

Structures innovantes en bois

Yves Weinand (éd.)

Structures innovantes en bois

Conception architecturale et
dimensionnement numérique

Birkhäuser
Basel

Table des matières

| | | |
|---|---|------------|
| | Introduction | 6 |
| 1 | Structures plissées | 13 |
| 2 | Géométries modernes en architecture | 49 |
| 3 | Flexion active | 91 |
| 4 | Recherche de forme et étude mécanique de structures porteuses à flexion active | 125 |
| 5 | Fabrication numérique | 189 |
| | Le laboratoire de recherche IBOIS de l'EPFL – École polytechnique fédérale de Lausanne | 236 |
| | Table des illustrations | 237 |

Comment l'innovation formelle et technologique peut-elle inscrire le secteur du bâtiment dans la perspective du développement durable ?

Yves Weinand

La construction en bois a de beaux jours devant elle. Il suffit de penser aux défis climatiques auxquels doit faire face notre planète et à la nécessité de rechercher et de mettre en œuvre des solutions durables, y compris pour le marché du bâtiment et les matériaux qu'il utilise. Or, on sait depuis des années qu'il faut moins d'énergie pour fabriquer le bois destiné au bâtiment que pour d'autres matériaux de construction. Mais les défis de l'industrie du bâtiment en termes de durabilité touchent également la question de la forme architecturale. Au laboratoire de Construction Bois de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, IBOIS/EPFL, nous nous sommes demandé comment utiliser l'innovation formelle et technologique pour engager le bâtiment sur la voie du développement durable. Le renouveau des technologies de construction et des procédés techniques dans la construction bois peut, en tenant compte des qualités traditionnelles de ce matériau, conduire à une utilisation accrue de celui-ci dans la construction contemporaine. Et cette démarche répond aussi au principe de longue durée ou de longévité, qui est la base de la modernité : est moderne ce qui dure ou ce qui résiste au temps.

Le bois est généralement considéré comme un matériau de construction traditionnel. Cette image est un atout quand il s'agit de légitimer socialement la recherche sur des formes complexes ou la création de surfaces libres qui font appel à ce matériau.

S'approcher de géométries complexes (en bois) dans l'optique du constructeur, et pas seulement dans l'optique de créer des formes, peut être compris comme une volonté affichée de prendre ses distances avec les tendances à la mode, comme par exemple ce qu'on appelle la blob architecture – une architecture qui présente des formes libres et molles. De nombreuses constructions qualifiées de blob architecture ignorent complètement le problème de la durabilité, d'une part en raison des matériaux utilisés et d'autre part en raison de leur consommation énergétique et de leurs frais d'entretien.

Néanmoins, nul ne peut plus ignorer le gain énergétique que procure l'utilisation du bois comme matériau de construction, y compris en termes d'analyse du cycle de vie et de démolition des bâtiments. Matériau de

construction naturel, le bois requiert moins d'énergie que d'autres matériaux pour sa production, sa transformation ainsi que pour l'assemblage et la durabilité de ses constructions. Ce processus d'innovation technologique et formelle est une attente du public. Les clients publics et privés sont de plus en plus demandeurs de solutions de construction qui soient à la fois durables et de grande qualité architecturale. Les architectes et les maîtres d'œuvres doivent répondre à cette demande, en initiant et en pilotant des processus innovants comme ceux dont il est question ici. Il faut également trouver des solutions adaptées pour des formes d'architecture « atypiques » à la fois durables et économiques.

Durabilité

Avec le changement climatique, le concept de durabilité est définitivement devenu une problématique centrale pour notre société du 21^{ème} siècle. À cet égard, les résultats de recherche présentés ici reposent sur la réflexion suivante : l'extension des possibilités d'utilisation du bois pourrait-elle augmenter l'usage de ce matériau dans la construction de bâtiments publics ?

Un édifice – quel qu'en soit le type ou la fonction – est toujours composé d'une grande quantité de petits éléments. Le bois et ses dérivés résultent de l'assemblage de petits morceaux : bois massif, bois équarris, contreplaqué et panneaux en lamibois sont toujours issus de la découpe et/ou de l'assemblage de plusieurs éléments plus petits. D'où la nécessité, quand on réunit ces matériaux pour réaliser un bâtiment, de prendre aussi en compte les techniques d'assemblage utilisées. La diversité des dérivés du bois existants et la quantité considérable de possibilités d'utilisation devraient déterminer les procédés de fabrication et de préfabrication.

Les résultats de recherche présentés ci-après ont pour objectif de répondre à ces questions. Ce qui nous intéresse, c'est de proposer de nouvelles solutions de construction susceptibles d'être adoptées directement par les magasins de bricolage pour faciliter la réalisation d'une architecture non conventionnelle accessible.

Les outils de conception numérique figurent parmi les instruments les plus précieux pour réduire les coûts de construction. Il paraît donc de plus en plus nécessaire de concevoir des outils informatiques spécifiques à orientation pratique. Nos outils doivent s'insérer à la croisée de l'architecture/du génie civil, du dimensionnement mécanique/de la configuration géométrique, de la recherche formelle/de la préfabrication numérique paramétrique à toutes les étapes spécifiques d'un projet.

Le Laboratoire de construction en bois, IBOIS/EPFL

Dans les diverses recherches lancées par le Laboratoire de construction en bois, IBOIS, les relations entre sciences de l'ingénieur et conception architecturale font l'objet d'un questionnement approfondi. L'IBOIS fait partie intégrante de l'Institut d'ingénierie civile ENAC/EPFL mais il entretient également des liens forts avec la section architecture par le biais d'un atelier de conception architecturale proposé dans le cadre du programme de master. La coopération entre architectes et ingénieurs y est encouragée afin de créer un environnement propice à l'élargissement de la communauté scientifique au sein des écoles d'architecture à l'échelle européenne.¹

Les résultats de recherche présentés ici portent sur des questions de construction et les difficultés que représentent la réalisation de formes libres et de surfaces complexes. Quel lien existe-t-il entre recherche fondamentale et recherche appliquée ? Quelle relation y a-t-il entre la recherche pure et la recherche appliquée – ou entre une recherche mue par la soif de connaissance et une recherche axée sur la résolution de problèmes (« problem oriented ») ? Et pour finir : comment concilier la dimension scientifique de la recherche en architecture avec la pratique artistique du travail sur le projet architectural ?

L'IBOIS est un lieu d'innovation, où la fascination de l'approche expérimentale inductive s'allie à la clarté des méthodes de déduction scientifiques. L'objectif est de créer de nouvelles formes et nouveaux types de



III.1 Panneaux tricouche

structures – notamment en bois. Outre ses qualités durables, le bois possède également des propriétés mécaniques exceptionnelles qui peuvent être mobilisées dans des formes spécifiques d'ouvrages porteurs.

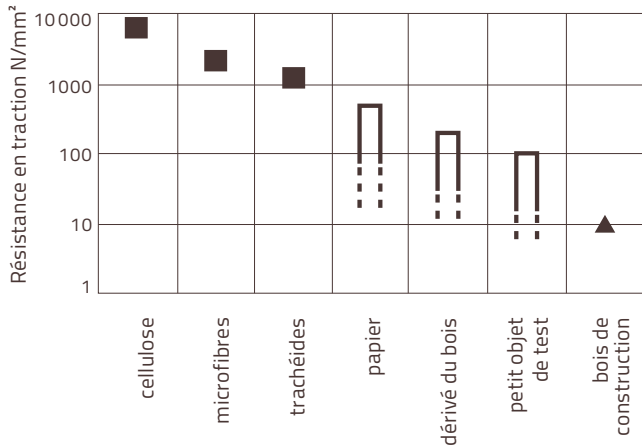
Les charpentes formées d'éléments rectilignes ont marqué la construction en bois pendant des siècles. Mais contrairement à l'acier et plus tard au béton armé – matériaux dominants aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles – les ingénieurs n'ont pas cherché à développer le bois comme matériau de construction. Avec le développement des outils informatiques, il est désormais possible d'élargir considérablement le champ d'application de ce matériau. Ces nouveaux outils permettent d'envisager de nouvelles géométries ainsi que des matériaux et des modes de construction innovants. Bref, il s'agit là d'un nouveau champ d'investigation en ingénierie de la construction en bois. Ici, la possibilité d'utiliser des matériaux dérivés du bois à surface portante, par exemple les panneaux grand format multicouche, en contreplaqué de planche ou en lamibois, joue un rôle essentiel.

Qualités intrinsèques du bois de construction

Aujourd'hui encore, on peut considérer la construction en bois comme une continuation des formes et des méthodes de construction traditionnelles. Dans la plupart des cas, on continue d'utiliser des ouvrages porteurs ou des systèmes de construction traditionnels, par exemple la construction à ossature ou les poutres en treillis. Mais

| Propriétés caractéristiques | Petit objet de test | Élément de construction | Différence par rapport au petit objet |
|---|---------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Résistance de flexion (valeur moyenne, N/mm ²) | 68 | 37 | 46% |
| Résistance en traction parallèlement aux fibres (valeur moyenne, N/mm ²) | 80 | 30 | 63% |
| Résistance en compression parallèlement aux fibres (valeur moyenne, N/mm ²) | 40 | 32 | 20% |

Tableau 1



III. 2

Tableau 1 Valeurs de résistance de petits objets de test en sapin
 III. 2 Évolution des valeurs de résistance de la cellulose ($f_v = 100 \text{ N/mm}^2$) au matériau de construction bois ($f_v = 10 \text{ N/mm}^2$)

avec les nouveaux matériaux dérivés du bois, il est temps d'inventer de nouveaux systèmes de construction à la fois adaptés et innovants. Le lien entre la construction en bois et le développement et la conception de coupes et de techniques d'assemblage est plus direct que dans le cas de l'acier et surtout du béton armé. Par exemple, il n'est pas possible de concevoir une structure portante en bois sans concevoir également tous les nœuds de raccordement et intégrer ces deux aspects – la structure portante et ses nœuds – dans l'appel d'offre.

Dans la formulation de leurs modèles statiques et de leurs conditions d'appuis, les ingénieurs qui travaillent avec le bois doivent nécessairement clarifier au préalable les moindres détails de construction et intégrer avec toute la précision locale requise les modèles statiques correspondants à leur modèle de calcul global. Par là même, ces ingénieurs retrouvent leur rôle de constructeurs proprement dit. Le bois offre ainsi, dès le début du processus de planification, une ouverture interdisciplinaire hors du commun, avec la nécessité pour l'ingénieur, l'architecte et l'entreprise exécutante de vérifier

d'emblée qu'ils partagent une même vision des choses. Notons à cet égard que le choix des types de panneaux peut et devrait être déterminant dans celui de la forme et du type du système porteur.

Voici les observations plus spécifiques que l'on peut faire à propos du bois :

La question de l'échelle

La taille de la pièce de bois utilisée détermine sa résistance et donc aussi le champ de ses applications. En comparaison, lorsqu'un petit objet (« clear wood ») est testé, il présente des caractéristiques mécaniques nettement supérieures à celles d'une planche aux dimensions normales. Par exemple, dans le tableau 1 ci-dessous, les valeurs étonnamment élevées d'un petit objet de test pour le sapin ont été classées par Peter Niemz². On peut donc constater qu'il y a d'importantes déperditions dans le processus de dimensionnement car des valeurs nettement inférieures ont été sélectionnées ici.

Anatomie du bois

L'illustration 3 montre les trois axes principaux du bois en prenant l'exemple d'un tronc vu en coupe : l'axe longitudinal, l'axe tangentiel et l'axe radial de la fibre. En pratique, on ne fait guère de différence entre axe radial et axe tangentiel et l'on choisit généralement une valeur moyenne. En outre, ces trois axes sont placés dans un système d'axes cartésien conforme à la géométrie descriptive utilisée dans l'histoire de la construction. C'est sur cette géométrie que reposent les principes de la science de la résistance des matériaux. Le repère cartésien est efficace pour décrire un matériau isotrope mais il l'est moins pour un matériau anisotrope comme le bois. Par exemple, l'axe longitudinal de la fibre est considéré comme parfaitement rectiligne. Or cela n'est qu'en partie vrai pour l'axe longitudinal du bois naturel, qui converge vers la cime du tronc, suivant une forme de cône. Une modélisation plus perfectionnée ou plus précise devrait donc tenir compte de ces propriétés spécifiques du matériau. Il serait intéressant d'envisager des modèles mécaniques spécifiques à chaque essence d'arbre, par exemple en numérisant la configuration exacte des fibres d'un tronc donné, pour ensuite l'exploiter mécaniquement dans le cadre d'une application particulière déterminée.

Le problème de l'anisotropie du bois a déjà été traité, par exemple lors de l'invention du contreplaqué, qui, comme son nom l'indique, plaque les fibres les unes contre les autres. Quand on superpose plusieurs couches en les entrecroisant, on obtient une structure homogène ou quasi-isotrope.

Le facteur système

Une chaîne se casse quand son maillon le plus faible défaille. En revanche, ce qu'on appelle un système continue de fonctionner même après la rupture de l'élément le plus faible.

Un matériau en bois – système Duo, lamellé-collé ou panneau en lamibois –, formé de plusieurs éléments collés les uns aux autres, peut donc être qualifié de système. On parle alors de systèmes multicouches.

Ce principe peut être appliqué à un matériau spécifique mais aussi à un système porteur. Le lamellé-collé, composé de plusieurs lamelles superposées, en est un exemple courant. Le calcul de la résistance varie avec le nombre de couches ou de lamelles. Si le nombre de couches ne dépasse pas quatre, les dimensions de la poutre sont calculées comme celles d'une poutre classique. S'il est supérieur à quatre, un facteur système peut être appliqué. Il augmente selon un rapport défini la résistance de la poutre. En termes de probabilité, la probabilité de défaillance d'une lamelle diminue avec l'augmentation du nombre de lamelles.

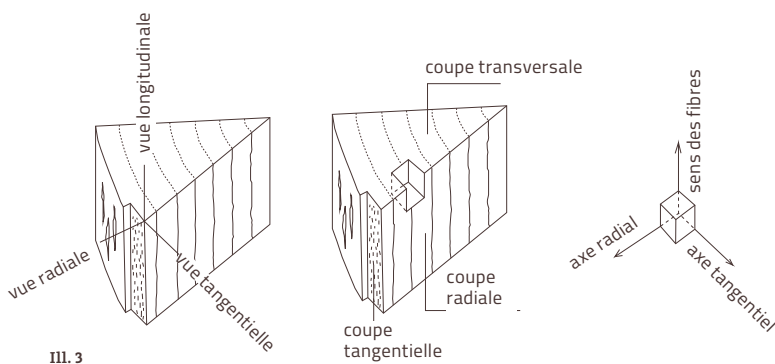
Le système réciproque, par exemple celui de Zollinger, est un autre exemple courant. Quand un élément de la configuration rhomboïdale d'une charpente en nid d'abeille de type Zollinger se casse – par exemple sous l'effet d'un vent particulièrement fort –, il ne cause pas la rupture du système tout entier. On parle alors de structure porteuse sociale : le membre le plus faible est soutenu par les membres situés à proximité immédiate.

Ces remarques nous conduisent à deux principes :

- Il est intéressant de produire ce type de matériaux dérivés du bois où l'effet système influence au maximum la résistance générale de l'élément.
- Il est intéressant de développer de tels systèmes porteurs, dans lesquels l'interdépendance maximale des éléments est la plus forte.

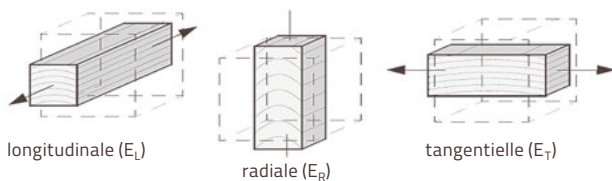
Si aujourd'hui on applique ces réflexions aux dérivés du bois, par exemple au lamellé-collé, on constate que leur application prospective à des systèmes porteurs entiers pourrait permettre à ces derniers de bénéficier également d'un facteur système.

Les réalisations classiques des charpentiers profitent très rarement d'un effet système ; dans la plupart des cas, la défaillance d'une panne ou d'une poutre maîtresse provoque l'effondrement de la charpente ou des combles. Il en va de même dans la construction en bois recourant aux assemblages classiques. La défaillance locale d'un raccordement cause l'effondrement de l'élément maintenu en position au moyen de ce raccordement.

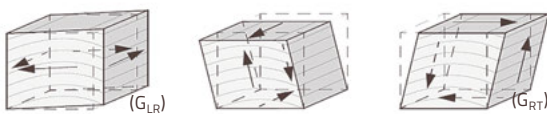


III. 3

module d'élasticité E – déformation normale :



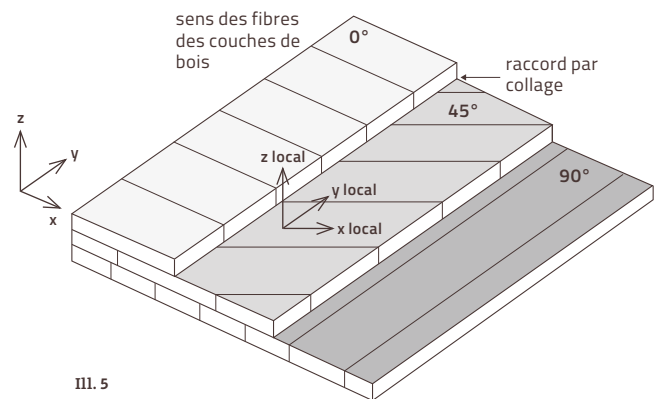
module de cisaillement G – déformation par cisaillement :



module d'élasticité E (dans le sens radial, longitudinal et tangential)
 $E_T/E_R/E_L = 1/1.7/20$ (bois tendre)
 $E_T/E_R/E_L = 1/1.7/13$ (bois dur)

module de cisaillement G (dans le sens radial, longitudinal et tangential)
 $G_{LR}/G_{LT} = 1/1$ (bois tendre)
 $G_{LR}/G_{LT} = 1.7/1$ (bois dur)

III. 4

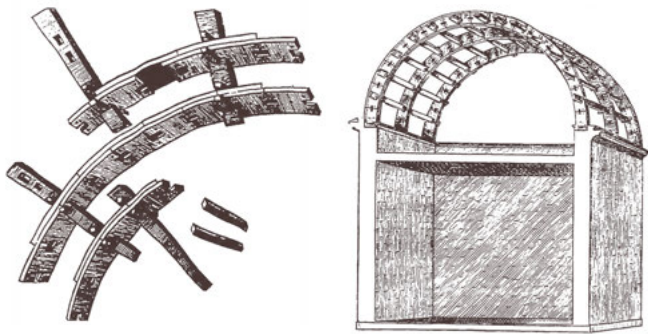


III. 5

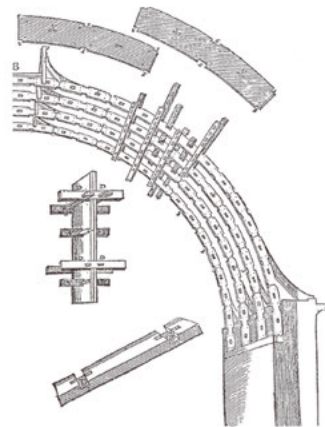
III. 3 Les trois directions des fibres de bois sont placées dans un système d'axes cartésien.

III. 4 Le module d'élasticité et le module tangential varient énormément.

III. 5 Principe du contreplaqué



III. 6 Philibert de l'Orme : les planches décrivent une partie de l'arc et sont montées sur chant. Par conséquent, le bord de chaque planche décrit une partie de l'arc. Une proportion importante des fibres de bois de la planche aboutit donc dans le vide ou dans le bord de la planche, car elles ne suivent pas l'orientation principale de la courbure comme l'exigerait le comportement sous charge d'un arc.



III. 6

Les structures portantes présentées dans le paragraphe suivant se composent d'un grand nombre d'éléments plus petits. La nécessité de développer ce type de systèmes porteurs, qui assurent une interdépendance particulièrement forte des éléments, concerne toutes les structures portantes présentées ci-dessous.

Une nouvelle génération de structures portantes

Le bois peut-il en faire plus que ce que l'histoire de la construction a montré jusqu'à aujourd'hui? Les constructions en bois peuvent-elles trouver une expression architecturale plus contemporaine? On est tenté de répondre par l'affirmative à ces questions quand on observe les édifices présentés dès 1615 par Philibert de l'Orme. Se fondant sur des recherches, de l'Orme proposait d'utiliser de petites pièces en bois de second choix. Il conjugait ce principe avec des innovations géométriques qui permettaient d'obtenir de plus grandes portées. Mais ses idées novatrices ne s'imposèrent pas car leur mise en œuvre était trop laborieuse : en effet, il fallait découper à la main individuellement et chacune des planches et chacun des raccords.

Aujourd'hui, les structures portantes de de l'Orme pourraient être usinées en CNC et préfabriquées industriellement à moindre coût ; les difficultés de son époque ne se poseraient donc plus. Quant à l'aspect architectural d'un système en réseau, il peut tout-à-fait être considéré comme contemporain.

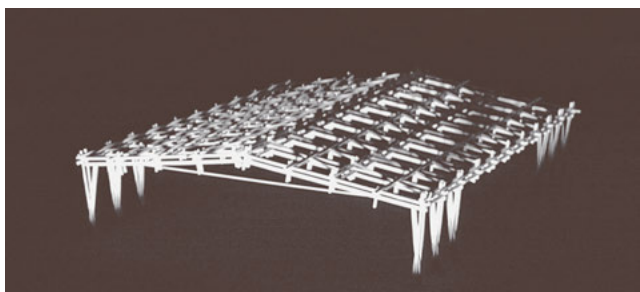
Les idées de de l'Orme ont notamment influencé les ouvrages militaires de l'armée française. Pour couvrir les manèges d'équitation, le colonel Armand Rose Émy proposa des structures portantes construites par assemblage d'une grande quantité de petits éléments en bois de second choix. Mais cette fois, les planches étaient montées en position horizontale ou plutôt dans une position horizontale activement cintrée. De cette façon, le cintrage local de chaque planche suivait la courbure générale de la construction en arc. Ce système évite d'une part les chutes de bois et, d'autre part, d'un point de vue mécanique, ces planches travaillent nettement mieux car leurs fibres longitudinales suivent la ligne de force de l'arc.

La Multihalle de Mannheim, objet de nombreuses publications, (Otto/Mutschler, 1975) est l'un des exemples les plus extraordinaires de structures portantes spatiales assemblées à partir de structures réticulées. La structure réticulaire double couche se compose de lattes de bois cintrées activement de section transversale carrée qui absorbent très bien les forces normales et épousent également la courbe des pressions.

Comme troisième et dernier exemple de système porteur particulièrement novateur, on ne manquera pas d'évoquer le projet de halle industrielle de Botrange, en Belgique. La structure portante se compose de simples planches sur plusieurs couches qui se croisent et qui for-



III. 7



III. 8

III. 7 Multihalle Mannheim : vue d'ensemble de la structure en coque d'une portée de 60 m. Quatre couches de nervures sont reliées entre elles dans les nœuds.

III. 8 Étude de concours pour une halle industrielle à Botrange, Belgique

ment une résille. Les planches traversent les points nœuds au niveau desquels elles sont simplement reliées sur les côtés par des chevilles insérées verticalement. Il en résulte un ouvrage porteur spatial composé d'un grand nombre de petits éléments. La rigidité locale des nœuds peut être accrue en insérant des chevilles supplémentaires, ce qui augmente aussi la rigidité globale du système.

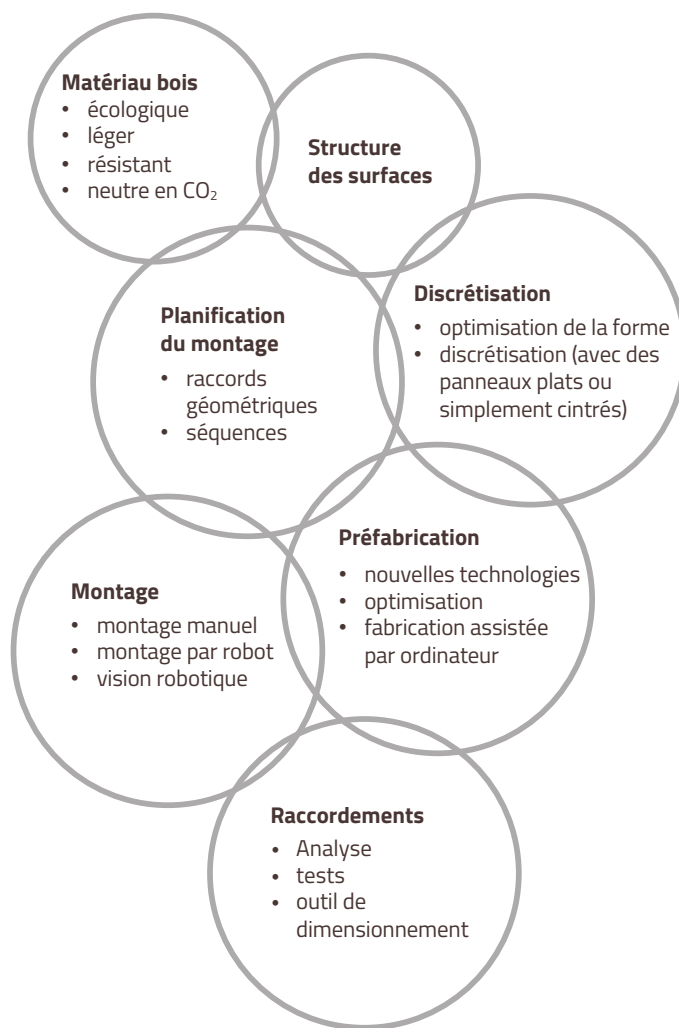
Les constructions à ossature ainsi que les systèmes de poteaux-poutres restent très répandus dans la construction bois. Dans la mise en œuvre de ces systèmes, des raccordements sont ajoutés individuellement sur le chantier. En outre, des éléments de plancher et des structures de cloison semi-finis sont apparus depuis et ont réussi à s'imposer.

Par la suite, nous essaierons de créer des systèmes préfabriqués sur mesure qui recourront à des séquences d'assemblage, des techniques de raccordement et des éléments préfabriqués parfaitement précis. Du fait de leur forme ou de leur géométrie spécifique, ces pièces spécialement fabriquées ne pourront être insérées qu'à un seul endroit du système et seulement dans une position bien particulière. L'objectif est ici d'éviter les erreurs, courantes sur les chantiers.

L'organisation actuelle de nos chantiers ressemble encore largement à celle du 19^{ème} siècle. La nécessité pour le chef de chantier de lire et de comprendre le plan d'exécution et de le relier aux éléments livrés sur le chantier doit être remplacée par une planification préalable différente, plus efficace. Le déroulement des travaux devrait être déterminé par des systèmes de raccordement sur mesure, des séquences d'assemblage prédéfinies et des techniques de raccordement entièrement mécaniques. Voilà pourquoi, dans la suite de l'ouvrage, nous nous intéresserons à des domaines aussi divers que la mathématique des surfaces, les algorithmes géométriques, les processus de subdivision, les procédés de planarisation, les séquences de raccordement, les techniques de fraisage automatisées, le développement des outils, les tests mécaniques ainsi que la mise en œuvre de processus d'assemblage manuels et robotisés. Le schéma reproduit ici permet de visualiser les domaines d'interaction des activités de recherche de l'IBOIS. Nous présenterons des systèmes de pliage, des surfaces libres discrétisées, des structures portantes tissées et cintrées activement ainsi que des systèmes porteurs mécaniques. Les raccordements feront eux aussi l'objet d'une attention particulière.

Remarques

- 1 Je remercie le professeur Pierre-Alain Croset pour ses remarques critiques et ses suggestions.
- 2 Keunecke, D. et Niemz P., Axial stiffness and selected structural properties of yew and spruce microtensile specimens, Wood Research, 53, p. 1–14, 2008.



III. 12 Interactions entre les activités de recherche de l'IBOIS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Structures plissées | |
| 1.1 | Structures plissées en panneaux de bois Yves Weinand | 14 |
| 1.2 | Optimisation structurale des structures en plaques de bois plissées Andrea Stitic et Yves Weinand | 32 |
| 1.3 | « La recherche doit conduire à la réalisation d'un produit » Entretien entre Ueli Brauen et Yves Weinand | 40 |
| 1.4 | La chapelle des diaconesses de Saint-Loup à Pompaples (Suisse) Marielle Savoyat | 44 |

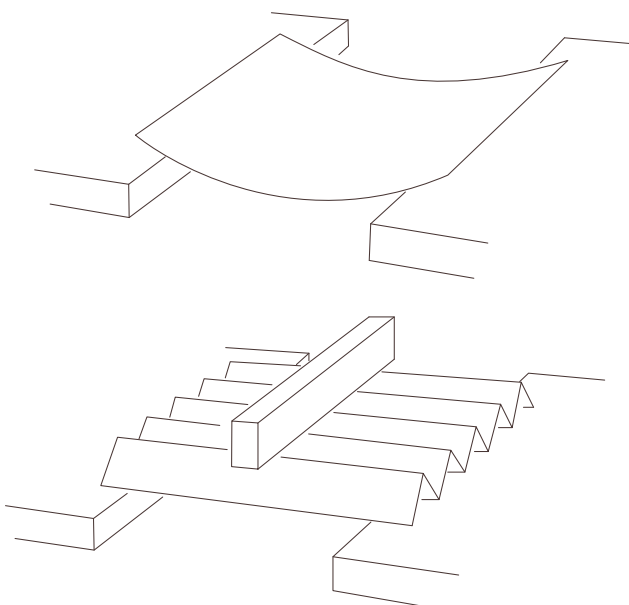
Structures plissées en panneaux de bois

Yves Weinand

Les structures plissées sont des constructions étonnantes où forme et ossature entretiennent une relation étroite et se conditionnent réciproquement. Ces structures plissées peuvent prendre des formes ou des silhouettes variées. Le pliage confère une grande rigidité à ces structures porteuses alors que l'épaisseur des panneaux reste faible par rapport à la portée des éléments. Ces constructions sont en outre très économiques du fait des matériaux employés, et se caractérisent par une grande légèreté.

Les structures plissées fabriquées en panneaux de bois ne se sont pas encore imposées dans l'univers du bâtiment. Dès les années 1930, on a imaginé des enveloppes associées à des structures porteuses en béton armé. À cette époque, il était important d'utiliser des supports prismatiques préfabriqués identiques afin de limiter le coût des coffrages en panneaux de bois. Dans les années 1970, des structures plissées entièrement réalisées en panneaux de bois furent conçues, mais l'initiative resta sans suite.

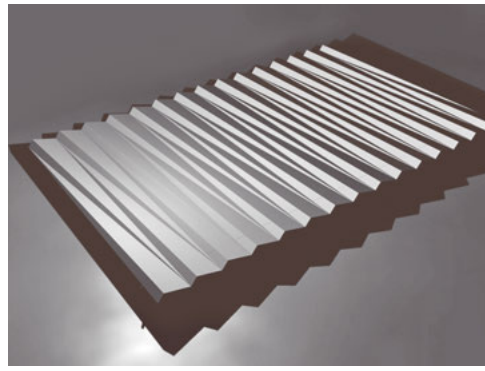
Cet ouvrage se propose d'étudier la manière dont les structures plissées en panneaux de bois pourraient trouver leur place sur le marché. Nous présentons ci-après trois projets qui permettent de cerner une évolution possible des constructions plissées en panneaux de bois. Ils mettent en évidence différents aspects de ces structures, d'un point de vue formel, mécanique et relatif aux conditions de fabrication. Comme on l'a déjà dit, le pouvoir d'attraction des constructions plissées vient tout d'abord de l'adéquation parfaite entre forme et structure. On peut réaliser des expériences avec des surfaces ou des



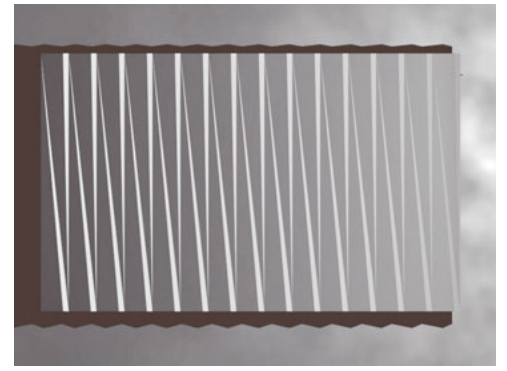
III.1



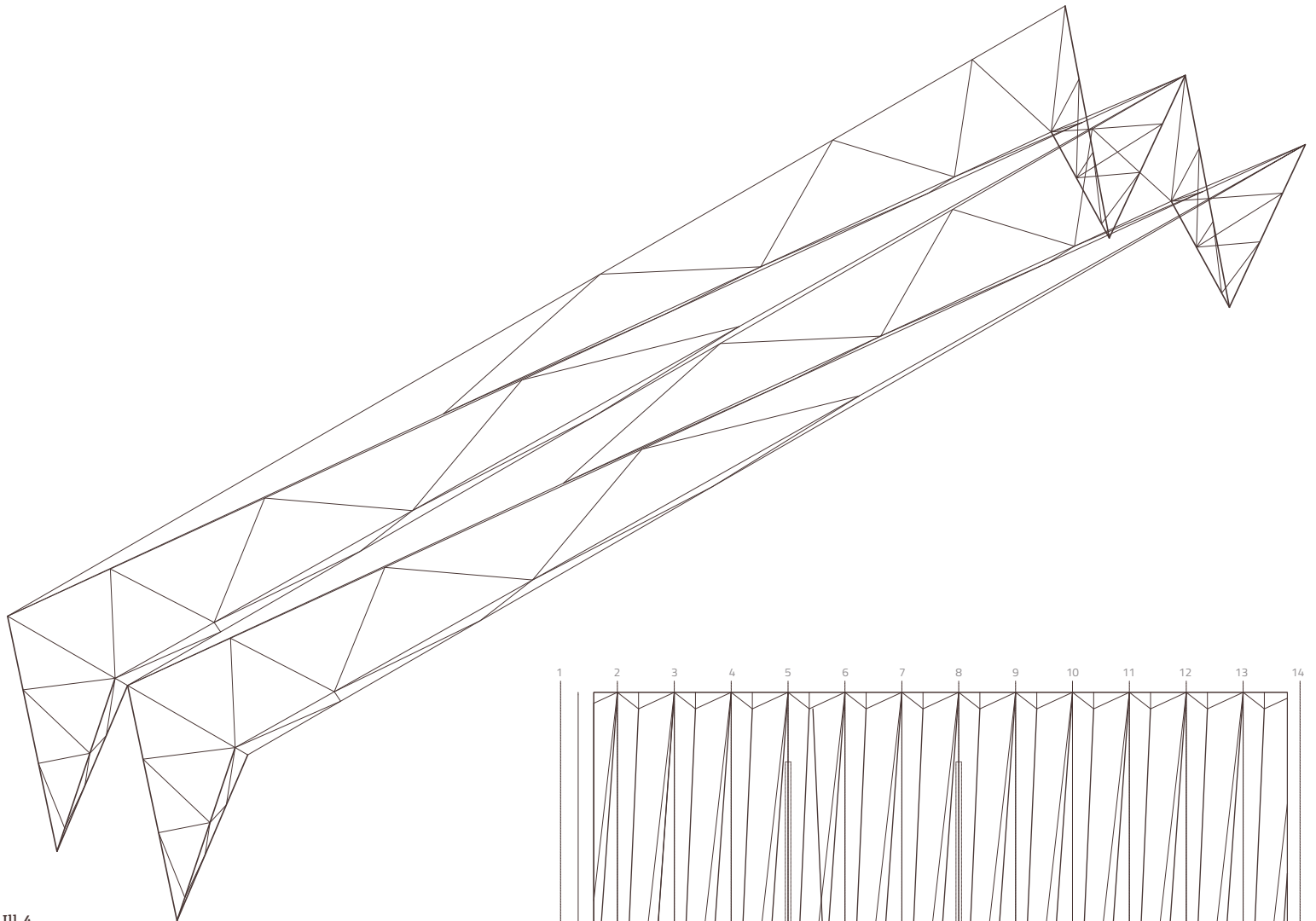
III. 2



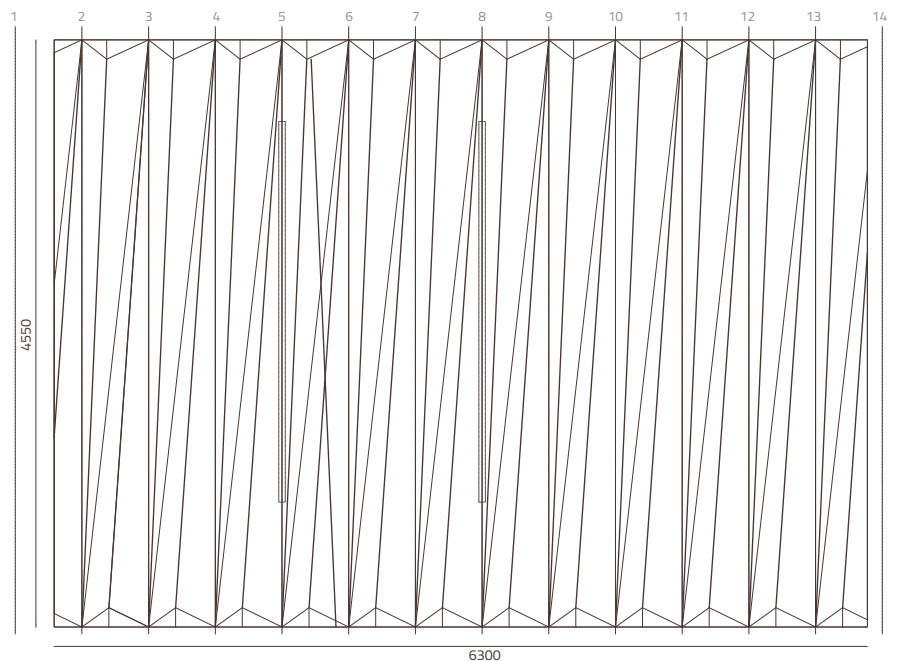
III. 3 a



III. 3 b

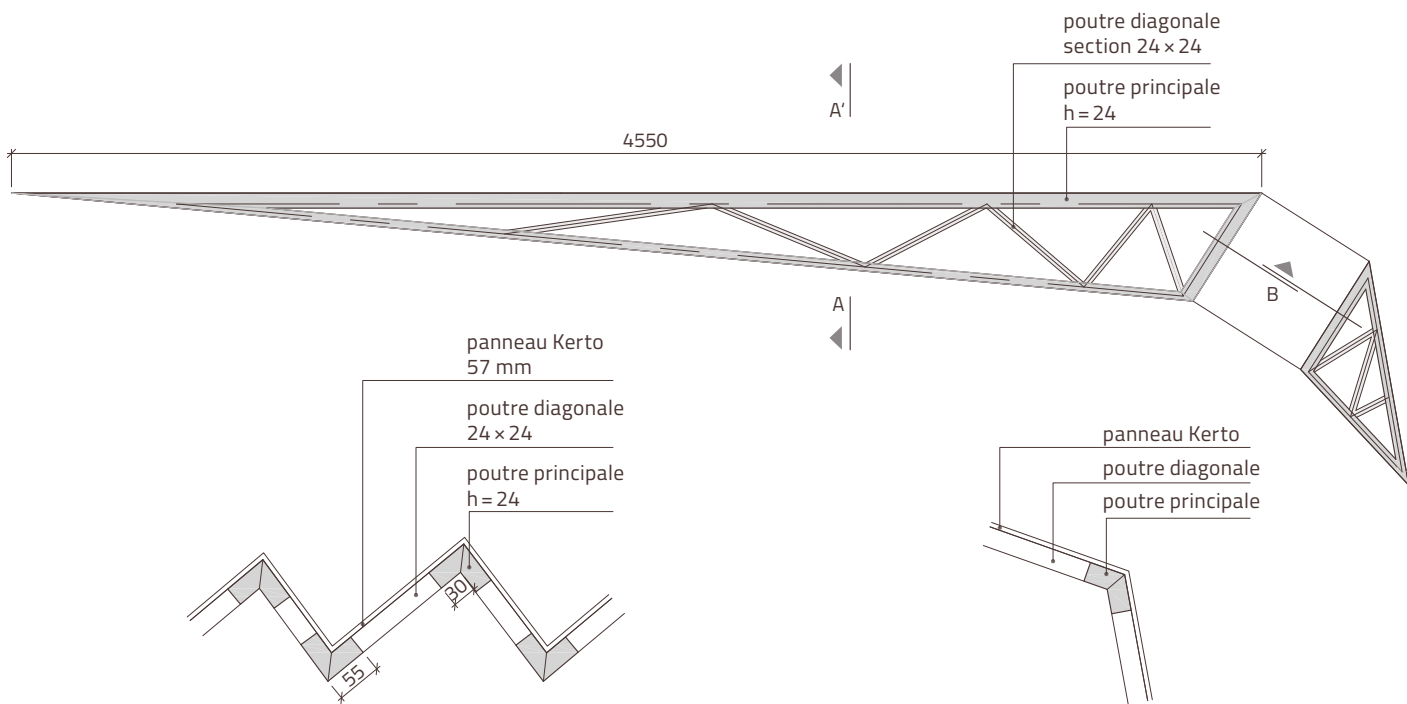


III. 4



III. 5

- III. 1 Principe du pliage: ce sont les plis qui créent la rigidité.
- III. 2 Structure plissée expérimentale
- III. 3 a et b Représentation axonométrique et en plan d'une structure plissée
- III. 4 Représentation axonométrique de l'élément de base selon la géométrie initiale
- III. 5 Plan de l'élément de base de la géométrie initiale



III. 6 Transformation du système porteur : le panneau est remplacé par une poutre en treillis recouverte de panneaux nettement moins épais.

panneaux de grand format relativement souples en les assemblant le long de leurs arêtes de manière à former des « plis ». L'arrangement géométrique des plis et la « fixation » d'une position spatiale déterminée et arbitrairement choisie pendant le processus de pliage ouvrent un vaste potentiel pour l'optimisation structurelle de ces ossatures porteuses.

Le premier exemple retenu est le toit du centre sportif des Isles, à Yverdon, prévu à l'origine pour être une structure plissée. Les études préalables portaient sur la définition géométrique d'un toit plissé autoporteur d'environ 45 mètres de portée. Pour la géométrie présentée sur la figure 3a, qui devait constituer la structure membranaire porteuse en panneaux de

lamibois, les calculs ont déterminé que les panneaux devaient avoir une épaisseur de près de 14 cm. Or les panneaux disponibles dans cette épaisseur sont coûteux.

Cela étant, la difficulté réelle de cette construction ne réside pas dans la découpe ni dans le montage des panneaux mais plutôt dans l'exécution de leurs liaisons mutuelles. C'est pourquoi on s'est rapidement tourné vers d'autres types de réalisations visant à la fois à diminuer l'épaisseur des panneaux et à offrir une solution concluante pour leur assemblage. L'une de ces solutions est présentée sur l'illustration 6.

Les éléments de bois lamellé-collé forment une ferme en treillis triangulée dont les vides sont recouverts à l'extérieur de panneaux. De ce fait, la poutre en treillis est visible de l'intérieur du gymnase tandis qu'à l'extérieur elle offre la surface nécessaire à la pose de l'isolation thermique et de l'enveloppe de toit. Le raccord est possible grâce à la découpe des poutres de rives : Les poutres lamellées-collées sur les côtés doivent être découpées en angle puis boulonnées entre elles. En conséquence, la géométrie globale du pliage crée localement un problème géométrique, le long de la pliure. Il est résolu dans ce cas par une découpe appropriée.

En termes de statique, il résulte de cette évolution que grâce à l'ajout de renforts latéraux, la structure porteuse plissée, dont la fonction devait au départ être assurée principalement par les éléments surfaciques, concentre sa rigidité sur les bords nervurés. Elle devient de fait une ossature porteuse. L'ajout d'éléments linéaires et de renforcements triangulaires à la géométrie du pliage fait perdre son unité visuelle à la structure plissée.

Lors de l'appel d'offres pour le gymnase d'Yverdon, ce système de pliage, même revu et corrigé, a été jugé trop cher par les entreprises soumissionnaires. Finalement, on a définitivement abandonné l'efficacité statique de la structure plissée et opté pour un système-cadre dont la rigidité est néanmoins toujours assurée par les plis du toit et des murs.

En résumé, on peut donc constater que :

- lorsque les calculs de charge imposent l'emploi de panneaux de 14 cm d'épaisseur, on est inévitablement amené à réfléchir aux possibilités existantes pour diminuer les coûts, et donc à utiliser des panneaux plus fins.
- l'amincissement des panneaux entraîne la nécessité de les renforcer. La géométrie des poutres de rives qui vient se superposer à celle du pliage « naturel » d'origine et les renforcements atténuent l'efficacité conceptuelle de la structure initiale.
- la structure plissée à surface active devient de fait une ossature porteuse après transfert de la majeure partie des efforts tranchants vers les barres latérales.

Nous avons fait ensuite une autre tentative, fructueuse celle-là, pour construire une structure plissée : la chapelle de Saint-Loup. Il convient toutefois de préciser d'emblée que dans ce cas, la portée n'était que de 9,5 mètres, soit nettement moins qu'à Yverdon où elle était de 45 mètres. Des panneaux trois plis de 60 mm d'épaisseur enjambent toute la largeur de la chapelle avec un élancement de 1/158. Les plis se retrouvent dans la géométrie du toit mais aussi des murs. En effet, l'efficacité statique du pliage en toiture est exploitée aussi pour les parois verticales.

L'outil développé par Hans Ulrich Buri au laboratoire IBOIS permet de déterminer non seulement la géométrie d'ensemble mais aussi la découpe et le chanfreinage des panneaux. Les images du montage montrent un système cadre autoporteur, efficient même avec un pli unique.

Notre souhait était de laisser la structure porteuse (les panneaux) visible, au moins à l'intérieur de l'édifice. Les plaques ont donc été assemblées les unes aux autres depuis l'extérieur au moyen de plaques métalliques de 2 mm d'épaisseur, perforées et clouées. La transmission des forces d'un panneau au suivant peut ainsi être réalisée au travers de ces connecteurs. Les efforts tranchants à reprendre ont permis d'identifier cinq familles. Les plaques perforées sont toujours identiques, seul le nombre de clous par panneau varie d'une famille à l'autre.

Les valeurs maximales de moment, qui se retrouvent habituellement aux angles, peuvent ici être évitées : ces moments sont répartis le long des arêtes et ne doivent pas être absorbés exclusivement dans les coins. Dans le cas de la chapelle, aux états-limites ultimes, les moments de flexion d'environ 10 kNm/m sont réduits de moitié.

Le détail proposé correspond donc à la surface porteuse de grande étendue de cette structure plissée. Contrairement aux constructions bois classiques, dans lesquelles des sections prismatiques sont assemblées par chevillage (clous, vis, tou-

rillons) qui affaiblissent systématiquement la section, une structure plissée comme celle de Saint-Loup utilise de manière optimale l'épaisseur des panneaux comme système porteur.

En résumé, on peut donc constater que :

- une épaisseur de 40 mm pour les parois et de 60 mm pour la toiture constitue un système efficace et économe en matériau dans cette catégorie de portées.
- la technique d'assemblage choisie évite l'affaiblissement de la section transversale du panneau.
- la technique d'assemblage s'adapte bien au comportement sous charge des éléments à surface porteuse.

De manière générale, il convient de remarquer que le concept géométrique de la chapelle de Saint-Loup est le fruit d'une création arbitraire dont la condition fondamentale était que l'enveloppe théorique de la chapelle reprenne le principe d'une feuille de papier pliée. Il n'y a donc théoriquement pas de chutes dues aux découpes. On a seulement créé une pente, différente pour chaque pli, afin de permettre l'écoulement des eaux pluviales.

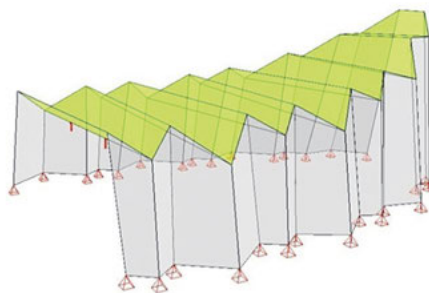
Le point faible manifeste de la construction est le bord libre présentant la plus grande portée, c'est-à-dire le dernier pli se trouvant au-dessus de l'entrée.

Dans l'histoire de la construction, la recherche de rigidité par le pliage est à l'origine de solutions variées et efficaces.

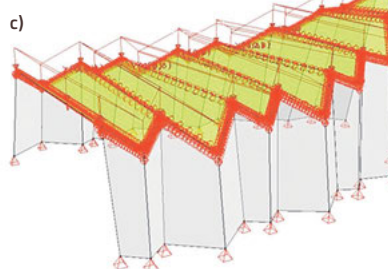
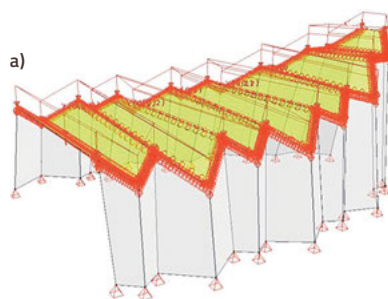
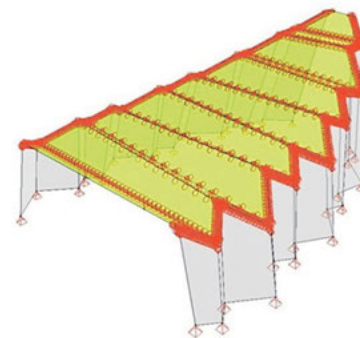
III. 7 Modélisation MEF de la structure plissée monolithique réalisée en panneaux contrecollés : conditions d'appuis et articulations le long des arêtes

III. 8 Modélisation MEF de la structure plissée monolithique avec charges ; a) charges permanentes, b) poids propre, c) neige, d) vent

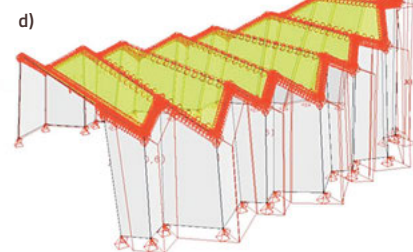
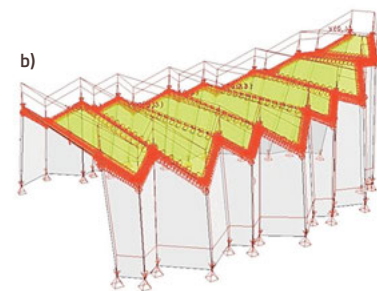
III. 9 Modélisation MEF de la structure plissée monolithique en panneaux contrecollés : déformations et efforts de membrane



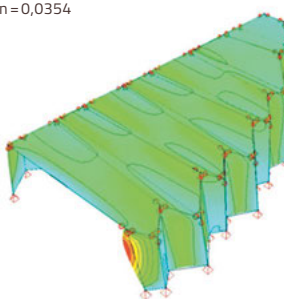
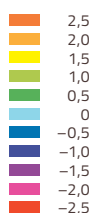
III. 7



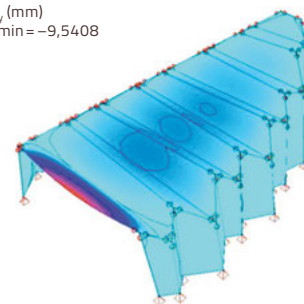
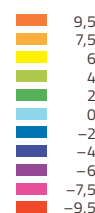
III. 8



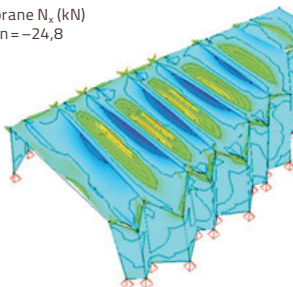
déformation d_x (mm)
max = 2,5159, min = 0,0354



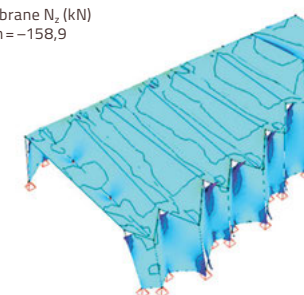
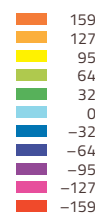
déformation d_y (mm)
max = 0,2145, min = -9,5408



effort de membrane N_x (kN)
max = 101,4, min = -24,8



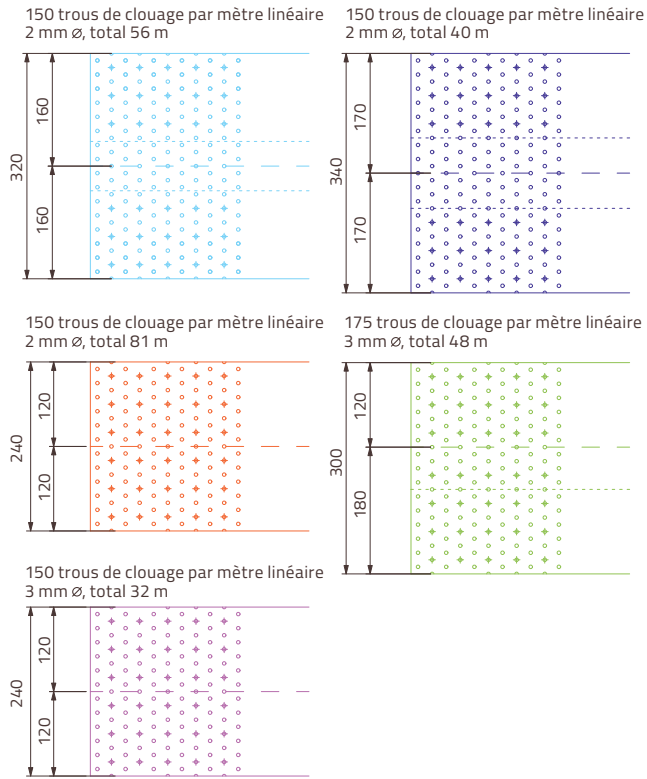
effort de membrane N_y (kN)
max = 15,7, min = -158,9



III. 9

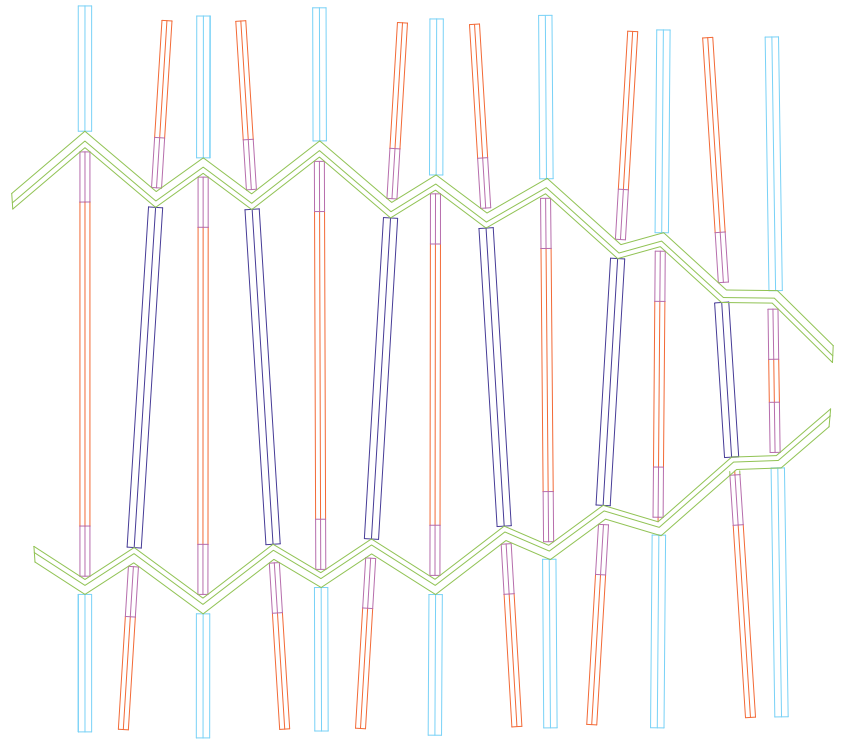


III. 10 a



III. 10 b

III. 10 a-c Détail de la jonction entre les panneaux. Des plaques perforées de 2 mm d'épaisseur sont réparties en cinq familles dans lesquelles seul le nombre de clous à poser varie. Les plaques perforées elles-mêmes ont été pliées au préalable.



III. 10 c

III. 11 Détail de l'assemblage réalisé
III. 12 Détail du panneau au niveau du pied
III. 13 Détail de l'arête du toit pendant la construction



III. 11



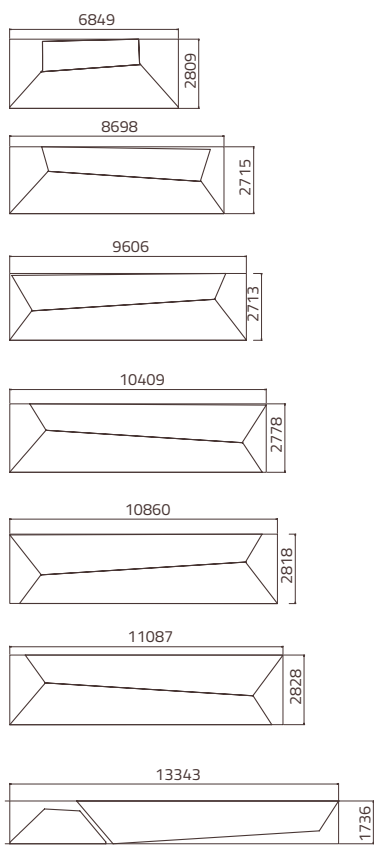
III. 12



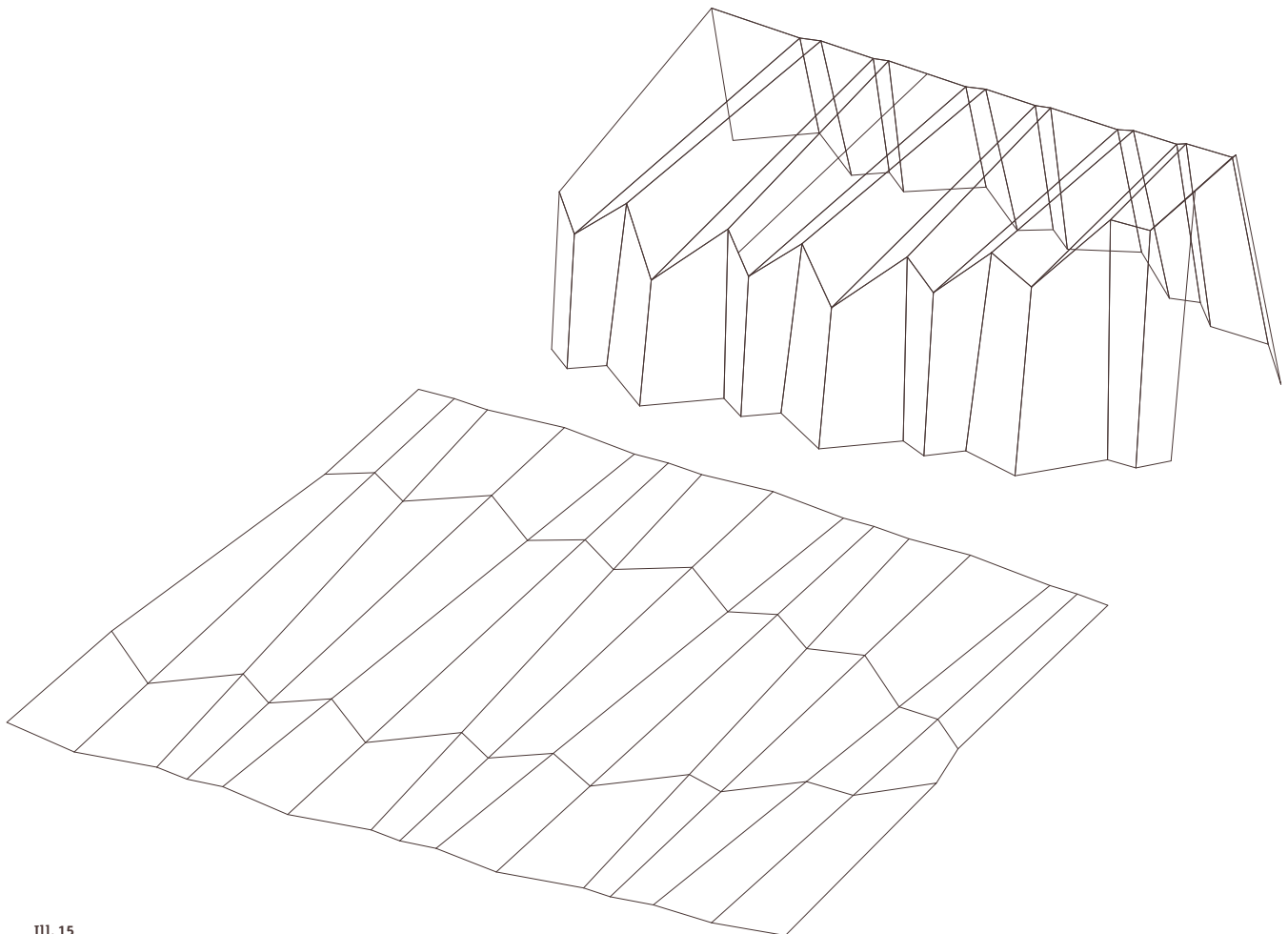
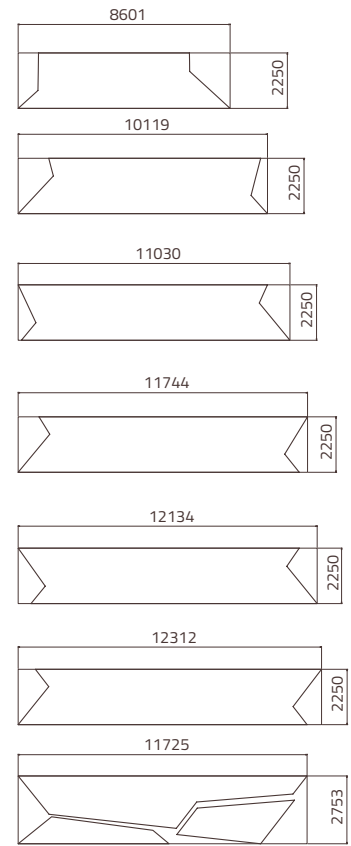
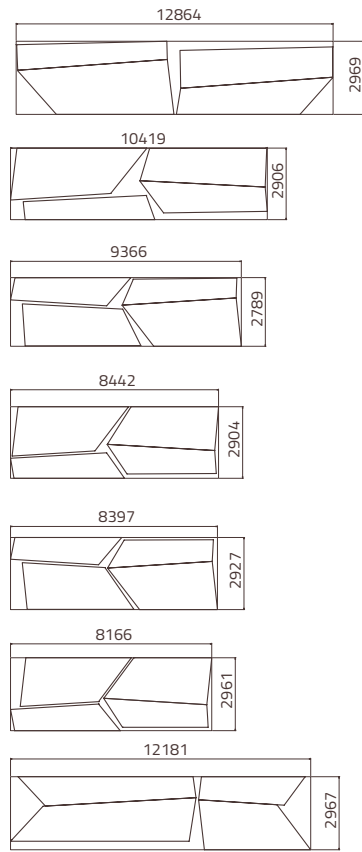
III. 13

III. 14 Plan de fabrication des panneaux. Les dimensions et les chanfreins sont enregistrés en tant que paramètres et transmis à la fraiseuse sous forme de code.

III. 15 Contrainte imposée par l'outil basé sur la technique de l'origami. Théoriquement, chaque pli créé à l'aide de cet outil peut être aplati et ramené à sur un plan unique (dans la tradition japonaise, une seule feuille de papier est utilisée).



III. 14



III. 15



III. 16



III. 17



III. 18

III. 16 Montage des panneaux. Chaque tronçon est autoporteur.

III. 17 La chapelle en construction

III. 18 Pose de l'enveloppe de toiture et du lattis

III. 19 a et b La chapelle achevée



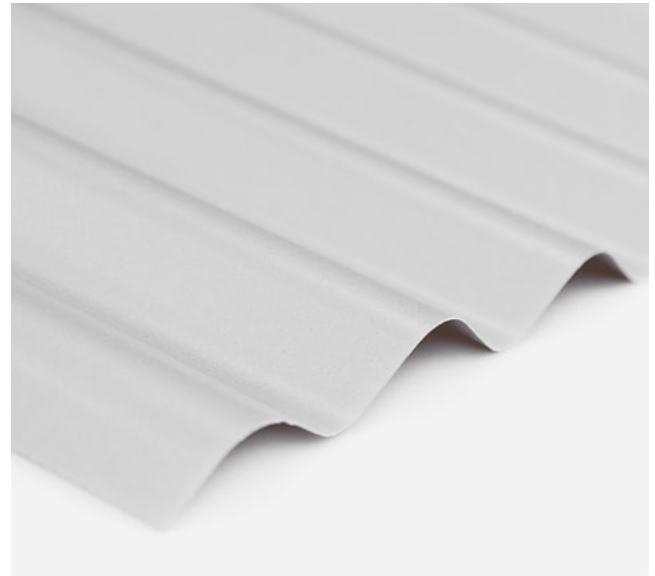
III. 19 a



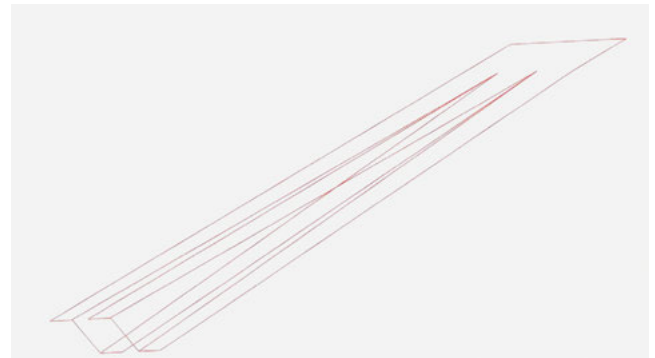
III. 19 b

Cette recherche de rigidité mécanique par pliage, dans la géométrie globale, n'a pas débouché sur une proposition unique, comme on le voit dans l'évolution présentée ici. Dans son travail, Hans Ulrich Buri présente au contraire de nombreuses possibilités géométriques.

Mais au bout du compte, les profils créés sur un axe transversal ou longitudinal restent des éléments purement géométriques. L'outil proposé par Hans Ulrich Buri reste donc un outil formel de nature architecturale et constructive. Il permet également une optimisation mécanique qui reste toutefois intuitive. Une étude de cas (ill. 24) peut montrer comment une géométrie pliée donnée peut aussi être optimisée du point de vue mécanique. En relevant de manière variable les plis ou en réduisant la largeur des plis vers le bord de la coque, on peut obtenir des effets positifs en termes de statique.



III. 20

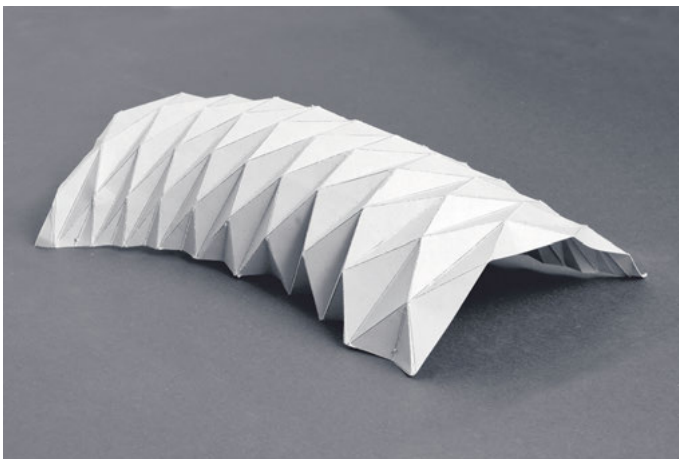


III. 21

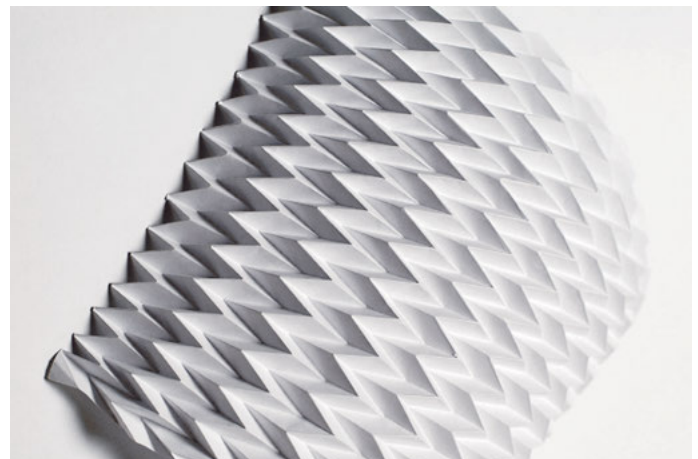
III. 20 La coupe transversale trapézoïdale est aussi une forme de pli.

III. 21 L'échelle du pliage peut être adaptée au bâtiment (ici au toit de la Stadthalle de Graz).

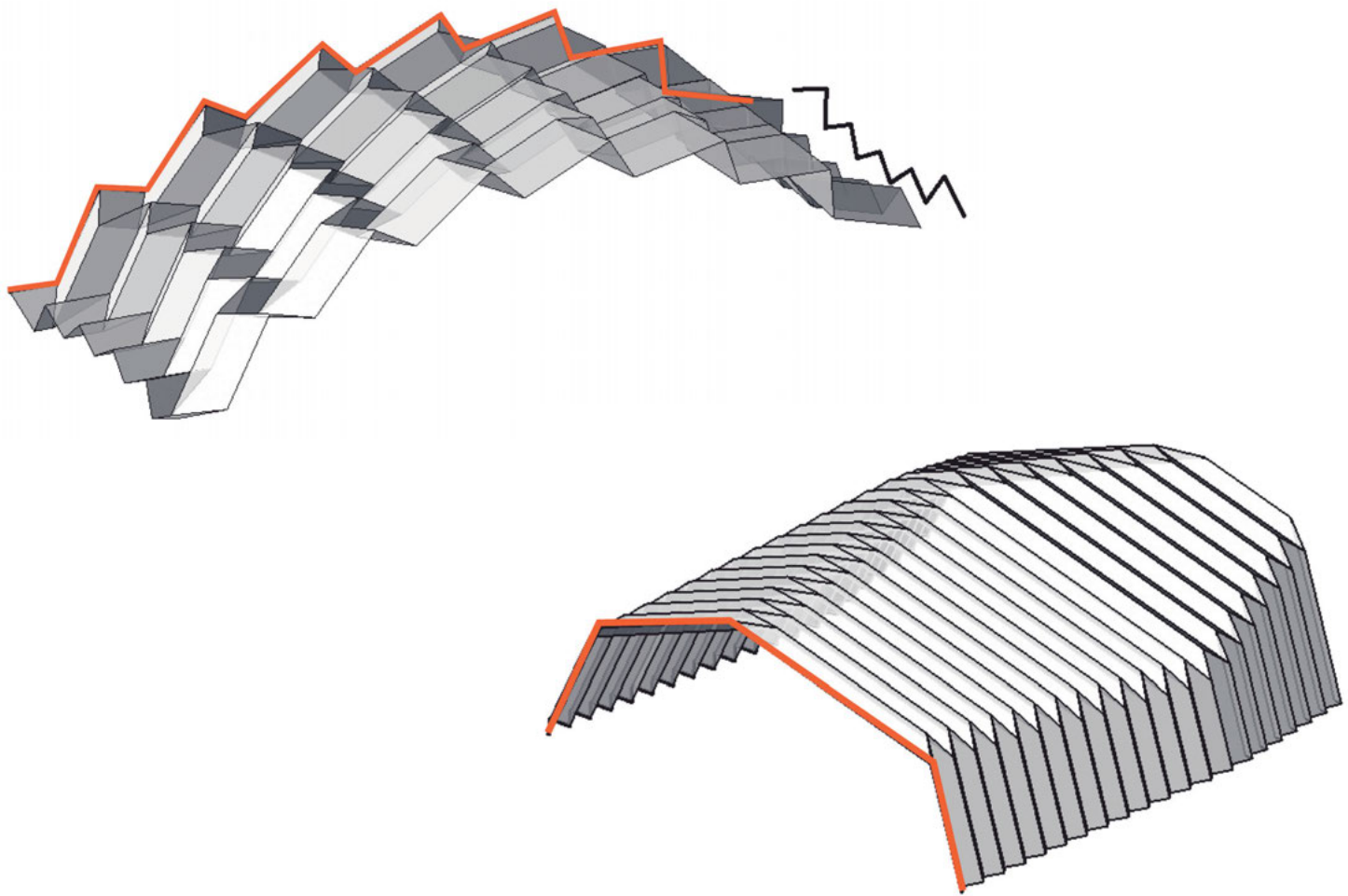
III. 22 a et b Évolution géométrique des pliages possibles



III. 22 a



III. 22 b



III. 23 Les profils créés sur un axe transversal ou longitudinal permettent l'élaboration de géométries pliées très différentes.

Les ajustements géométriques peuvent donc contribuer à la rigidité de l'ensemble :

- une profondeur de plis plus importante augmente le moment d'inertie.
- quand la fréquence des plis est rapprochée vers les bords de la coque, de simples ajustements géométriques permettent d'obtenir des rigidités horizontales supplémentaires dans ces zones.

Ces ajustements se révèlent convaincants : contrairement à la réponse constructive traditionnellement apportée par les ingénieurs et consistant à renforcer les bords de telles constructions en coque, on a ici la possibilité d'utiliser mécaniquement la variété des pliages, ce qui évite l'ajout d'une pièce supplémentaire de nature différente.

- On peut prévenir le risque de flambement local en réduisant la superficie des panneaux et en diminuant