en bois des éléments structuraux ou connexes de l'ordre du « décoratif » (Figure A2.17). Le contexte robotique permet également de repenser tout un univers issu du façonnage ancestral qui a été volontairement oublié ces dernières décennies sous l'effet d'une production industrielle standardisée : outre l'ornementation, le vocabulaire de l'assemblage à l'image des queues d'aronde façonnées par les maîtres-ébénistes ou charpentier peut être réinterprété aujourd'hui[22]. La robotique autorise une « complexité » dans les formes usinées conférant, dans le cadre d'un assemblage visible par exemple, une esthétique et une compréhension structurale et architecturale. Le bois demeure plus que jamais un matériau d'assemblage.

Figure A2.17 - Procédé «TOBI» (Tour à Bois Innovant) permettant un fraisage épicycloïdal miltidirectionnel. Société d'Innovation et d'Ingénierie en Machines-Ouitils (SIIMO).
Disponible à l'adresse : http://www.tobi-innovation.com/ [consulté le6 juillet 2016]

[22] Voir les travaux de Christopher Robeller (Robeller et al., 2015).

Annexe 3

Le cintrage du bois

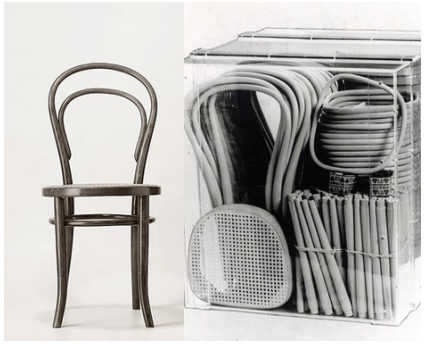


Figure A3.1 - Chaise Thonet n°14, Hêtre courbé à la vapeur d'eau, 1859.
Disponible à l'adresse : http://artdesigntendance.com/bien-avant-ikea-la-chaise-n14-bistrot-thonet/

Le procédé du cintrage était connu dès l'antiquité comme en témoigne le fauteuil en bois doré de la Reine Hétep-Hérès 1re datant d'environ 2500 Av. J.-C. Le ployage fut également employé dans la construction navale grecque pour le formage des « couples » (membrures transversales) . Ce phénomène de plastification est obtenu par le réchauffement du bois humide (12 à 25% d'humidité) par bain ou vaporisation (de 70 à 150°C). La plastification maximale, d'un point de vue physique, est obtenue dans la zone de compression. Lors du cintrage, la fibre neutre se déplace vers la zone de traction, augmentant la section plastique de l'élément courbé.

L'industrialisation de ce procédé est attribuée à l'ébéniste allemand Michael Thonet, dont ses premières réalisations ont vu le jour en 1841[1]. Il utilisa du hêtre étuvé[2] formé sous la contrainte de gabarits (Figure A3.1). Les décennies qui suivirent furent le théâtre d'innovations techniques dans ce domaine. À titre d'exemple, Alvar Aalto et Otto Korhonen ont mis au point, en 1932, une nouvelle méthode de cintrage au moyen de lamelles en contreplaqué insérées dans les rainures longitudinales ; par la suite, cette technique fut diffusée par la société « Artek »[3]. Par ailleurs, Gérald Summers fabrique, en 1934, une chaise formée dans un seul panneau de contreplaqué : la Plywood Armchair. Grâce à un panneau prédécoupé et une série de cintrage, il parvient à la morphologie du fauteuil souhaité évitant ainsi tous recours à des procédés d'assemblages (Figure A3.2). Dès 1940, l'architecte américain Charles Eames révolutionne la manière de façonner le contreplaqué grâce à la technique du moulage en trois dimensions. Il met au point, avec sa femme Ray, un système de presse doté d'une matrice positive et négative en plâtre comprimant les feuilles de placages encollées. Ces pièces de contreplaqué moulées affichent une grande résistance structurelle révélée par le principe de la double courbure[4].

Figure A3.2 - Plywood Armchair, Gérald Summers, 1933.
Disponible à l'adresse : http://the189.com/design/gerald-summers-bent-plywood-armchair/

[1] (von Vegesack, 1986).

[2] L'étuve du hêtre permet de faire rentrer, au cœur du bois, de la vapeur d'eau afin de le rendre momentanément souple.

[3] En 1935, Alvar Aalto créa la société « Artek » ayant pour ambition de promouvoir une culture moderne de l'habitation au travers du mobilier (Ólafsdóttir, 1998).

[4] Se référer à la section «1.2. Le plissage et ses applications constructives», traitant de la courbure de Gauss.

Un autre dispositif illustré par la technique du moulage sous vide présente une alternative avantageuse. En effet, ce dispositif est moins onéreux puisqu'il ne nécessite que la fabrication d'une seule matrice[5]. Ce principe a été employé par Achim Menges en 2013 pour la réalisation du pavillon « HygroSkin » (Figure A3.3).

Figure A3.3 - HygroSkin. Mise en forme des modules du pavillon par la technique du moulage sous vide. Achim Menges, 2013. Source : FRAC Centre Orléans.

Aujourd'hui, la technologie du contreplaqué « thermoformable » UPM Grada offre une nouvelle possibilité dans le contreplaqué moulé. Un film adhésif spécifique disposé entre les couches de placage permet de galber et mouler le panneau après sa production. D'autres technologies, brevetées au début du XXe siècle, sont réemployées à notre époque : c'est le cas du « Bendywood », ou bois cintrer à froid[6], mis en œuvre aujourd'hui par l'entreprise Candidus Prugger. Afin d'obtenir la « malléabilisation » du bois, ce matériau est d'abord plastifié (25% d'humidité, réchauffé à 150°C) puis comprimé dans le sens axial. Cette action mécanique entraîne un écrasement de la paroi cellulaire favorisant le cintrage à froid. L'objet le plus familier illustrant ce principe, est certainement la paille en plastique articulée grâce à une charnière à soufflets. Après séchage, le bois se rigidifie et conserve sa forme (Figure A3.4).

Figure A3.4 - Benywood, tourillon de hêtre cintré à froid. Disponible à l'adresse : http://www.l-atelier-bois.com/bendywood/1533

Cependant, l'ensemble de ces techniques adaptées au bois ne conviennent pas pour le cintrage d'un panneau industriel composé d'éléments collés. Bien que des panneaux puissent être courbés

[5] (Wood, Linn, 1942, p. 132).

[6] Dans l'année 1917, l'Office Impérial des Brevets de Berlin a breveté une technique permettant de rendre le bois flexible à long terme. Plus de détails sont disponibles à l'adresse : http://www.bendywood.com [consulté le 26 février 2013].

dans leur limite élastique comme le contrecollé employé pour la toiture de la buvette Prouvé Novarina à Évian-les-Bains, une solution alternative consiste à fabriquer les panneaux selon une matrice courbe. Le pavillon « Curved Folded Wood Pavilion » réalisé par l'Ibois illustre cette technique. Ce projet présente une surface courbe suivant une direction longitudinale dont les extrémités sont repliées de manière à créer un portique. Cette courbure apporte l'inertie suffisante pour éviter le fluage du panneau couvrant.
De plus, le pli courbe entre l'élément couvrant et les montants assurent le contreventement du portique. L'utilisation de l'élasticité du matériau pour générer la courbure entraînerait nécessairement une instabilité du panneau[7]. C'est pourquoi ce projet utilise des panneaux de CLT fabriqués directement selon une courbure donnée[8]. Toutefois, le coût élevé lié à la réalisation d'un moule et à un processus en partie manuel présente un certain désavantage pour ce type de production.

[7] Le panneau tend à se «relaxer» naturellement s'il n'est pas maintenu.

[8] Les contraintes résiduelles dans le panneau, qui augmentent avec la réduction du rayon de courbure, peuvent être atténuées en diminuant l'épaisseur des couches (Robeller, Christopher, 2015, p. 45).

Annexe 4

Azimut et hauteur solaires

Cette annexe est issue du Rapport de Fin d'Études d'Alice Labeye[1]. Elle apporte les informations nécessaires au calcul de l'azimut et de la hauteur solaires.

- **La déclinaison solaire**

La déclinaison solaire δ correspond à l'angle formé entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle est donnée par la formule[2] approchée suivante :

$$\delta = 23{,}45 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365}(284 + j)\right) \quad [°]$$

Avec :
j : numéro du jour de l'année.

- **L'angle horaire**

L'angle horaire ω détermine le mouvement du soleil par rapport au zénith (plan méridien du lieu défini). Le calcul de l'angle horaire est complexe, mais il peut être approché grâce à la formule[3] suivante :

$$\omega = \pi \times \left(1 - \frac{h_{sv}}{12}\right) \quad [°]$$

Avec :
h_{sv} : heure solaire vraie.

Le moteur de calcul fonctionne avec l'heure solaire « vraie », il n'est donc pas nécessaire de la calculer à partir de l'heure légale au lieu géographique considéré.

- **La hauteur solaire**

La hauteur solaire h peut être définie à partir des deux données précédentes et de la latitude λ du lieu étudié.

$$\sin h = \cos\delta \times \cos\omega \times \cos\lambda + \sin\delta \times \sin\lambda \qquad \text{et } h > 0$$

[1] cf. Annexe II du rapport d'(Labeye, 2016).

[2] (Beckers, Beckers, 2010).

[3] (Bourdin, 2014).

- **L'azimut solaire**

L'azimut solaire α est alors calculé au moyen des deux formules suivantes :

$$\cos\alpha = \cos\delta \times \cos\omega \times \sin\lambda - \frac{\sin\delta \times \cos\lambda}{\cos h}$$

et

$$\sin\alpha = \frac{\cos\delta \times \sin\omega}{\cos h}$$

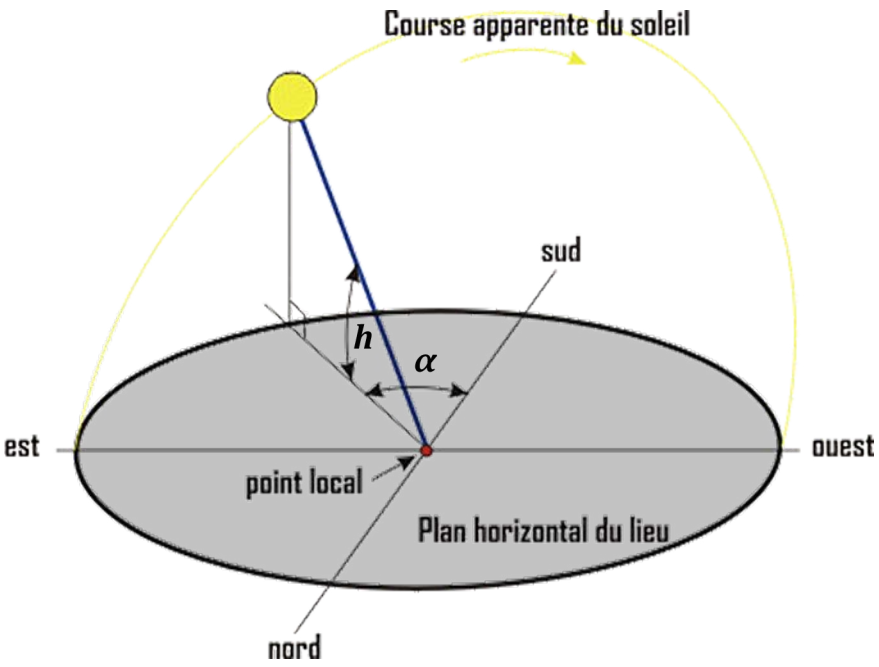


Figure A4.1 - Course apparente du soleil.:
α = azimut; h = hauteur

Liste des illustrations

Figure 1 - Structure plissée en panneaux de bois reprenant le modèle de pliage « Miura Ori ». XVII

Figure 2 - Maison médicale des étudiants en médecine « La Mémé » conçue par Lucien Kroll entre 1970 et 1972; Université Catholique de Louvain. XIX

Figure 3 - Le dôme géodésique (cf. Buckminster Fuller et Steve Baer) permet de construire des structures peu coûteuses, notamment avec l'emploi de matériaux de recyclage; Drop City, 1965. XX

Figure 4 - Structure de protection amovible pour les constructions en bois. XXI

Figure 5 - Pose des panneaux de type « Querto Q » formant la couverture courbe des ateliers municipaux de Hohenems. XXII

Figure 6 - . Projet ECO-CHUTE: structures fondées sur l'utilisation de composants en bois irréguliers peu ou pas transformés (branches, chutes d'industrie, bois de réutilisation...). XXIII

Figure 1.1 - Modèle dit « Fontaine de prin-temps » pour la confection d'un décor de table par Andreas Klett en 1677. 29

Figure 1.2 - Tunique en lin plissée, Égypte, Meir, VIe - XIe Dynastie. 30

Figure 1.3 - Grotte d'Harpéa. Cette cavité naturelle s'est formée par l'effondrement partiel de strates rocheuses d'un pli anticlinal. 31

Figure 1.4 - Origami instantané d'un cône de papier réalisé par Biruta Kresling. 32

Figure 1.5 - Déploiement d'une feuille de hêtre. Comme pour le charme, les plis permettent de contenir la feuille dans l'enveloppe du bourgeon avant son éclosion. 33

Figure 1.6 - Forficule avec ses ailes déployées. 33

Figure 1.7 - Le pli chez le cactus. 34

Figure 1.8 - Plis morphologiques chez les coquillages. 35

Figure 1.9 - Hangar d'Orly. D'après (Fernández Ordóñez, 1979). 37

Figure 1.10 - Chapelle de la Royale Air Force Académie (cf. Annexe 1). 37

Figure 1.11 - Projet du stade de Jeddah. Disponible à l'adresse : http://blog.la76.com/2012/04/jorn-utzon/ [Consulté le 16 mars 2015]. 37

Figure 1.12 - Le pli de la feuille de papier permet d'absorber les contraintes de flexion. 38

Figure 1.13 - Poutre rectangulaire équivalant à un voile plissé. 39

Figure 1.14 - Importance des appuis lors de la sollicitation d'une poutre en « V ». 39

Figure 1.15 - Diverses possibilités d'augmenter l'inertie d'une dalle. 39

Figure 1.16 - Morphologies structurales : 40

Figure 1.17 - Formes de courbure. 40

Figure 1.18 - Couvrement plissé du palais des Expositions de Turin. 41

Figure 1.19 - Hôtel Marques De Riscal. 42

Figure 1.20 - Variation de la perception de l'espace engendrée par les dimensions du pli. 42

Figure 1.21 - Église de St Marc de Bagotville, Québec. 43

Figure 1.22 - Eglise de la Miséricorde de Tylmanowa. 44

Figure 1.23 - Exemple de diffuseur. 46

Figure 1.24 - Coupe longitudinale du Gunma Music Center (cf. Annexe 1). 46

Figure 1.25 - « Turpentine Shed ». 47

Figure 1.26 - Église du Christ Obero, 1958,Uruguay. 47

Figure 1.27 - Mise en place des éléments préfabriqués en béton, salle multisports, Windisch, Suisse, Livio 49

Figure 1.28 - Langage du plissage. 49

Figure 1.29 - École de Droit de Chicago, Eero Saarinen, 1960 (cf. Annexe 1). 50

Figure 1.30 - Igreja de Santo Antonio da Polana, Nuno Craveiro Lopes, 1962 (cf. Annexe 1). 51
Figure 1.31 - Independent Congregational Church, Manske & Dieckmann, 1961 (cf. Annexe 1). 51
Figure 1.32 - Alfriston School Swimming-pool, Beaconsfield, Royaume-Uni, Duggan Morris Architects, 2010 (cf. Annexe 1). 52
Figure 1.33 - Basel College of Art and Design and the Industrial Trade School, Bâle, Suisse, Hermann Baur, Hans Peter Baur, Franz, 1961 (cf. Annexe 1). 53
Figure 1.34 - Arrêt de Bus « Avril », Krumbach, Autriche, Architecten De Vylder Vinck Taillieu, 2014 (cf. Annexe 1). 53
Figure 1.35 - Assembly Hall, Harrisson et Abramovitz, 1963 (cf. Annexe 1). 53
Figure 1.36 - Tempodrom de Berlin, Gerkan, Marg et Partner, 2001 (cf. Annexe 1). 54
Figure 1.37 - Réplique de la grotte du Pont-d'Arc, Xavier Fabre, Vencent Speller et Atelier 3A, 2015 (cf. Annexe 1). 54
Figure 1.38 - a. One Fold, Patkau Architects, 2014 (cf. Annexe 1). 55
Figure 1.39 - Drapé sculpté dans le marbre; « La Modestie » par Antonio Corradini (1751). 57
Figure 1.40 - Modèle d'abris en tôle pliée. Architectes John et Patricia PATKAU, 2014. Voir Annexe 1. 57
Figure 1.41 - Voûte nervurée des hangars de la base militaire d'Avord et Istres. 58
Figure 1.42 - Voûte à section ondulatoire des hangars d'Orly. 58
Figure 1.43 - Agrandissement d'un pli effectué sur une feuille de papier. 58
Figure 1.44 - Schémas des profils des voûtes en béton armé pour les hangars d'Orly. 59
Figure 1.45 - Selon l'hypothèse de Bernoulli, la fibre neutre a un allongement nul. 60
Figure 1.46 - Pli formé par un pliage de matière. 60
Figure 1.47 - Pli formé par un assemblage de matière. 61
Figure 1.48 - Nature du profil : 62
Figure 1.49 - Caractéristiques d'un pli selon une coupe transversale. 63
Figure 1.50 - Caractéristiques d'un pli selon son orientation longitudinale. 63
Figure 1.51 - Variation d'un pli : 64
Figure 1.52 - Propriété des ombres : 64
Figure 1.53 - Représentation d'un plissage reprenant les caractéristiques du pli d'un point de vue longitudinal et transversal. 65
Figure 1.54 - Caractéristiques du plissage selon le sens de propagation 65
Figure 1.55 - Caractéristiques dans l'addition de plis. 66
Figure 1.56 - Nature positive (P) ou négative (N) des plis qui constituent le profil d'un plissage. 66
Figure 1.57 - Rang du plissage : a. rang « 0 » ; b. rang « 1 » ; c. rang « 2 ». 67
Figure 1.58 - « Patterns » des directions des plis qui composent le plissage unidirectionnel. 67
Figure 1.59 - « Patterns » des directions des plis qui composent le plissage unidirectionnel. 68
Figure 1.60 - Présentation de deux méthode aboutissant à un brisis. 68
Figure 1.61 - Plissage Miura-Ori: 69
Figure 1.62 - Caractéristiques d'un plissage brisé : 69
Figure 1.63 - Degré d'interpolation d'un plissage : 70
Figure 1.64 - Exemple de méthode différenciée pour la création d'un même plissage : 74
Figure 2.1 - Il faut environ 150 à 250 années avant d'exploiter un chêne. Ce long cycle de croissance nécessite une anticipation de son exploitation pour les générations à venir. 76
Figure 2.2 - Projet ECO-Chute. 77
Figure 2.3 - La chaufferie du campus de Hooke Park est composée de 167 résineux. 79
Figure 2.4 - Directions principales et plans de coupe d'une pièce de bois. 81
Figure 2.5 - Équilibre hygroscopique du bois. 82
Figure 2.6 - Procédé « TOBI » (Tour à Bois Innovant) permettant un fraisage épicycloïdal multidirectionnel. Société d'Innovation et d'Ingénierie en Machines-Outils (SIIMO). 83

Figure 2.7 - Visualisation de la fibre selon le plan de coupe. 83
Figure 2.8 - Panneau en châtaignier purgé de nœuds. 84
Figure 2.9 - Organigramme des panneaux selon leurs constituants 86
Figure 2.10 - Production d'un panneau de CLT: encollage et positionnement des couches croisées de planches. 88
Figure 2.11 - Montage des panneaux à ossature formant la coque plissée qui recouvre la piscine. 90
Figure 2.12 - Fabrication d'un panneau composant pour le pavillon « Hydroskin » réalisé en 2013 par Achim Menges. 91
Figure 2.13 - Assemblage par clavettes. Laetitia Florin, École Cantonale d'Art de Lausanne (ECAL). 93
Figure 2.14 - Escalier de la maison Gamble. Les frères Greene associent les techniques de menuiserie au vocabulaire de la charpenterie. 94
Figure 2.15 - Assemblage à feuillure simple, à rainure et langeutte simple ou à fausse languette. 96
Figure 2.16 - Assemblages plans à queues : a. queues droites, b. queues d'arondes, c. queues d'raonde perdues, d. queues d'aronde perdues coupées sur onglet. 97
Figure 2.17 - Assemblage textile, Katharina Leitner, RWTH, Aachen, 2004. 98
Figure 2.18 - Deux exemples d'assemblages innovants réalisés à l'aide d'une machine à commande numérique. 99
Figure 2.19 - Développement du programme CATIA par l'entreprise GT design & engineering (Gehry Technologies) au service de la production architecturale. 101
Figure 2.20 - Objectile, Patrick Beaucé + Bernard Cache, Volume 6 of the series Consequence Book Series on Fresh Architecture, 2003, pp 40-45. 102
Figure 2.21 - Embryologic House, Greg Lynn, 1988. 103
Figure 2.22 - Mise en œuvre des panneaux courbes de la toiture, maison Prouvé, Nancy. 104
Figure 2.24 - Prototype formé de panneaux de CLT incurvés et assemblés par un système de queues d'aronde. L'ensemble des panneaux a été usiné par une machine à commande numérique. 105
Figure 2.23 - Lignum Pavilion, Architectes Frei et Saarinen, Zurich, 2009. 105
Figure 2.25 - Montage du pavillon ICD/ITKE 2010. Chaque bande de contreplaqué est maintenue par la précédente. 106
Figure 2.26 - Halle d'exposition du Landesgartenschau. Enveloppe structurelle conçue et fabriquée numériquement. 107
Figure 2.27 - SkilledIn Office. Exemple d'une structure développée et réalisée au Centre des techniques innovantes de Rotterdam. Ce projet affiche le lien qui existe entre les possibilités potentiellement illimitées du monde numérique et le monde matériel grâce à la fabrication robotisée. 108
Figure 2.28 - Vue extérieure et vue intérieure de la piscine d'Alfriston School. La morphologie du plissage ainsi que les montants visibles des composants favorisent l'absorption du son. 109
Figure 2.29 - Pavillon Temporaire. Plissage d'éléments triangulaires formant une « voûte » à deux brisis. 110
Figure 2.30 - Salle de répétition de Thannhausen. Ce plissage est constitué d'une série de plis identiques agissant comme des portiques structuraux. 111
Figure 2.31 - Cette géométrie de plissage optimise le calpinage des éléments. 112
Figure 2.32 - Chapelle Saint Loup. La géométrie du plissage permet à la fois d'affirmer une identité morphologique forte et un principe architectural ingénieux : l'enveloppe protectrice et la structure se confondent. 113
Figure 3.1 - Définition de la zone d'implantation en fonction des trois flux principaux du site. 116
Figure 3.2 - Panneaux de lamibois débités en deux parties. 116
Figure 3.3 - Portique cinq axes robotisé de l'ENSTIB. 117
Figure 3.4 - Modélisation de l'enveloppe initiale à partir de trois courbes planaires. 118
Figure 3.5 - Mise en forme du plissage. 120

Figure 3.6 - Définition des éléments connexes : anneau de compression et ouvertures. 121
Figure 3.7 - Possibilités de mise en épaisseur : 121
Figure 3.8 - Collision de matière lors de la mise en épaisseur. 122
Figure 3.9 - Principe d'assemblage. 123
Figure 3.10 - Validation du modèle géométrique après vérification manuelle des paramètres et contraintes techniques et architecturales. 125
Figure 3.11 - Calepinage manuel des 57 pièces constituant le plissage. 125
Figure 3.12 - La fabrication numérique nécessite plusieurs formats de transfert de données : 126
Figure 3.13 - Processus d'usinage en deux étapes. 127
Figure 3.14 - Aspect brut de l'usinage : éclatements du bois et usinage non abouti. 128
Figure 3.15 - Montage à blanc en atelier : recherche d'éventuelles anomalies. 128
Figure 3.16 - Montage de la New-Yourte. 129
Figure 3.17 - Numérisation d'une des 57 pièces usinées. (EXAscan de *CREAFORM*®). 130
Figure 3.18 - Comparaison géométrique entre le modèle de l'enveloppe interne issu du logiciel de CAO (couleur grise) et le modèle numérique issu de la lasergrammétrie de la face intérieure du pavillon réel (couleur verte). 130
Figure 3.20 - Vue extérieure et vue intérieure de la New-Yourte. 133
Figure 3.19 - Maquette de la New-Yourte réalisée par impression 3D. 133
Figure 4.1 - Méthode d'extrusion des nœuds. 143
Figure 4.2 - Diagramme d'activité représentant les phases principales de la méthode reliées au dispositif d'évaluation. 145
Figure 4.3 - État d'un fragment dans l'espace de référence du repère théorique. 146
Figure 4.4 - Dénomination des directions du repère théorique. 147
Figure 4.5 - Décomposition du profil du plissage selon l'intervalle, l'amplitude et le décalage. 148
Figure 4.6 - Diagramme d'activité de la phase de modelage. 149
Figure 4.7 - Caractérisation de l'intersection théorique de deux éléments. 150
Figure 4.8 - Diagramme d'activité de la phase de matérialisation. 151
Figure 5.1 - Présentation des trois repères utilisés lors des opérations internes aux « clusters ». 154
Figure 5.2 - Présentation chronologique des différentes étapes de la phase de modelage. 155
Figure 5.3 - Clusters de traitement de la normale des surfaces. 157
Figure 5.4 - Principe d'orientation de deux plissages destinés à être joints 157
Figure 5.5 - Présentation des quatre possibilités de rotation du couplet (A_0 , A_2). 158
Figure 5.6 - Clusters d'orientation des surfaces de référence par la gestion de l'ordre des arêtes. 158
Figure 5.7 - Caractérisation d'un sommet du profil par le vecteur ($\vec{R}$). 159
Figure 5.8 - Clusters de génération des valeurs d'intervalles. 161
Figure 5.9 - Clusters de génération des valeurs d'amplitudes. 161
Figure 5.10 - Clusters de génération des profils du plissage. 162
Figure 5.11 - Retranscription des valeurs d'intervalles : a. selon les coordonnées relatives ; b. selon les coordonnées absolues. 163
Figure 5.12 - Principe de relevé des coordonnées de chaque sommet de la polyligne. 164
Figure 5.13 - C luster de génération des tables du plissage. 165
Figure 5.14 - Cluster de génération de la géométrie du plissage. 167
Figure 5.15 - Matérialisation du profil initial. 168
Figure 5.16 - Matérialisation du profil secondaire. 169
Figure 5.17 - Principe de la table de proportion dans le repère théorique. 170
Figure 5.18 - Matérialisation de l'arête sur la surface de référence. 170
Figure 5.19 - Matérialisation des facettes ; utilisation de la fonction « Sweep 2 rails ». 170
Figure 5.21 - Cluster de « rectification » de la surface des facettes du plissage. 171

Figure 5.20 - Impact de la nature rectiligne ou curviligne des arêtes selon la morphologie de la surface de référence. 171
Figure 5.22 - Recherche de la normale moyenne de la facette. 172
Figure 5.23 - Calcul du déplacement d'un sommet suivant la normale moyenne de la facette. 172
Figure 5.24 - Recherche de la planéité de la facette par le calcul du déplacement des sommets (S). 173
Figure 5.25 - Cluster de « jonction » du plissage. 174
Figure 5.26 - Construction géométrique de la jonction : 176
Figure 5.27 - Modification du vecteur ($\overrightarrow{D}$) lors de la jonction de plissage. 177
Figure 6.1 - Présentation chronologique des différentes étapes de la phase de matérialisation. 181
Figure 6.2 - Principe de décomposition de l'entité (E) selon l'épaisseur (e) définie par le concepteur. 182
Figure 6.3 - Position de la facette de référence par rapport à l'élément selon la valeur de décalage (d). 183
Figure 6.4 - Transformation des facettes de la surface plissée de référence en éléments de l'enveloppe plissée : 184
Figure 6.5 - Cluster du traitement de l'épaisseur par duplication et décalage des nœuds. 185
Figure 6.6 - Recherche de la direction de déplacement d'un nœud. 185
Figure 6.7 - Cas 1 : facettes planes aux arêtes rectilignes : 186
Figure 6.8 - Cas 2 : facettes gauches aux arêtes curvilignes : 187
Figure 6.9 - Cas 3 : facettes gauches aux arêtes rectilignes : 188
Figure 6.11 - Cluster du traitement de l'épaisseur par duplication et décalage des facettes. 189
Figure 6.10 - Nature d'un plissage selon ses plans bissecteurs : 189
Figure 6.12 - Procédé de construction géométrique d'éléments à épaisseur constante. 190
Figure 6.13 - Collision entre les différents éléments du plissage. 192
Figure 6.14 - Principe de « démultiplication » d'un nœud suivant la morphologie de la surface plissée. 192
Figure 6.15 - Présentation non exhaustive de différents types de traitement des nœuds. 193
Figure 6.16 - Cluster du traitement des nœuds par percement. 194
Figure 6.17 - Cluster du traitement des nœuds par évasement. 195
Figure 6.18 - Méthode de sélection des nœuds de la surface plissée initiale : 195
Figure 6.19 - Percement des nœuds : 196
Figure 6.20 - Évasement conique des nœuds : 196
Figure 6.21 - Évasement polygonal des nœuds : 197
Figure 6.22 - Enveloppe construite selon une valeur de décalage (d) nulle. Afin d'éviter la collision de matière entre les éléments, le traitement du nœud doit s'effectuer de part et d'autre de la surface plissée. 197
Figure 6.23 - Diffusion de la lumière par les nœuds à l'intérieur de l'enveloppe plissée (percement comblé par une bouteille de verre remplie d'eau). Détail de la New-Yourte, Défis du bois 2014. 198
Figure 6.24 - Ensemble des profils proposés pour la création de la géométrie de l'assemblage. 199
Figure 6.25 - Principe de construction géométrique des assemblages dans l'outil N-sWArM. 200
Figure 6.26 - Identification de la volumétrie englobante selon une vue en coupe. 200
Figure 6.27 - Déclinaison non exhaustive des possibilités de répartition de la volumétrie englobante entre les éléments. 201
Figure 6.28 - Introduction du « jeu d'assemblage » lors de la découpe de la volumétrie englobante. 202
Figure 6.29 - Clusters de traitement des assemblages. 203
Figure 6.30 - Visualisation des plis primaires et secondaires d'un plissage. 204

Figure 6.31 - Processus de caractérisation de la volumétrie englobante. 204
Figure 6.32 - Découpage de la volumétrie englobante : 205
Figure 6.33 - Variantes de la géométrie d'assemblage à partir du composant « Dovetails_Joints » :206
Figure 6.34 - Cas particulier de plis où la volumétrie englobante n'est pas définissable. 206
Figure 6.35 - Caractérisation de l'angle (α) assurant la création d'une volumétrie englobante. 207
Figure 6.36 - Positionnement du plan de joint de référence pour la création des assemblages par rainures-languettes. 207
Figure 6.37 - Exemples de section de fausse-languettes : 208
Figure 6.38 - Paramètre de positionnement de la fausse languette. 208
Figure 6.39 - Variantes de la géométrie d'assemblage à partir du composant « T&G_Joints » : 209
Figure 6.40 - État de la facette dans l'espace de référence du repère théorique. 210
Figure 6.41 - Exemples de plissage réalisés selon la méthode de Hans Buri. 211
Figure 6.42 - Géométrie de la chapelle. 212
Figure 6.43 - Développé de la surface et calepinage des panneaux. 212
Figure 6.44 - Surface de référence. 213
Figure 6.45 - Vues géométrales et vue perspective de l'enveloppe plissée. 213
Figure 6.46 - Cluster de définition géométrique des intervalles. 214
Figure 6.47 - Séquençage de la surface de référence par des plans orientés. 214
Figure 6.48 - Représentation des trois plans contenant les profils de plissage et le profil de jonction. 214
Figure 6.49 - Modélisation de la New-Yourte avec les fonctions initiales présentes dans l'outil CARA(s)PACE. 215
Figure 6.50 - Cluster de modification de table selon un plan imposé. 216
Figure 6.51 - Cluster de jonction selon un plan imposé. 216
Figure 7.1 - Matrice de complaisance élastique d'après (Natterer et al., 2004, p. 76). 221
Figure 7.2 - Figuration des appuis au sol. 222
Figure 7.3 - Définition des sollicitations. 222
Figure 7.4 - Mode d'assemblage des facettes. 223
Figure 7.5 - Maillage des facettes du plissage par une division identique des arêtes de chaque facette. 223
Figure 7.6 - Matrice d'assemblage définissant le couplage entre panneaux. 224
Figure 7.7 - Moteur d'évaluation structurale. 226
Figure 7.8 - Image de la « déformée » de la structure sous son poids propre produit par le logiciel *Castem*®. 228
Figure 7.9 - Mesure expérimentale de la raideur en un point. 228
Figure 7.10 - Graphiques des résultats. 229
Figure 7.11 - Moteur d'évaluation thermique. 232
Figure 7.12 - Principaux postes de déperditions thermiques d'un bâtiment. Source ADEME. 232
Figure 7.13 - Rayonnement direct, diffus et réfléchi. 235
Figure 7.14 - Hauteur et azimut solaire (cf. Annexe 4). 235
Figure 7.15 - Ombres portées par l'enveloppe plissée de la chapelle Saint Loup sur elle-même. 237
Figure 7.16 - Projection de la géométrie sur le plan solaire. 237
Figure 7.17 - Calcul des points d'intersection et du point actif pour un rayon, et calcul de tous les points actifs pour une géométrie donnée, dans le cas d'un pourcentage de paroi vitrée par surface de l'enveloppe. 238
Figure 7.18 - Principe de fonctionnement du moteur d'évaluation thermique. 239
Figure 7.19 - Évolution des apports solaires journaliers au cours de l'année 242
Figure A2.1 - Composition générale d'un tronc d'arbre : 330

Figure A2.2 - Directions principales et plans de coupe d'une pièce de bois. 330
Figure A2.3 - Comportement global d'un échantillon de bois homogène (sans nœud) sous un effort de traction et de compression: 331
Figure A2.4 - Visualisation de la fibre selon le plan de coupe. 332
Figure A2.5 - Caractéristiques du nœud : 333
Figure A2.6 - Zone Initiale Poreuse (ZIP) du châtaigner. 333
Figure A2.7 - Dessin des cernes en fonction du mode de débit. 334
Figure A2.8 - Microdensitométrie d'un cerne (mesures de la densité du bois par absorption des rayons X). 335
Figure A2.9 - Mise en place d'une des treize « méga » poutres en bois d'épinette noire du Centre de Soccer de Montréal. 337
Figure A2.10 - Eau libre et eau liée dans le bois. 341
Figure A2.11 - Équilibre hygroscopique des bois. 342
Figure A2.12 - Effet de tuilage de planches débitées dans la section d'un tronc après séchage. 345
Figure A2.13 - Le fluage. 348
Figure A2.14 - La relaxation. 348
Figure A2.15 - Isotherme de pyrolyse à 300°C. 350
Figure A2.16 - Panneau de bois usiné avec une machine à commande numériques. 351
Figure A2.17 - Procédé « TOBI » (Tour à Bois Innovant) permettant un fraisage épicycloïdal miltidirectionnel. Société d'Innovation et d'Ingénierie en Machines-Ouitils (SIIMO). 352
Figure A3.1 - Chaise Thonet n°14, Hêtre courbé à la vapeur d'eau, 1859. 354
Figure A3.2 - Plywood Armchair, Gérald Summers, 1933. 354
Figure A3.3 - HygroSkin. Mise en forme des modules du pavillon par la technique du moulage sous vide. 355
Figure A3.4 - Benywood, tourillon de hêtre cintré à froid. 355
Figure A4.1 - Course apparente du soleil.: 359

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Dans un repère cartésien, les plissages représentant un degré « 0 » d'interpolation présentent un pattern où les directions des plis sont parallèles entre elles. Le profil du plissage est identique tout au long de l'extrusion. 71

Tableau 1.2 - Dans un repère cartésien, les plissages représentant un degré « 1 » d'interpolation présentent un pattern où les directions des plis peuvent varier. Ainsi, il existe plusieurs profils « différents » au sein d'un même plissage. 72

Tableau 1.3 - Dans un repère polaire, les plissages représentant un degré « 1 » d'interpolation présentent un pattern où les directions des plis sont rayonnantes. Le profil du plissage converge vers le point central du repère. 73

Tableau 2.1 - Intérêts et limites de quatre panneaux de bois choisis pour leurs caractéristiques structurales et d'usinabilité. 89

Tableau 5.1 - Table de plissage (T). La caractérisation des profils ainsi que la création des listes de tables sont décrites dans les sous-sections suivantes. 159

Tableau 5.2 - Caractérisation d'un profil. 160

Tableau 5.3 - Caractérisation d'un profil selon les composantes du vecteur ($\vec{R}$). 163

Tableau 5.4 - Tables de plissage. 165

Tableau 5.5 - Table de plissage. Le vecteur P est passé de trois composantes indépendantes à six composantes dépendantes. 166

Tableau 5.6 - Présentation des quatre possibilités de jonction de plissages par le choix des arêtes. 175

Tableau A2.1 - Valeurs moyennes de densité selon les essences. 335

Tableau A2.2 - Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques du bois, du béton et de l'acier à titre indicatif. 336

Tableau A2.3 - Durabilité naturelle et imprégnabilité des essences d'après la norme NF EN 350-2. 339

Tableau A2.4 - À gauche, le tableau de classement des résineux selon leurs valeurs caractéristiques; à droite, le tableau de classement des feuillus selon valeurs caractéristiques. 340

Tableau A2.5 - Limites et valeurs moyennes du coefficient de retrait et de gonflement (α) selon chacune des trois directions. 343

Tableau A2.6 - Ordre de grandeur de la conductibilité thermique des matériaux couramment utilisés dans la construction. 349

Table des matières

Résumé III

Abstract V

Remerciements XI

Sommaire XIII

Introduction XVII

Partie A
Présentation du contexte d'étude 27

Chapitre 1
L'attrait des structures plissées 29

1.1. Le plissage dans la nature 30

1.1.a. Les systèmes contenus 31

1.1.b. Les systèmes évolutifs 32

1.1.c. Les systèmes structuraux 34

1.2. Le plissage et ses applications constructives 37

1.2.a. La dimension structurale 37

1.2.b. La dimension spatiale 41

1.2.c. La dimension plastique 42

1.2.d. La dimension de l'ambiance 44

1.2.d.1. L'aspect thermique 45

1.2.d.2. L'aspect acoustique 45

1.2.e. La dimension constructive 47

1.2.e.1. L'aspect matériau 47

1.2.e.2. L'aspect économique 48

1.2.f. Synthèse 49

1.3. Le plissage dans la science 57

1.3.a. Le pli 57

1.3.a.1. La matière pliée 59

1.3.a.2. Le pli élémentaire 62

1.3.b. Le plissage 65

1.3.b.1. Les caractéristiques du plissage 65

1.3.b.2. Cas du brisis 68

1.3.c. Type et classement du plissage 70

Chapitre 2
La construction par panneaux de bois 75

2.1. Le bois, une ressource 75
2.2. Le bois, un matériau « dérivable » 81
2.2.a. Les caractéristiques du matériau bois 81
2.2.b. Les panneaux de bois 85
2.2.b.1. Les panneaux en bois massif 85
2.2.b.2. Le panneau composant 90
2.3. Les assemblages de panneaux 92
2.3.a. La notion d'assemblage 92
2.3.b. L'assemblage des panneaux 96
2.4. Le numérique et l'architecture en panneaux 100
2.4.a. Les spécificités de l'architecture numérique 100
2.4.b. L'architecture numérique et les panneaux de bois 104
2.5. L'architecture plissée en panneau de bois 109

Chapitre 3
Cas d'application : la New-Yourte 115

3.1. Le contexte 115
3.2. Investigations 117
3.2.a. La volumétrie 118
3.2.b. Le plissage 119
3.2.c. Les éléments singuliers 121
3.2.d. La matérialisation 121
3.2.e. L'évaluation 123
3.2.f. Le calepinage 125
3.2.g. La fabrication 126
3.2.h. Le montage 128
3.2.i. La validation 130
3.2.j. Synthèse 131

Partie B
Proposition d'un modèle numérique 135

Chapitre 4
Présentation du modèle théorique 137

4.1. Présentation préliminaire 138
4.1.a. Le modelage 138
4.1.a.1. La volumétrie générale 138
4.1.a.2. Le plissage 139
4.1.a.3. Les éléments singuliers 140
4.1.b. La matérialisation 140
4.1.b.1. Le matériau « produit » 141
4.1.b.2. Les assemblages 142
4.1.b.3. La gestion des nœuds 142
4.1.c. L'évaluation 143
4.2. Organigrammes de la méthode 144
4.2.a. La phase de modelage 146
4.2.b. La phase de matérialisation 150

Chapitre 5
La modélisation géométrique 153

5.1. Traitement de la surface de référence 155
5.1.a. Orientation de la normale 156
5.1.b. Ordre des arêtes 157
5.2. Les tables de plissage 159
5.2.a. La caractérisation des profils 159
5.2.a.1. Les grandeurs du profil 160
5.2.a.2. La génération des profils 162
5.2.b. Les listes de tables 164
5.2.b.1. Notion de « vecteur de déplacement » 165
5.2.c. Opérations sur les tables de plissage 166
5.3. La visualisation géométrique 167
5.3.a. Matérialisation du profil 167
5.3.b. Matérialisation des facettes 169
5.4. La jonction du plissage 174
5.5. Les éléments singuliers 178

Chapitre 6
La matérialisation 181

6.1. La mise en épaisseur 182
6.1.a. Cas de l'épaisseur variable 184
6.1.b. Cas de l'épaisseur constante 189
6.2. La gestion des nœuds 192

6.3. Les assemblages 199
6.3.a. Cas de l'assemblage par queues droites 204
6.3.b. Cas de l'assemblage par rainures et languettes 206
6.4. Mise à l'épreuve de l'outil CARA(s)PACE 211
6.4.a. Reconstitution de la chapelle St Loup de Pompaples. 211
6.4.b. Reconstitution de la New-Yourte. 214

Chapitre 7
Les moteurs d'évaluations 219

7.1. Le moteur d'évaluation structurale 220
7.1.a. La méthode de calcul aux éléments finis 221
7.1.a.1. La modélisation des panneaux 221
7.1.a.2. La modélisation des liaisons entre panneaux 223
7.1.a.3. Le traitement des résultats 225
7.1.a.4. L'environnement numérique 226
7.1.b. Analyse de l'expérience 227
7.2. Le moteur d'évaluation thermique 231
7.2.a. Les déperditions thermiques 232
7.2.b. Les apports solaires reçus par une surface vitrée 234
7.2.b.1. Le rayonnement solaire 235
7.2.b.2. Le facteur d'ombrage 236
7.2.b.3. Intégration des apports solaires 238

Conclusion 245
Bibliographie 253
Filmographie 261
Annexe 1
Références architecturales 263
Annexe 2
Les caractéristiques du bois 329
Annexe 3
Le cintrage du bois 353
Annexe 4
Azimut et hauteur solaires 357
Liste des illustrations 361
Liste des tableaux 369

Proposition d'un modèle numérique pour la conception architecturale d'enveloppes structurales plissées
Application à l'architecture en panneaux de bois

Résumé : L'objectif de notre recherche consiste à caractériser le concept de plissage afin de proposer un modèle numérique permettant de concevoir des structures architecturales plissées en panneaux de bois.
Dans ce contexte, nous ouvrons une perspective originale sur l'intégration de la dimension morpho-structurale comme facteur de modulation de l'architecture. Nous abordons également le plissage dans sa dimension numérique par une approche paramétrique. Cette dernière permet une modélisation adaptative dans le continuum conception-fabrication.
Notre méthode, implémentée dans l'outil CARA(s)PACE (Conception of Architectural Research Algorithm for Structural Pleated Approaches and Creative Envelopes), permet de générer une géométrie de plissage à partir d'une surface de référence. Cet outil est composé d'un modeleur géométrique paramétrique couplé à des moteurs d'évaluation. Il guide le concepteur dans la recherche de formes fondées sur le plissage, sécurise les propositions et fournit les données numériques nécessaires pour une fabrication robotisée.

Mots clés : Architecture, Structure plissée, Modélisation paramétrique, Fabrication robotique, Panneaux de bois

Proposition of a digital model for architectural design of pleated structural envelopes
Application to architecture with wooden panels

Abstract: The purpose of this research is to characterise the concept of pleating in order to give a numerical model allowing the design of wooden pleated architectural structures.
In this context, we are bringing a singular perspective to the integration of the morpho-structural dimension as a modulating factor of architecture. We also deal with creasing in its digital dimension by adopting a parametric approach which allows an adaptive modelling within the 'design-manufacturing' continuum.
Our method, implemented in the CARA(s)PACE (Conception of Architectural Research Algorithm for Structural Pleated Approaches and Creative Envelopes) tool, generates a geometry of pleating from a reference surface. This tool is composed of a parametric and geometric modeller coupled with evaluation engines. It guides the designer in the research of forms based on creasing, secures the suggestions and provides the numerical data needed for a robotic manufacturing.

Key-words: Architecture, Pleated structure, Parametric modelling, Robotic manufacturing, Wooden panels.