

Le pli, une figure d'interface entre architecture et ingénierie

Julien Meyer, Gilles Duchanois et Jean-Claude Bignon

MAP/CRAI, ENSA Nancy, France

meyer@crai.archi.fr, duchanois@crai.archi.fr, bignon@crai.archi.fr

RÉSUMÉ. Cet article présente une recherche dans le domaine des structures architecturales plissées. Nous abordons plus spécifiquement la technique des composants en panneaux de bois massif contrecollés. L'environnement numérique proposé permet, d'une part, l'ajustement de la structure en plis à la forme architecturale dessinée par le concepteur et, d'autre part, la vérification de sa stabilité et de sa résistance. Il est composé d'un modèleur géométrique paramétrique couplé à un logiciel de calcul de structure. L'interaction de ces deux outils numériques guide le concepteur architecte dans la recherche de formes fondées sur des plis, sécurise les propositions structurelles et fournit les fichiers numériques pour une fabrication robotisée des panneaux.

MOTS-CLÉS : Dimension architecturale, Dimension structurelle, Structure plissée, CLT (Cross Laminated Timber), Modélisation paramétrique.

ABSTRACT. This paper deals with a research in the field of folded architectural structures. We specifically discuss the technical components of CLT (Cross Laminated Timber) panels. We suggest a digital environment which allows a pleated structure to be adjusted to an architectural form drawn by the designer, while corroborating stability and joining. Consisting of a geometric parametric modeler coupled with structural analysis software. The interaction of these two digital tools guides the architect designer in the research of folded forms, improves the reliability of structural proposals and provides digital files for automated manufactured panels.

KEYWORDS: Architectural dimension, Structural dimension, Pleated structure, CLT (Cross Laminated Timber), Parametric modeling.

1 Introduction

L'utilisation du terme de « pli » voire « d'origami » dans de nombreux projets architecturaux, manifeste aujourd'hui un déplacement dans le vocabulaire des formes contemporaines en quête d'une nouvelle écriture architecturale.

Cette notion de pli, figure à la fois géométrique et structurale, n'est pas nouvelle et parcourt même l'histoire de l'architecture. L'architecture du XXème siècle nous offre des exemples intéressants de réalisations architecturales qui empruntent un vocabulaire à la géométrie de leur structure et en particulier à la géométrie du pli. On évoquera en particulier les travaux de Walter Netsch pour la United States Air Force Academy Cadet Chapel (1954) ou encore ceux de Jorn Utzon, avec le projet du stade à Djeddah, en Arabie Saoudite (1999).

Plus récemment, avec le développement de nouvelles techniques liées à la robotique, l'emploi de nouveaux matériaux et l'essor des outils numériques, le vocabulaire des formes s'est à nouveau emparé des géométries structurales et finit même par donner consistance à un courant architectural nommé « New structuralism » par R. Oxman (Oxman, 2010).

Dans le domaine de l'architecture et de la construction bois, le développement de nouveaux composants comme le Lamibois et le Contrecollé ouvre la porte à des réalisations qui renouent avec les vocabulaires de la morphologie structurale et en particulier celui du pli et du plissage (Weinand, 2010). Outre sa dimension plastique qui enrichit le vocabulaire des espaces et des formes construites, le plissage apporte par inertie de forme, une qualité structurale économe en matière.

C'est l'objet de cet article que d'aborder et de caractériser le concept de pli structural en architecture et de présenter un modèle et un environnement numérique interdisciplinaire permettant de concevoir et réaliser des structures non standards plissées en bois.

2 Le pli en bois dans l'architecture

Bien qu'exceptionnelles, plusieurs réalisations au caractère fortement expérimental ont montré les potentialités du bois pour réaliser des architectures particulièrement inventives. Parmi celles-ci, deux réalisations récentes viennent attester de l'intérêt du principe du pli en architecture. Le pavillon temporaire à Osaka de l'agence RAA, Ryuichi Ashizawa

Architects (Ashizawa, 2010) et la chapelle St Loup à Pompaples du groupement d'architectes Localarchitecture / Mondada (Mondada, 2008).

Par leurs qualités structurales associées aux qualités architecturales, ces deux projets manifestent les vertus des structures plissées en bois. En effet, une série de plis, orientée de manière mono-directionnelle, permet de rigidifier considérablement une surface de faible épaisseur. La portée en est ainsi augmentée et la matière économisée.

Le caractère architectural issu de ce plissage est tout aussi intéressant. On reprendra ici les variables émotionnelles définies par J.M Delarue (Delarue, 1997):

- la « fascination de l'animé », par le rythme.
- l'« euphonie », arrêtes supérieures et inférieures, sommets et vallées, positif et négatif.
- les « nuances » issues de la lumière révélée.
- l'« emprise du trait » guidant le regard.

Divers travaux de recherche comme ceux réalisés par l'IBOIS, laboratoire de l'EPFL dirigé par Y. Weinand (Buri, 2010) viennent conforter cette interrelation entre les qualités physiques et environnementales du matériau bois avec les potentialités géométriques du pli, tant structurales que plastiques.

3 Modèle théorique

Nous proposons un modèle permettant de décrire et de créer une forme structurale et architecturale plissée. Les données du modèle doivent permettre de concevoir cette forme, tant d'un point de vue géométrique que mécanique. Modèle commun, il peut être utilisé comme une passerelle entre deux disciplines : l'architecture et l'ingénierie. Ce modèle est implémenté dans un modeleur numérique permettant une géométrie paramétrique du pli, de manière à rendre compatible la forme architecturale recherchée à un comportement structural satisfaisant.

3.1 Caractérisation du pli

D'une manière générale, un pli est une altération d'une surface matérielle (couche géologique du sol, tissus, feuille de papier...) généralement de faible épaisseur et possédant un rayon de courbure de petite dimension au regard de l'épaisseur de la matière. Il peut être originaire d'actions de déformation d'une surface initiale comme plier, plisser, froisser ou encore

de tout autre procédé aboutissant à relier deux ou plusieurs plans formant un angle.

Cette différenciation est importante dans notre démarche visant à géométriser un pli tant structural qu'architectural. En effet, notre définition ne limite pas le pli à une surface originelle à l'exemple de l'origami, mais accepte le pli comme l'union de différentes surfaces.

La définition d'un pli peut être interprétée de différentes manières (Figure 1). On distingue deux cas de pli. Le premier se caractérise par la courbure. On estime que les tangentes en un point de la surface (relative à la dérivée première) sont continues dans toutes les directions. Dans ce cas, le rayon de courbure minimum (relative à la dérivée seconde) est défini par un rayon acceptable avant rupture de la matière. Un pli peut donc être défini selon un rapport entre l'épaisseur du matériau et le rayon de courbure. A ce stade, un facteur d'échelle, défini par le rapport entre le rayon de courbure et la dimension globale du matériau courbé, doit être considéré. Nous faisons référence aux plaques de tôle ondulée.

Un deuxième cas de pli se définit mathématiquement par discontinuité des tangentes en un point d'une surface et dans une direction donnée. Ce changement ponctuel de direction se traduit physiquement par une interruption de la matière, entraînant de ce fait, une notion d'assemblage. C'est dans cette hypothèse que nous avons établi notre recherche de pli en panneaux de bois massif. Le travail avec des panneaux de bois influe sur notre caractérisation du pli. Même si le bois peut être courbé, il nous paraît plus judicieux, d'un point de vue industriel, de travailler par assemblage de pièces de bois planes.



Figure 1. Tangente continue (rayon de courbure minimum).
Tangente discontinue (assemblage du matériau).

D'un point de vue géométrique, le pli se définit comme l'intersection de deux surfaces planes dans l'espace selon une valeur angulaire. Cet angle sera déterminé en fonction du nombre de plis choisis sur une distance définie, soit la fréquence du plissage et la hauteur du pli. Cette intersection se caractérise comme la ligne de sommet ou de vallée selon

que le pli est sortant ou rentrant. Ces deux caractéristiques sont déterminées en fonction de la vision extérieure de l'enveloppe plissée. On parlera également du signe d'un pli par rapport à un autre. Sachant que le retournement de la structure implique l'inversion du signe des plis. L'arête ou axe désigne la direction du pli.

D'un point de vue structural, le pli s'associe principalement à l'idée d'inertie. On parle ici de hauteur du pli ou amplitude du pli, distance de projection entre la ligne de pli et le plan moyen formé par les arêtes opposées constituant les faces connexes.

3.2 Dimension morphologique

Cette dimension se base sur des constats issus des pratiques architecturales. En effet, on admet que l'architecte travaille par ajustement successif de sa forme avant d'arriver à une ou plusieurs solutions acceptables (Wetzel, 2009). Le concepteur conçoit la volumétrie de son projet en fonction de l'usage qui lui est affecté et des effets spatiaux et sensibles qu'il recherche. L'objectif de notre application consiste donc à offrir au concepteur, un maximum de liberté créative tant sur la forme que sur les caractéristiques spatiales du pli. Pour cela, un opérateur morphologique supervise une série de paramètres permettant d'agir à tout moment sur le travail de modélisation géométrique : d'une part sur le dimensionnement global de la surface travaillée, d'autre part, plus en détails sur les caractéristiques du pli : la fréquence (le rythme) et l'amplitude (la hauteur du pli).

Si le pli peut être appliqué en principe à toutes surfaces ou formes, nous avons limité, dans l'état actuel de notre travail, la forme initiale ou enveloppe support à une surface semi-cylindrique dont l'axe et le profil sont variables. L'utilité considérée de la structure plissée réside en effet dans ses capacités techniques et formelles à recouvrir un espace de grandes dimensions avec une faible épaisseur. Parmi toutes les potentialités morphologiques en architecture, la forme de la voûte a été retenue pour ses qualités à couvrir de grands espaces. Cette forme sert de support au plissage.

Le plissage est construit par une succession de plis dont la direction est voisine de la normale à l'axe directeur. L'archétype du pli retenu présente plusieurs qualités. Tout d'abord, il est l'une des techniques du pli les plus intuitives pour la construction d'une forme stable. Ensuite, la simplicité et l'homogénéité du rythme du pli lui confèrent une dynamique esthétique. Le découpage de « l'enveloppe support » par des plans de pli

a permis la représentation d'arcs, trajectoire des nœuds reliant les lignes de pli. Cette méthode s'avère particulièrement robuste à la modélisation dynamique. La correction de la forme primaire entraîne un ajustage automatique du plissage. Enfin et surtout, cette technique s'adapte relativement bien aux nombreuses variations de formes du support.

3.3 Dimension structurale

La dimension structurale du plissage passe par l'utilisation d'un logiciel de calcul d'éléments finis utilisant des éléments coques afin de déterminer la stabilité structurelle (sous le poids propre par exemple) et matérielle (flambement). Cet évaluateur structural permet également de valider le dimensionnement (sous chargement externe) de la structure plissée. La notion d'assemblage entraîne une caractérisation des liaisons entre les différents éléments constituant la coque. Par défaut, on considère les liaisons comme des encastremements (continuité matérielle). Cependant, tous les types de lois de comportement des assemblages peuvent être définis grâce à l'introduction d'une matrice dans le logiciel de calcul. Pour des raisons constructives (discontinuité matérielle), une recherche vers des assemblages du type « pivot linéique », assimilable à des charnières, semble souhaitable. Dans ce cas, la nature des assemblages étant insuffisante pour assurer la stabilité de la structure, une disposition des panneaux selon une géométrie du plissage est nécessaire. Enfin, une caractérisation des appuis, correspondant aux nœuds définis par la surface de référence, est essentielle pour la validation de la structure.

3.4 Interaction / Rétroactions

Une part importante de notre travail se situe à l'interaction des deux dimensions que nous venons d'évoquer. La géométrie constructive du pli apparaît alors comme l'interface entre ces deux domaines. D'une part, elle induit les caractéristiques morphologiques de la structure plissée et, d'autre part, elle renseigne le logiciel de calcul sur les données nécessaires à la caractérisation de la structure. Elle permet un dialogue entre l'expression architecturale et l'expression structurale au travers d'un processus itératif. Ce processus est basé sur trois activités:

- la proposition : la morphologie architecturale est définie selon les paramètres appliqués à la géométrie constructive du pli et les besoins déterminés par le concepteur.

– l'évaluation : cette géométrie formelle ainsi fixée est analysée structurellement selon les caractéristiques nécessaires à la stabilité et au dimensionnement de la structure.

– l'adaptation : le rapport d'expertise informe sur les modifications utiles via les paramètres géométriques du pli.

Lors des différents cycles du processus de conception, les allers et retours dans la recherche de la forme conduisent à une modification par ajustement de celle-ci. Ces modifications peuvent être engendrées soit par le logiciel de calcul dans le cas de caractéristiques du pli inadaptées à la structure, soit par la géométrie de plissage lors d'une modification de la forme initiale ou encore par des opérateurs internes comme celui appliqué à la gestion de planéité des surfaces.

La relation entre l'opérateur morphologique et l'évaluateur structural est gérée par un contrôleur conditionnel. Ce dernier indique le nombre d'itération nécessaire afin de correspondre au mieux à la forme souhaitée. L'ensemble des opérateurs (géométriques, structurels et conditionnels) permet au concepteur de maîtriser le passage entre de la morphologie initialement souhaitée et la forme optimisée.

Aux travers des données introduites dans le contrôleur, les besoins peuvent être affinés au fur et à mesure de la conception. On obtient ainsi une vision concrète de la progression du projet.

4 Implémentation du modèle

Dans notre travail le processus de modélisation de la structure plissée passe par plusieurs étapes morphologiques successives: la mise en forme de l'enveloppe support et la mise en forme du pli selon sa géométrie constructive (paramètre du profil, de la fréquence et de l'amplitude).

La modélisation géométrique s'effectue dans l'environnement du modèleur Rhinocéros couplé à Grasshopper, éditeur d'algorithme graphique de gestion de données géométriques paramétriques.

L'enveloppe support est définie par une surface gauche. Elle est délimitée par quatre splines, elles-mêmes contrôlées par trois points chacune. Cette série de points possède des coordonnées paramétrables en X;Y;Z, permettant une première mise en forme de l'enveloppe support. Les coordonnées des points, caractérisant la surface initiale, restent modifiable à tous moments. Une fois déterminé, ce volume primaire peut accueillir l'algorithme de plissage (Figure 2).

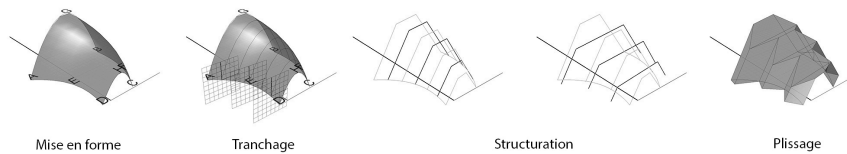


Figure 2. Représentation de la procédure de plissage.

Il existe différentes géométries du pli. Dans le cadre de ce travail, nous avons privilégié une géométrie qui vient s'ajuster sur la surface de référence de manière à correspondre au mieux à la volumétrie de départ. En effet, une série de lignes polygonales est construite à partir du découpage de l'enveloppe support par une série de plans verticaux et normaux à son axe directeur. Chaque polyligne, renommée 'profil', est composée de segments, auxquels on affecte alternativement, dans un plan vertical, un décalage d'une valeur paramétrable marquant les sommets et les vallées du plissage. Le profil, défini par rapport à une surface initiale, donne la direction du plissage. Chaque sommet du profil constitue un nœud pouvant avoir jusqu'à quatre faces communes. Le nombre de segments détermine le nombre de pans, soit $n-1$ brisis, ligne de cassure du plissage. Les segments constituant un pan n'étant pas forcément parallèles, les facettes ne sont donc pas nécessairement planes.

En effet, les formes aléatoires engendrées par le modelage de l'enveloppe initiale, peuvent entraîner, lors de la construction géométrique du plissage, des facettes gauches. Un paramètre de gestion de surface des facettes a donc été introduit. Un script de programmation en VBnet, permet de déterminer une surface plane, avec un degré de précision variable. Cette précision dépend du rayon de courbure acceptable par le matériau. Ainsi la structure s'ajuste à la capacité de déformation du matériau. Cependant, lorsqu'on se rapporte à une surface quasi plane (matériau à faible rayon de courbure), un écart morphologique important peut être observé. Pour l'instant, seule une correction manuelle permet de se rapprocher de la forme initiale spécifiée par le concepteur. Le composant programmé possède deux entrées : les surfaces définies par leurs sommets et le degré de précision que l'on souhaite obtenir. En sortie de composant, nous avons un récapitulatif des actions menées, les coordonnées des nouveaux sommets constituant les facettes, ainsi que le résidu de l'action avec le nombre d'opération nécessaire de bouclage pour arriver au résultat final. Accepter un rayon de courbure sur une facette entraîne une précontrainte dans le matériau, qui nécessitera une vérification structurelle supplémentaire.

Afin de tester la stabilité et le dimensionnement des panneaux en bois, une passerelle informatique est créée entre le modèleur de la structure plissée et un logiciel de calcul d'éléments finis (Castem). Ces données sont définies par la géométrie constructive du pli. Elles correspondent aux coordonnées des sommets de chaque face constituant le plissage généré dans Grasshopper. Les sommets réitérés sont regroupés sous la forme de nœuds, constituant le maillage de la structure reconstruit dans l'environnement de Castem.

Dans un premier temps, cette approche se contente de vérifier la stabilité et le dimensionnement de la structure plissée en fonction du chargement. Un paramètre de subdivision des éléments formant la coque permet d'augmenter la précision de calcul. Pour les premiers tests de stabilité étudiée sous le poids propre de la structure (affectation d'un matériau et d'une épaisseur), les nœuds structuraux sont considérés comme des encastremements. Actuellement, les résultats de contraintes et de déformées nous font part d'un état qualitatif de la structure. Les résultats nous dirigent vers deux paramètres pouvant agir comme correcteurs morphologiques du plissage (Figure 3). Le premier concerne la raideur du matériau en variant l'épaisseur ou la dimension des plaques. Le second se rapporte à la raideur des assemblages. À terme, ces informations agiront comme correcteurs morphologiques du plissage se référant à des instructeurs, évitant ainsi un écart formel trop important avec le plissage initial.

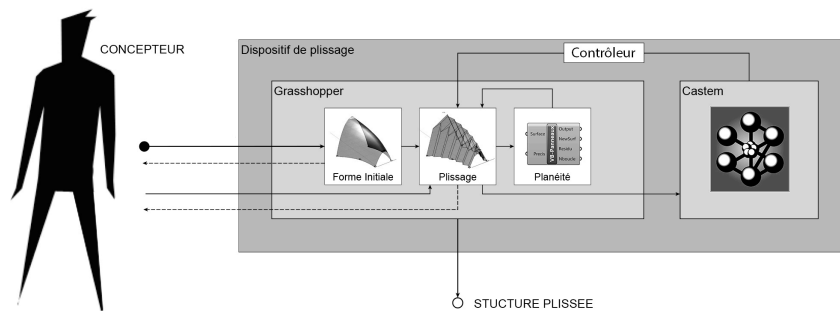


Figure 3. Implémentation du processus d'optimisation géométrique et structurale.

5 Expérimentations

Pour valider notre travail, deux expérimentations ont été menées. La première testant l'aptitude du modèle de l'enveloppe support ainsi que le

modèle du plissage à produire une structure plissée conforme à une structure existante. La deuxième vérifiant l'utilisabilité de l'outil prototype en situation de conception.

5.1 Reconstitution de la chapelle St Loup de Pompaples

Dans cette première expérimentation, nous prenons comme référence la chapelle St Loup. Notre recherche de modélisation repose sur l'enveloppe structurelle composée de panneaux de bois contrecollés (6 cm pour la toiture et 4 cm pour les porteurs verticaux).

Le modèle donne une approximation morphologique satisfaisante avec une faiblesse d'ajustement dans la troisième direction (Figure 4). D'une part, l'approximation linéaire de l'enveloppe support nécessiterait un niveau supérieur du type quadratique (au niveau de la courbure de la partie couvrante). D'autre part, un défaut d'informations paramétriques sur le rythme du pli entraîne un écart morphologique important. Cependant, le rythme de plissage de la chapelle St Loup est plutôt lié à un aspect matériel et de mise en œuvre (taille des panneaux industriels) qu'au caractère géométrique du plissage.

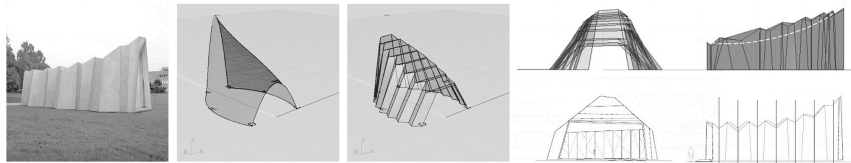


Figure 4. Test de représentation de la chapelle St Loup.

5.2 Réhabilitation de l'église Saint François d'Assise de Vandœuvre

La seconde expérimentation a pour objectif de valider la démarche de conception assistée par notre application. Le projet prend place dans la nef d'une église en reconversion. L'expérimentation débute par la validation de son utilité : la démarche adoptée permet de définir une morphologie capable de faire face aux contraintes architecturales du projet: estimation de la forme support, choix du nombre de brisis et de leurs positionnements, réglage de la fréquence et de l'amplitude du pli, définition du degré de courbure des panneaux et enfin, l'évaluation morphologique et structurale (Figure 5).

Le moteur d'évaluation permet de définir une série de critères d'ajustements sur lesquelles le concepteur peut agir: épaisseur du matériau (définie par le dimensionnement), type d'assemblage des panneaux (défini par la stabilité), taille des panneaux, angle du pli (domaine défini par la technique de fabrication), rayon de courbure (accepté par le matériau) et le nombre d'appuis.

Les premières applications de la méthode montrent un fonctionnement correct où les rétroactions restent cependant à commande manuelle. Les perspectives visent à développer l'assistance du moteur d'évaluation. Par la suite, ce dernier pourra être enrichi par divers critères architecturaux et techniques.

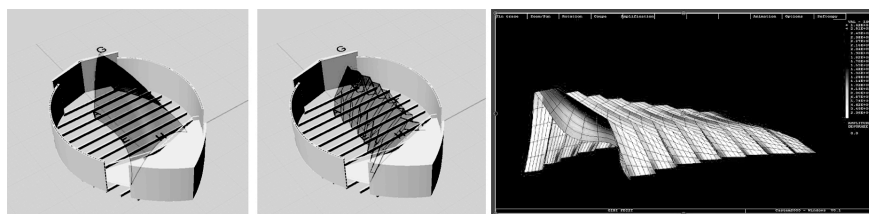


Figure 5. Validation de la démarche de conception.

6 Conclusion

Le pli fait partie aujourd'hui des nouveaux langages de conception en architecture. La recherche morphologique adaptée tant aux capacités structurales que formelles du pliage est source d'inspiration pour de nombreux concepteurs.

Dans notre travail, nous avons tenté d'esquisser un premier modèle du pli qui favorise l'interaction entre la conception architecturale et la conception structurale tout en procédant à son implémentation dans un outil numérique. Des recherches dans le domaine de la géométrie et des mathématiques nous ont permis de déterminer que la conception de la forme est fortement contrainte par la logique du processus de pliage.

Les expérimentations menées dans ce travail ont défini les qualités et les faiblesses de notre modèleur. Les limites de notre opérateur morphologique se situent dans la manière de construire sa géométrie. Bien que le modèle soit fonctionnel et dans certains cas acceptable, la morphogenèse se caractérise par une technique particulière de plissage, entraînant un champ trop restrictif des possibilités du pli.

L'esthétique et les partis structuraux adoptés, dans les projets exposés dans cette recherche ont soulevé une grande variété de questions, dont beaucoup restent encore à approfondir. La réalité constructive engendre des contraintes physiques. Une meilleure association de cet outil morphologique avec l'outil de calcul, Castem, permettra un ajustement formel adapté aux contraintes structurelles.

Les perspectives proposées se scindent en plusieurs parties. D'une part, une correction des techniques géométriques utilisées pour le pli est indispensable. D'autre part, la prise en compte de données constructives liées à l'épaisseur et aux assemblages devra être poursuivie. Enfin, la réalisation de structures prototypes semble une étape cruciale dans la détermination d'éléments favorable à une réalité constructive. L'objectif de cette recherche restant l'étude des structures plissée en panneaux bois, de la conception à la réalisation.

Bibliographie

- Ashizawa, R. (2010). *Gefaltete Hütte*, in Baumeister, n° B3, pp.73.
- Buri, H. (2010). *Origami-Folded Plate Structures*, Thesis n°4714, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Delarue, J.-M. (1997). *Le pli, source de formes et de sens*, in Les cahier de la recherche architecturale, n°40, Éditions Parenthèses, Paris, pp. 46.
- Localarchitecture, Mondada, D. (2010). *A temporary Chapel for the Deaconesses of St-Loup-Pompaples, Vaud, Switzerland, 2007-2008*, in A+U, n°479, pp. 56-59.
- Oxman, R. (2010). *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural technologies*, Editions John Wiley & Sons.
- Weinand, Y. (2010). *Timber Projet, Nouvelles formes d'architectures en bois*, Editions Ppur, 127p.
- Wetzel, J.-P. (2009). *Proposition d'un modèle et d'un outil dédiés à la conception morphologique architecturale en phase esquisse*, Thèse, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.