

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ORIGAMI ARCHITECTURAL : POTENTIALITÉ ET LIMITE DU PLI COMME
GÉNÉRATEUR DE SYSTÈMES CONSTRUCTIFS.

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN DESIGN DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

JEAN-FRANÇOIS ROY

MARS 20165

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ma famille pour son appui, et tout particulièrement ma mère et son dévouement exemplaire, sans qui la gestion logistique des contraintes familiales n'aurait tout simplement pas été possible.

Un merci à Jean-François Kuersteiner qui s'est réveillé dans la nuit pour réfléchir à mes pliages, à François Frenette, qui a contribué à sa façon à la documentation du premier cycle d'expérimentation, et à Anne Dupuis pour son dévouement en tant que reviseuse linguistique.

Un grand merci également aux gens de Cascades pour leur aide irremplaçable. Particulièrement Alexandre Morin, directeur des ventes des divisions Contenants spécialisés et Composants structuraux, pour la quantité considérable de carton plat offert, Jean Parent, vice-président de la division emballage de Norampac, pour son écoute généreuse et Luc Lefebvre, coordonnateur au développement de nouveaux produits et marchés, pour son aide précieuse dans la réalisation des prototypes en carton ondulé.

Sans oublier Patrick Evans, ami et directeur de maîtrise attentif, qui a su me questionner, m'épauler et me recentrer dans les moments importants; ainsi que Réjean Legault, directeur du programme de maîtrise et professeur dévoué, dont les propos, toujours justes et posés, m'ont éclairé tout au long de ces deux années.

Finalement, je ne saurais passer sous silence l'apport essentiel de Joel Lamere, assistant professeur au M.I.T., dans l'élaboration des assises théoriques du pli. Ses commentaires à propos de la conception de mes prototypes furent également déterminants pour ma recherche.

DÉDICACE

À ma famille immédiate, Karine, Luna, Ébène, Gédéon et Féréol; qui ont partagé mes joies et subi mon stress tout au long de ces deux années. Vous avez tout mon respect et toute mon admiration.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------|
| LISTE DES FIGURES | VII |
| GLOSSAIRE | XIII |
| RÉSUMÉ | XV |
| ABSTRACT | XVI |
| INTRODUCTION | 1 |
| 0.1 Objectif..... | 3 |
| 0.2 Approche..... | 4 |
| 0.3 Processus | 5 |
| PREMIÈRE PARTIE : VOLET THÉORIQUE | 7 |
| CHAPITRE I | |
| PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE..... | 8 |
| 1.1 Introduction..... | 8 |
| 1.2 Hypothèse et objectif de recherche..... | 8 |
| 1.3 Mise en contexte du projet de recherche | 11 |
| 1.4 Précédents..... | 12 |
| 1.4.1 Précédents en architecture | 13 |
| 1.4.2 Précédents en arts..... | 17 |
| 1.4.3 Précédents en industrie | 18 |
| 1.4.4 Précédents en sciences..... | 20 |
| 1.5 Enseignements des précédents..... | 22 |
| 1.6 Questions de recherche | 28 |
| 1.7 Le Pourquoi théorique..... | 28 |
| 1.8 Le Comment pratique | 29 |
| CHAPITRE II | |
| LE PLI : ARGUMENTAIRE THÉORIQUE ET PRATIQUE..... | 31 |
| 2.1 Introduction..... | 31 |
| 2.2 Présentation des acteurs-clés travaillant sur les matériaux en feuille | 32 |
| 2.3 Détour par les écrits de la monographie <i>Folding In Architecture</i> | 34 |
| 2.3.1 Le pli..... | 35 |

| | | |
|---|---|-----|
| 2.3.2 | La singularité | 35 |
| 2.4 | Approche matérielle du pli : dialogue entre théorie et applications..... | 36 |
| 2.4.1 | Le pli comme langage | 37 |
| 2.4.2 | Le pli comme matière | 39 |
| CHAPITRE III | | |
| | MÉTHODOLOGIE ET MATÉRIAU | 42 |
| 3.1 | Introduction..... | 42 |
| 3.2 | Cycles d'expérimentation..... | 44 |
| 3.3 | Lien entre les cycles d'expérimentation et l'argumentaire théorique | 45 |
| 3.4 | Choix du matériau | 46 |
| 3.5 | Descriptif et limites dimensionnelles du matériau | 49 |
| 3.5.1 | Le carton plat | 49 |
| 3.5.2 | Le carton ondulé | 51 |
| SECONDE PARTIE : VOLET PRATIQUE | | 54 |
| CHAPITRE IV | | |
| PREMIER CYCLE D'EXPÉRIMENTATION : LE PLI COMME LANGAGE..... | | 55 |
| 4.1 | Introduction..... | 55 |
| 4.2 | Étude de pliages droits..... | 56 |
| 4.2.1 | Évaluation des prototypes | 58 |
| 4.2.2 | Paramètres à considérer pour la conception du système constructif..... | 61 |
| 4.3 | Étude de pliages courbes..... | 62 |
| 4.3.1 | Modèles testés..... | 63 |
| 4.3.2 | Analyse des modèles..... | 64 |
| 4.4 | Synthèse du premier cycle d'expérimentation..... | 65 |
| CHAPITRE V | | |
| DEUXIÈME CYCLE D'EXPÉRIMENTATION : LE PLI COMME MATIÈRE | | 106 |
| 5.1 | Introduction..... | 106 |
| 5.2 | Étude avec carton plat..... | 107 |
| 5.2.1 | Prototype n° 1 : motif Yoshimura | 108 |
| 5.2.2 | Prototype n° 2 : motif Réflexion | 109 |
| 5.2.3 | Prototype n° 3 : motif Yoshimura | 110 |
| 5.2.4 | Prototype n° 4 : motif en V | 110 |
| 5.2.5 | Prototype n° 5 : motif Yoshimura irrégulier..... | 111 |

| | | | |
|---------------------------------|--|-----|-----|
| 5.2.6 | Analyse des prototypes en carton plat | 113 | |
| 5.3 | Étude avec carton ondulé, échelles variées | 114 | |
| 5.3.1 | Prototype n° 6 : motif Yoshimura | 114 | |
| 5.3.2 | Prototype n° 7 : motif réflexion | 115 | |
| 5.3.3 | Prototype n° 8 : système modulaire | 115 | |
| 5.3.4 | Analyse des prototypes en carton ondulé..... | 116 | |
| 5.4 | Synthèse du deuxième cycle d'expérimentation | 117 | |
| CHAPITRE VI | | | |
| CONCLUSION | | | 142 |
| 6.1 | Expérimenter avec des prototypes : potentiel et limite | 144 | |
| 6.2 | Limites du pli | 146 | |
| 6.2.1 | Stratégies pour rainer | 146 | |
| 6.2.2 | Stratégies pour plier | 148 | |
| 6.3 | Potentiels du pli | 152 | |
| APPENDICE A..... | | | 155 |
| ENTREVUE AVEC JOEL LAMERE | | | 155 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | | | 170 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 FOA : Yokohama Pier Port Terminal. Vues de l'espace multifonction et diagramme illustrant le lien entre la circulation et les surfaces pliées..... | 23 |
| Figure 1.2 Eisenman: Rebstockpark. Perspective et plan d'ensemble..... | 23 |
| Figure 1.3 Vyzoviti : Emergency Eco-Park. Planches de concours..... | 23 |
| Figure 1.4 Lamere: 25-Arch Folium (à gauche), vue et détail de l'installation Overliner..... | 24 |
| Figure 1.5 Tehrani : Change of State. Différentes vues de l'installation..... | 24 |
| Figure 1.6 RoboFold : ARUM pour ZHA. Différentes vues de l'installation..... | 24 |
| Figure 1.7 Weinand : Chapelle St Loup. Plan, coupe et photo extérieure..... | 25 |
| Figure 1.8 Eliasson : Die Dinge, (...) et One-Way Colour Tunnel. Vues variées..... | 25 |
| Figure 1.9 Schlian : We are building this ship as we sail it. Vues variées..... | 26 |
| Figure 1.10 Miyake : Exemple de déploiement d'une robe de la collection 132 5.... | 26 |
| Figure 1.11 KLINT : The Lantern. Vue de la lampe, de la gaufreuse et du pliage à la main..... | 26 |
| Figure 1.12 Miura : Différentes vues du motif et photo du SFU..... | 27 |
| Figure 1.13 Lang : Étude géométrique, Eyeglass et origami monumental..... | 27 |
| Figure 1.14 YOU & KURIBAYASHI : position ouverte et fermée de l'endoprothèse... | 27 |

| | |
|---|----|
| Figure 3.1 Rouleaux de carton plat. Image tirée de Pro-Carton. (2008). <i>Fact File Part 5 : Cartonboard</i> . [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages. | 51 |
| Figure 3.2 De gauche à droite, carton double face, double-double et triple cannelure. Tirée de http://www.supersindustries.com/products.php?product=37 | 52 |
| Figure 4.1 Comparaison du profil, une fois plié à plat, de deux variations pour le motif en V. | 59 |
| Figure 4.2 Ci-dessus : plan et élévation du motif Réflexion n° 1. Pages suivantes : photos des différentes options d’ancrage..... | 66 |
| Figure 4.3 Ci-dessus : plan et élévation du motif Réflexion n° 2. Pages suivantes : photos des différentes options d’ancrage..... | 69 |
| Figure 4.4 Ci-dessus : plan et élévation du motif Réflexion n° 3. Pages suivantes : photos des différentes options d’ancrage..... | 70 |
| Figure 4.5 Ci-dessus : plan et élévation du motif en V n° 1. Page suivante : photos des différentes options d’ancrage..... | 73 |
| Figure 4.6 Ci-dessus : plan et élévation du motif en V n° 2. Pages suivantes : photos des différentes options d’ancrage. | 77 |
| Figure 4.7 Ci-dessus : plan et élévation du motif en V n° 3. Pages suivantes : photos des différentes options d’ancrage. | 80 |
| Figure 4.8 Ci-dessus : plan et élévation du motif Waterbomb n° 1. Pages suivantes : photos des différentes options d’ancrage..... | 83 |
| Figure 4.9 Ci-dessus : plan et élévation du motif Yoshimura n° 2. Page suivante : photos des différentes options d’ancrage..... | 86 |

- Figure 4.10** Ci-dessus : plan du motif Yoshimura n° 3. (il n'y a pas d'élévation puisque le motif ne peut se plier à plat) Page suivante : photos des différentes options d'ancrage.88
- Figure 4.11** Ci-dessus : plan du motif n° 1 du Bauhaus. Voir figure 4.11a à la page 98 pour une photo du motif déployé.90
- Figure 4.12** Ci-dessus : plan du motif n° 2 du Bauhaus. Voir figure 4.12a à la page 98 pour une photo du motif déployé.91
- Figure 4.13** Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Huffman. Voir figure 4.13a à la page 98 pour une photo du motif déployé.92
- Figure 4.14** Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Huffman. Voir figure 4.14a à la page 98 pour une photo du motif déployé.93
- Figure 4.15** Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Lamere. Voir figure 4.15a à la page 98 pour une photo du motif déployé94
- Figure 4.16** Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Lamere. Voir figure 4.16a à la page 98 pour une photo du motif déployé95
- Figure 4.17** Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Mitani et Igarashi. Voir figure 4.17a à la page 98 pour une photo du motif déployé.....96
- Figure 4.18** Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Mitani et Igarashi. Voir figure 4.18a à la page 98 pour une photo du motif déployé.....97
- Figure 4.19** Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Roy. Voir figure 4.19a, b, c & d à la page 101 pour des photos du motif déployé.99
- Figure 4.20** Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Roy. Voir figure 4.20a, b, c & d à la page 101 pour des photos du motif déployé. 100

- Figure 4.21** Ci-dessus : plan du motif n° 3 de Roy. Voir figure 4.21a & b à la page 105 pour des photos du motif déployé..... 102
- Figure 4.22** Ci-dessus : plan du motif n° 4 de Roy. Voir figure 4.22a & b à la page 105 pour des photos du motif déployé..... 103
- Figure 4.23** Ci-dessus : plan du motif n° 5 de Roy. Voir figure 4.23a, b, c & d à la page 105 pour des photos du motif déployé..... 104
- Figure 5.1** Instruments pour rainer à la main le carton plat : roulette à disque métallique, patron d'embossage, x-acto et équerre..... 107
- Figure 5.2** Illustration de la formule mathématique décrivant les liens entre les angles d'un motif à plat et de profil..... 112
- Figure 5.3** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 1 (motif Yoshimura). Page suivante : photos des différentes options de déploiement..... 119
- Figure 5.4** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 2 (motif Réflexion). Page suivante : photos des différentes options de déploiement..... 121
- Figure 5.5** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 3 (motif Yoshimura). Pages suivantes : photos des différentes options de déploiement. 123
- Figure 5.6** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 4 (motif en V). Page suivante : photos des différentes options de déploiement..... 126
- Figure 5.7** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 5 (motif Yoshimura irrégulier). Page suivante : photos des différentes options de déploiement pour le modèle en papier cartonné (trois photos du haut) et pour le prototype en carton plat. 128
- Figure 5.8** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 6 (motif Yoshimura). Page suivante : photos des différentes options de déploiement..... 130

- Figure 5.9** Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 7 (motif Réflexion). Page suivante : photos des différentes options de déploiement..... 132
- Figure 5.10** Ci-dessus : plan et élévation du module Miura-Ori pour le prototype n° 8 (système modulaire). Voir page 140 pour différentes options de déploiement. 134
- Figure 5.11** Ci-dessus : plan et élévation des modules Yoshimura pour le prototype n° 8 (système modulaire). Voir page 140 pour différentes options de déploiement..... 135
- Figure 5.12** Ci-dessus : plan et élévation des modules en V pour le prototype n° 8 (système modulaire). Voir page suivante pour différentes options d'assemblage. 136
- Figure 5.13** Élévations A & B de différentes options d'assemblage pour des modules variés du prototype n° 8..... 137
- Figure 5.14** Élévations C,D & E de différentes options d'assemblage pour des modules variés du prototype n° 8. Voir page suivante pour différentes options de déploiement. 138
- Figure 6.1** Une machine CNC (à gauche) et les têtes amovibles (à droite) pour rainier et couper du carton ondulé. Récupéré le 11 mai 2015 de <http://www.samplemakingcuttortableplottermachine.com/sell-657752-cardboard-xanita-triple-flute-corrugated-board-pp-corrugated-cnc-cad-sample-maker-cutter.html> 147
- Figure 6.2** Une raineuse-découpeuse rotative (à gauche) et différents gabarits (à droite) pour rainier et couper du carton plat. Récupéré le 11 mai 2015 de <http://bharattechno.tradeindia.com/boxes-rotary-die-cutting-1083325.html> 148

- Figure 6.3** Appareil pour micro-plier de façon continue. Image tirée de Forte, C. (2005). Packaging Material Innovation: 3-D Folded Structures. [IPTA essay competition]. p.3. 149
- Figure 6.4** Imprimante à jet d'encre modifiée (à gauche) et papier calque auto-plié (à droite). Images récupérées le 17 mai 2015 de <http://www.christopheguberan.ch/Hydro-Fold> 150
- Figure 6.5** Illustration d'un auto-pliage du motif Miura-Ori (à gauche) et d'un icosaèdre (à droite). Images récupérées de Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., Xu, L., Shin, B., Zhou, M., Rus, D. et Wood, R.J. (2013). *Self-folding shape memory laminates for automated fabrication. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, Actes du colloque, 2013, : IEEE. 151
- Figure 6.6** Prototype en spirale, utilisant un motif Yoshimura régulier adapté à une fabrication automatisée. 152

Note : Tous les dessins et toutes les photographies sont attribués à l'auteur, sauf lorsqu'autrement indiqué.

GLOSSAIRE

Algorithme (algorithm) : Ensemble des règles opératoires qui permettent la résolution d'un problème par l'application d'un nombre fini d'opérations à exécuter en séquence.²

Cannelure (flute) : papier destiné à être ondulé. Désigne aussi le profil du papier kraft qui, après ondulation, sert d'entretoise aux couvertures et médianes.¹

Double face (single wall) : carton ondulé composé d'une cannelure et de deux couvertures.¹

Double-double face (double wall) : carton ondulé composé d'une feuille médiane prise en sandwich entre deux cannelures; le tout recouvert de deux couvertures.¹

Lamination (lamination) : L'application d'un revêtement sur un matériau en feuille.²

Machine CNC (computer numerical control machine) : les fonctions et les mouvements d'une machine-outil sont commandés au moyen d'un programme informatique contenant des données alphanumériques codés. Les nombres peuvent être considérées comme les coordonnées d'un graphique contrôlant le mouvement de l'outil (paramètres de coupe, de rainage, vitesse, etc.).³

Matériau en feuille (sheet material) : un mince morceau de matière telle que le papier, le verre ou le métal, généralement sous forme rectangulaire.⁶

Pliage à plat (flat-foldable) : principe mathématique stipulant qu'après avoir plié toutes les rainures par +/- 180 degrés en suivant un ordre particulier, le résultat final se trouve sur un seul plan.⁴

Pliage rigide (rigid-foldable) : principe mathématique stipulant que si le motif était fait de panneaux rigides reliés par des charnières, il pourrait être plié.⁴

Pliieuse-colleuse (folder-gluer) : machine de transformation exécutant les opérations de pliage et d'assemblage lors de la fabrication des boîtes d'emballages.¹

Pli montagne (mountain fold) : un simple pli, en origami, qui vise à faire une « crête ». Représenté graphiquement par une alternance de tirets et de points (— · — · — ·).⁵

Pli vallée (valley fold) : l'opposé du pli montagne, il vise à faire un « creux ». Représenté graphiquement par une succession de tirets (-----).⁵

Prépliage (crease) : action de plier partiellement une ligne de rainage pour que celle-ci soit bien droite. Dans l'industrie de l'emballage, le prépliage se déroule de façon mécanique au niveau de la plieuse-colleuse.¹

Rainage (scoring) : action de marquer un pré-pli par un léger écrasement de la matière. Le rainage permet de réduire la pression exercée sur le carton lors du pliage et aide à prévenir le craquelage.²

Raineuses-découpeuses rotatives (Rotary Die-Cutting machine) : une presse qui peut couper et rainer un matériau semi-rigide à l'aide d'un moule cylindrique.⁸

Tessellation (tessellation) : le recouvrement d'un plan géométrique sans vides ni chevauchements par des figures planes isométriques, identiques ou non. Se dit d'une répétition de une répétition de figures suivant un rythme établi et servant à former un motif d'origami.⁷

Triple cannelure (triple wall) : carton ondulé constitué de trois cannelures intercalées et collées sur quatre feuilles de papier (deux médianes et deux couvertures).¹

Les définitions du glossaire sont tirées des ouvrages ou site web suivants :

¹ Glossaire, dans : Besenval, V. (1988). *La fabrication du carton ondulé*. Paris : F. Nathan, pp.75-76.

² Office québécois de la langue française (2012). Le grand dictionnaire terminologique. Récupéré le 5 mai 2015 de <http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>

³ Récupéré le 16 mai 2015 de <http://wings.buffalo.edu/eng/mae/courses/460-564/Course-Notes/CNC%20notes.pdf>

⁴ Schenk, M. (2012). *Origami in Engineering and Architecture, An art spanning Mathematics, Engineering and Architecture*. [Diaporama électronique]. Cambridge: University of Cambridge. Récupéré de http://www.markschenk.com/research/teaching/ArchEng2012_lecture_web.pdf.

⁵ Mouvement français des plieurs de papier (2015). *Solfège*. [Brochure]. Paris. Récupéré le 2 mai 2015 de <http://mfpp-origami.fr/origami/>

⁶ Collins English Dictionary 5th Edition (2000). Récupéré le 16 mai 2015 de <http://dictionary.reverso.net/english-definition/sheet%20materials>

⁷ Merriam-webster dictionary (2015). Récupéré le 2 mai 2015 de <http://www.merriam-webster.com/dictionary/tessellation>

⁸ Interstate Specialty Products (2015) Lexique de découpe. Récupéré le 16 mai 2015 de <http://www.interstatesp.com/capabilities/die-cutting-glossary-terms>

RÉSUMÉ

Cette recherche-conception en design de l'environnement vise à approfondir les mécanismes et les processus nécessaires pour développer de grandes formes tridimensionnelles à partir du pliage de matériaux en feuille. En créant simultanément une forme et une structure, les matériaux en feuille pliés peuvent fournir une certaine économie de matière tout en questionnant la nature de la conception de l'objet. Le pliage de matériaux en feuille, qui est une stratégie courante en design industriel, demeure plutôt limité dans son application à une échelle architecturale. L'hypothèse de recherche a été de tester les limites du pliage et de valider dans quelle mesure il est possible de transférer les mécanismes de pliage de type origami à de grandes applications architecturales. Suite à une analyse des différentes approches théoriques, nous passons à une série d'expérimentations matérielles qui cherchent à questionner ce changement d'échelle et à déterminer s'il y a une limite dimensionnelle à l'utilisation des principes de l'origami. Dans la tradition du Research by design, les travaux d'expérimentation et de recherche se sont appuyés l'un l'autre dans un cadre itératif. Dans le but de tester l'hypothèse de recherche, nous avons tenté, à travers plusieurs cycles d'expérimentation, d'articuler un système constructif pour lequel le pliage d'un unique matériau en feuille serait le moyen privilégié de construction.

MOTS-CLÉS : Matériaux en feuille, Pli, Origami, Structures pliables-dépliables, Research by design, Carton

ABSTRACT

This environmental design research/creation thesis aims to deepen the mechanisms and processes required to develop large three-dimensional forms using folded sheet materials. By simultaneously creating both form and structure, folded sheet materials can provide a certain economy of material while also questioning the nature of object design. The folding of sheet materials, which is common in industrial design, remains rather limited in its applications within larger architectural scales. Our research hypothesis has been to test the limits of folding and validate the extent to which it is possible to transfer origami-folding mechanisms to larger architectural structures. Following an analysis of different theoretical approaches, we move on to a series of material experiments seeking to question the change of scales and to determine if there is a dimensional limit to the use of origami principles. In a Research by design framework, experimental and research work have supported each other in an iterative manner. Through several cycles of experimentation at different scales, we have attempted to articulate a constructive system for the folding of a single sheet to test the research hypothesis.

KEYWORDS: Sheet Material, Fold, Origami, Deployable Structures, Research by Design, Cardboard

INTRODUCTION

Le pliage de matériaux en feuille, stratégie abondamment utilisée dans la nature pour augmenter rigidité et stabilité, se transpose depuis longtemps déjà dans le milieu du design, par exemple en design industriel pour la réalisation de petits objets ou encore en architecture, essentiellement pour la fabrication d'éléments structuraux. Pourtant, cette stratégie a tout le potentiel pour être extrapolée à une échelle architecturale globale, car les avantages des structures pliées sont multiples:

- Elles permettent de réaliser des formes autant régulières qu'irrégulières;
- Elles expriment le contraste entre la fragilité du matériau à l'état initial et la grande résistance structurale acquise une fois plié;
- Spatialement, le déploiement d'objets pliés à plat permet d'occuper rapidement beaucoup d'espace et de redistribuer leur volume initial;
- Plier un matériau en feuille permet de créer à la fois une forme et une structure, permettant ainsi une économie de matériaux (considérations écologiques inhérentes à notre époque) et une reconceptualisation de l'objet;
- Ces structures peuvent être particulièrement légères, car l'action de plier un matériau en feuille procure un ratio force/matériau optimal.

Depuis le milieu des années 90, le pli suscite un intérêt renouvelé¹ : des designers d'horizons variés cherchent de nouvelles applications pour ces stratégies, entre

¹ Le pliage géométrique a une longue et riche tradition. Outre l'origami japonais traditionnel, dont les premières références datent de 1680, mentionnons les travaux du pédagogue allemand Friedrich Fröbel au milieu du XIX^e siècle ainsi que ceux de Joseph Albers dans les années 1920 au Bauhaus. On doit entre autres à Fröbel l'invention de la maternelle ainsi

autres à travers un changement d'échelle. Ce renouveau coïncide également avec l'apport des nouvelles technologies. Si au départ les designers ont simplement transposé leurs outils de dessin orthogonaux aux nouveaux outils informatiques, force est de constater que de nos jours, les outils de représentation tridimensionnelle et les outils paramétriques permettent d'élargir le spectre des possibles, tant formellement et spatialement que matériellement. La grande quantité et diversité de logiciels maintenant disponibles est une bonne indication de la prévalence du pliage en tant que technique constructive. Ces outils, particulièrement bien adaptés au pliage de type origami, participent à un processus itératif où l'expérimentation conceptuelle et constructive à l'échelle 1 :1 est plus accessible que jamais.²

À la même époque, la publication en 1993 de la monographie *Folding in Architecture* fait école dans le milieu architectural. Les différents essais qui composent ce document fondateur introduisent les fondements théoriques du concept du pli en architecture. Greg Lynn et Peter Eisenman, entre autres auteurs, y font état de stratégies pour juxtaposer différentes contraintes contextuelles, culturelles, programmatiques, structurelles et économiques à l'intérieur de systèmes pliés complexes.³ Malgré l'influence indéniable que ces écrits ont eue sur la manière de concevoir l'architecture, ils n'ont d'aucune façon porté un éclairage nouveau sur la manière de plier les matériaux.

Parallèlement, et certainement à l'opposé de l'approche préconisée par Lynn et Eisenman, on peut noter depuis deux décennies un intérêt marqué pour l'origami

qu'une série de jouets éducatifs, dont une série en particulier fait appel à la tessellation et au pliage. Albers, quant à lui, est surtout reconnu pour sa pédagogie développée au Bauhaus, où l'exploration des potentiels formels était directement en lien avec la réalisation de modèles physiques. Un fameux exercice consistait à créer des formes en papier les plus appropriées au matériau, entre autres grâce au pli.

² Iwamoto, L. (2009). *Digital fabrications : architectural and material techniques*. New York : Princeton Architectural Press.

³ Lynn, G. (2004). Architectural Curvilinearity, The Folded, the Pliant and the Supple. Dans *Folding in architecture*. (Rev. éd.). Chichester : Wiley-Academy, p.25.

appliqué, un champ d'études interdisciplinaire que certains nomment *Origamics*⁴ et qui allie l'art traditionnel japonais du pliage de papier à différents domaines comme les mathématiques, la physique, l'ingénierie, la biologie, l'architecture, etc. Les applications sont extrêmement variées, l'origami pouvant entre autres servir de contexte pour l'enseignement de la géométrie et du calcul mathématique, d'outil de modélisation pour la compréhension d'objets tridimensionnels complexes, de base à la conception d'endoprothèses coronariennes, ou encore de modèle pour le développement de nanomatériaux ou de composantes électroniques.

L'intérêt du pliage pour la réflexion théorique et les applications concrètes en design de l'environnement est donc indéniable et en constante évolution. On assiste depuis le début du XXI^e siècle à une multiplication d'objets, d'emballages, de mobilier, et, depuis peu, de petits bâtiments temporaires dont la conception emprunte à la fois à l'art ancien de l'origami et aux possibilités extraordinaires que proposent les nouvelles technologies.

0.1 Objectif

Malgré l'influence grandissante de l'origami dans le domaine du design, peu de propositions demeurent fidèles à sa définition traditionnelle : l'origami consiste, à partir d'un seul carré de papier, à réaliser par une succession de plis toutes sortes de modèles, figuratifs ou non, sans découpage, collage, adjonction d'autres matériaux, ni décoration du modèle terminé.⁵ Si cette définition est très largement respectée lors de la conception de petits objets, à partir d'une certaine dimension, les

⁴ Gönenç Sorguç, A., Hagiwara, I. et Arslan Selçuk, S. (2009). Origamics in Architecture: A Medium of Inquiry or Design in Architecture. *Journal of the Faculty of Architecture, Middle East Technical University*, 26(2), p.235.

⁵ Définition du Mouvement français des plieurs de papier. Récupéré le 4 mai 2015 de <http://mfpp-origami.fr/origami/>

designers utilisent généralement les principes structuraux associés à l'origami en délaissant l'objectif initial de plier un matériau.

Un des objectifs de la présente maîtrise est donc de rester le plus fidèle possible à la définition de l'origami, entre autres grâce à un travail artisanal avec la matière et non seulement par un travail de conception via les outils traditionnels de l'architecte (plan, coupe et élévation). Ce travail physique est particulièrement important pour comprendre comment un matériau en feuille peut être plié, car, contrairement à d'autres méthodes constructives, les formes produites par cette technique sont intrinsèquement liées aux caractéristiques physiques de la matière travaillée.

Les méthodes d'origami ont une relation si étroite avec les caractéristiques physiques du matériau plié qu'il est essentiel, dans le délai imparti d'une maîtrise, de se concentrer sur l'étude d'un seul matériau. Le choix de travailler avec du carton s'est vite imposé, tant pour la grande malléabilité de ce matériau que pour son accessibilité. Le chapitre III définit la méthodologie mise en place pour encadrer les différentes études matérielles et dresse un bref portrait des types de carton utilisés lors du deuxième cycle d'expérimentation.

Enfin, via un travail à la fois théorique et expérimental, la recherche souhaite questionner le changement d'échelle possible et déterminer s'il y a une limite dimensionnelle à l'utilisation des principes de l'origami. À partir de l'étude de prototypes à échelle réduite (voir le chapitre IV pour une description de ces différents pliages de papier), nous poursuivons la tradition de recherche dans ce domaine en étudiant les potentiels et les limites de la transposition à une échelle architecturale des avantages spatiaux et structuraux de ces prototypes. En d'autres termes, est-ce que la technique d'origami, qui sert généralement à produire des objets, peut générer des espaces architecturaux via un changement d'échelle?

0.2 Approche

Cette maîtrise de type recherche-conception est en grande partie pratique et s'appuie sur les processus et mécanismes développés par les acteurs-clés qui travaillent présentement à élargir les potentiels de pliage des matériaux en feuille, et plus particulièrement sur les travaux de Joel Lamere, assistant professeur au département d'architecture du M.I.T. à Boston. Lamere, qui pratique le pliage depuis plus de 10 ans, peut être associé à une approche matérielle du pli et à ce titre s'inscrit en faux contre la vision théorique du pli telle que proposée dans la monographie *Folding in Architecture*. À ce propos, le chapitre II, qui illustre les liens entre la théorie et la pratique du pli, ne cherche pas à réconcilier les concepts théoriques que Lynn et Eisenman ont empruntés à Deleuze avec le travail pratique du pli. Il met plutôt en lumière la théorie qui est intrinsèquement associée à l'action de plier, soit le respect des potentiels et des limites du matériau même, ainsi que la nécessité d'apprendre le langage du pli.

De nombreuses règles mathématiques servent en effet à décrire le comportement des surfaces pliées, et de nombreuses recherches ont été menées à cet effet depuis une vingtaine d'années.⁶ Pourtant, au-delà de la compréhension scientifique du pli existe aussi une compréhension formelle : le développement de nouveaux motifs d'origami, et par le fait même leur transposition à une échelle autre que celle d'une feuille de papier, passe donc inévitablement par un apprentissage du langage du pli.

0.3 Processus

⁶ Les recherches d'Erik Demaine et de Tomohiro Tachi sur le comportement mathématique des surfaces courbes, entre autres sujets, en sont des exemples probants. Voir à cet effet Demaine, E.D., Demaine, M.L., Hart, V., Lacono, J., Langerman, S. et O'Rourke, J. (2009, 11-13 novembre.) (Non)existence of Pleated Folds: How Paper Folds Between Creases Dans Communication présentée à /au 7th Japan Conference on Computational Geometry and Graphs (JCCGG 2009) Kanazawa, Ishikawa, Japan, ainsi que Tachi, T. (2010). Freeform variations of origami. *J. Geom. Graph*, 14(2), 203-215.

Ayant fait le choix d'un travail de Research by Design, une méthodologie qui sied bien au domaine de l'architecture, cette maîtrise a suivi un processus itératif qui a permis de préciser et d'enrichir les objectifs de recherche. Le volet expérimental a débuté avec l'intention de concevoir un abri pour une à trois personnes réalisé à partir du pliage d'une grande feuille de carton. Le premier cycle d'expérimentation a permis de tester différents motifs d'origami et de comprendre également à quel point le pli est un langage dont les règles, les mécanismes et la logique interne doivent s'apprendre au même titre que l'on doit apprendre le vocabulaire, la grammaire et la syntaxe si l'on souhaite parler, lire et écrire une nouvelle langue. Et comme pour l'apprentissage d'une nouvelle langue, peu de raccourcis sont disponibles; seuls le temps et la pratique permettent de maîtriser suffisamment ce nouvel outil pour espérer concevoir des objets satisfaisants.

Le second cycle d'expérimentation a été le théâtre de nombreux va-et-vient et de retours en arrière, tant dans le choix du type de matériau à privilégier (carton plat ou ondulé) que dans l'approche conceptuelle (conserver la contrainte de la feuille unique ou alors opter pour l'agrégation de différents modules). Malgré une compréhension de plus en plus fine des mécanismes du pli et du comportement structural du matériau, le temps imparti pour cette recherche n'était tout simplement pas suffisant pour espérer concevoir un système constructif plié à la hauteur des attentes de l'auteur. Lorsque l'on s'aventure dans le monde du pli, le nombre de variables est vertigineux : une quantité astronomique de motifs sont disponibles, sans compter l'infinité de variations géométriques et de combinaisons possibles. Même en réduisant les options, l'adaptation du motif au matériau reste un défi en soi.

C'est donc pour éviter ces différents écueils que l'objectif de la maîtrise s'est recentré sur la compréhension des potentiels et des limites à une transposition architecturale de l'origami, et plus particulièrement des défis inhérents au changement d'échelle. L'auteur reste convaincu des potentiels de telles applications, surtout à la suite de recherches plus approfondies sur les stratégies appropriées de rainage et de pliage.

PREMIÈRE PARTIE

VOLET THÉORIQUE

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

1.1 Introduction

Le monde du design regorge d'exemples d'objets créés à partir du pliage de matériaux en feuille. Cette façon de faire fonctionne très bien à petite échelle et s'adapte à une multitude de matériaux, ainsi qu'à un processus de fabrication automatisé de type industriel. Pourtant, cette stratégie, qui est très courante en design industriel, demeure plutôt limitée dans son application à une échelle architecturale. Pourquoi donc n'y a-t-il pas plus d'objets de grandes tailles, voir même des petits bâtiments, qui sont réalisés en pliant de la matière? La question est légitime et c'est particulièrement sur cet enjeu de changement d'échelle que cette recherche souhaite se pencher.

Il apparaît particulièrement nécessaire et prometteur de tester le potentiel et la limite dimensionnelle du pliage de matériau en feuille dans un contexte réel, par opposition au domaine de recherche mathématique qui utilise comme *à priori* une épaisseur de matériau nulle, ou encore le domaine aérospatial qui n'a pas à se soucier de la gravité.

1.2 Hypothèse et objectif de recherche

L'hypothèse de recherche est de valider jusqu'à quel point il est possible de transférer les mécanismes de pliage de type origami (mécanismes qui s'apparentent

à ceux employés en design industriel; une échelle somme toute limitée) à des applications structurelles dans leur globalité (une échelle architecturale plus vaste).

La situation concrète, qui est particulièrement intéressante pour tester cette hypothèse, est le développement d'un système constructif pour lequel le pliage d'un unique matériau en feuille serait le moyen privilégié de construction.

Cet objectif trouve un certain écho dans les travaux du laboratoire de recherche mis sur pied au tournant du XX^e siècle par Issey Miyake. En effet, avec sa ligne de vêtement A-POC (*A Piece Of Cloth*), Miyake a entrepris une réflexion sur ce qui est certainement un des grands objectifs dans l'histoire du design, soit de créer un objet à partir d'une seule et unique pièce :

I have endeavoured to experiment to make fundamental changes to the system of making clothes. Think: a thread goes into a machine that, in turn, generates completed clothing using the latest computer technology, eliminating the usual needs for cutting and sewing the fabric. The idea stemmed from my desire to make a contribution to environmental protection and the conservation of resources. The process not only cuts down on resources and labour, but is also a means to recycle thread.⁷

Ce choix du matériau unique est au cœur de la présente recherche et est également fidèle aux principes de l'origami, où l'objectif est de réaliser un objet uniquement grâce au pliage d'une seule feuille de papier. Cet objectif de réaliser une structure globale en ne pliant qu'une seule feuille de carton est également à l'opposé de la logique constructive traditionnelle, où l'objet bâti est construit par addition d'éléments modulaires. Dans le domaine de la construction, des connecteurs doivent systématiquement être utilisés pour joindre murs, planchers et toit.

⁷ Miyake, I., Fujiwara, D., Kries, M. et Vitra Design Museum. (2001). A-Poc making : [Issey Miyake & Dai Fujiwara : Vitra Design Museum Berlin June 1-July 1, 2001]. Weil : Vitra Design Museum, p.68.

Le pli créant *de facto* cette connexion, un système plié permet non seulement d'être à la fois structure et enveloppe, mais il intègre également dans le même élément les différentes composantes du bâti (murs, planchers et toit). Pour reprendre les propos de Vyzoviti, l'utilisation de tessellation, soit l'organisation intrinsèque des motifs dans un système de type origami, permet de diviser une surface en une série d'éléments réunis sans joints.⁸ À l'exception des constructions en béton moulé, seule l'action de plier un matériau en feuille permet donc de créer un objet à partir d'une seule et unique pièce, et ainsi de contribuer à la reconceptualisation de l'objet bâti.

En se basant sur des motifs classiques d'origami qui alternent les plis vallées et les plis montagnes, les prototypes conçus dans le cadre de cette maîtrise s'éloigneront toutefois des formes de pliage habituellement utilisées en industrie, particulièrement celles du domaine de l'emballage qui fonctionne presque exclusivement sans alternance de plis.

L'objectif de concevoir un système constructif devrait permettre la réalisation d'un espace temporaire, adaptable et versatile. Le choix de concevoir ce système avec du carton, un matériau léger et bon marché, permet d'en faciliter grandement la construction. Qui plus est, le choix du carton, qui est presque à 100 % fait de matière recyclée, répond à la considération écologique évoquée en introduction et accroît l'économie de matière inhérente à la réalisation d'un espace à partir d'une pièce unique, économie réalisée entre autres par l'absence de déchets de construction.

Au-delà des avantages économiques, écologiques et structureaux d'un système constructif de ce type, le caractère poétique des pliages d'origami peut également contribuer à créer un espace modulable s'adressant aux sens des utilisateurs, leur proposant une expérience unique par la rythmique de l'espace, la modulation, le mouvement, l'altération sonore, etc. Selon la vision de Peter Eisenman : « Folding changes the traditional space of vision [...] Folding also constitutes a move from

⁸ Vyzoviti, S. et De Souza, P. (2012). Origami tessellations in a continuum. Integrating design and fabrication in architectural education. *ENHSA – EAAE, no.59*(SCALE LESS - SEAM LESS), p. 166.

effective to affective space.⁹ » En effet, une surface plissée introduit une tectonique complètement différente de celle à laquelle nous a habitué le domaine traditionnel de la construction, particulièrement quant aux nuances issues de la lumière révélée.¹⁰ Le pliage peut donc servir pour créer non seulement une structure, mais également du mouvement, des vues, une articulation, un filtre, etc. Les possibilités et les intentions deviennent alors multiples.

1.3 Mise en contexte du projet de recherche

L'objet de cette recherche s'appuie de manière à la fois théorique et pratique sur les recherches, projets, installations et travaux de différents chercheurs ou designers, dont Joel Lamere, assistant professeur au département d'architecture du M.I.T. à Boston, Sophia Vyzoviti, professeure associée au département d'architecture de l'Université de Thessalie en Grèce, la firme OOOJA Architects du Danemark¹¹, Gregory Epps, ingénieur et fondateur de RoboFold et Erik Demaine, spécialiste de l'origami computationnel et professeur au M.I.T.

Bien que chacun ait un angle d'approche différent, tous ces chercheurs ont un intérêt prononcé pour le pli, certains cherchant à en comprendre les fondements mathématiques, d'autres le potentiel de développement paramétrique, ou encore pour certains la géométrie des surfaces développables.

⁹ Eisenman, P. *Visions' Unfolding : Architecture in the Age of Electronic Media*.

¹⁰ Meyer, J., Duchanois, G. et Bignon, J.-C. (2014, 18-20 juin.) Le pli, une figure d'interface entre architecture et ingénierie. Dans *Communication présentée à /au SCAN'14: Séminaire de conception architecturale numérique Luxembourg*.

¹¹ Madirazza, A.B. et Arkitektskolen i Århus. (2011). *Folded structures : digital physical workshop*. San Francisco : Blurb.

1.4 Précédents

Un bref survol de l'utilisation du pli dans des domaines variés comme l'architecture, les arts, les sciences et l'industrie du XX^e et du XXI^e siècle permet de constater à quel point le sujet est riche. Bien que la revue suivante soit non exhaustive, les précédents cités aident à situer les différentes approches utilisées actuellement, que ce soit l'utilisation du pli d'une manière purement théorique, d'une façon artisanale, ou encore en cherchant à en répliquer les bénéfices structuraux. Peu importe l'approche, tous les projets présentés peuvent se réclamer, d'une manière ou d'une autre, de l'*origamics*, le champ d'études interdisciplinaire de l'origami appliqué, car ils sont des exemples de l'appropriation et de l'intégration du pli aux domaines d'études des différents concepteurs. À chaque concepteur est associé, dans la liste des précédents, un projet phare ainsi qu'une approche du pli, ci-après défini. Une documentation visuelle accompagne également les précédents et se trouve aux pages 23 et suivantes.

1. Approche théorique : utilisation des concepts associés au pli en tant que stratégie pour intégrer des paramètres variés à l'intérieur d'un continuum complexe. Cette approche, qui ne cherche d'aucune manière à plier des matériaux, propose une nouvelle stratégie de conception de projets basée sur une analogie du pli ;
2. Approche formelle: utilisation de formes dérivées du pli pour améliorer la résistance structurelle d'un objet ou d'un bâtiment, généralement par juxtaposition de surfaces sans nécessairement les plier. Cette approche permet en quelque sorte de « plier » des matériaux trop épais pour être réellement pliés ;
3. Approche matérielle : utilisation du pliage comme action directe sur des matériaux en feuille. C'est une vision un peu plus artisanale du pli en ce sens qu'elle exige une expérimentation physique sur la matière.

En excluant les concepteurs utilisant la première approche, la majorité des autres cherchent à développer de nouvelles formes et de nouveaux motifs de pliage adaptés à leurs projets, pour répondre soit à des besoins structuraux et spaciaux, ou encore pour étudier les comportements mathématiques et géométriques de différents motifs. Inévitablement, l'appropriation des mécanismes du pli par ces chercheurs tient compte d'un certain changement d'échelle entre les prototypes et le résultat final. Aussi, ce travail de transposition est de plus en plus réalisé grâce aux nouveaux outils technologiques et paramétriques à travers un aller-retour entre le digital et l'analogue.

1.4.1 Précédents en architecture

EISENMAN, Peter : Rebstockpark Master Plan – 1991
[approche théorique] (Voir Figure 1.2 à la page 23)

Il s'agit du projet phare qu'Eisenman utilise pour valider sa théorie du pli tel qu'illustré dans la monographie *Folding in Architecture*. En reconsidérant deux aspects de l'urbanisme du XX^e siècle (l'espace-temps, et la répétition et l'individualité), Eisenman développe un vaste projet urbain dont l'idée conceptuelle centrale intègre ses concepts de pli et de singularité. Le système d'organisation orthogonal familier est remplacé par un système étendu qui ne se limite pas aux angles droits. La relation entre les différents bâtiments, ainsi que la relation des bâtiments à l'espace libre est déterminée par le pli.¹²

Dans ce projet, nul matériau n'est physiquement plié. On assiste plutôt à l'utilisation du concept théorique pour intégrer des éléments programmatiques disparates.

¹² Rebstockpark Frankfurt am Main (2003) Rebstockpark - The development of a concept
Récupéré le 14 mai 2015 de : http://www.rebstockpark-ffm.de/rebstockpark_eisenman_e.htm

Foreign Office Architects : Yokohama Pier Port Terminal – 2002
[approche théorique et formelle] (Voir Figure 1.1 à la page 23)

Le nouveau terminal portuaire de Yokohama est certainement un des rares projets d'architecture à intégrer la notion de pli à la fois en tant que concept théorique et en tant que tactique formelle. L'approche théorique et structurelle de FOA est particulièrement en phase avec la transposition du concept de pli en architecture :

The use of segmented elements such as columns, walls or floors has been avoided in favour of a move towards a materiality where the differentiation of structural stresses is not determined by coded elements but by singularities within a material continuum [...]¹³

Le projet devient en quelque sorte un vecteur pour exprimer la pensée théorique des architectes : l'intégration des différences à l'intérieur d'un système cohérent. La conception de la structure, élément emblématique du projet qui est basé sur le motif d'origami Yoshimura, est la conséquence directe d'un besoin programmatique plutôt qu'un simple geste formel. Ce sont en effet les flux de circulations entrelacés générant les plis qui à leur tour ont généré la forme.

TEHRANI, Nader : Change of State – 2006
[approche matérielle] (Voir Figure 1.5 à la page 24)

Nader Tehrani est un pionnier dans l'intégration du pliage et des nouvelles technologies en architecture. Professeur à l'école d'architecture du M.I.T., il est également designer principal de la firme NADAAA, une agence dédiée à l'avancement de l'innovation, à l'interdisciplinarité et au dialogue avec l'industrie. Cette installation est le résultat d'un an de recherches avec un groupe d'étudiants, dont l'objectif était d'explorer les différentes possibilités spatiales, programmatiques et structurelles inhérentes à l'utilisation de matériaux en feuille couplée aux techniques de fabrication CNC. Tehrani n'est pas tant intéressé par le travail artisanal de pliage de matériaux en feuille, mais plutôt par l'intégration du pli aux différents outils de conception et de fabrication paramétriques.

¹³ Foreign Office Architects, The digital and the Global, in Architecture on the Horizon, AD Profile 122, 1996.

Weinand, Yves : Chapelle St Loup – 2008
[approche formelle] (Voir Figure 1.7 à la page 25)

À la fois ingénieur et architecte, Yves Weinand dirige depuis 2004 le laboratoire de construction en bois (IBOIS) de l'école Polytechnique fédérale de Lausanne. Ses recherches portent entre autres sur la matérialité, les nouvelles méthodes de construction et les considérations structurelles. En collaboration avec le consortium d'architectes Localarchitecture / Mondana, Weinand et son collègue Hani Buri ont conçu une chapelle temporaire basée sur un motif d'origami en V. L'ondulation du motif est irrégulière pour assurer une réflexion variée de la lumière sur chaque panneau, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.

La construction est réalisée avec de minces panneaux de bois lamellé croisé, les panneaux jouant à eux seuls le rôle de structure et d'enveloppe. Le bois n'est bien évidemment pas plié, les panneaux sont plutôt conçus et fabriqués grâce à des outils paramétriques pour être ensuite assemblés précisément selon les angles désirés.

VYZOVITI, Sophia : Emergency Eco-Park – 2008
[approche matérielle] (Voir Figure 1.3 à la page 23)

Au sein de son bureau matrix_g.sea, Vyzoviti a conçu un abri pour réfugiés qui a reçu une mention honorable lors de la compétition « Renewable energy sources and bioclimatic architecture for shells to shelter people affected by natural disasters » de l'Union Internationale des Architectes.

The proposed shelter unit is energy-efficient, recyclable, polymorphic and extendable, easy to transfer and install and engaging the dwellers in its construction process. The dwelling core is a self-supporting pleated tube to which deployable components – sleeping areas, veranda and bathroom – adhere. Dwelling parts are transported to the location by truck in flat packages and erected in situ.¹⁴

¹⁴ Architizer. Récupéré le 17 mars 2015 de <http://architizer.com/projects/emergency-eco-park/>

Cette proposition d'abri prend appui sur certaines caractéristiques intrinsèques aux pliages d'origami, soit leurs propriétés de pliability-dépliability. Avec ce projet, Vyzoviti intègre le travail réalisé lors des différents ateliers d'architecture qu'elle a dirigé à la Delft University of Technology en Hollande ainsi qu'à l'Université de Thessalie en Grèce. L'abri présenté est en effet la résultante d'un matériau plié à une échelle architecturale et non seulement la transposition des principes de l'origami.

LAMERE, Joel : Overliner – 2011 & 25-Arch Folium – 2010
[approche matérielle] (Voir Figure 1.4 à la page 24)

Le projet Overliner, qui s'insère délicatement à l'intérieur d'un remarquable escalier, est suspendu par des câbles en son centre. Les particularités géométriques de l'escalier trouvent écho dans les dimensions et la répétition en série des feuilles pliées. Grâce à une technique complexe de pliage courbe, les feuilles de polypropylène translucide se transforment en poutres rigides, révélant ainsi les riches textures profondes que l'on retrouve dans les lignes courbes bidimensionnelles.¹⁵

The intention here was to try to create something which was a single module that could be aggregated into the whole [...]. That project is very much like a module-born exercise where there is a kind of specific radial splay degree that it needs to have, a specific step between one to the next that it needs to have, in order to produce something which both sits very precisely above the stairs but can also be self-structured.¹⁶

25-Arch Folium, un des premiers projets pliés d'envergure de Lamere, réalisé en collaboration avec Cynthia Gunadi, est un dispositif spatial et lumineux à l'intérieur d'une grotte sur la bordure nord des jardins du Musée Evergreen à Baltimore. L'objet est un tube de polypropylène qui est plié et replié en 25 arches de différents formats liées ensemble par des attaches. Cette installation est une géométrie pure, un unique objet plié, qui est ensuite découpé en sections. Les détails qui ont été

¹⁵ School of Architecture + Planning, M.I.T. Descriptif du projet Overliner. Récupéré le 9 mars 2015 de <http://architecture.mit.edu/architectural-design/project/overliner-fast>

¹⁶ Roy, J-F. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Joel Lamere.

conçus produisent l'illusion d'une géométrie singulière dérivée d'une seule feuille de plastique.¹⁷

RoboFold : ARUM pour Zaha Hadid Architects (ZHA) – 2012
[approche matérielle] (Voir Figure 1.6 à la page 24)

Gregory Epps, fondateur de RoboFold, est une des premières personnes à s'approprier la robotique pour des applications en design et en architecture.¹⁸ La technologie de RoboFold permet de traduire le processus intuitif du pliage de papier à la main dans un système industrialisé conçu pour plier le métal en utilisant de multiples robots industriels. En partenariat avec ZHA, RoboFold entreprit le développement, la fabrication et l'installation de la pièce centrale de l'exposition *Common Ground* pour la Biennale d'architecture de Venise, prouvant ainsi la possibilité de construire une sculpture métallique avec 488 panneaux emboîtables et uniques.

1.4.2 Précédents en arts

ELIASSON, Olafur : Die Dinge, die Du nicht siehst, die Du nicht siehst – 2001
One-Way Colour Tunnel – 2007 [approche formelle et matérielle]
(Voir Figure 1.8 à la page 25)

Eliasson est un artiste islando-danois reconnu pour ses sculptures et installations, dont certaines sont basées sur les principes du pliage. Une partie de l'installation de 2001 consiste en un tunnel créé à partir d'une multitude de feuilles de carton ondulé, pliées selon un motif diagonal similaire au motif Yoshimura. Il est quelque peu anecdotique qu'Eliasson ait choisi de plier littéralement un matériau en feuille

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Crafts Council. Récupéré le 9 mars 2015 de <http://www.craftscouncil.org.uk/artists/Gregory-epps/>

pour ce projet car il s'intéresse généralement aux caractéristiques formelles des systèmes pliés plutôt qu'à l'action physique du pli. Dans le deuxième exemple, *One-Way Colour Tunnel*, l'approche formelle est utilisée pour réaliser un tunnel kaléidoscopique en juxtaposant des miroirs triangulaires d'acrylique selon le motif Yoshimura dont les proportions empruntent une logique d'expansion logarithmique.

SHLIAN, Matt : We are building this ship as we sail it – 2010
[approche formelle et matérielle] (Voir Figure 1.9 à la page 26)

Artiste se considérant comme un ingénieur du papier, Shlian crée depuis 2004 des œuvres variées en 2 et en 3 dimensions (engins mobiles, sculptures cinétiques, tableaux, etc.). Il est également professeur et chercheur invité au département des sciences matérielles à l'Université du Michigan à Ann Arbor. Cette sculpture en particulier est un exercice de pliage courbe en papier, similaire à celles réalisées par David Huffman dans les années 70.¹⁹

Beginning with an initial fold, a single action causes a transfer of energy to subsequent folds, which ultimately manifest in drawings and three-dimensional forms. [...] I begin with a system of folding and at a particular moment the material takes over.²⁰

Shlian travaille essentiellement à l'échelle de l'objet, en utilisant les techniques de l'origami et du kirigami.²¹

1.4.3 Précédents en industrie

KLINT, Kaare : The Lantern –1944
[approche matérielle] (Voir Figure 1.11 à la page 26)

Originellement conçu pour le Musée des arts décoratifs du Danemark, *The Lantern* est certainement considéré comme un classique du design du XX^e siècle. La

¹⁹ Voir la section 4.3.1.2 à la page 63 ainsi que les figures 4.11(a) & 4.12(a) aux pages 90, 91 et 98 pour un descriptif et des photos de certains pliages de Huffman.

²⁰ Shlian, M. Déclaration de l'artiste. Récupéré le 17 mars 2015 de <http://www.mattshlian.com/statement2012.html>

²¹ Le Kirigami, une discipline proche de l'origami, est le nom japonais de l'art du coupage de papier.

compagnie LE KLINT se spécialise depuis 1943 dans la fabrication de luminaires en papier ou en plastique. Bien que les motifs soient rainés grâce à une gaufreuse mécanique conçue par la compagnie, tous les modèles sont pliés à la main dans leur usine de Copenhague. LE KLINT considère qu'il faut trois ans aux employés pour maîtriser les techniques de pliage requises pour fabriquer la centaine de différents modèles. Les premiers modèles conçus sont basés sur le motif d'origami classique Yoshimura, tandis que les plus récentes créations utilisent des motifs courbés originaux.

MIYAKE, Issey : A-POC – 1998 et 132 5. Collection – 2010
[approche matérielle] (Voir Figure 1.10 à la page 26)

Le designer de mode Issey Miyake travaille depuis plus de 30 ans sur le plissage de textile. Au tournant du XXI^e siècle, il délaisse sa ligne de vêtements haute couture pour se consacrer à la recherche. Son premier laboratoire, A-POC, lui donne l'occasion de repenser complètement le complexe processus manufacturier de la confection de vêtement. A-POC est basé sur la possibilité de produire des longueurs interminables de nouveau tissu, avec des propriétés jusqu'alors inconnues, grâce à des machines CNC. Miyake forme ensuite le Reality Lab., à partir de 2007, dans le but d'explorer les manières futures de créer les objets, des vêtements aux produits industriels. Le Reality Lab. présente en 2010 le plus récent projet de Miyake, 132 5., une gamme de vêtements pliés qui se développent à partir de formes géométriques bidimensionnelles. La collection 132 5. prend racine dans les mathématiques et l'origami, comme en témoigne entre autres le sens innovateur de ses numéros :

- 1 fait référence à la structure d'une seule pièce utilisée pour chaque produit ;
- 3 fait référence au 3D ;
- 2 vient du processus initial 2D de pliage;
- 5. , précédé par une espace, fait référence à la métamorphose des formes pliées en vêtements ou objets.²²

²² Récupéré le 5 mai 2015 de http://in-ei.artemide.com/html/1325_EN.html

1.4.4 Précédents en sciences

MIURA, Koryo : inventeur du motif Miura-Ori – 1980

[approche matérielle] (Voir Figure 1.12 à la page 27)

Astrophysicien et professeur à l'Université de Tokyo, Koryo Miura a inventé une méthode de pliage rigide permettant de plier et de déplier une feuille dans un seul mouvement rapide. Ce motif, qui a la particularité mathématique d'avoir un coefficient de Poisson négatif²³, est formé d'une tessellation de parallélogrammes. Il a notamment été utilisé pour le déploiement des voiles solaires du *Space Flyer Unit* mis en orbite par le Japon en 1995.

LANG, Robert : Eyeglass – 2002

[approche matérielle] (Voir Figure 1.13 à la page 27)

Le docteur Lang est un physicien et un artiste considéré comme un des pionniers dans le mariage interdisciplinaire des mathématiques et de l'origami. Découvreur d'une méthode de conception de pliage basée sur la juxtaposition de cercles, ses études des algorithmes et des relations entre les mathématiques et les motifs d'origami ont contribué à la réalisation de formes d'origami d'une très grande complexité. Lang a entre autres réalisé plusieurs pliages à grande échelle :

Monumental origami brings its own challenges in both the composition and the realization. The physical properties of paper change nonlinearly with size, so that a fold that can be easily created in small size may be difficult or impossible at larger scale. Even if it can be folded, it may not support itself. And the range of large papers is somewhat limited, which further constrains the design.²⁴

Ces objets figuratifs respectent certes les principes de l'origami (une seule feuille de papier pliée), mais perdent une certaine finesse dans le changement d'échelle.

²³ La plupart des matériaux, lorsqu'étirés dans une direction, se compriment dans les deux autres directions perpendiculaires à la direction d'expansion (coefficient de Poisson positif). Cependant, un matériau avec un coefficient de Poisson négatif devient plus grand dans les deux autres dimensions lorsqu'il est étiré.

²⁴ Lang, R. Descriptif de l'origami monumental. Récupéré le 2 juin 2015 de <http://www.langorigami.com/art/monumental/monumental.php>

Lang a également contribué au développement des coussins gonflables pour automobiles (optimisation du pliage à plat) et fut également consultant au Lawrence Livermore National Laboratory pour la conception d'un télescope spatial déployable de 100m de diamètre.

YOU, Zhong & KURIBAYASHI, Kaori : endoprothèse médicale autodéployable – 2005 [approche matérielle] (Voir Figure 1.14 à la page 27)

Professeurs à l'Université d'Oxford, You et Kuribayashi ont conçu une endoprothèse vasculaire servant à débloquer les veines et les artères. Contrairement aux endoprothèses traditionnelles faites de tiges métalliques, cette nouvelle endoprothèse est faite d'une mince feuille d'alliage de nickel et de titane pliée selon le motif d'origami Waterbomb.²⁵

Cet objet est pertinent pour la présente recherche non seulement car il est réalisé à partir d'un matériau unique pliable-dépliable mais également car il s'agit d'un objet auto-pliable.²⁶ Les principales caractéristiques de ces endoprothèses sont :

- Un petit volume d'emballage pour une livraison facile;
- Un boîtier sans revêtement supplémentaire pour prévenir les problèmes associés aux endoprothèses existantes;
- Une forme structurelle simple pour une expansion fiable.²⁷

²⁵ OpenWetWare. Récupéré le 17 mars 2015 de http://openwetware.org/wiki/Origami_Tissue_Engineering

²⁶ L'utilisation de processus auto-pliable est une des avenues prometteuse pour le développement futur de l'origami architectural.

²⁷ You, Z. et Kuribayashi, K. (2003). *A novel origami stent. Proceedings of Summer Bioengineering Conference*, Actes du colloque, 25-29 juin 2003

1.5 Enseignements des précédents

Bien qu'un exercice similaire pourrait être fait en mettant l'accent sur l'approche formelle ou théorique, la majorité des différents projets précédemment cités sont des exemples d'une approche matérielle du pli, un biais volontaire servant à illustrer la diversité des réalisations s'en réclamant. À la lueur des exemples présentés, nous pouvons conclure ceci :

- L'approche matérielle se prête bien à une petite échelle, comme c'est le cas pour des endoprothèses, des plis sur du textile, des abat-jours, etc. À ce titre, on peut avancer que le pliage fonctionne à l'échelle du design industriel, car les usines sont en mesure de produire des matériaux aux dimensions suffisantes pour répondre aux besoins et réaliser les objets souhaités;
- Les projets qui quittent l'échelle du design industriel pour investir l'espace architectural se situent essentiellement dans le domaine de l'installation artistique ou architecturale. Cette échelle, mitoyenne entre l'objet et le bâtiment, semble bien adaptée aux systèmes pliés et aux dimensions des matériaux présentement disponibles;
- La vaste majorité des grands objets ou installations décortique le système global de pliage en une suite de modules plus facilement manipulables. Jusqu'à présent, aucun projet de grande envergure n'a été réalisé grâce au pliage d'un unique matériau en feuille;
- Les motifs plus complexes et/ou circulaires sont plutôt associés à un travail artisanal qui requiert un pliage à la main;
- Les bâtiments se réclamant du pliage utilisent généralement le pli comme stratégie formelle et/ou conceptuelle, mais peu ou pas en tant que travail réel sur la matière, sauf pour certains éléments architecturaux.

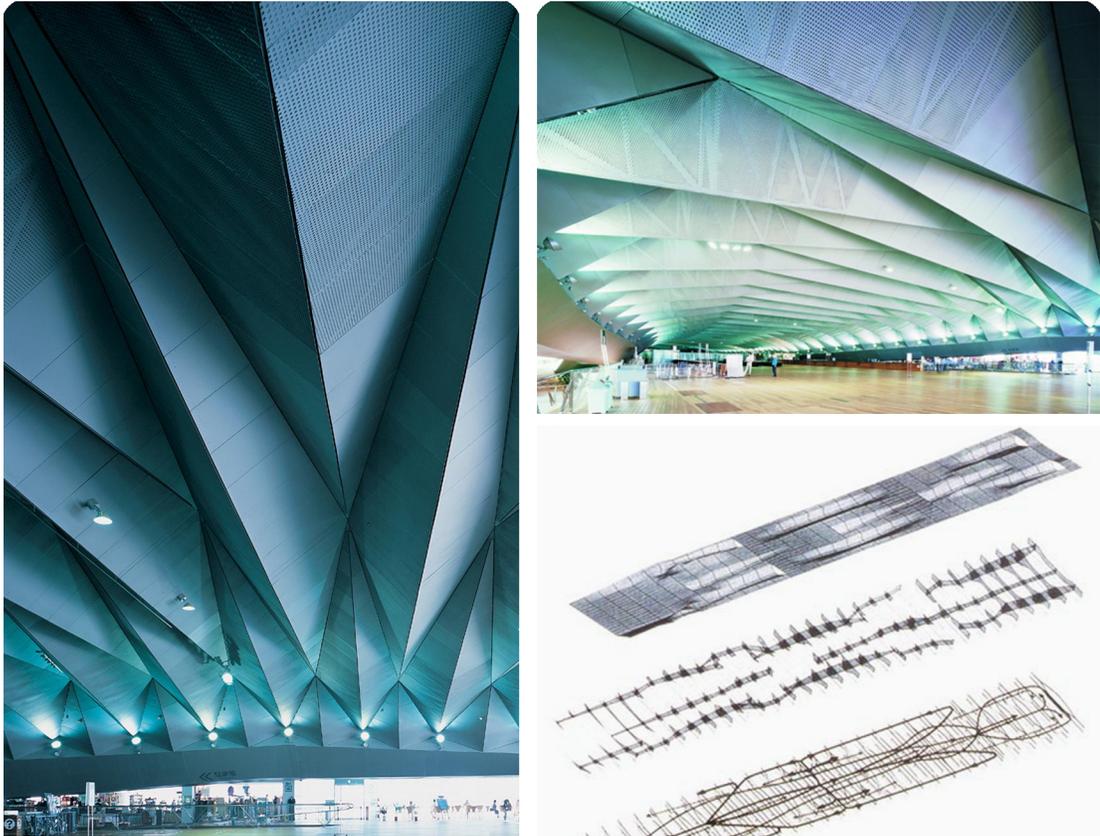


Figure 1.1 FOA : Yokohama Pier Port Terminal. Vues de l'espace multifonction et diagramme illustrant le lien entre la circulation et les surfaces pliées.



Figure 1.2 Eisenman: Rebstockpark
Perspective et plan d'ensemble.

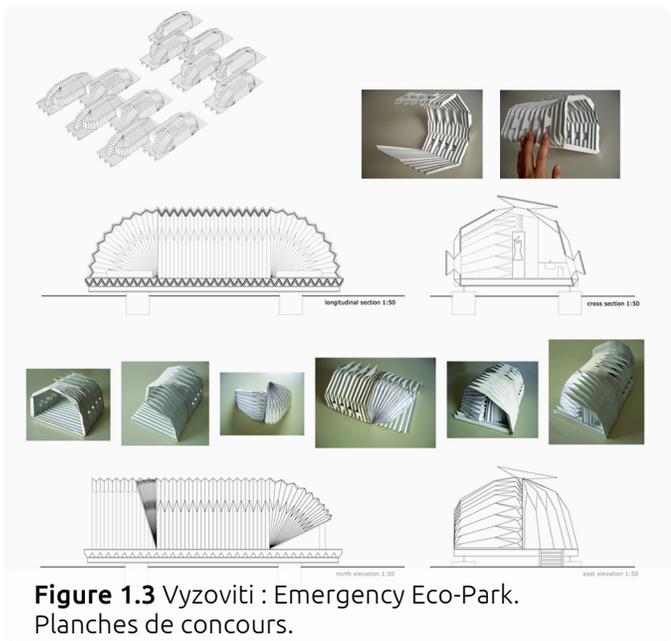


Figure 1.3 Vyzoviti : Emergency Eco-Park.
Planches de concours.

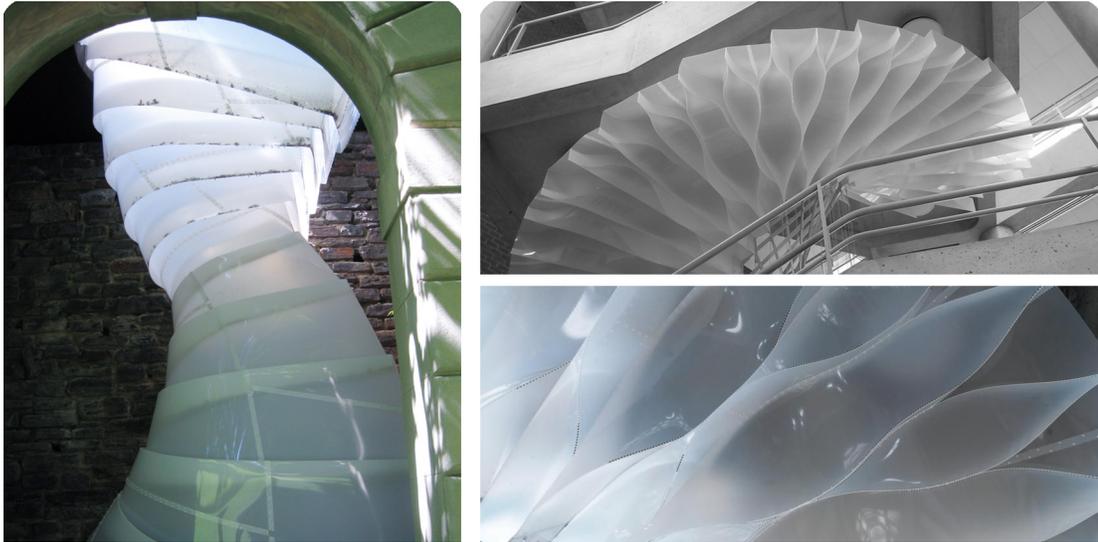


Figure 1.4 Lamere: 25-Arch Folium (à gauche), vue et détail de l'installation Overliner.



Figure 1.5 Tehrani : Change of State. Différentes vues de l'installation.



Figure 1.6 RoboFold : ARUM pour ZHA. Différentes vues de l'installation.

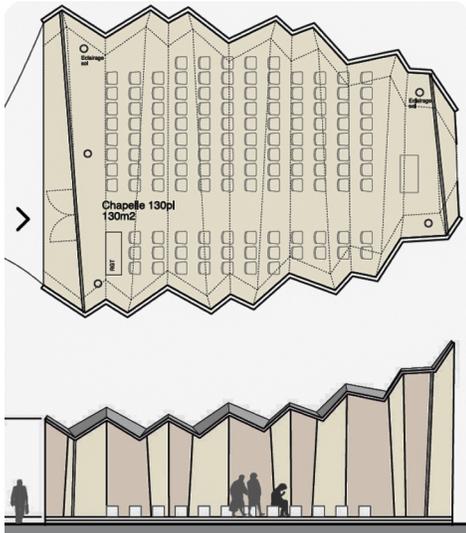


Figure 1.7 Weinand : Chapelle St Loup. Plan, coupe et photo extérieure.



Figure 1.8 Eliasson : Die Dinge, [...] et One-Way Colour Tunnel. Vues variées.



Figure 1.9 Schlian : We are building this ship as we sail it. Vues variées.

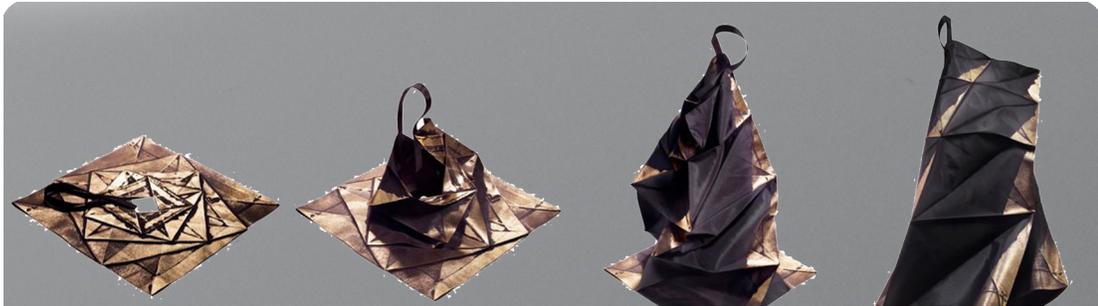


Figure 1.10 Miyake : Exemple de déploiement d'une robe de la collection 132 5.

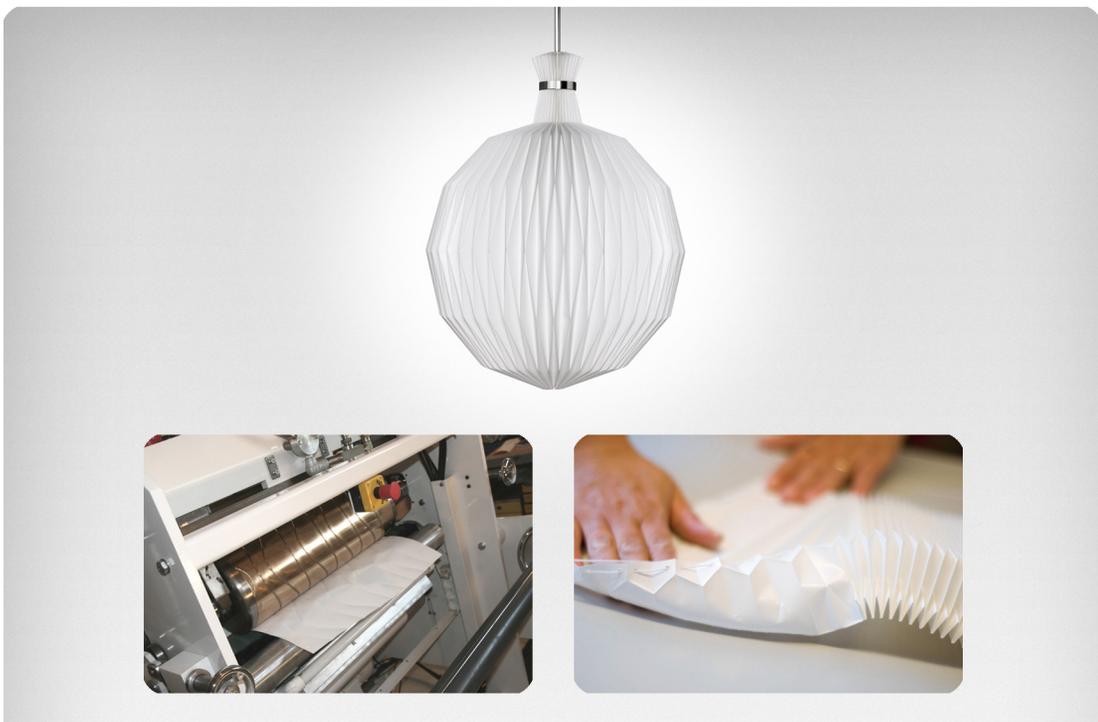
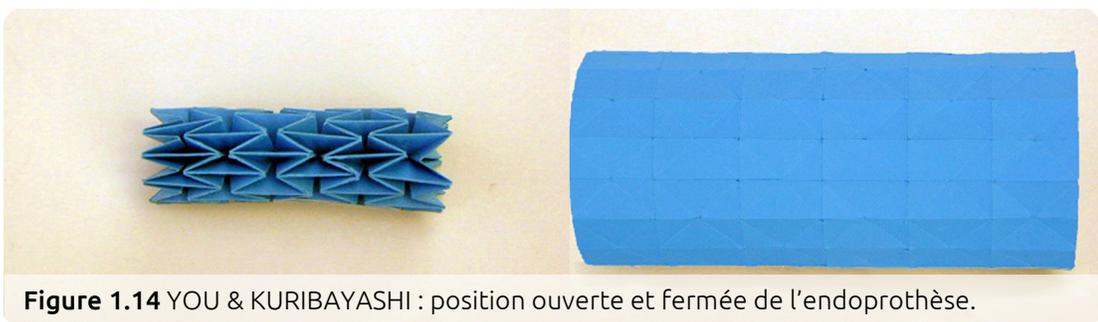
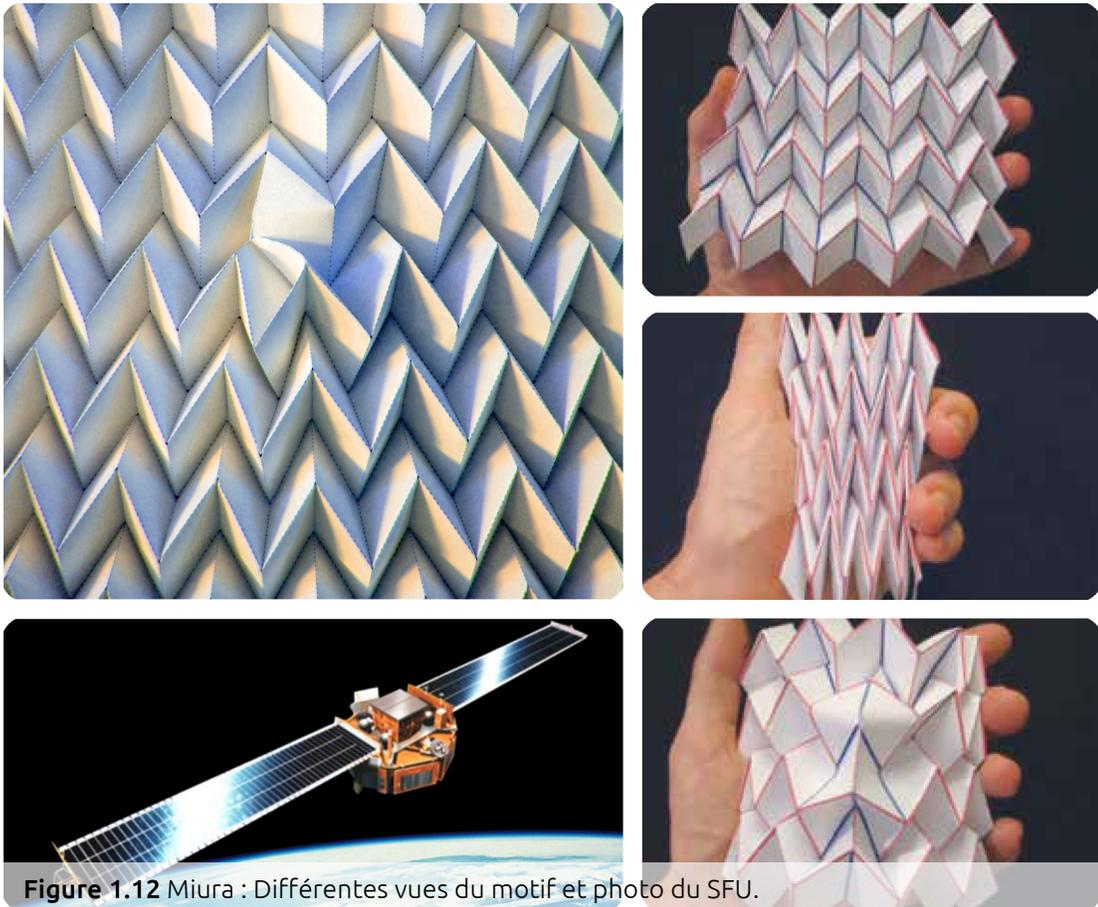


Figure 1.11 KLINT : The Lantern. Vue de la lampe, de la gaufreuse et du pliage à la main.



1.6 Questions de recherche

La recherche se déploie autant sur le registre fondamental qu'appliqué. Cette position est largement reconnue et analysée dans la littérature théorique du design²⁸ et propose de porter un regard dont la finalité est pratique. La démarche choisie se base sur les principes du *Research by Design*, qui inclut le processus itératif comme spécificité propre au design.²⁹

Pour questionner les limites dimensionnelles du pliage, cette maîtrise de recherche-conception commande la réalisation de prototypes (idéalement construits à l'échelle 1:1) afin de valider l'hypothèse de départ. Ce prototypage ne peut se faire sans s'appuyer sur une base théorique, c'est pourquoi deux types de questions interreliées sont au cœur de ce mémoire.

1.7 Le Pourquoi théorique

Les professionnels faisant de la recherche sur le pliage des matériaux en feuille tentent tous, à leur manière, de transposer leurs préoccupations théoriques dans leurs expérimentations pratiques. La question théorique qui est en filigrane de ce mémoire est :

Quel est l'argumentaire théorique permettant la compréhension et l'utilisation des stratégies de pliage de type origami en design de l'environnement?

Bien que l'argumentaire théorique énoncé au chapitre II offre une première assise à cette question, les justifications théoriques seront également précisées tout au long des chapitres sur les cycles d'expérimentation. En effet, les différentes étapes de prototypage ont mis en lumière certains avantages des pliages ainsi que leurs

²⁸ Cross, N. (2007). *Designing ways of knowing*. Basel : Birkhäuser.

²⁹ Hauberg, J. (2011). *Research by design – a research strategy*. Dans *Architecture & Education Journal*, no. 5, pp. 46-56.

caractéristiques uniques, qui trouvent leurs explications dans des règles mathématiques, physiques et conceptuelles.

1.8 Le Comment pratique

Le pliage semble universel : les designers d'horizons divers ont tous, un jour ou l'autre, expérimenté le pli. Appliquée au papier, cette technique, qui porte le nom d'Origami en Asie (Ori = pliage, Kami = papier), était même un des principaux sujets de l'atelier d'introduction au design que Josef Albers dirigea au Bauhaus des années 1920 jusqu'à la dissolution de l'école en 1933. Une quantité phénoménale d'ouvrages a été publiée sur les techniques de pliage du papier, dont plusieurs livres étoffés qui mettent l'accent sur des concepts génériques de pliage, ce qui porte à croire qu'il y a suffisamment de ressources disponibles pour répondre à la première question :

Comment plie-t-on (le carton)?

Pourtant, au-delà des principes techniques permettant de plier du carton (qui sont sensiblement les mêmes que l'on travaille avec du carton plat ou du carton ondulé), c'est dans le développement de motifs et les stratégies de pliages que réside tout l'intérêt de cette question. Par exemple, certains motifs permettent un pliage à plat, idéal pour le transport, alors que d'autres non. Ou encore, un pliage droit permet une plus grande flexibilité et adaptabilité qu'un pliage courbe; par contre, cette flexibilité s'obtient au détriment d'une rigidité structurelle (incroyablement plus forte avec des pliages courbes). Le détail des différentes possibilités et limites du pliage se trouve au chapitre IV : premier cycle d'expérimentation.

De plus, s'il est possible de plier une feuille de carton en suivant virtuellement n'importe quel motif, il n'est pas dit que tous ces motifs peuvent fonctionner efficacement à une plus grande échelle. C'est alors dans le transfert de l'expérimentation à une échelle plus vaste que le pliage se complexifie : jusqu'où est-

il réellement possible de transférer des principes fonctionnant à petite échelle ? Quelles sont les stratégies de transfert et d'adaptation requises pour plier une immense feuille de carton dans le but de créer un espace d'une dimension satisfaisante pour l'humain? Ce n'est donc pas seulement le concept en soi qui est intrigant, mais également le passage d'une échelle à une autre, avec tout ce que cela implique de compréhension quant aux outils, à la machinerie et aux méthodes nécessaires pour effectuer ces plis à grande échelle. Dès lors, la question de recherche prend de l'ampleur et devient :

Comment plie-t-on (le carton) à une échelle architecturale?

Le chapitre V (deuxième cycle d'expérimentation) retrace les différentes étapes ayant permis de tester cette limite d'échelle, tout d'abord via des prototypes à l'échelle 1:2, puis avec des modèles de plus en plus grands.

CHAPITRE II

LE PLI : ARGUMENTAIRE THÉORIQUE ET PRATIQUE

2.1 Introduction

En architecture, le pliage peut être interprété comme un concept théorique, une tactique formelle et, de façon plus littérale, une opération sur la matière. Bien que la présente recherche emprunte principalement à la dernière avenue, il est toutefois utile de comprendre le contexte de la première association. De plus, dans ces trois cas, le pliage permet l'émergence de nouveaux espaces sans perdre les caractéristiques intrinsèques de ce qui est plié.³⁰

Cette façon de définir le pli dérive des écrits fondateurs de Greg Lynn sur le sujet au début des années 90. Lynn argumentait dans la monographie *Folding in Architecture* que « s'il y a un seul effet produit dans l'architecture du pliage, ce sera l'habileté d'intégrer des éléments disparates dans une nouvelle mixture continue.³¹ »

Depuis les premiers travaux théoriques sur le sujet, il est maintenant acquis que l'intérêt architectural pour le pli, dans sa déclinaison théorique, se trouve dans son potentiel de cohésion et de continuité dans la juxtaposition de paramètres spatiaux, culturels, sociaux, programmatiques et contextuels à l'intérieur d'un langage unique.

³⁰ Iwamoto, L. (2009). *Digital fabrications : architectural and material techniques*. New York : Princeton Architectural Press, p.62.

³¹ Lynn, G. (2004). *Folding in architecture*. (Rev. éd.). Chichester : Wiley-Academy, p.24.

Il est entendu que la simple matérialisation du pli ne peut en aucun cas approcher la complexité du concept; en ce sens, le pli, comme toute construction théorique et conceptuelle, dépasse nécessairement le domaine formel de l'architecture.

Pourtant, il convient de noter que l'approche formelle du pli n'est pas simplement une pâle copie des autres approches. Par exemple, de grands projets architecturaux donnant l'impression d'être pliés ont néanmoins une forte vérité structurale; elle-même transposée d'une étude matérielle, c'est-à-dire à partir de modèles littéralement pliés à plus petite échelle. Quoi qu'il en soit, tout comme le pliage en tant qu'outil architectural conceptuel, le pliage de matériaux, qui plus est le pliage de type origami, partage l'aspiration de créer une fluidité et une versatilité à l'intérieur d'une surface continue.

2.2 Présentation des acteurs-clés travaillant sur les matériaux en feuille

Pour être en mesure de répondre à la question théorique de ce mémoire, soit « *quel est l'argumentaire théorique permettant la compréhension et l'utilisation des stratégies de pliage de type origami en design de l'environnement?* », un regard approfondi sur la manière dont certains acteurs-clés justifient leur travail s'impose. Ce regard se pose principalement sur le travail de Joel Lamere, assistant professeur au M.I.T. et cofondateur de l'agence GLD; et en partie sur celui de Sophia Vyzoviti, assistante professeure au département d'architecture de l'Université de Thessalie en Grèce et fondatrice associée de matrix_g.sea, une agence d'architecture interdisciplinaire faisant la promotion du design comme approche de recherche.

Joel Lamere cherche entre autres à marier son intérêt pour les géométries formelles à une compréhension spécialisée du comportement des matériaux en feuille. Bien que son intérêt architectural soit vaste, la préoccupation actuelle de ses recherches se penche plus particulièrement sur la géométrie des matériaux en feuille : comment peuvent-ils se courber, s'étirer, se plier, etc.

Obviously understanding sheet material is really critical to architecture. It's a long-standing discourse on sheet material in architecture; in part because it's

so ubiquitous in conventional construction, so everything including plywood, sheet metal steel, aluminum, plastics; all of these have to deal with the developable surface geometry, which is to say sheet shape generally. So expanding the total set of understanding about sheet shapes is a kind of obvious worthwhile architectural undertaking.³²

À travers l'étude tectonique des matériaux en feuille, Lamere cherche par-dessus tout à élargir l'ensemble des possibilités de production disponibles à l'architecture. Le pli devient donc pour lui un domaine inexploité pour augmenter les possibilités de fabrication et de construction en architecture.³³

Sophia Vyzoviti, quant à elle, travaille depuis plus de 10 ans sur les matériaux en feuille. Elle s'intéresse plus particulièrement aux notions suivantes :

- Les pliages de papier (paperfolds) en tant qu'outils et méthodes pour générer de nouvelles formes;
- Le potentiel cinétique des formes pliées;
- L'apport du design participatif dans la création de formes complexes, permettant également d'alimenter le lien entre le travail analogue et le travail digital.

Ses recherches portent entre autres sur le développement d'outils de design et sur l'exploration des processus générateurs de formes. Dans une perspective de théorie architecturale, Vyzoviti avance que le pliage peut être vu comme un concept générateur pouvant influencer les récents développements architecturaux.

L'intérêt des architectes pour la complexité formelle continue à prendre de l'ampleur au XXI^e siècle, stimulé par la technologie digitale [...] Le vocabulaire formel montre un intérêt marqué pour les courbes et les plis, les surfaces tordues, les textures intriquées et les motifs variables [...] Dans ce contexte, le

³² Lamere, J. (2012). Extrait d'un vidéo promotionnel de la School of architecture and planning du M.I.T.. Récupéré le 15 mars 2014 de <http://architecture.mit.edu/architectural-design/news/mit-architecture-video>

³³ Roy, J-F. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Joel Lamere.

| pliage peut être envisagé comme une méthode empirique et dynamique pour générer des formes complexes.³⁴

2.3 Détour par les écrits de la monographie *Folding In Architecture*

Pour décrire son approche théorique, Vyzoviti se base entre autres sur les écrits de Greg Lynn et de Peter Eisenman que l'on retrouve dans la monographie *Folding In Architecture*. Particulièrement en accord dans leurs textes respectifs, Lynn et Eisenman avancent que pour se détacher du Post-Modernisme et trouver une alternative à la logique formelle contradictoire des déconstructivistes, la nouvelle architecture cherche à mettre en œuvre deux concepts interconnectés : le pli et la singularité.

Le concept de pli est, quant à lui, transféré à l'architecture à partir des propos du philosophe Gilles Deleuze, plus particulièrement dans la théorie proposée dans son livre *Le pli. Leibniz et le Baroque*. Pour Lynn, le pli permet à l'architecture d'être partie prenante d'une complexité via une flexibilité. Selon lui, le concept de Deleuze pave la voie à l'intégration des différences dans un système continu et hétérogène. Autrement dit, la nouvelle architecture devient un système flexible pour l'organisation d'éléments disparates à l'intérieur d'espaces continus.

Contrairement à une architecture déconstructiviste de contradiction, de superposition et de collisions accidentelles, les systèmes pliés sont capables d'engendrer des connexions non prédictives avec les contraintes contextuelles, culturelles, programmatiques, structurelles et économiques. Là où la complexité et la contradiction émanaient d'un contexte conflictuel, les auteurs proposent maintenant de plier délicatement les lieux, les matériaux et les programmes à l'intérieur de l'architecture tout en maintenant leurs identités individuelles.

³⁴ Vyzoviti, S. (2008). Out of the box and into the fold. Falling right into place: The Fold in Contemporary Art, p. 39.

2.3.1 Le pli

Les assises de ce concept se trouvent dans la théorie de Deleuze qui redéfinit l'objet. Ce nouvel objet, l'objectile, constitue une modulation temporelle qui « implique une mise en variation continue de la matière autant qu'un développement continu de la forme. »³⁵ Ce concept trouve un certain écho dans le travail littéral du pli sur la matière, car, comme le décrit la philosophe Manola Antonioli, le pli pour Deleuze relève « [...] d'une énième variante d'une pensée du multiple, où la multiplicité n'est pas ce qui a beaucoup de parties, mais ce qui est plié de beaucoup de façons. »³⁶

Cette idée de multiplicité et de modulation sied bien au travail d'exploration formelle entrepris à travers le développement de prototypes. En effet, la tessellation est intrinsèquement associée au développement de motifs de pliage. Qui plus est, les proportions associées au développement du système constructif influent elles aussi sur la modulation et la variation de forme du dit système, tant en 2D (lors de l'élaboration du motif servant à plier) qu'en 3D (lors du choix du déploiement final de l'objet générant un espace satisfaisant).

2.3.2 La singularité

En s'appropriant la théorie de Deleuze, Eisenman intègre à son architecture deux concepts entrelacés, soit le pli et la singularité. Pour Eisenman, la notion d'évènement, associé à l'objectile de Deleuze, est essentielle à la discussion sur la singularité. La singularité est en effet différente de l'individualité, du spécifique ou du particulier, faisant plutôt référence à la possibilité, dans un système répétitif, qu'une copie soit différente d'une autre copie. Cette façon de concevoir la singularité pavera la voie à l'utilisation d'outils paramétriques en architecture, outils

³⁵ Deleuze, G. (1988). *Le pli Leibniz et le baroque*. Paris : Éditions de Minuit, p. 26.

³⁶ Antonioli, M. (2010). *Les plis de l'architecture*. Récupéré le 11 mars 2014 de <http://leportique.revues.org/2491>

qui permettent justement de manufacturer une multitude d'objets uniques, contrairement à la logique industrielle qui requérait la fabrication d'une grande quantité d'objets identiques.

Pour Vyzoviti, les pliages de papier sont intrinsèquement changeants : ils sont variables, altérables, ajustables et fluides; un pliage est potentiellement plusieurs.³⁷ En effet, les pliages peuvent être vus comme un processus algorithmique dont le résultat, une fois déplié, garde les traces de l'objet final. Le motif «imprimé» sur le matériau en feuille permet certes de refaire le pliage, mais une certaine variation demeurera toujours.

Un motif à plat peut donc générer une grande famille de pliage, produisant une catégorie d'objets partageant certaines propriétés intrinsèques, qui sont donc tout un chacun singulier, et non identique.³⁸ Dans cette modulation du déploiement se trouve une première application du concept de singularité.

Le caractère paramétrique des motifs de pliage est une autre façon d'entrevoir la singularité associée au pli. Un motif d'origami est un type de design qui peut facilement être formulé en tant que règles paramétriques. Une fois paramétrée, une infinité de variations peut être appliquée au motif et générée par des machines CNC, créant ainsi autant d'objets variés et singuliers.

2.4 Approche matérielle du pli : dialogue entre théorie et applications

La notion de pli est bien évidemment au cœur de cette maîtrise. Par contre, puisque le travail de recherche se penche sur le pli en tant qu'action sur la matière et non en tant que concept architectural, c'est en premier lieu dans les réflexions de Lamere et de Vyzoviti que la compréhension des stratégies de pliage prend racine. Pour reprendre les propos de Lamere :

³⁷ Vyzoviti, S. (2006). *Supersurfaces : folding as a method of generating forms for architecture, products and fashion*. Amsterdam : BIS Publishers, p. 8.

³⁸ Ibid.

The Deleuze-Guattari take on folding is super interesting but it has nothing to do with actual folding! It is a proxy for other very interesting ideas but not for folding.³⁹

En somme, bien que les concepts théoriques introduits dans la monographie *Folding In Architecture* proposent un angle de compréhension riche sur la notion de pli, entre autres par rapport à la singularité propre au pliage, c'est essentiellement une recherche de l'argumentaire théorique de l'approche matérielle qui guide la présente réflexion.

2.4.1 Le pli comme langage

Lamere argumente dans un premier temps que le pliage peut être entrevu comme un univers en soi, un univers ayant sa propre logique et son propre mode de fonctionnement. En examinant les motifs testés dans les cycles d'expérimentation, le constat de logique interne apparaît clairement. Lors de la conception géométrique d'un motif de pliage, une légère variation d'un seul élément (un angle d'intersection entre deux rainures, par exemple) entraîne automatiquement la modification de l'ensemble du motif. L'analogie avec le langage, tel que proposé par Lamere, semble fort à propos :

For me the inspiration and the creativity come in part just from [...] understanding what I am doing as a kind of language, a language with constraints. And then once you understand the language then you start to build bigger sentences out of it, right? You understand certain formal output from pieces you produce, you understand the rules of how they might meet from one piece into another. And it becomes like a kind of aggregation exercise, [...].⁴⁰

Le pli est une forme de langage, car il respecte un certain nombre de règles mathématiques et géométriques. Et tout comme la construction de phrases doit

³⁹ Roy, J-F. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Joel Lamere.

⁴⁰ Roy, J-F. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Joel Lamere.

suivre un ordre logique et précis, la construction d'un système plié suit également un ordre séquentiel (communément nommé algorithmique) :

Representations of paperfolds are constructed making explicit the step-by-step procedure transforming the flat plane to three-dimensional surface; in other words, by algorithms. [...] In formal explanations of paperfolds the primal objectives are comprehension and pronouncement of chains of operations that are executed in sequences disciplined in time leading to or deriving from the three-dimensional object.⁴¹

La notion de langage est donc fondamentale, non seulement pour être en mesure de développer des motifs et des objets, mais également pour rendre compte des possibilités infinies de motifs. En effet, la question de l'évaluation est une des grandes difficultés dans le monde du pli : considérant qu'il y a des variations infinies au sein même d'une seule famille de motif, et qu'il y a autant de famille que l'imagination peut produire, comment est-il possible de déterminer quel motif est le plus adéquat pour un projet particulier?

So if to me folding is a kind of language, then when you are learning it you are trying to expand repertoires, you are trying to increase the vocabulary, you are trying to read and consume, you are trying to put nonsensical sentences together that might provoke possibilities. Those are the things that you are doing when learning a language and the language of folding is no different in that regard; and so, in order to qualify good language just like you would qualify good folding, or to make judgments on it, to choose one or the other, it almost requires already that you are good enough at it to say: «this sentence is a good one and this sentence is not, this problem is a good one and this problem is not».⁴²

Pour être en mesure de concevoir et de juger adéquatement un motif ou un prototype, il faut donc quasiment posséder un certain bagage d'expérience. C'est du moins de cette façon que Lamere envisage le pli : un langage qui s'apprend tout d'abord par la lecture, soit les algorithmes et les codes graphiques servant à décrire l'origami. Avec un peu d'expérience, on peut ensuite parler ce langage, c'est-à-dire être en mesure de plier avec précision le matériau. Il faudra par contre beaucoup

⁴¹ Vyzoviti, S. (2008). Out of the box and into the fold. Falling right into place: The Fold in Contemporary Art, p41.

⁴² Roy, J-F. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Joel Lamere.

d'expérience pour réussir à écrire de nouveaux motifs de pli et être suffisamment à l'aise pour se corriger.

2.4.2 Le pli comme matière

L'autre façon d'entrevoir le pliage est de comprendre à quel point la conception de systèmes pliés est intrinsèquement liée à la matière. Avec l'amélioration de la conception digitale et des outils de modélisation paramétrique, on parle de plus en plus d'intelligence matérielle. La matière, au lieu d'être perçue comme inerte, est plutôt appréciée et interrogée pour sa capacité à réagir. La manière dont le matériau peut répondre aux contraintes physiques fait de plus en plus partie intégrante du processus de création.⁴³

Le pliage de matériaux en feuille n'échappe pas à cette intelligence matérielle puisqu'elle est inhérente au processus de fabrication. Dans le monde du pli, il n'y a donc pas lieu de faire une distinction entre la forme et la matière. Au contraire, ces deux éléments entretiennent un dialogue constant à toutes les étapes du processus de conception et de fabrication :

In some sense I reject the bifurcation of those two things at all (material and form), especially when it comes to folding. The beauty of the form and the spatial geometry of folding is that it is inherently material. That's the thing about it that makes it so great: it is the material constraint which makes the form of folding. [...] So I kind of reject that in the world of folding these things are actually even separate; I think that the beauty of the form comes from the constraints of materiality, and that the materialization is deeply embedded in the form, so they are kind of intermingled in some ways.⁴⁴

On pourrait même argumenter qu'il est impossible de concevoir un système plié uniquement grâce à des outils virtuels; et qu'il faut donc obligatoirement réaliser un

⁴³ Sheil, B. et Glynn, R. (2011). *Fabricate : making digital architecture*. (1st éd.). Toronto : Riverside Architectural Press.

⁴⁴ Roy, J-F. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Joel Lamere.

travail direct sur la matière pour arriver à un résultat satisfaisant.⁴⁵ Le pli comme processus de fabrication doit s'ancrer dans le réel, ne serait-ce que pour prendre en considération la matière à plier, ses caractéristiques et ses dimensions, la force gravitationnelle qui exerce une pression sur la structure pliée, mais aussi, et surtout, les humains qui la plieront. Lors de ses nombreux ateliers expérimentaux, Sophia Vyzoviti est arrivée à des conclusions similaires, concernant entre autres l'éventail des possibilités qu'offrent les systèmes pliés :

The digital simulation of the deployable pattern is not adequate to predict (beyond translational deployment) the full spectrum of shape change in the physical, animated through human activation prototype.⁴⁶

Les variations de positionnement dans l'espace des matériaux en feuille pliés sont une des caractéristiques uniques des systèmes pliables. Et seule une manipulation humaine peut en révéler l'étendue, et par le fait même découvrir des configurations non prévisibles par les modèles informatiques.

En définitive, il appert que la recherche d'une réponse quant aux potentiels et aux limites du pli doit nécessairement prendre en considération l'apprentissage des règles grammaticales encadrant le pli ainsi que les possibilités et les limites associées aux caractéristiques physiques du matériau employé dans la fabrication du système constructif. C'est ainsi que les deux cycles d'expérimentation cherchent à répondre à ces orientations.

En effet, le premier cycle se veut une étude de motifs sans véritable *a priori*, essentiellement dans le but de se familiariser avec le langage du pli. Même si certains critères permettant de définir le système constructif sont introduits à cette étape, l'objectif premier reste la compréhension de la logique interne qui régit le monde du pliage. Le deuxième cycle cherche quant à lui à tester concrètement le

⁴⁵ Les modèles virtuels ne peuvent rendre compte adéquatement de l'épaisseur du matériau, ou encore de l'effet gravitationnel sur ce dernier ; des paramètres pourtant cruciaux dans la conception de motifs.

⁴⁶ Vyzoviti, S. Pleat and Play. ENHSA-EAAE, no.55(Rethinking the Human in Technology-Driven Architecture), 13 p.

potentiel et la limite du pli dans le monde réel, avec une matière tangible. C'est alors que la notion d'intelligence matérielle entre en jeu : jusqu'à quelles dimensions le carton peut-il être utilisé pour concevoir un système constructif plié?

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE ET MATÉRIAU

3.1 Introduction

Le travail d'expérimentation est central à la présente recherche puisqu'il est intrinsèque au processus de conception et de fabrication. C'est grâce à cette approche pratique qu'il est possible de démontrer comment l'hypothèse (les potentiels et limites des applications structurales globales du pliage) est concrètement réalisable. De plus, c'est à travers la conception de prototypes qu'un véritable travail itératif de *Research by design*⁴⁷ peut s'opérer.

La recherche à travers le design (*Research by Design*) est un type de recherche où le design occupe bien évidemment une part essentielle du processus. Cet élément expressif qu'est le design offre la possibilité de décrire qualitativement le monde et d'apporter une vision nouvelle à travers l'expérimentation; ce qui est en soi caractéristique du champ de pratique et de recherche en architecture.⁴⁸

Puisque le design est un processus foncièrement non linéaire, un peu brouillon, et avec plusieurs chevauchements entre les différentes étapes qui le composent, une recherche se basant sur ces principes devrait elle aussi progresser par soubresauts, chevauchements et retours en arrière.

L'objectif de la présente recherche est d'embrasser le fait que le design est un processus où l'on « apprend en faisant ». En d'autres mots, ce n'est pas seulement la

⁴⁷ Hauberg, J. (2011). Research by design – a research strategy. Dans *Architecture & Education Journal*, no. 5, pp. 46-56.

⁴⁸ Ibid.

solution au problème de design qui doit être trouvée grâce au processus créatif, les paramètres mêmes de l'objectif de recherche-conception doivent être déterminés en faisant ce travail conceptuel.⁴⁹ C'est en passant à travers une série d'itération, soit les différents cycles d'expérimentation décrits aux chapitres IV et V, que la compréhension des objectifs de cette recherche a évolué et que le design des prototypes est devenu de plus en plus riche et précis.

Ce processus d'apprentissage à travers l'action est donc le fil conducteur de cette recherche. Qui plus est, le choix de ce travail itératif est calqué sur la démarche méthodologique de Joel Lamere, un des acteurs-clés contemporains réfléchissant sur le pliage des matériaux en feuille. Lamere construit depuis 2005 un langage spécifique associé au pli à travers le développement de motifs 2D et de modèles 3D :

It's just by the nature of the shape of the scoring line that you use, you produce certain effects in the way the curvature of the actual surface happens. My research is very much into how that works, essentially, and all the ways we can model that and use it as a design tool. Right? It seems like such a simple thing, really. It's a material kind of research, obviously, but it's also related to a much longer history of architecture and drawing. It's about how the inscription of a line becomes a three-dimensional form. To me, it's a contemporary version of a much longer history of discourse.⁵⁰

Cette vision matérielle de la recherche, décrite par Lamere, sous-entend qu'au-delà de la théorisation et de la modélisation informatique il faut éventuellement plier la matière et construire l'objet ou l'espace projeté. Cette approche est au cœur du processus d'expérimentation et sied parfaitement au cadre d'une recherche à travers le design.

⁴⁹ Mitchell, C.T. (2002). *User-responsive design : reducing the risk of failure*. New York : Norton.

⁵⁰ McNichol, D. (2011). Entrevue avec Lamere, J. The accidental architect. blog People + Projects : Boston Society of Architects/AIA. Récupéré le 8 avril 2014 de <http://www.architects.org/news/accidental-architect>

3.2 Cycles d'expérimentation

La recherche en architecture est depuis toujours liée aux matériaux et au dimensionnement de ceux-ci; plus spécifiquement à une expérimentation matérielle permettant une interaction entre l'œil, la main et l'esprit. Pour reprendre les propos de Jorgen Hauberg :

By far, most of our cognition is acquired physically by imitating or repeating, through actions and movements, by making mistakes, and feeling pain or pleasure [...] In essence, cognition and experience are of a personal nature, but they can also be objective and true.⁵¹

C'est en effet dans cet état d'esprit que le travail de conception et d'expérimentation a été réalisé. La compréhension de la mécanique du pli s'est faite en premier lieu en reproduisant des modèles existants, pour ensuite réaliser, à force de tâtonnements et d'erreurs, des prototypes mieux adaptés aux objectifs de recherche.

La méthodologie utilisée ancre la problématique dans une exploration matérielle et en ce sens, le développement du système constructif ici proposé est basé sur la classification des différents types de recherche en design de l'environnement tels que définis par Forsyth et Crewe, plus particulièrement la recherche nommée « travail créatif ». Le travail créatif et itératif réalisé pour la présente maîtrise a en effet été fait systématiquement à partir d'un ensemble de travaux précédents (entre autres, les travaux de recherche de Sofia Vyzoviti, Joel Lamere, Erik Demaine et Gregory Epps). De plus, les chapitres portant sur les cycles d'expérimentation proposent un argumentaire permettant d'expliquer et de justifier tout le processus créatif. Selon Forsyth et Crewe, le travail de recherche créatif peut en outre être réalisé de la manière suivante :

Multiple design options can be generated to show the range of potential environments, and then these can be evaluated or critiqued. For example, one

⁵¹ Hauberg, J. (2011). Research by design – a research strategy. Dans *Architecture & Education Journal*, no. 5, p. 47.

can easily imagine a two or three-dimensional matrix where designs systematically vary along two or three characteristics, producing a clear range of options. These could then be evaluated in terms important to the researcher – formal, social, ecological, and so on.⁵²

Le premier cycle d'expérimentation se base spécifiquement sur une méthodologie semblable, soit la mise en place d'une matrice permettant de produire une série d'options qui a été documentée et évaluée. Le second cycle d'expérimentation porte quant à lui sur le développement de proportions adaptées et de nouvelles combinaisons de motifs de pliage dans le but de tester l'hypothèse de travail, soit les potentiels et les limites d'une application intégrale de ces motifs à grande échelle.

3.3 Lien entre les cycles d'expérimentation et l'argumentaire théorique

Les designers et chercheurs précédemment cités partagent un intérêt pour le pli et les matériaux en feuille et tentent d'approfondir leur compréhension du phénomène à la fois dans un cadre académique et professionnel. Ils ont des questions et des intérêts précis qui les guident dans la mise en place d'une méthodologie rigoureuse, et leur permettent de justifier leur façon d'expérimenter sur les matériaux en feuille.

C'est en analysant l'argumentaire théorique de certains et parfois même en discutant avec d'autres de leur méthodologie que l'hypothèse de cette recherche fut précisée et que l'angle d'approche expérimental fut peaufiné.

Puisque l'organisation de travail pour cette maîtrise oscille entre le volet recherche et le volet conception, il apparaît important de bien articuler la conciliation entre ces deux aspects. Pour ce faire, la notion d'entretoise⁵³ a été empruntée à Jean Lancri,

⁵² Forsyth, A. et Crewe, K. (2006). Research in Environmental Design : definitions and limits. Dans *Journal of Architectural and Planning Research*, vol. 23, no. 2, Summer 2006, p.169.

⁵³ Lancri, J. (2006). Comment la nuit travaille en étoile et pourquoi ? Dans Pierre Gosselin et Éric Le Coguiec (dir.), *La recherche création pour une compréhension de la recherche en pratique artistique*, (p. 9-20). Québec: Presses de l'Université du Québec.

plasticien et professeur à l'université de Paris I. Cette notion implique non seulement d'entrecroiser la théorie et la pratique, mais plus particulièrement de permettre au travail de recherche de s'appuyer sur celui de conception, et vice-versa. De cette manière, chacune des composantes en recherche-conception permet de méditer sur l'autre.

Deux déclinaisons de cet entretoisement ont eu lieu. La première établit un dialogue entre le volet théorique (comprendre comment les acteurs-clés parviennent à traduire leur théorie dans leurs travaux pratiques) et le volet pratique (utiliser cette compréhension pour développer un système constructif). La seconde déclinaison concerne spécifiquement le travail d'expérimentation et propose d'alterner plusieurs fois les cycles d'atelier et de réflexion. À partir des questions de recherche énoncées au chapitre I, la séquence suivante a été suivie pour chacun des cycles d'expérimentation :

- Aller-retour entre l'exploration en atelier et la conception de prototypes;
- Compréhension des découvertes;
- Écriture d'une synthèse.

Malgré le caractère linéaire de cette méthodologie, il est évident que puisqu'un va-et-vient entre recherche et conception est souhaité (pour bonifier l'une et l'autre composante), une intégration plutôt organique des différentes composantes du travail a été à l'œuvre lors de cette recherche. Pour finir, parce que l'action de plier une surface est intrinsèquement matérielle, la méthodologie des cycles d'expérimentation ne peut être complète sans une réflexion sur le matériau utilisé. Les prochaines sections expliquent pourquoi le choix du matériau s'est arrêté sur le carton et décrivent ses principales caractéristiques.

3.4 Choix du matériau

Une réflexion quant à la disponibilité d'un matériau dans l'industrie locale québécoise a été nécessaire pour ancrer de façon concrète le travail de prototypage. Deux options ont été envisagées dans les premières étapes de la recherche :

1. La réutilisation des déchets de l'industrie des pâtes et papiers. Ce choix est cohérent avec l'importance de cette industrie, qui est l'un des principaux leviers économiques du Québec, produisant entre autres 41,3 % du papier journal du Canada et 10 % du papier journal du monde entier.⁵⁴
2. L'utilisation de l'aluminium, un matériau dont la demande augmente régulièrement depuis plus de 100 ans et pour lequel le Québec est le troisième producteur mondial.⁵⁵

Le choix de travailler avec un matériau ou l'autre entraîne bien évidemment son lot d'avantages et d'inconvénients. La réutilisation de carton recyclé permet d'enrichir la problématique en y intégrant le thème de l'écoconception, mais cela a également un impact sur la pérennité des prototypes réalisés.⁵⁶

Pour sa part, malgré une empreinte écologique six fois plus élevée que le carton, l'aluminium a l'avantage d'être recyclable à l'infini sans perdre ses caractéristiques essentielles intrinsèques (contrairement aux fibres de papier). De plus, c'est un matériau malléable qui résiste à l'oxydation, des caractéristiques fort intéressantes

⁵⁴ Feuilles « L'INDUSTRIE DES PÂTES ET PAPIERS – COUP D'ŒIL 2001 » publiés par l'Association des industries forestières du Québec. Récupéré le 1^{er} février 2014 de http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/milieu_ind/bilans/pates_01/chapitre_1.htm#1

⁵⁵ Sources : Ressources naturelles Canada et Association de l'aluminium du Canada. 1901-2012, Récupéré le 1^{er} février 2014 de <http://www.ledialoguesurlaluminium.com/impact-économique--2/production-et-marchés>

⁵⁶ Construire en carton n'est pas aussi éphémère qu'il n'en paraît. Au XIX^e siècle, du mobilier était fabriqué en papier mâché et en carton bouilli. Les Asiatiques ont très tôt employé la pâte à papier pour fabriquer du petit mobilier ainsi que certains éléments architecturaux, dont la fameuse cloison japonaise de papier joshi. Depuis les années soixante, une quantité considérable d'objets en carton sont conçus, les plus célèbres étant la chaise Spotty de Peter Murdoch et les fauteuils de Frank O. Gehry. La conception de mobilier en carton prend maintenant un nouvel essor grâce aux technologies numériques et paramétriques. Voir Leblais, O. (2008). *Carton : mobilier, éco-design, architecture*. Marseille : Parenthèses.

pour la réalisation du système constructif envisagé. Par contre, il n'offre aucune possibilité de déploiement, comme le fait le carton.

Pour faire un choix de matériau éclairé, il est important de comprendre qu'on ne peut pas transposer intégralement les résultats d'une analyse structurale et formelle réalisée à petite échelle (l'étude de prototypes en papier, par exemple) à un objet à grande échelle (la réalisation d'un système constructif en carton). En d'autres termes, concevoir de petits pliage de papier permet de réfléchir aux géométries possibles, mais n'est en rien garant du comportement structural des systèmes globaux réalisés en carton à une échelle architecturale.

C'est donc grâce à un travail d'expérimentation, fait en pliant le matériau à sa pleine grandeur, que le potentiel et la limite du pli peuvent être testés. En d'autres termes, dans le monde du pliage, le matériau dicte en grande partie la forme finale possible. C'est avec cette contrainte de l'expérimentation matérielle que la décision de travailler avec le carton s'est rapidement imposée, et ce, pour plusieurs raisons :

- C'est un matériau «démocratique» puisqu'il est facilement accessible et peu coûteux⁵⁷;
- C'est un matériau complètement recyclable produit presque entièrement de matière recyclée (entre 85 % et 100 % de pâte de papier recyclé pour le carton de type kraft)⁵⁸ ;
- Contrairement à l'aluminium, c'est un matériau facilement manipulable, pliable à la main, et dont l'assemblage peut se faire sans outils spécialisés;

⁵⁷ Cette caractéristique est souvent invoquée par les concepteurs travaillant avec du carton, dont entre autres Sophia Vyzoviti ou encore Matcha & Ljubas.

⁵⁸ Lorsqu'il n'est pas fait à 100 % de pâte de papier recyclé, le pourcentage restant provient de fibres neuves issues de déchets de scieries et de sous-produits de la forêt. On peut donc certes qualifier le produit de matériau écologique. Les cartons fournis par l'entreprise Cascades sont également certifiés FSC ; Cascades étant la 5^e plus importante récupératrice de vieux papiers en Amérique du Nord et la 3^e plus importante utilisatrice de fibres recyclées. Récupéré le 1er mai 2015 de <http://www.cascades.com/fr/developpement-durable/environnement/matieres-premieres/>

- Le carton est léger (particulièrement le carton ondulé) et aisément transportable ;
- Le carton peut être plié et déplié plusieurs fois avant d'atteindre sa limite, soit un bris des fibres de bois.

Pour conclure, sachant qu'il est techniquement plus difficile et plus dispendieux de travailler sur des prototypes en aluminium, et sachant aussi que le carton permet de répondre adéquatement aux paramètres de recherche, des pourparlers avec la compagnie Cascades ont été entamés dans le but de pouvoir bénéficier de leur expertise. Un partenariat a été créé avec les divisions Multipro et Norampac de Cascades, ce qui a entre autres permis l'accès ponctuel à une machine CNC pour rainer le carton ondulé et à différents échantillons de carton plat et ondulé pour la réalisation des prototypes lors du deuxième cycle d'expérimentation.

3.5 Descriptif et limites dimensionnelles du matériau

Le carton peut être divisé en deux grandes familles, soit le carton plat et le carton ondulé. Les premiers prototypes furent réalisés avec du carton plat. Voyant certaines limites structurelles à ce type de carton, et surtout la difficulté de le rainer à la main, la suite des expérimentations a été réalisée avec du carton ondulé.

3.5.1 Le carton plat

Le carton plat est un matériau multicouche, habituellement composé de trois épaisseurs ou plus. Le fait d'utiliser plusieurs couches dans la fabrication du carton fournit des caractéristiques techniques importantes et donne de la souplesse dans le choix des fibres (la pâte) pour chaque couche. Ceci procure une certaine rigidité au

carton, ainsi que la possibilité d'être rainé et plié.⁵⁹ Sa rigidité et sa durabilité sont responsables de sa bonne force mécanique et de sa résistance à la compression. Outre le nombre de couches et le type de pâte utilisé pour chacune, les spécifications du carton plat varient en fonction du grammage⁶⁰ (poids par mètre carré, en grammes) et de l'épaisseur (définie en microns en Europe et en points en Amérique).

Le carton utilisé dans la fabrication des prototypes est du carton non couché recyclé (URB)⁶¹, un carton ayant une surface rugueuse et macroporeuse, par opposition au carton couché dont une des couches externes est recouverte de pigments minéraux favorisant l'impression. Le carton non couché est composé à 100% d'une pâte recyclée non blanchie et présente donc la couleur naturelle des ingrédients (le blanchiment réduit la résistance des fibres de 5 à 10%).

Le carton URB est distribué en rouleaux et disponible dans des épaisseurs allant de 15 à 60 points, un point correspondant à un millième de pouce. Bien que la largeur maximale d'un rouleau peut être de 132 pouces (11 pieds), les largeurs couramment utilisées par l'industrie québécoise dépassent rarement 6 pieds. La longueur exacte des feuilles n'est pas une donnée connue puisque le carton se vend en rouleau et au poids, mais on peut facilement l'estimer à plusieurs centaines de pieds.⁶²

Contrairement aux idées reçues, le carton d'aujourd'hui est très performant techniquement, offrant une grande résistance à l'écrasement et à la flexion. La technologie Fibersmart développée par Cascades et utilisée dans la confection du

⁵⁹ Pro-Carton. (2008). *Fact File Part 5 : Cartonboard*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

⁶⁰ Le seuil entre le papier et le carton est normalement considéré comme étant à 160g/m², grammage à partir duquel le matériau est assez rigide pour être utilisé par l'industrie de l'emballage. La plupart des cartons pliables ont un grammage situé entre 200 et 600 g/m².

⁶¹ Pour de plus amples informations sur le carton URB, voir Cascades. (2010). *Le carton non couché recyclé*. [Brochure technique], récupéré le 25 mars 2014 de http://emballage.cascades.com/doc/2010_11_URB.pdf

⁶² Les informations les plus précises disponibles donnent les mesures du diamètre du mandrin (4, 12 ou 16 pouces) ainsi que le diamètre externe du rouleau, variant entre 50 et 72 pouces.

carton URB permet de créer un produit contenant moins de fibres, procurant ainsi un rapport poids-force supérieur aux cartons traditionnels. Des options d'encollage ou de lamination permettent également d'obtenir un carton résistant à l'eau, à la vapeur, à la chaleur et à la graisse.⁶³

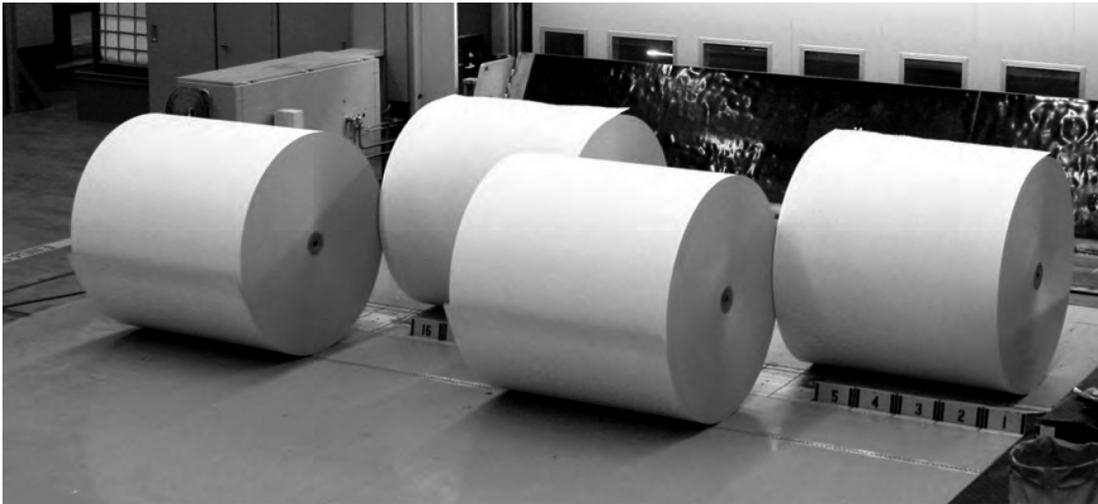


Figure 3.1 Rouleaux de carton plat. Image tirée de Pro-Carton. (2008). *Fact File Part 5 : Cartonboard*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

3.5.2 Le carton ondulé

Datant du XIX^e siècle, le carton ondulé est certainement le principal et l'un des plus anciens matériaux utilisés pour l'emballage de produits. Sa grande résistance mécanique, de loin supérieure à celle du carton plat, lui vient de sa structure même : une cannelure (une feuille de papier Kraft ondulée mécaniquement) prise et collée entre deux feuilles de Kraft planes (typiquement un carton non couché).⁶⁴

⁶³ On peut entre autres laminer le carton plat avec un film d'aluminium ou de polyester métallisé pour résister à la chaleur, du papier sulfuré pour résister à la graisse, ainsi que diverses extrusions plastiques de polyéthylène, de polypropylène ou de polyester pour résister à l'eau et à la vapeur.

⁶⁴ Besenval, V. (1988). La fabrication du carton ondulé. Paris : F. Nathan.

Le carton ondulé n'est pas seulement plus résistant que le carton plat, il est également plus léger. Outre sa plus grande résistance, le carton ondulé a la caractéristique d'être un matériau chaud et acoustique; ceci à cause de sa structure cannelée qui referme une, deux ou trois épaisseurs d'air.

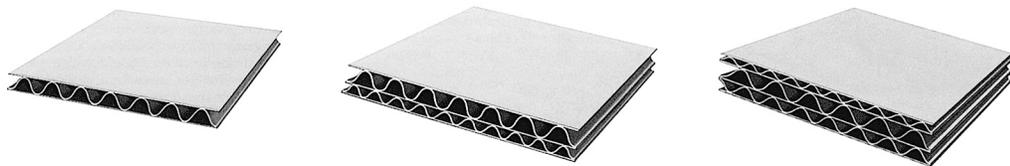


Figure 3.2 De gauche à droite, carton double face, double-double et triple cannelure. Tirée de <http://www.supersindustries.com/products.php?product=37>

Une variété de types de carton ondulé existe, identifiée selon différentes dénominations (type A, B, C, E et BC). L'ordre alphabétique des dénominations indique l'ordre chronologique de leur apparition : il n'y a donc aucun rapport direct avec l'ordre des épaisseurs. Les propriétés mécaniques des différents types varient en fonction du nombre de cannelures (simple, double ou triple cannelure), de leur ondulation, ainsi que de l'épaisseur et de la qualité des différents papiers entrant dans leur composition. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des différents types de carton ondulé utilisé par Cascades, dont toutes les feuilles ont comme dimensions maximales 8' x 10' :

| Types | Épaisseur | Flute | Nombre d'ondulations au pied linéaire |
|-------|-----------|-------|---------------------------------------|
| A | 8 mm | | 32-37 |
| B | 4 mm | | 45-52 |
| C | 6 mm | | 39-43 |
| E | 2.5 mm | | 90-98 |
| BC | 10 mm | | variable |

La cannelure est l'élément clé procurant au carton ondulé sa grande résistance. Pourtant, elle est également responsable de son principal point faible : un écrasement de la cannelure peut provoquer des points de faiblesse. Puisque les plis d'un motif d'origami vont inévitablement écraser la cannelure, le positionnement du rainage est donc d'une grande importance pour optimiser la force structurale du système constructif.

Le type de cannelure est également déterminant pour la résistance du matériau; et donc du système global. La petite cannelure (type E) a une meilleure cohésion que la grande cannelure (type A) parce qu'elle comporte un plus grand nombre d'ondulations au pied linéaire et donc davantage de colle. Parce qu'il est mince, le carton de type E est donc plus facile à plier, mais également plus fragile.

Une dernière caractéristique à considérer est le positionnement de la cannelure à l'intérieur du système constructif. Grâce à sa cannelure, le carton ondulé est en mesure de résister à des charges de compression et de flexion dans une seule direction; toute charge appliquée dans une autre direction l'écraserait.⁶⁵ La résistance unidirectionnelle du carton ondulé doit donc être prise en compte lors de la conception des prototypes.

⁶⁵ Forte, C. (2005). Packaging Material Innovation: 3-D Folded Structures. [IPTA essay competition]. p.1.

SECONDE PARTIE

VOLET PRATIQUE

CHAPITRE IV

PREMIER CYCLE D'EXPÉRIMENTATION : LE PLI COMME LANGAGE

Comment plie-t-on (le carton) : une étude de pliages droits et de pliages courbes.

4.1 Introduction

A sheet of paper cannot stand by itself, but it can stand when it is folded into two planes. For making objects of paper as well as many other things, it is essential to give the material not only length and width but also depth; this is what is meant by three-dimensional.⁶⁶

Cet extrait, tiré de l'introduction du livre *The Art of Papercraft*, décrit bien le cadre de travail de ce premier cycle d'expérimentation. L'objectif de concevoir un système constructif plié doit nécessairement débiter par une compréhension des mécanismes permettant de créer des formes tridimensionnelles à partir du simple pliage de matériaux bidimensionnels, compréhension qui s'est faite dans le cas présent grâce au travail artisanal consistant à plier à la main du papier cartonné.

Ce premier cycle de travail expérimental s'est donc déroulé en deux étapes : une étude exhaustive d'une variété de pliages droits au printemps et à l'été 2014, et une étude intuitive des exemples les plus probants de pliages courbes à l'automne 2014. L'étude des pliages droits se base essentiellement sur les motifs présentés dans le livre *Techniques de pliage pour les designers*⁶⁷, tandis que l'étude des pliages courbes

⁶⁶ Ogawa, H. (1971). *The Art of Papercraft*. Londres : B.T. Batsford.

⁶⁷ Jackson, P. (2011). *Techniques de pliage pour les designers* : papier, plastique, métal, tissu. Paris : Dunod.

reprend les sculptures réalisées par David Huffman et Erik Demaine, ainsi que certains modèles conceptuels de Joel Lamere et de J. Mitani et T. Igarashi.

Malgré le réflexe inné du designer cherchant à résoudre un problème pour aboutir à un résultat voulu, ces études ont plutôt été réalisées en évitant de concevoir des formes spécifiques ou encore de calculer précisément la forme géométrique d'un motif en 2D. Ce cycle d'expérimentation s'est plutôt attardé sur la réalisation d'une grande quantité de familles de motifs et de leurs nombreuses variations géométriques dans le but de faire des découvertes inattendues et d'aboutir à un prototype final plus riche en possibilités. Ce faisant, ces premières expérimentations ont essentiellement permis l'apprentissage du langage du pli. Bien que les motifs testés n'aient pas requis une dextérité très poussée⁶⁸, ils ont tout de même nécessité certains apprentissages de base, soit entre autres :

- La compréhension des différents symboles permettant de décrire en 2D les formes 3D résultantes ;
- La familiarisation avec les techniques de rainage et de pliage ;
- L'impact des variations de proportions des motifs sur les formes 3D.

4.2 Étude de pliages droits

L'objectif de cette étude fut de réaliser divers prototypes à échelle réduite pouvant servir de base à la conception d'un système constructif permettant d'abriter une à trois personnes. Les systèmes conçus devaient répondre aux critères suivants :

1. Le système doit pouvoir se déployer rapidement et se ranger de façon

⁶⁸ Certains motifs illustrés dans les pages suivantes peuvent sembler complexes, que ce soit par rapport à la quantité de plis à rainer ou à la difficulté de les plier. Pourtant, l'essentiel des motifs testés ont seulement requis l'usage des deux plis de base en origami, soit le pli montagne et le pli vallée. Les sculptures figuratives aujourd'hui réalisées dans le monde de l'origami tendent à avoir un nombre de plus en plus élevé de rainures, requérant par le fait même un algorithme complexe ainsi que des plis particulièrement difficiles à faire.

compacte;

2. Le système doit pouvoir être assemblé sans outils et fixé au sol avec un minimum d'ancrages;
3. Le système doit être léger et facilement transportable.

Dans le but de développer des prototypes répondant aux critères énoncés plus haut, une expérimentation contrôlée a été réalisée avec du papier cartonné. Tous les prototypes furent pliés en respectant les principes de l'origami rigide; c'est-à-dire en s'assurant que les surfaces demeurent en tout temps des polyèdres non déformés (des surfaces planes).⁶⁹ Les prototypes ont également tous été réalisés à partir de morceaux de papier égaux, soit du papier cartonné de 11" x 17" et de 80 livres; dans le but de représenter, à l'échelle 1"=1'-0", un système constructif réalisable avec une feuille de carton non couché recyclé de 11'-0" x 17'-0".

Les prototypes sont basés sur différentes familles de motif, et pour chaque famille, cinq variations du motif ont été réalisées ainsi que cinq façons différentes d'ancrer les prototypes au sol, pour un total de 25 options (5 motifs x 5 ancrages). Pour cette première série d'expérimentation, les variations de motifs conçus sont toutes régulières (c'est-à-dire que la même forme géométrique est utilisée pour créer une tessellation sur la feuille de carton). En définitive, une vingtaine de pliages ont été réalisés, comprenant essentiellement les motifs Yoshimura, Miura-Ori, Waterbomb et en V. Parmi ceux-ci, une dizaine ont été sélectionnés pour une séance de documentation photo. À la suite du présent chapitre (pages 66 et suivantes) se trouve un résumé de cette documentation, comprenant, pour chaque motif droit, son descriptif en 2D (plan et élévation du motif à l'échelle 4" = 1'-0") ainsi que des photos

⁶⁹ Les structures rigides pliées sont des structures tridimensionnelles construites grâce au pliage de matériaux en feuille, en s'assurant que tous les éléments demeurent plats une fois le pliage complété. Voir Stavric, M. et Wiltsche, A.(2013, 05/2013.) Investigations on Quadrilateral Patterns for Rigid Folding Structures – Folding Strategies - Rigid and Curved Folding. Dans Communication présentée à /au Open Systems: Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (p. 232) Singapore : The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.

illustrant l'éventail des possibilités d'ancrage. Les motifs courbes sont quant à eux représentés en plan (à l'échelle 5" = 1'-0") et par quelques vues du motif déployé.

4.2.1 Évaluation des prototypes

Les paramètres suivants ont été utilisés pour évaluer les différents prototypes :

1. Réponse aux critères initiaux de conception ;
2. Conception et réalisation des motifs de pliage ;
3. Complexité du motif (nombre de plis requis) ;
4. Variabilité du déploiement ;
5. Ratio « espace occupé une fois plié vs espace créé une fois déployé ».

À la lueur de ces premiers résultats, les constats suivants peuvent être formulés :

4.2.1.1 Réponse aux critères initiaux de conception

- Tous les prototypes répondent également aux critères n°2 (assemblage sans outils) et n°3 (léger et transportable) mentionnés en début de section 4.2, puisqu'ils sont conçus avec le même matériau et en utilisant les mêmes techniques. Tout en tenant compte de ces critères pour la conception du système constructif final, ils ne feront pas partie des paramètres fondamentaux pour le choix du ou des motifs employés;
- Le critère n° 1 (déploiement rapide et rangement compact) amène des réponses variées d'une famille de motifs à une autre, mais aussi au sein d'une même famille. S'il est vrai que tous les prototypes testés peuvent se plier à plat, certains sont beaucoup plus compacts que d'autres. Voici, en guise d'exemple, une comparaison du profil, une fois plié à plat, de deux variations pour le motif en V. Notez que les deux profils sont à la même échelle et représentent le résultat d'une feuille de 11" x 17" pliée à plat :

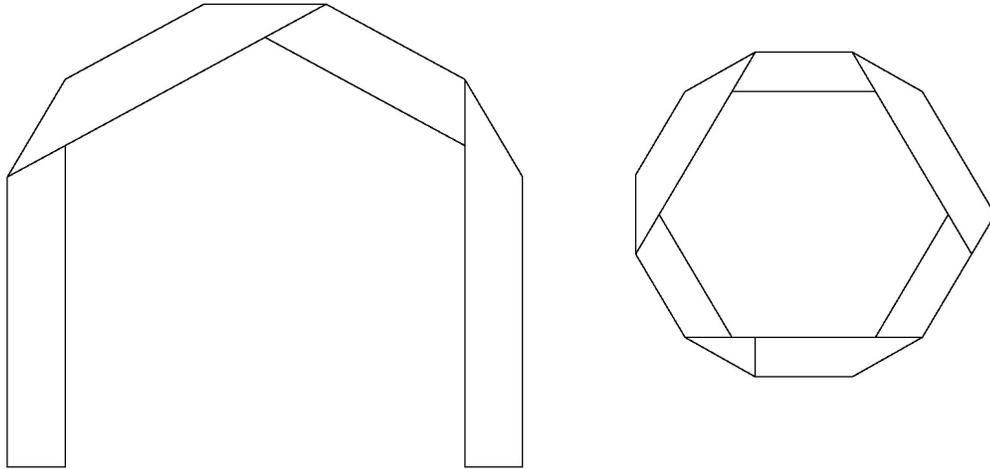


Figure 4.1 Comparaison du profil, une fois plié à plat, de deux variations pour le motif en V.

4.2.1.2 Conception et réalisation des motifs de pliage

- Planifier des variations d'un même motif sur une feuille de papier de façon aléatoire ou intuitive amène des résultats surprenants et souvent imprévisibles. Pour reprendre les propos de Vyzoviti, « Folding also implicitly allows accidental and unknown end-results for a relatively long period of the design process. »⁷⁰ Il devient donc évident que pour arriver à une forme déployée précise il faudrait calculer rigoureusement le motif à dessiner à plat (entre autres avec des dessins en coupe ou avec des logiciels de modélisation 3D);
- De manière inattendue, les variations de motifs (nombre de répétitions, angles, formes) au sein d'une même famille, même si elles semblent peu différentes en 2D, le sont parfois énormément lorsque pliées en 3D. À l'inverse, certains types de variation de motifs en 2D entraînent peu de variantes en 3D.

⁷⁰ Vyzoviti, S. (2003). Folding architecture : spatial, structural and organizational diagrams. Amsterdam : BIS Publishers.

4.2.1.3 Complexité du motif (nombre de plis requis)

- Certains motifs sont très laborieux à exécuter, car le nombre de plis est très élevé. À titre d'exemple, certains motifs se réalisent en 30 minutes tandis que d'autres peuvent prendre jusqu'à 4 heures. La complexité d'un motif n'est pas non plus garante de succès. En effet, plus la tessellation de formes est dense (motifs très petits), plus l'algorithme est long et complexe à exécuter. Même si le motif du système constructif final sera idéalement imprimé et rainé mécaniquement (avec une rainuse-découpeuse rotative ou une machine CNC), un motif complexe implique un pliage plus compliqué; pliage qui implique fort probablement un travail manuel. De plus, dans tous les cas testés jusqu'à présent, bien que le résultat soit une forme offrant une grande flexibilité, l'espace sous la forme déployée est malheureusement plus petit que celui d'autres motifs moins complexes.

4.2.1.4 Variabilité du déploiement

- Certains motifs ont énormément de flexibilité une fois déployés, permettant des courbes et des torsions dans tous les axes (x, y et z) et donc la création d'espaces et de volumes fort variés. D'autres, au contraire, sont beaucoup plus rigides, parce qu'un ou même deux axes sont pratiquement fixes. En ce sens, il est donc parfois plus difficile, pour une famille de motifs donnée, par exemple le motif en V, de produire cinq façons différentes d'ancrer les prototypes au sol. Au contraire, certaines familles semblent offrir des variations d'ancrage quasi infinies, comme c'est le cas pour les motifs Waterbomb ou Yoshimura;
- Selon le type d'ancrage, certains motifs ont le potentiel de se combiner, c'est-à-dire que plusieurs personnes, avec chacune leur propre système, pourraient les joindre pour créer un plus grand espace.

4.2.1.5 Ratio « espace occupé une fois plié vs espace créé une fois déployé »

- Il y a un très grand éventail de possibilités dans ce que l'on pourrait qualifier de ratio « espace occupé une fois plié vs espace créé une fois déployé ». Certaines familles de motifs sont très compactes une fois pliées tout en permettant la création d'un grand espace une fois déployées. Cette caractéristique est en lien direct avec le degré de mobilité du système constructif: un pliage à plat compact permet un transport plus aisé, répondant ainsi de façon plus efficace au critère n° 3.

4.2.2 Paramètres à considérer pour la conception du système constructif

Les caractéristiques qui seront mises de l'avant pour évaluer les systèmes constructifs se précisent. La mobilité devient un critère important et en ce sens, un motif qui s'écrase à plat de manière très compacte semble plus porteur et mérite d'être développé.

En lien avec la mobilité vient le ratio « compaction / déploiement ». En effet, un motif qui prend un espace minime une fois plié, mais qui ne propose pas un espace suffisamment vaste une fois déployé n'a pas beaucoup d'intérêt. Un compromis devra donc être trouvé entre la compaction à l'extrême et un déploiement suffisamment grand pour que le motif fonctionne à une échelle humaine.

La complexité du ou des motifs choisis est également un paramètre de conception important. Si le motif est trop complexe, le système constructif final sera difficilement ajustable et demandera une grande compréhension et une grande dextérité pour être manipulé.

Enfin, la variabilité et la flexibilité de positionnement de l'espace déployé peuvent également être un critère, bien que cette caractéristique soit de moindre importance. S'il est tout de même conservé, ce critère permettra d'éliminer plusieurs familles de motifs trop rigides dans leur déploiement.

4.3 Étude de pliages courbes

La plupart des modèles de pliage d'origami utilisent essentiellement des rainures droites. Les avantages en sont multiples : ils peuvent être compris en tant qu'algorithmes, se déplier et se replier avec facilité, et offrent la possibilité de se plier à plat.

Pourtant, les rainures courbes offrent un vaste éventail de possibilités de design, ainsi que des avantages physiques que les pliages droits n'ont pas. Un des principaux avantages des pliages courbes est leur grande rigidité, de loin supérieure à celle des pliages droits. Cet avantage s'explique principalement par les caractéristiques physiques du matériau. En effet, le papier plié, peu importe sa dimension, tend à rester dans un état d'équilibre. Cet état d'équilibre minimise l'énergie élastique du système général : là où le papier n'est pas plié, il tend à retourner à son état plat d'origine, et là où se trouvent les plis (une déformation plastique qui modifie la mémoire du papier), il tend à retrouver l'angle de pliage inscrit.⁷¹

Si toute forme de pliage respecte cet état d'équilibre, les pliages courbes peuvent en plus se fixer dans l'espace, créant ainsi un ensemble très stable.⁷² Ceci s'explique entre autres parce qu'un pli courbe crée une tension sur deux axes tandis qu'un pli

⁷¹ Demaine, E.D., Demaine, M.L. et Koschitz, D.(2008) Curved Crease Origami Dans Communication présentée à /au Advances in Architectural Geometry (AAG 2008) p. 29–32 Vienna, Austria

⁷² Les pliages droits, comme le motif Yoshimura ou Miura-Ori, peuvent développer un nombre quasi infini de positions dans l'espace, de l'état initial du matériau en feuille jusqu'à l'état final de pliage à plat. À l'opposé, les pliages courbes ont une limite de déploiement, puisqu'ils ne peuvent être pliés à plat. De l'état initial du matériau en feuille, les pliages courbes se développent dans l'espace jusqu'à atteindre un état limite, une position barrée (lock position), qui leur procure une plus grande stabilité que les pliages droits.

droit ne le fait que sur un seul. Malheureusement, cette stabilité s'obtient au détriment de la capacité à se plier à plat.

4.3.1 Modèles testés

Une douzaine de différents modèles connus ont été réalisés, ainsi qu'une transposition de certaines des études de pliage droit précédemment citées. Les modèles proposés par Huffman et Demaine peuvent difficilement être transposés à la conception du système constructif recherché et ont plutôt servi de base de compréhension des pliages courbes. Au contraire, les modèles conceptuels de Joel Lamere et de J. Mitani et T. Igarashi sont beaucoup mieux adaptés, car ils permettent de réaliser des volumes plus ou moins fermés sous la forme pliée.

4.3.1.1 Le modèle du Bauhaus

Les ateliers donnés par Josef Albers au Bauhaus en 1927 et 1928 sont documentés en photographies et sont reconnus comme étant les premiers exemples de modèles de pliage courbes. Le modèle le plus connu de cette période est attribué à un des élèves d'Albers, et est fait de cercles concentriques alternant des plis vallées et des plis montagnes, prenant automatiquement sa forme finale sous la tension exercée par l'alternance des plis.⁷³ Ce modèle s'avère fort difficile à plier, principalement à cause de l'alternance de plis rapprochés qui crée une tension opposée à chaque pli.

4.3.1.2 Les modèles de D. Huffman

David Huffman, ingénieur électrique et professeur des sciences de l'informatique à l'Université de la Californie, étudiait simultanément les mathématiques et l'art de

⁷³ Demaine, E.D., Demaine, M.L., Koschitz, D. et Tachi, T. (2011, 19–23 Septembre). *Curved Crease Folding: a Review on Art, Design and Mathematics 17th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA 2011)*, Actes du colloque, 19–23 Septembre 2011, Pasadena, California

l'origami courbe. Il est entre autres reconnu pour son ouvrage de référence, *Curvature and Creases, A Primer on Paper*, qui décrit le comportement des surfaces près des lignes de courbure.⁷⁴ Entre les années 1970 et 1990, Huffman a créé des centaines de modèles de pliages courbes, représentant la vaste majorité des études réalisées jusqu'à tout récemment dans ce champ de recherche. Les modèles de David Huffman sont généralement plus simples à réaliser que celui développé au Bauhaus, et ont permis une meilleure compréhension du langage des pliages courbes.⁷⁵

4.3.1.3 Les modèles de J. Lamere et de J. Mitani et T. Igarashi

Les différents modèles cylindriques de J. Mitani et T. Igarashi fonctionnent selon un principe d'alternance de plis vallées et de plis montagnes dans un axe tangent à un demi-cylindre. La simplicité du motif est certes un avantage non négligeable pour sa conception, sa compréhension et sa réalisation. Pour les pliages courbes, qui ne peuvent être livrés pré-pliés, cette caractéristique est primordiale pour que l'utilisateur puisse rapidement et facilement développer le système constructif.

Le premier modèle de Lamere testé reprend le principe d'alternance de plis vallées et de plis montagnes, mais il est réalisé à partir d'une surface plane contrairement aux surfaces courbes utilisées par Mitani et Igarashi. Le deuxième modèle est, quant à lui, une transposition courbe du motif Yoshimura.

4.3.2 Analyse des modèles

- De façon générale, la plupart des modèles potentiellement utiles pour la conception du système constructif final demandent nécessairement un ancrage au sol pour maintenir leur forme, ce qui n'est pas le cas de la plupart

⁷⁴ Huffman, D.A. (1976). Curvature and creases: A primer on paper. *IEEE Trans. Computers*, 25(10), 1010-1019.

⁷⁵ Demaine, E.D., Demaine, M.L. et Koschitz, D. (2010, 3-17 juillet). *Reconstructing David Huffman's Legacy in Curved-Crease Folding. 5th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education (OSME 2010)*, Actes du colloque, 3-17 juillet 2010, Singapore

des motifs plats testés ;

- Certains modèles ont l'avantage d'être structurellement autoportants. Par contre, cette caractéristique requiert la plupart du temps une forme qui se replie sur elle-même (les extrémités se rejoignent) ;
- La stabilité intrinsèque des pliages courbes entraîne une rigidité qui permet peu ou pas de variations dans le déploiement des formes ;
- Comme prévu, aucun modèle ne peut se plier à plat. Heureusement, les pliages courbes, tout comme les pliages droits, se prêtent à la tessellation et peuvent donc être subdivisés en plus petits modules pour une mobilité accrue. Une complexité supplémentaire est à prévoir pour l'assemblage des différents modules compte tenu de la grande tension créée par les courbures.

4.4 Synthèse du premier cycle d'expérimentation

Malgré un avantage marqué du pliage courbe pour la stabilité et la rigidité, ses désavantages forcent à favoriser le développement des pliages droits pour les études subséquentes. En ce sens, les paramètres suivants seront pris en considération pour la conception du système constructif final :

- Capacité du motif à se plier à plat ;
- Optimisation du ratio « compaction / déploiement » ;
- Flexibilité dans le déploiement de la forme.

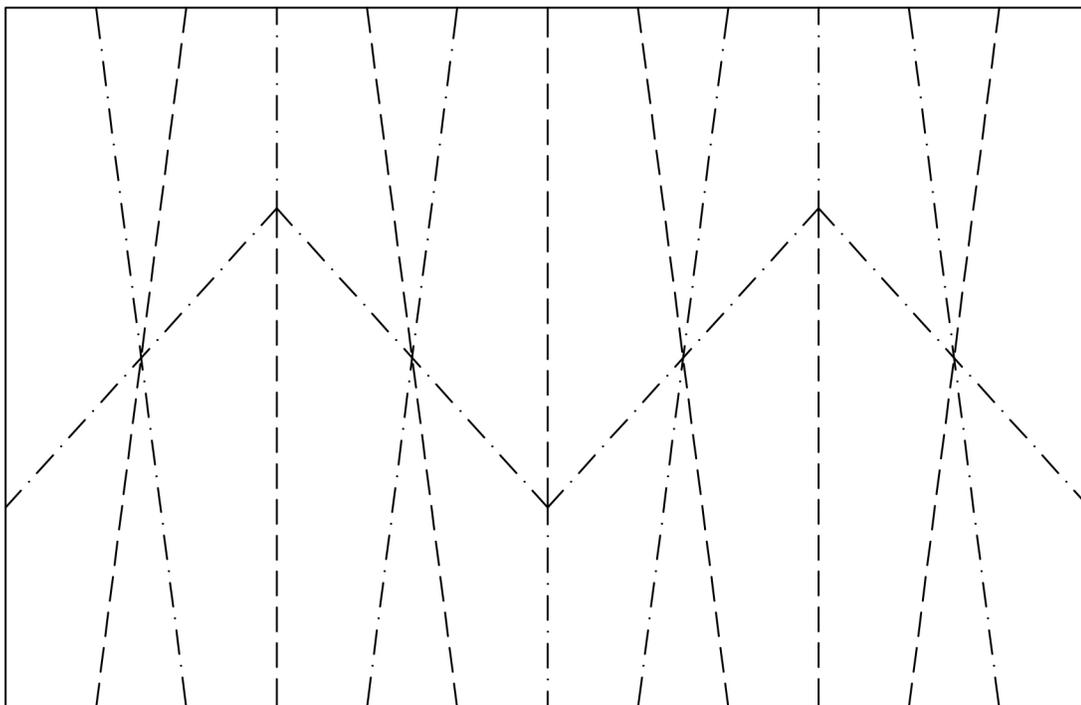
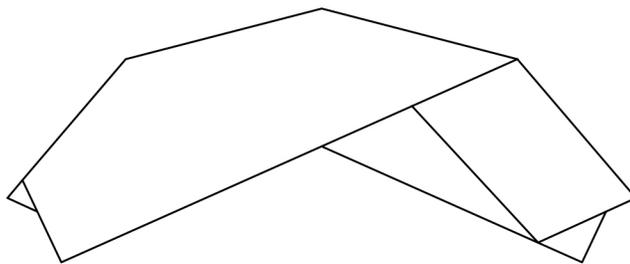
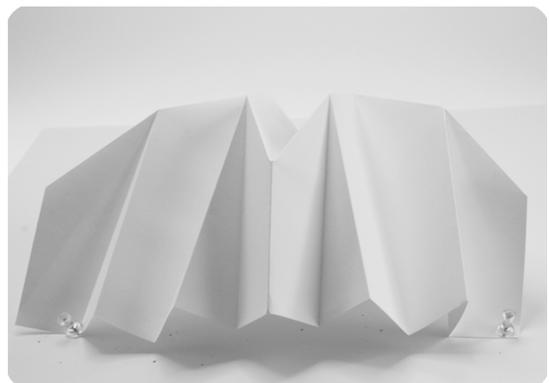
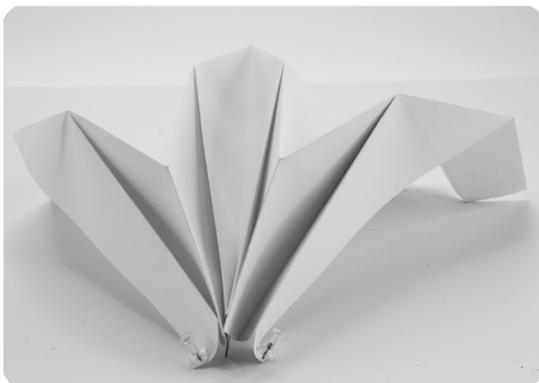
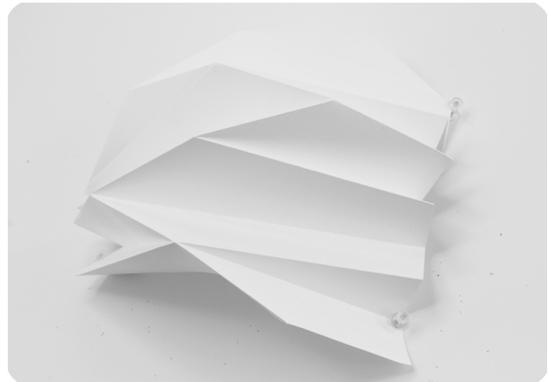
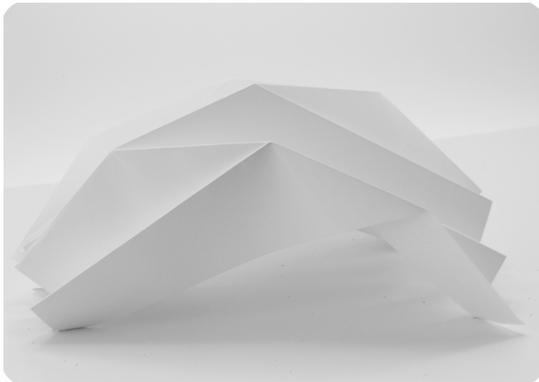
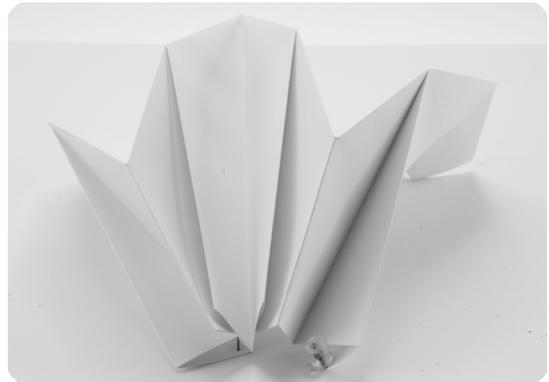
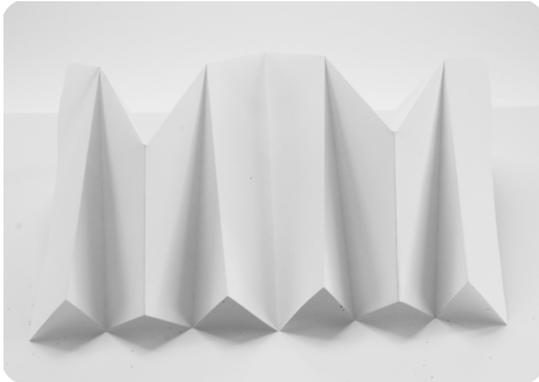
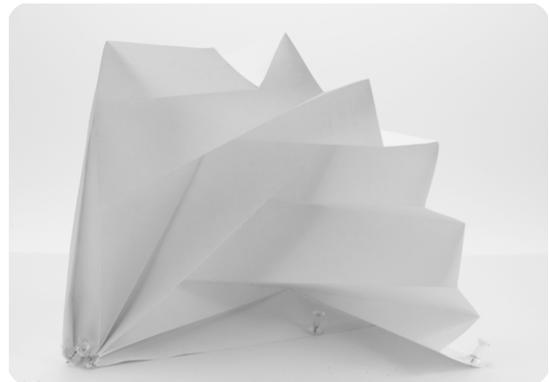
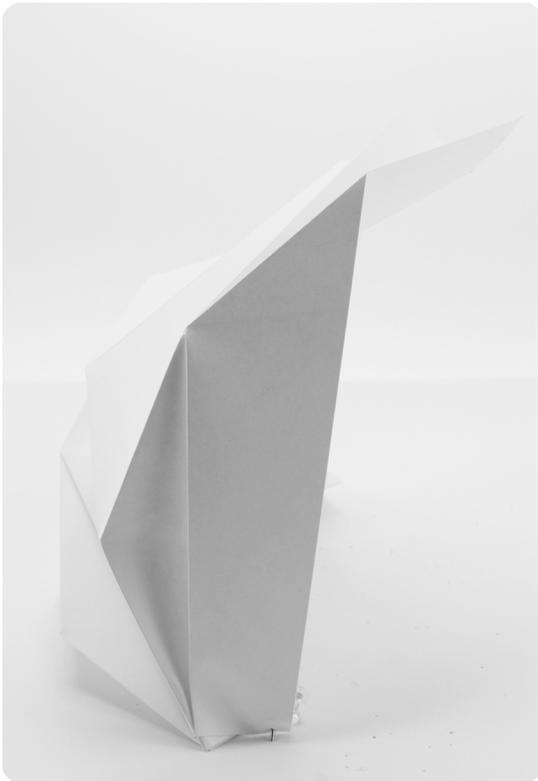
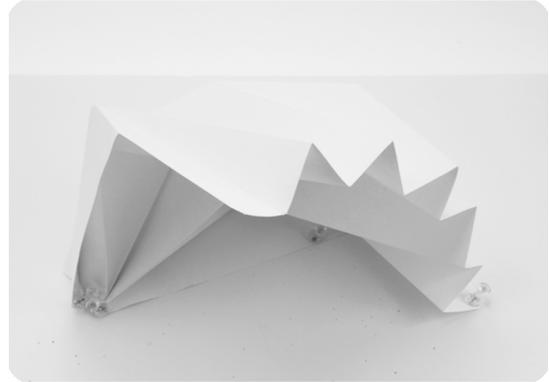
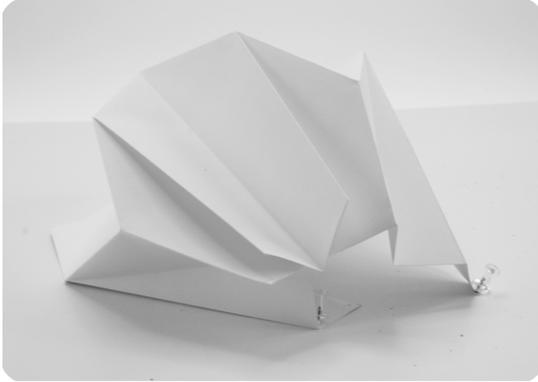
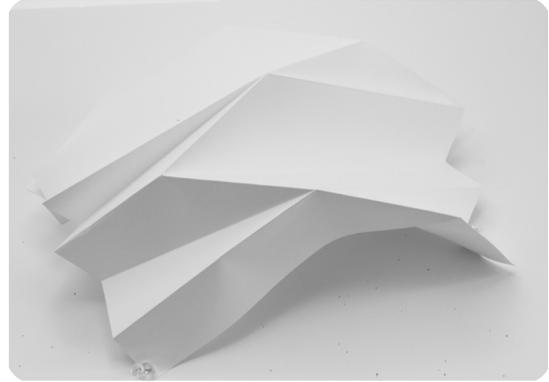
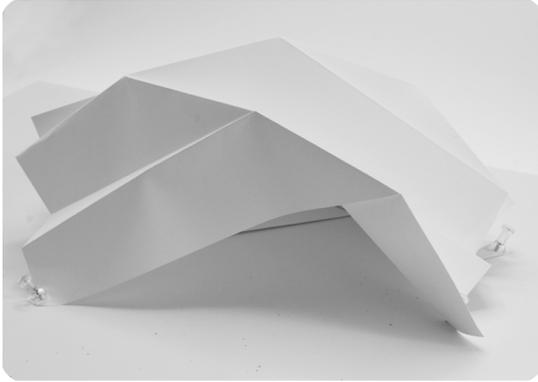


Figure 4.2 Ci-dessus : plan et élévation du motif Réflexion n° 1. Pages suivantes : photos des différentes options d'ancrage.





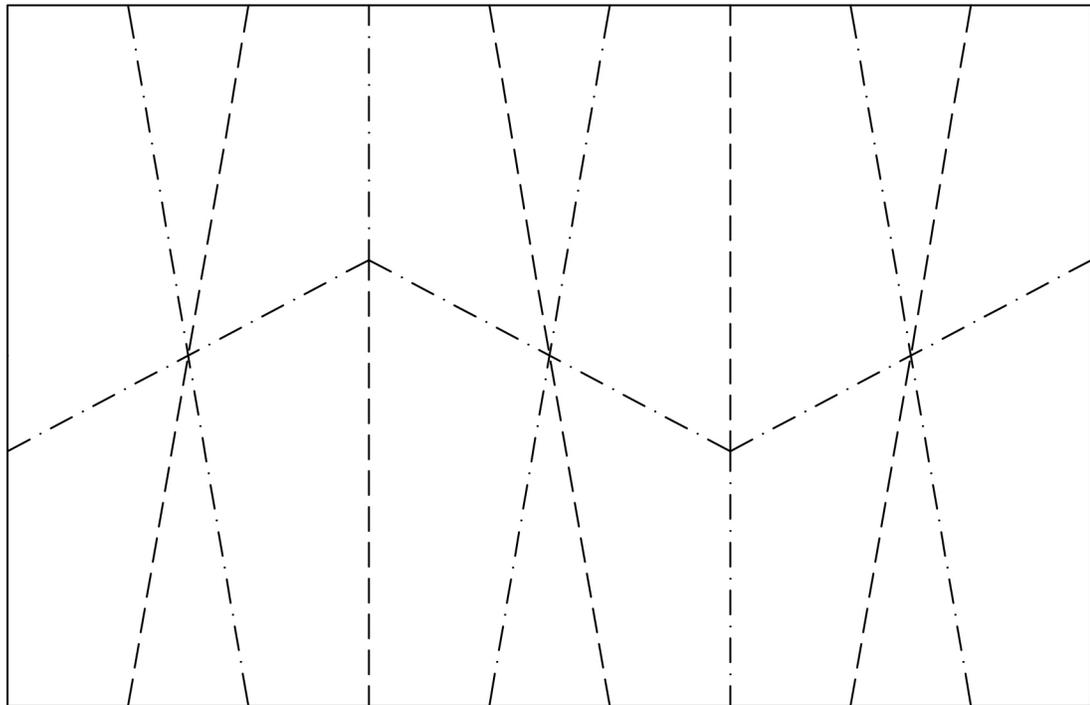
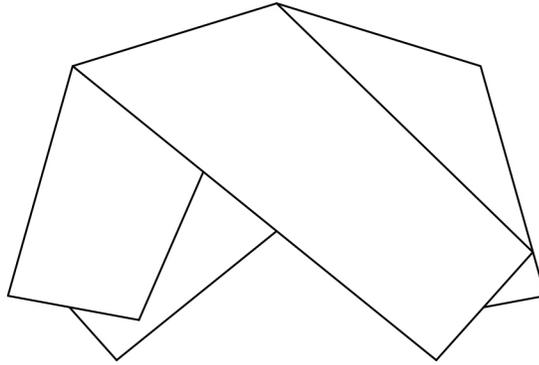
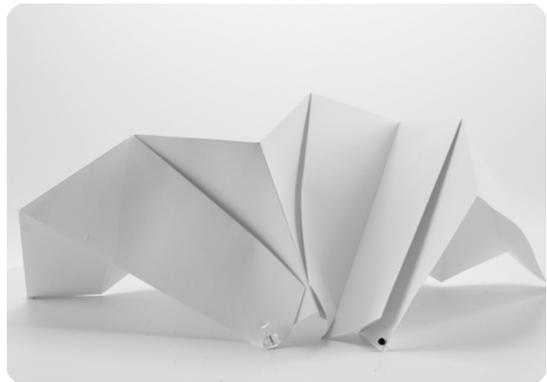
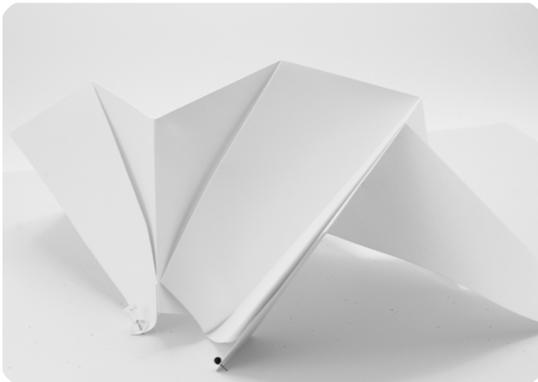
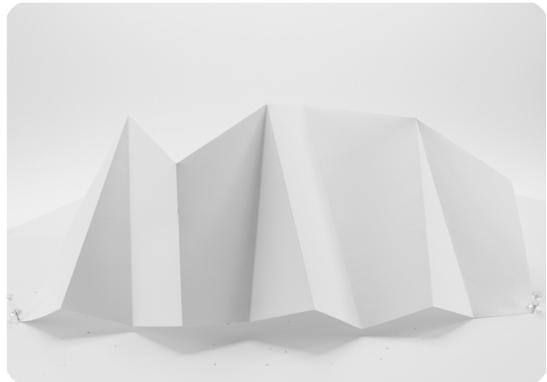
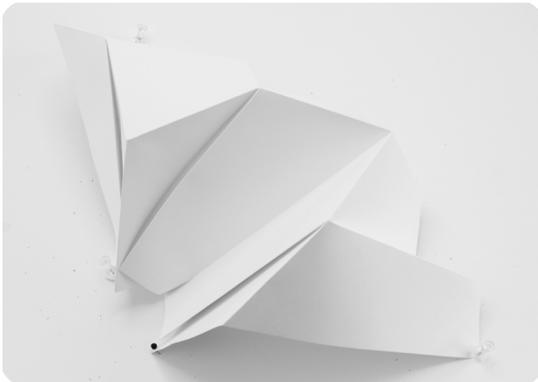
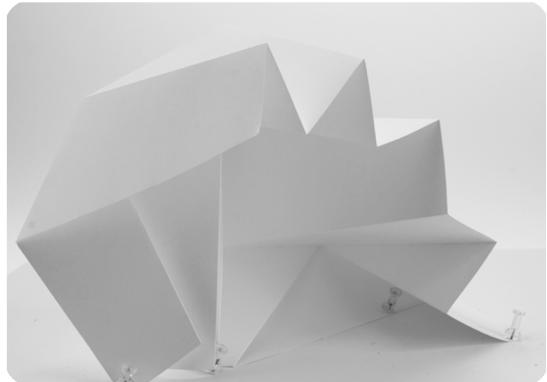
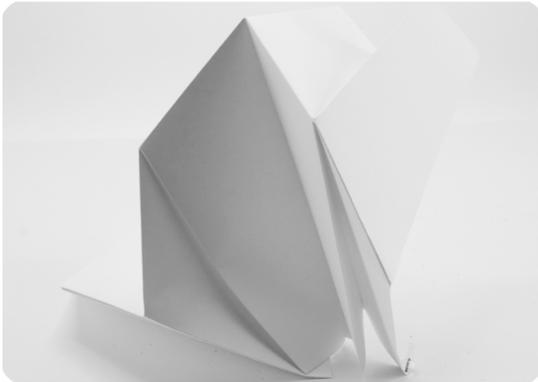
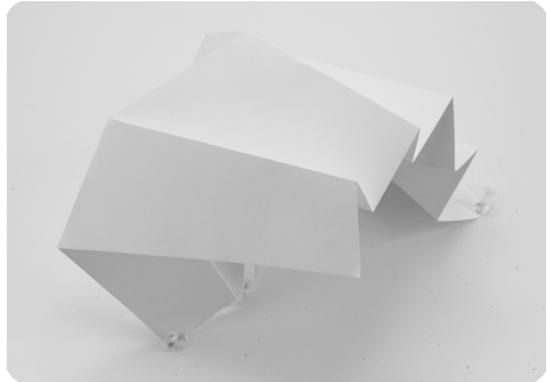
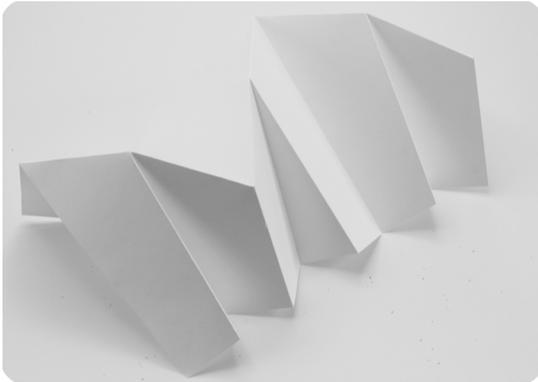
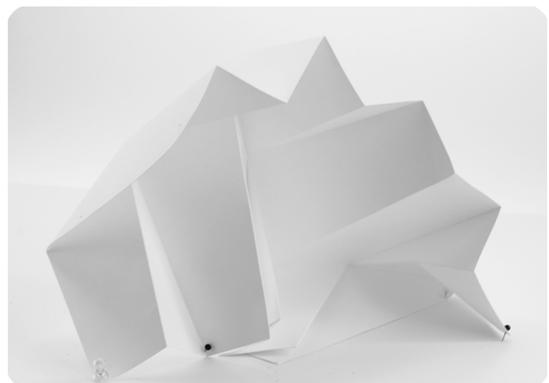
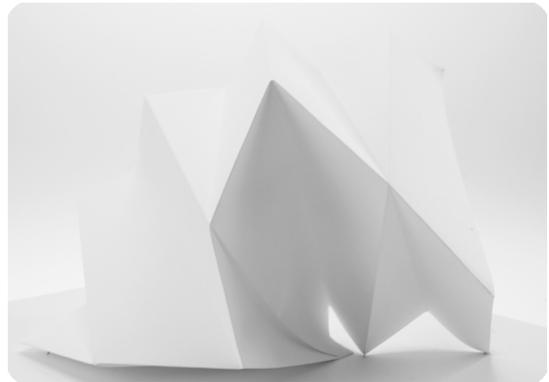
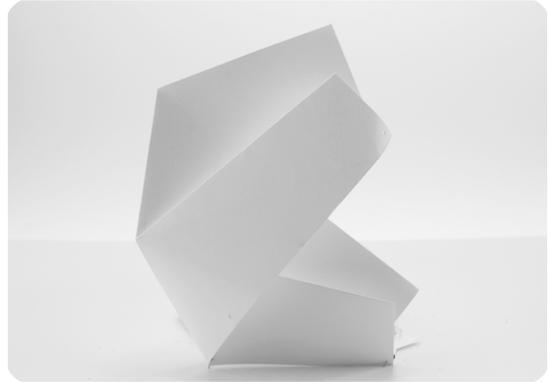
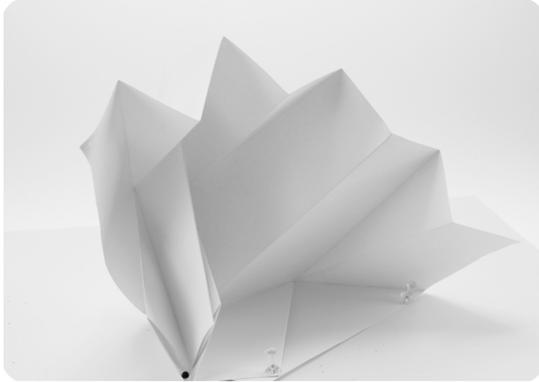
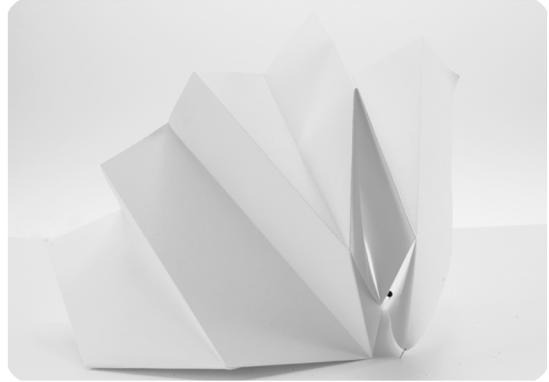
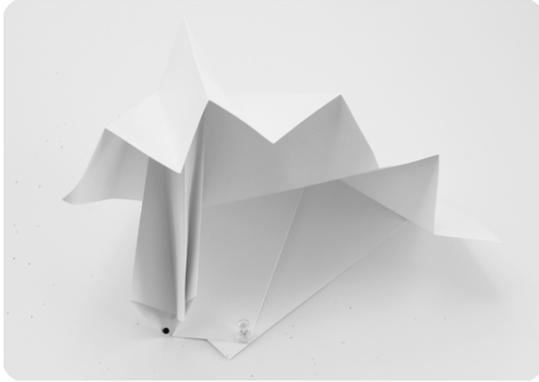


Figure 4.3 Ci-dessus : plan et élévation du motif Réflexion n° 2. Pages suivantes : photos des différentes options d'ancrage.





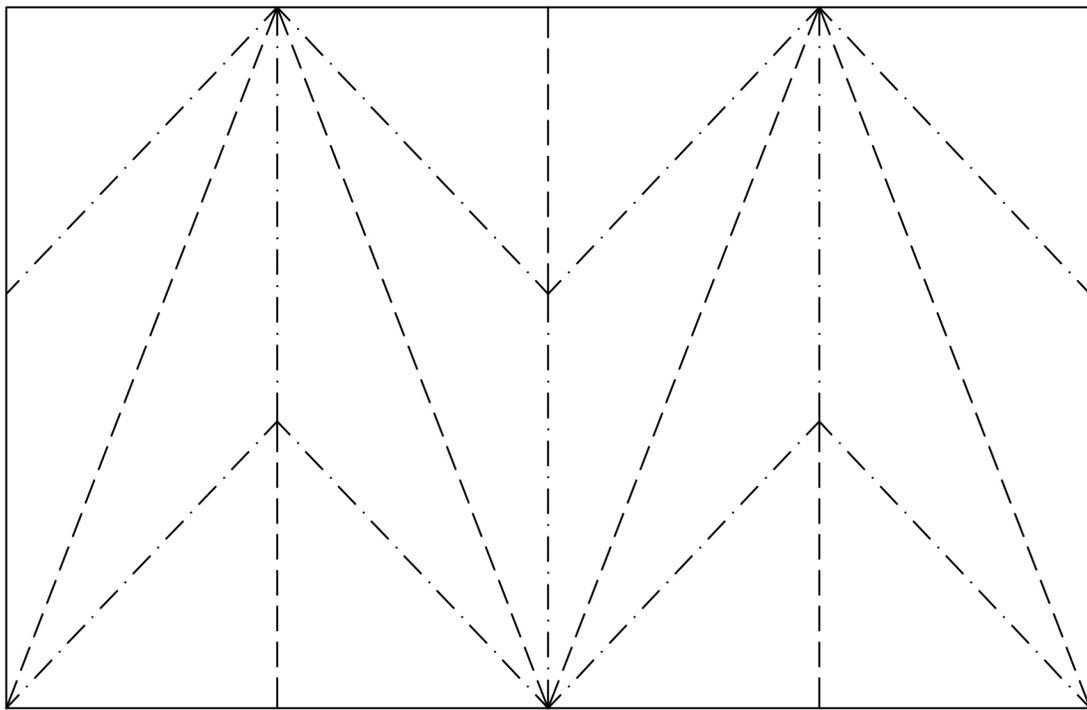
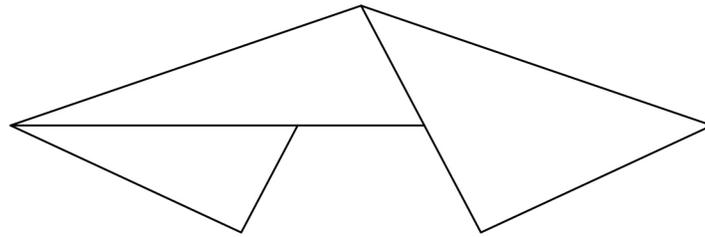
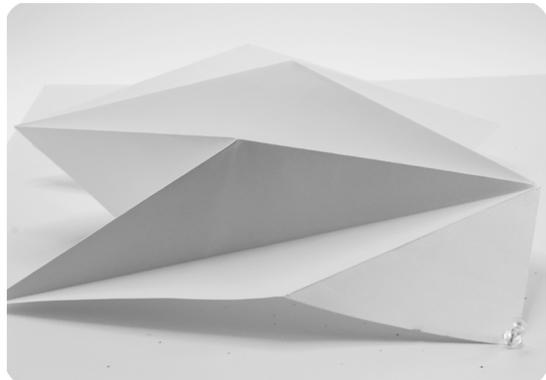
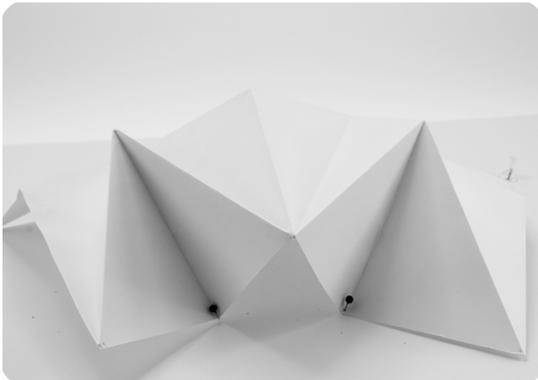
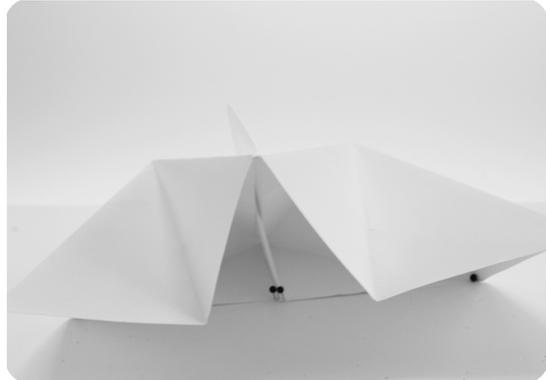
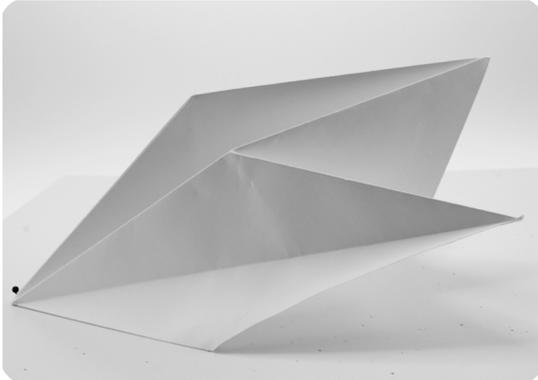
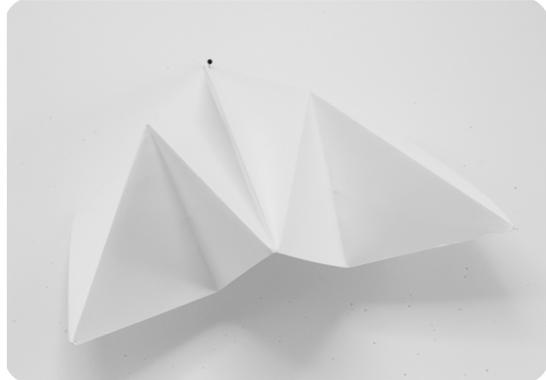
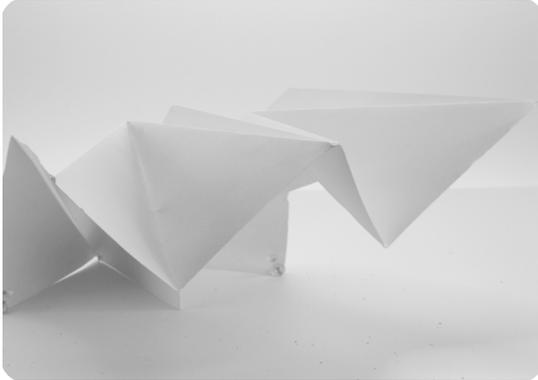
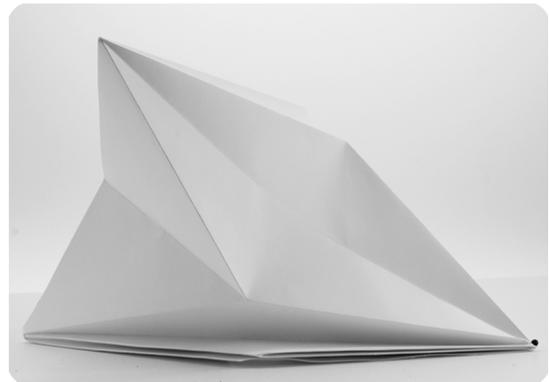
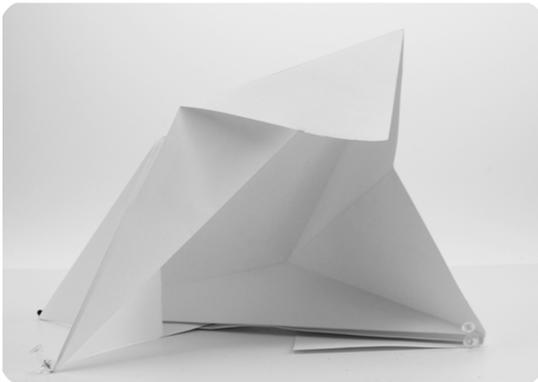
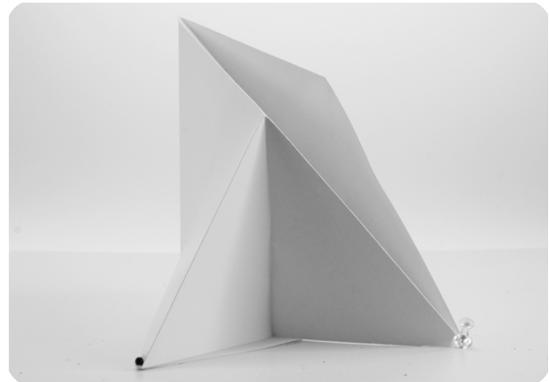
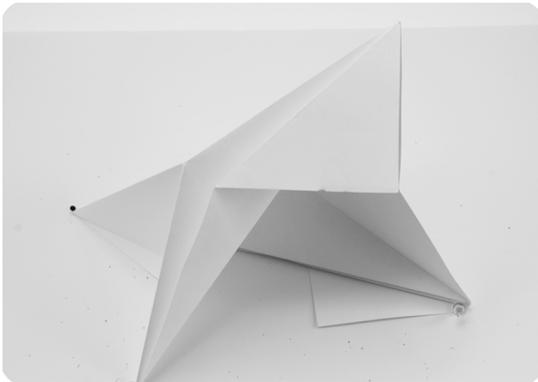
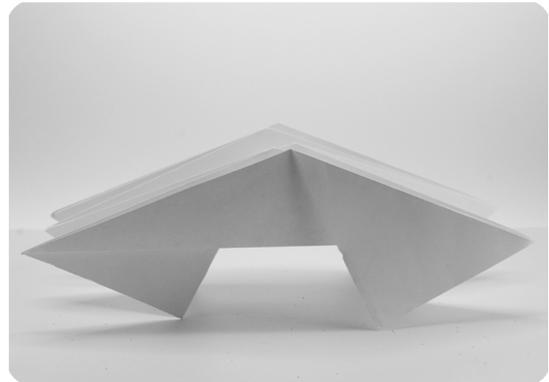
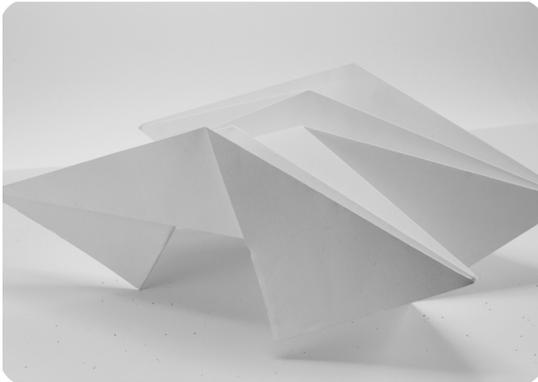
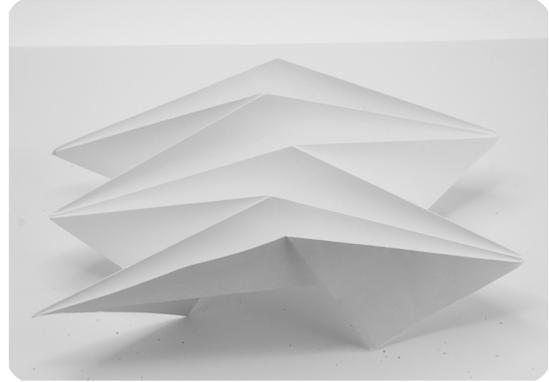
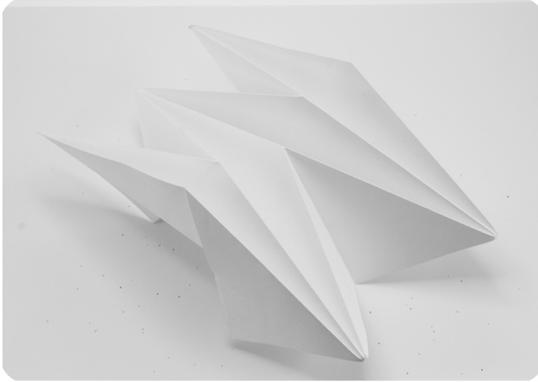


Figure 4.4 Ci-dessus : plan et élévation du motif Réflexion n° 3. Pages suivantes : photos des différentes options d'ancrage.





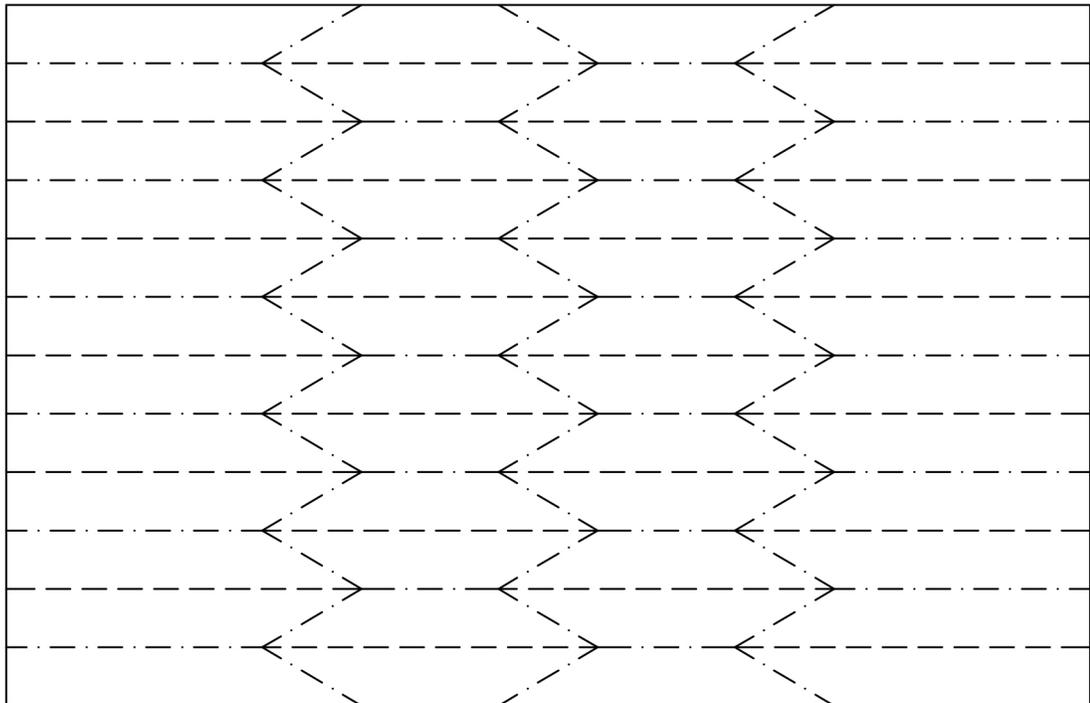
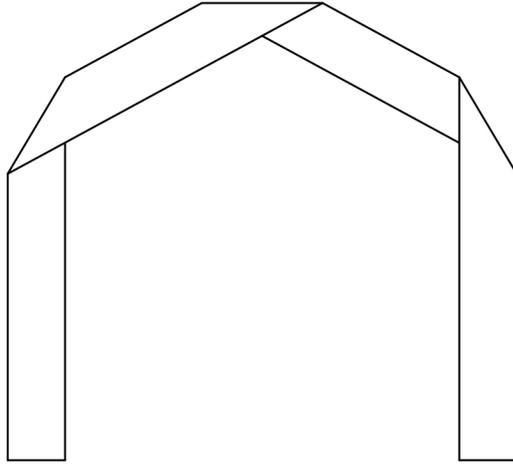
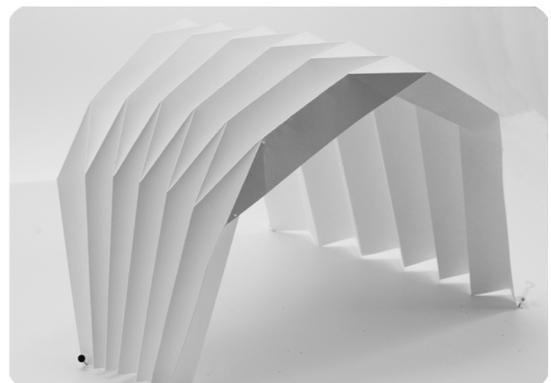
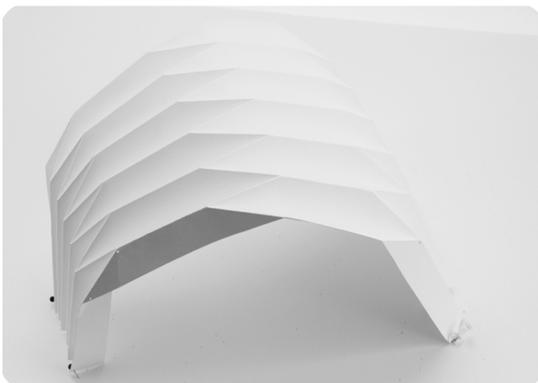
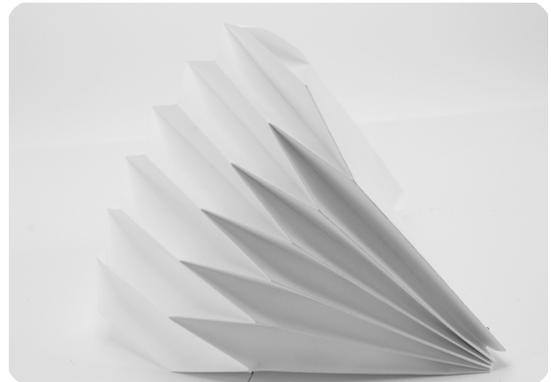
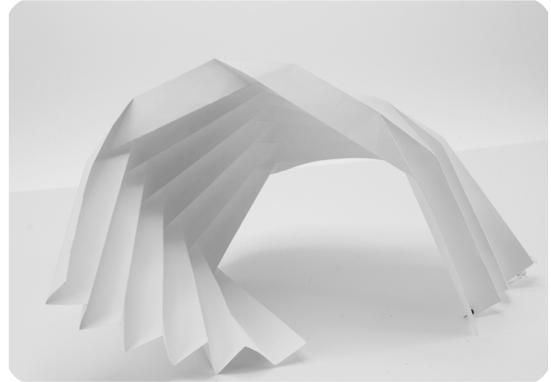
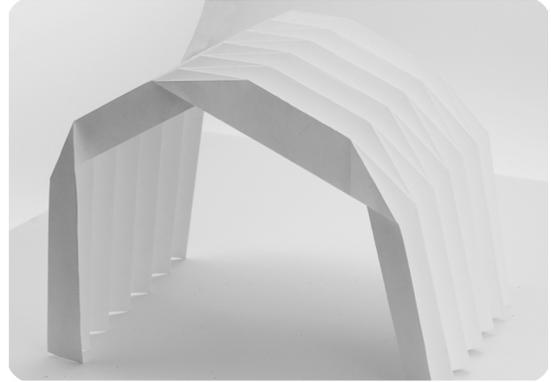
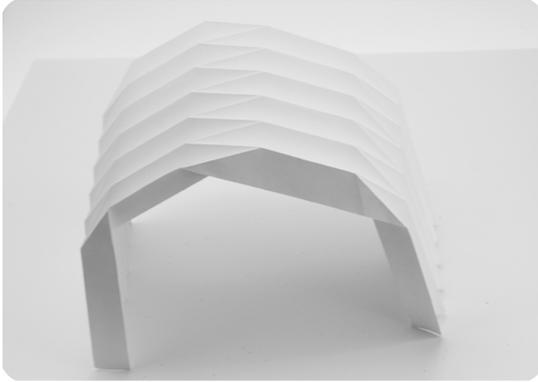


Figure 4.5 Ci-dessus : plan et élévation du motif en V n° 1. Page suivante : photos des différentes options d'ancrage.



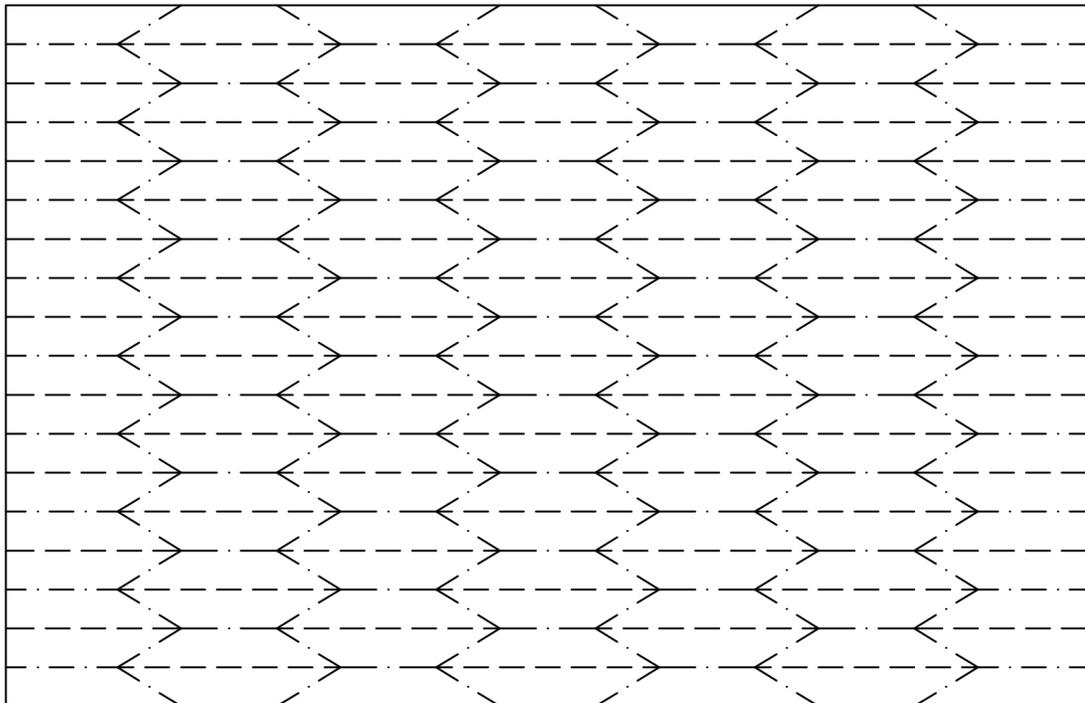
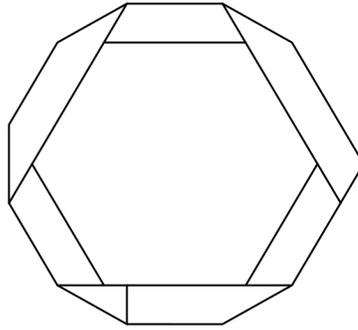
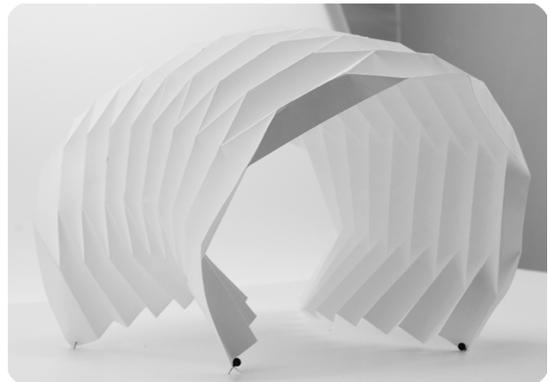
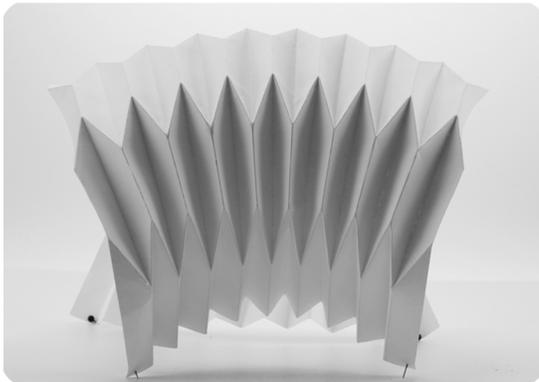
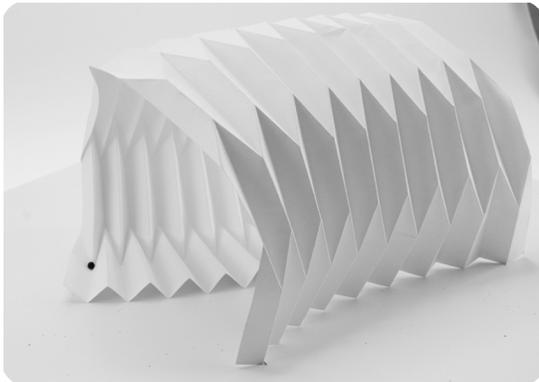
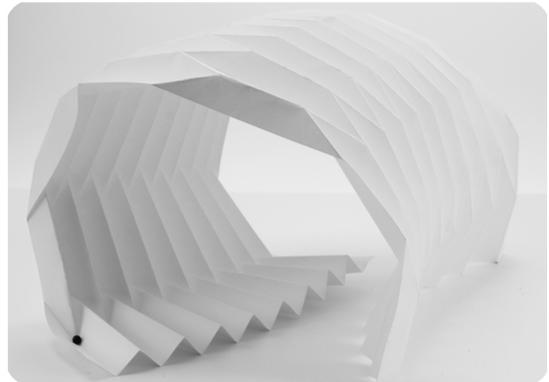
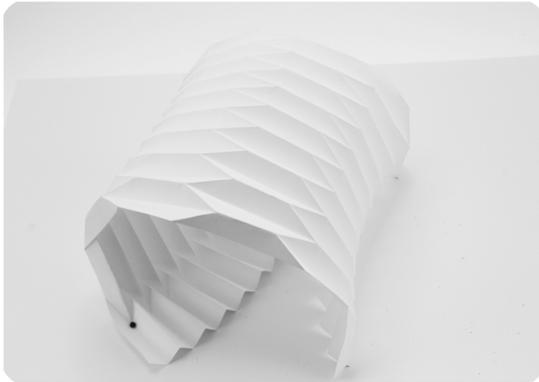
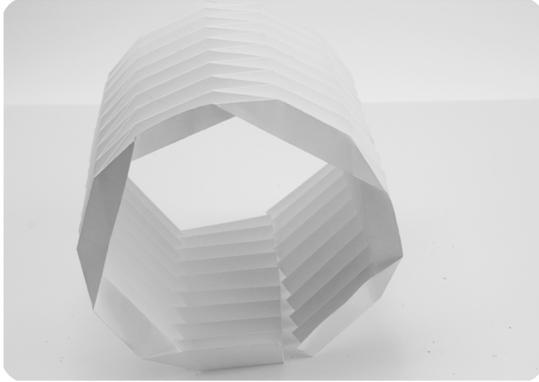
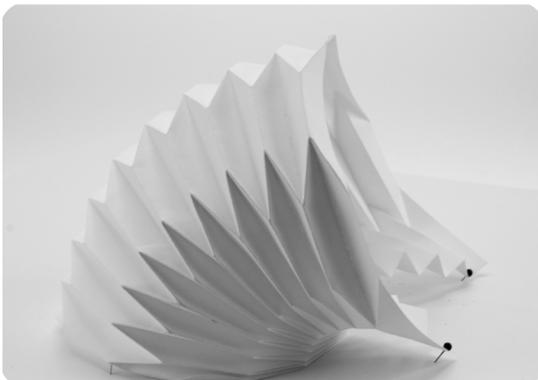
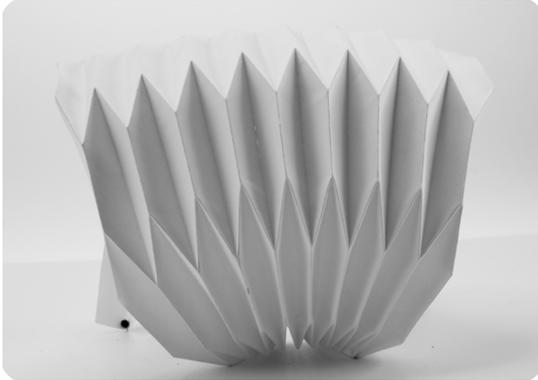
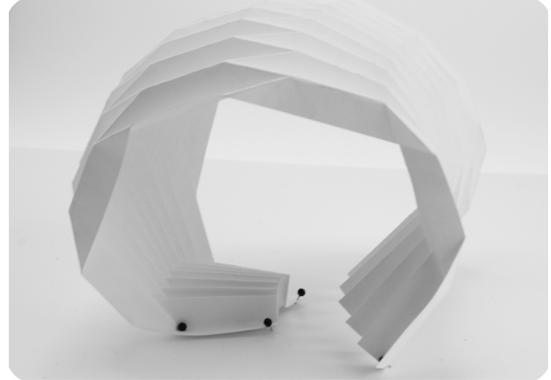


Figure 4.6 Ci-dessus : plan et élévation du motif en V n° 2. Pages suivantes : photos des différentes options d'ancrage.





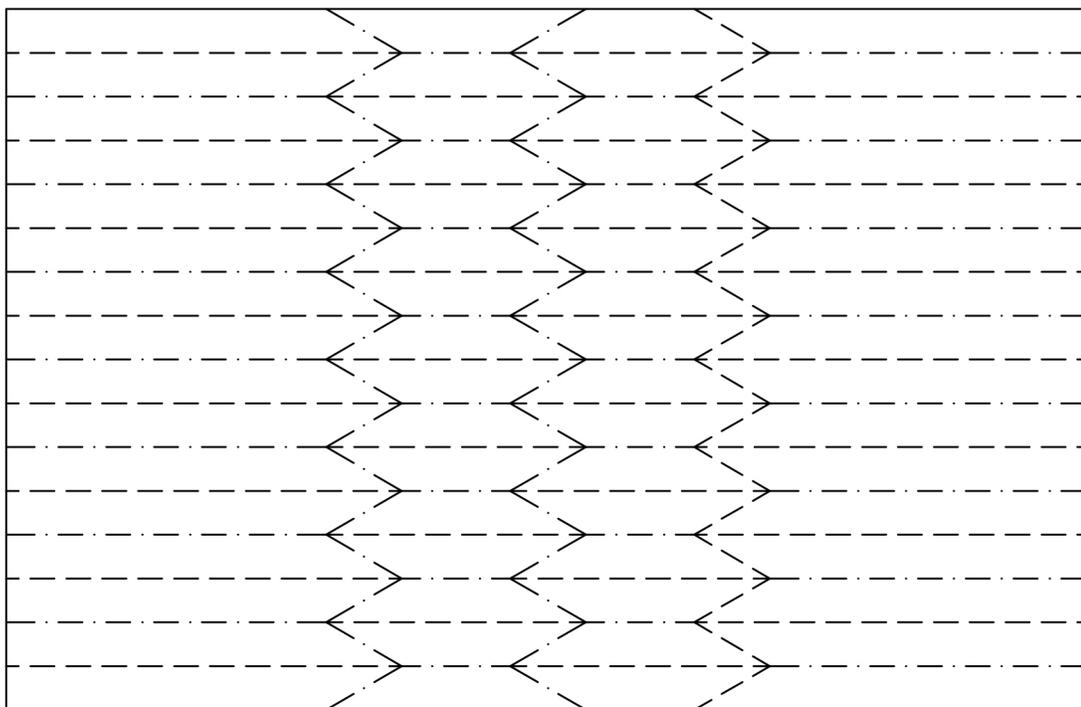
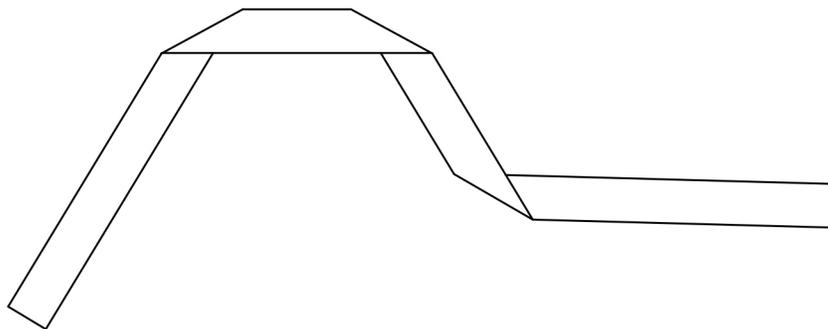
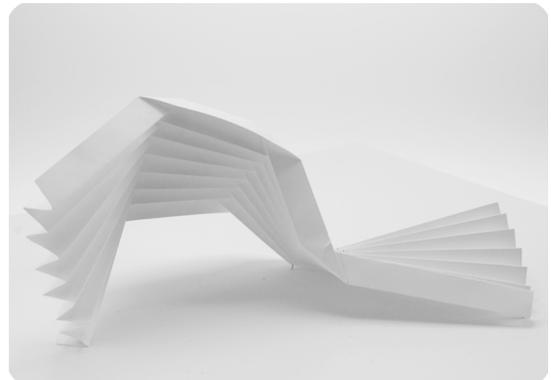
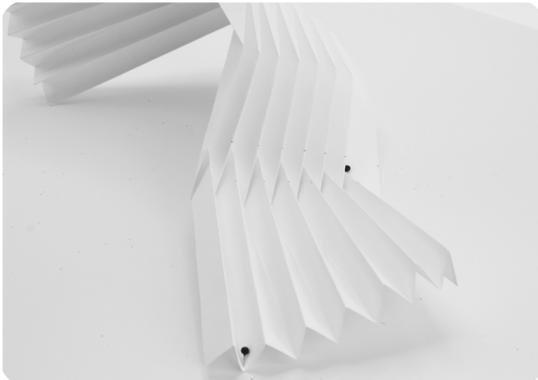
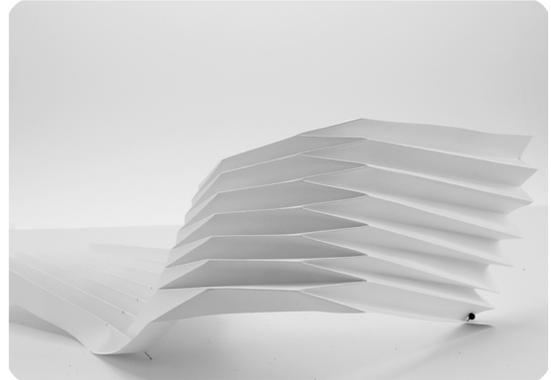
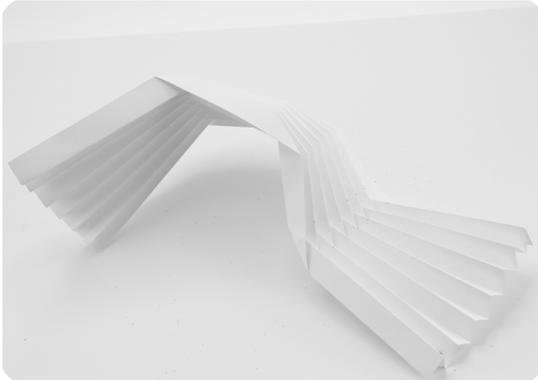
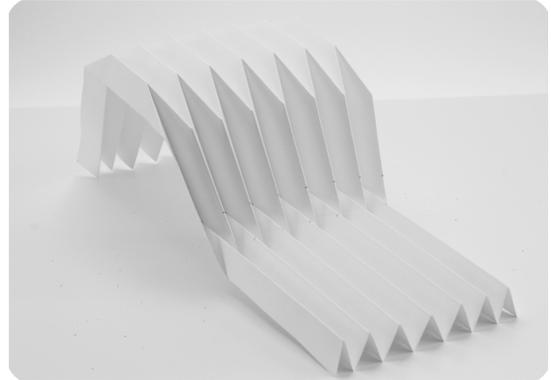
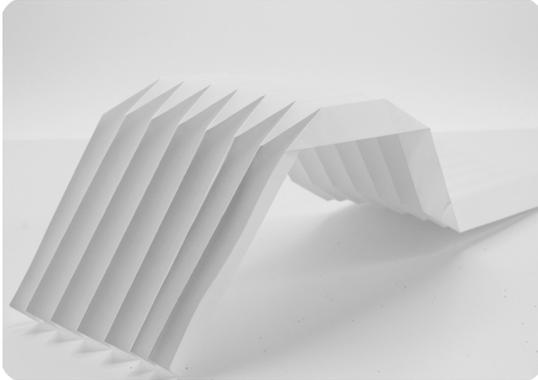
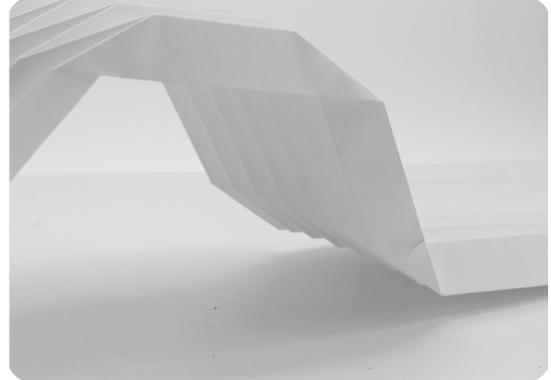
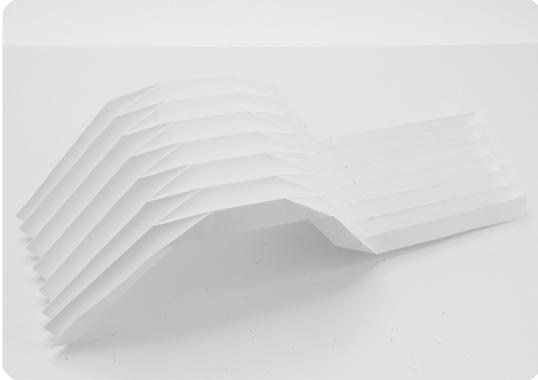
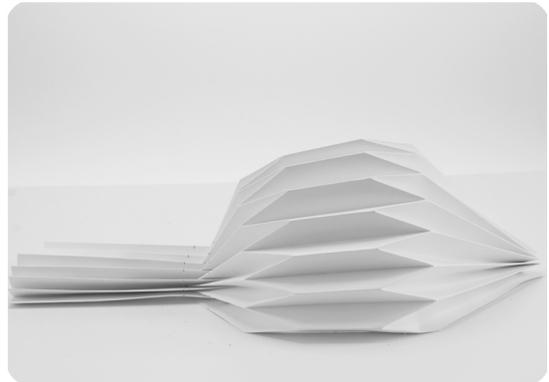
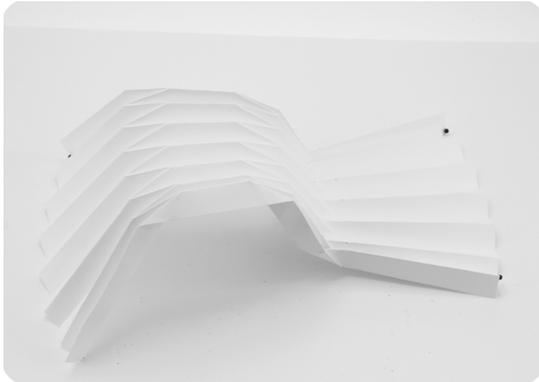


Figure 4.7 Ci-dessus : plan et élévation du motif en V n° 3. Pages suivantes : photos des différentes options d'ancrage.





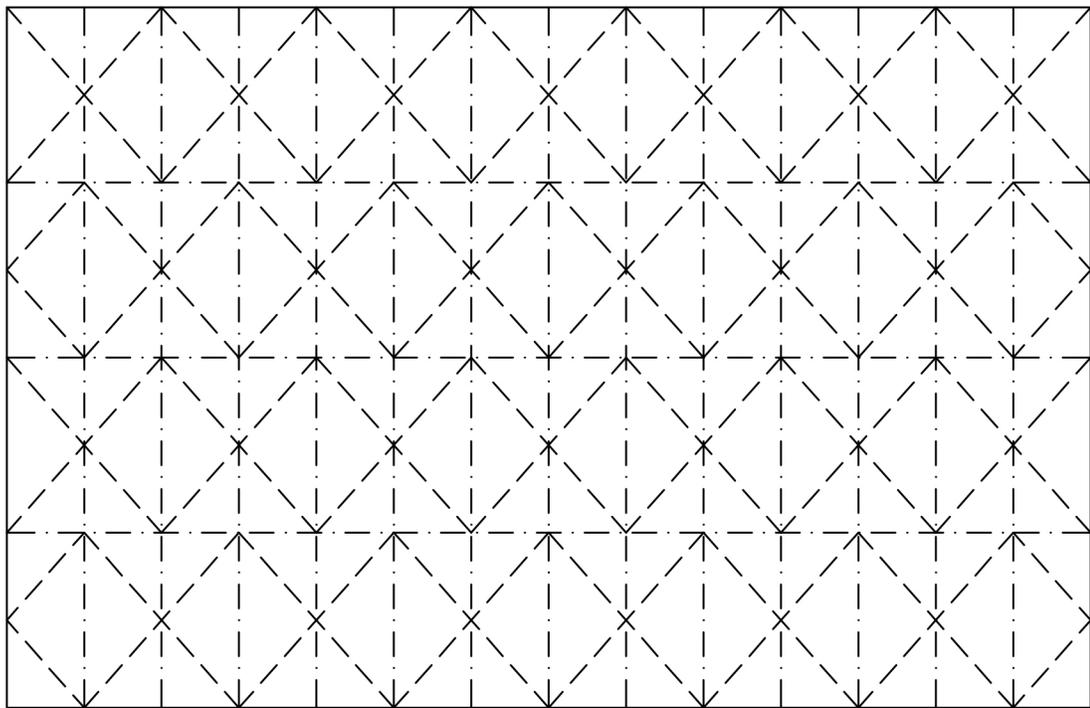
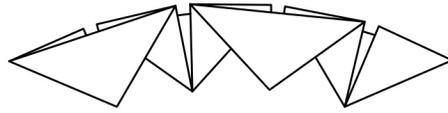
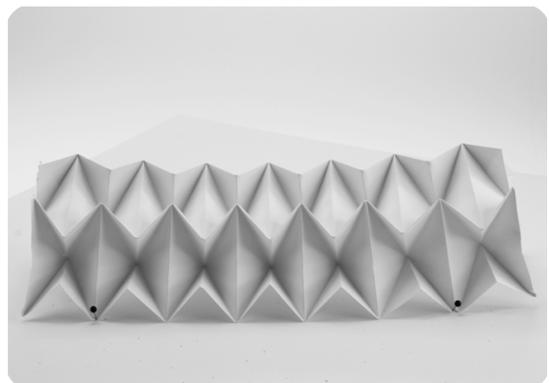
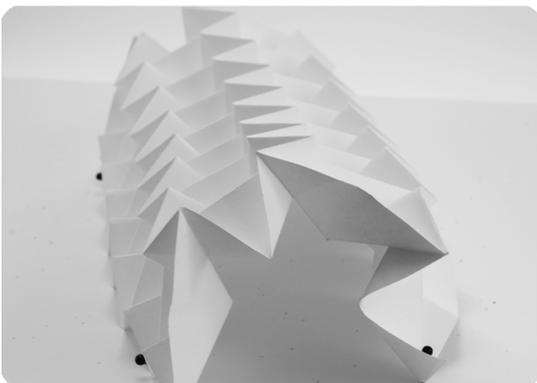
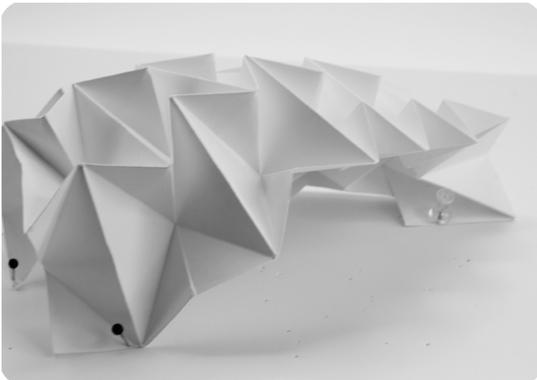
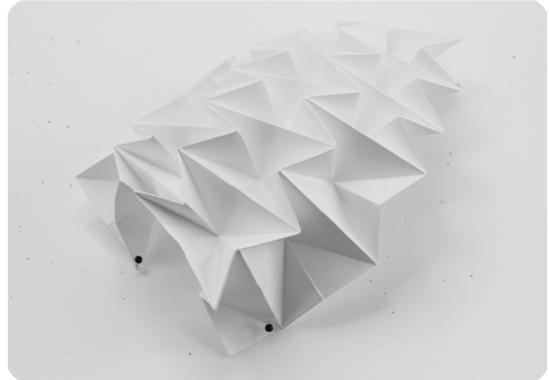
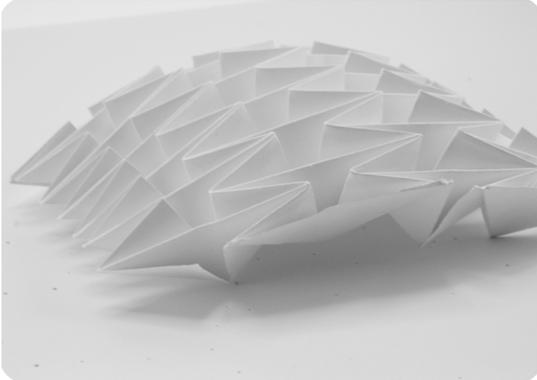
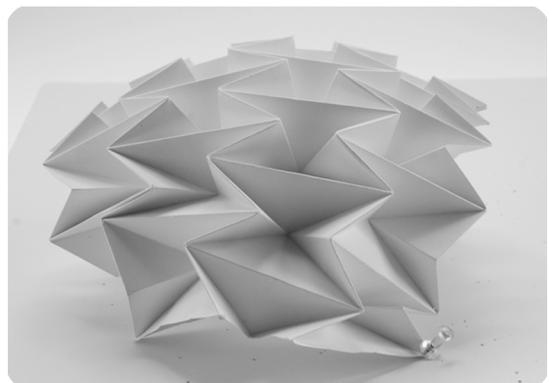
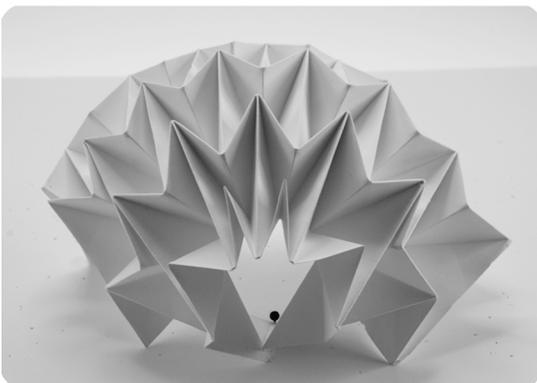
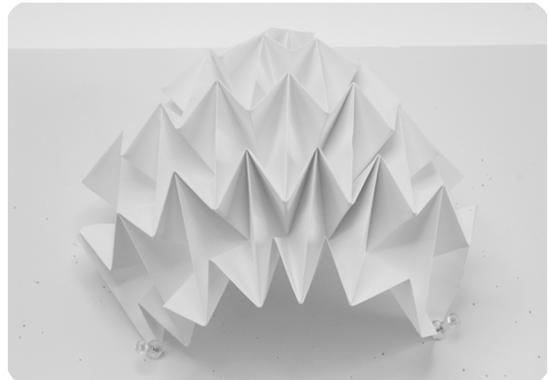
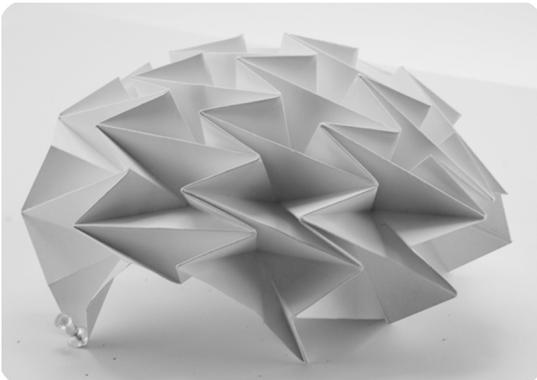
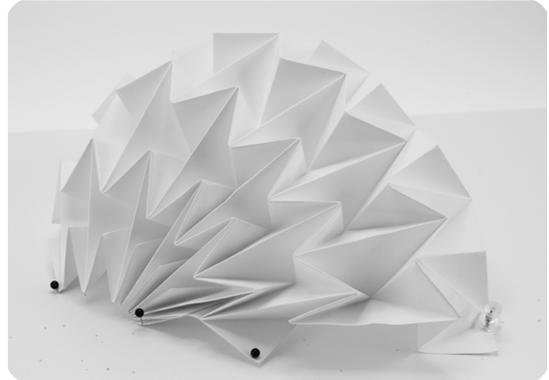
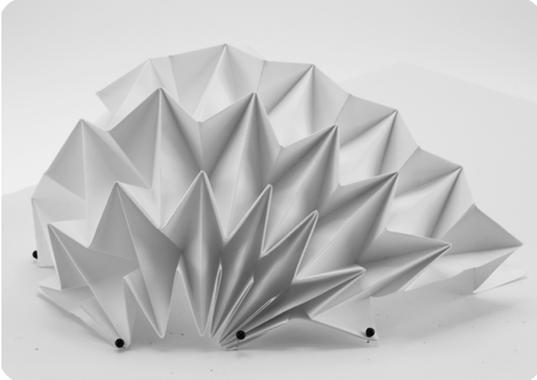
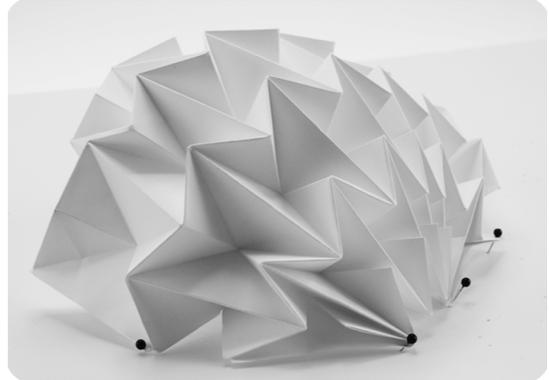


Figure 4.8 Ci-dessus : plan et élévation du motif Waterbomb n° 1. Pages suivantes : photos des différentes options d'ancrage.





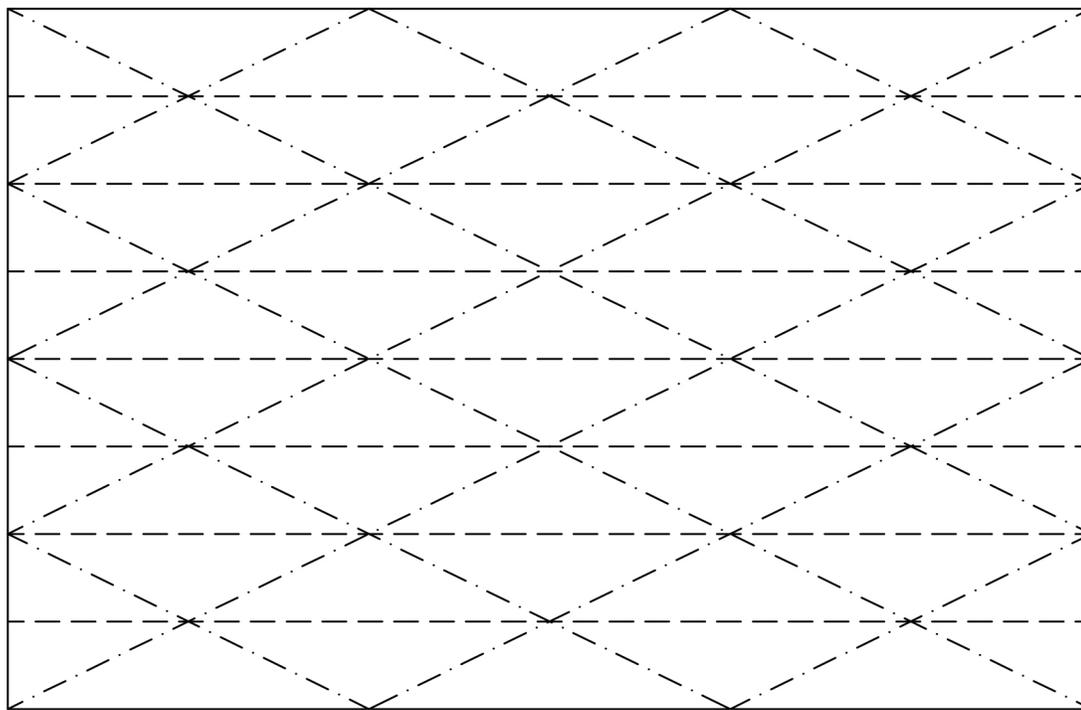
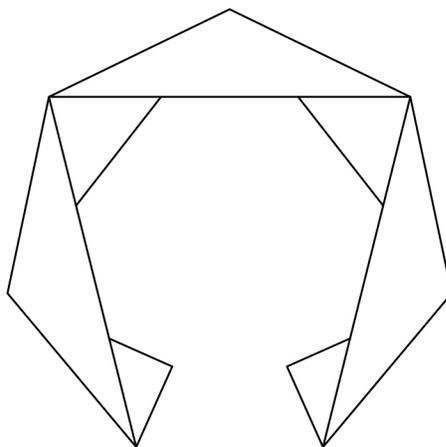
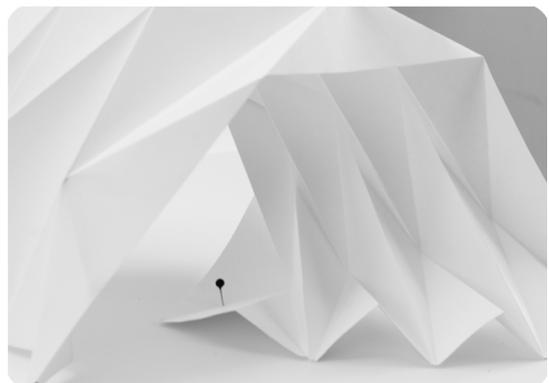
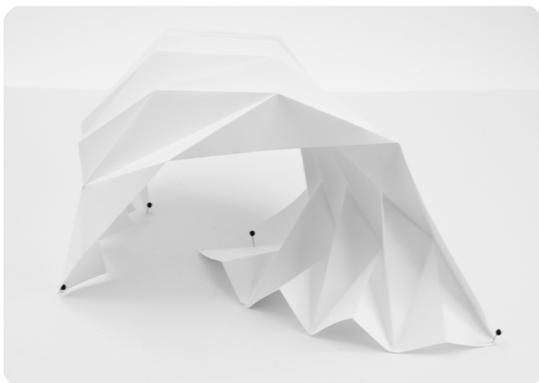
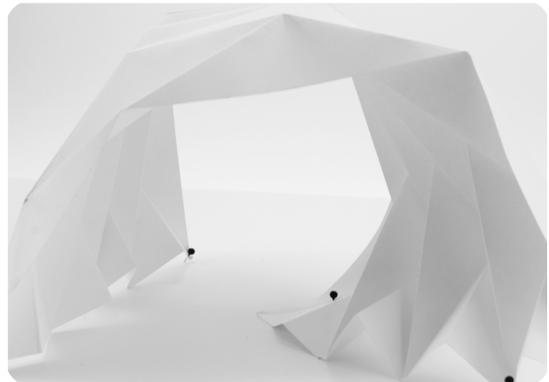
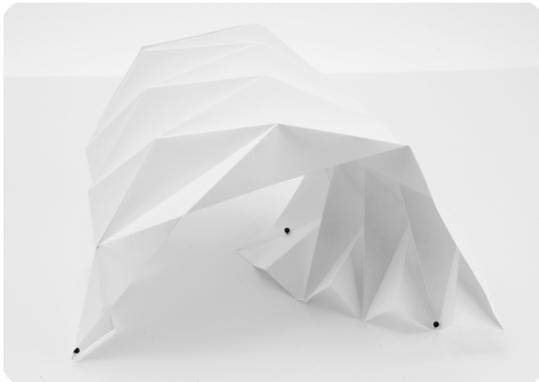
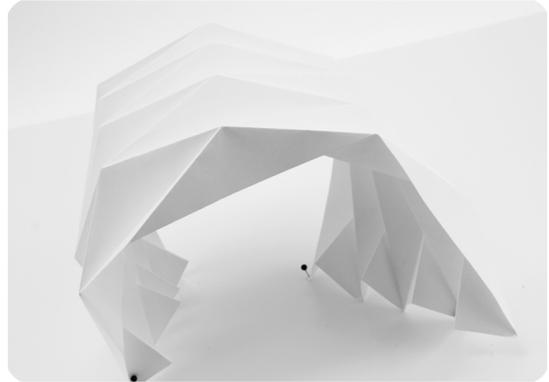
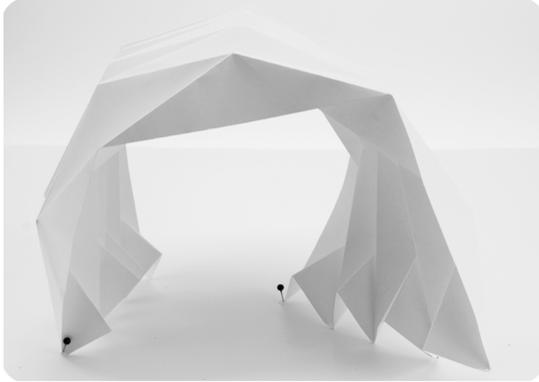
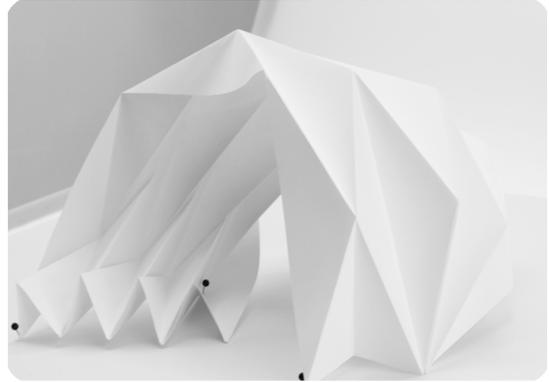
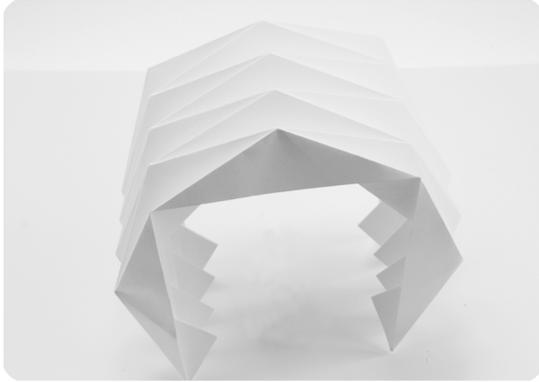


Figure 4.9 Ci-dessus : plan et élévation du motif Yoshimura n° 2. Page suivante : photos des différentes options d'ancrage.



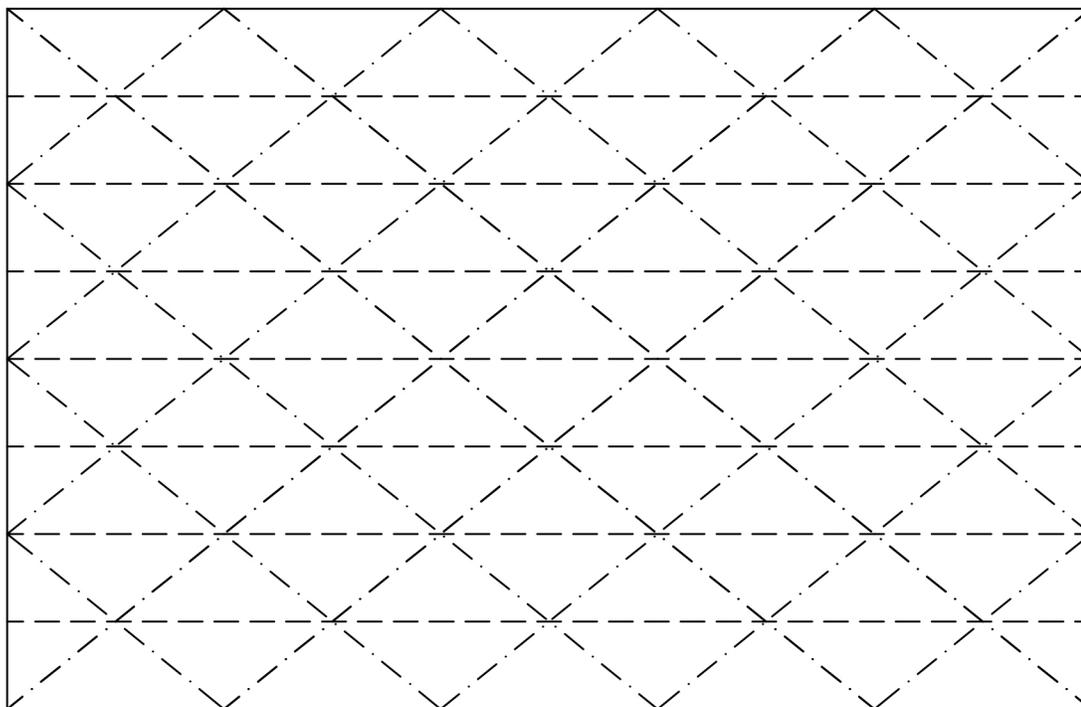
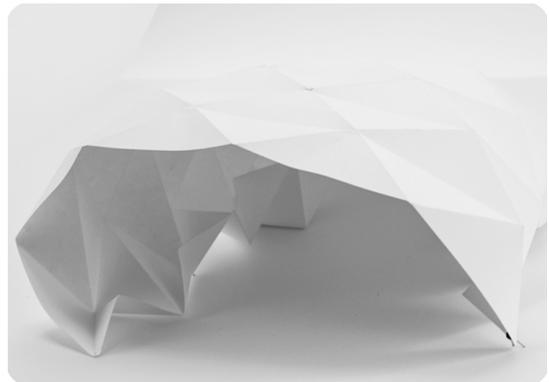
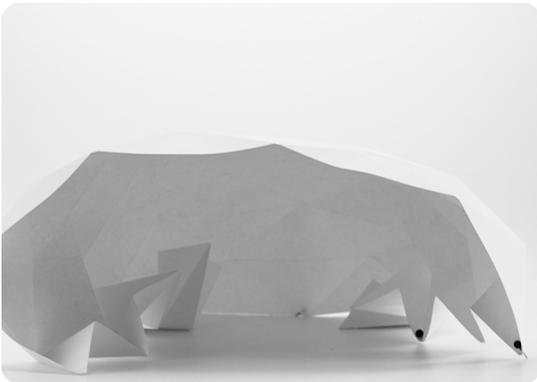
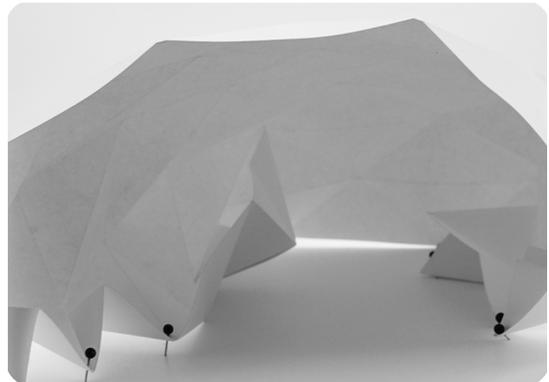
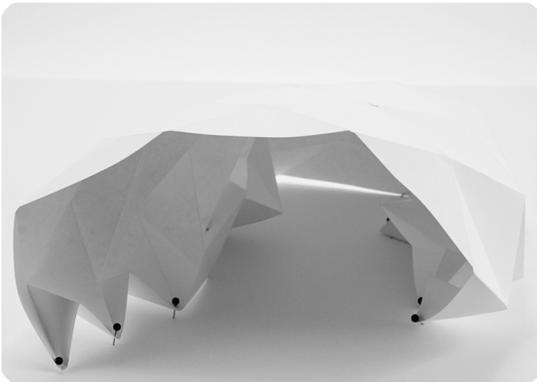
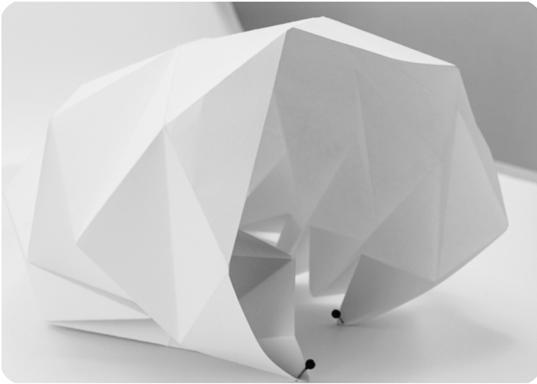
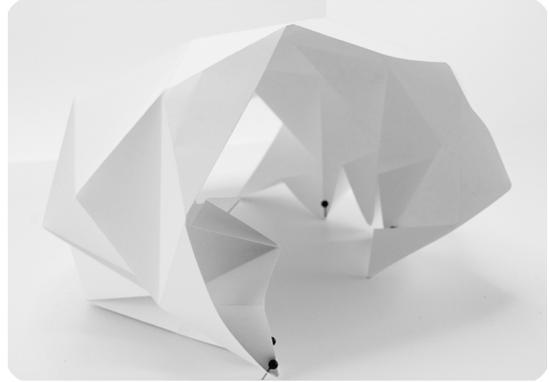
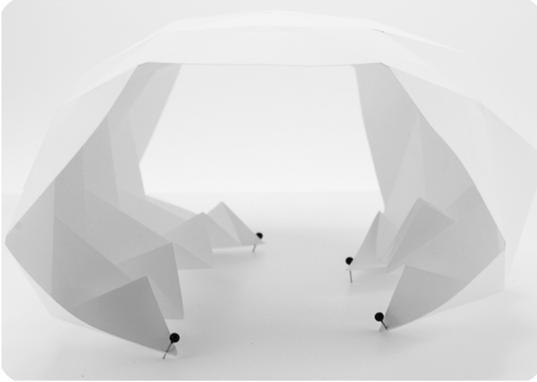


Figure 4.10 Ci-dessus : plan du motif Yoshimura n° 3. (il n'y a pas d'élévation puisque le motif ne peut se plier à plat) Page suivante : photos des différentes options d'ancrage.



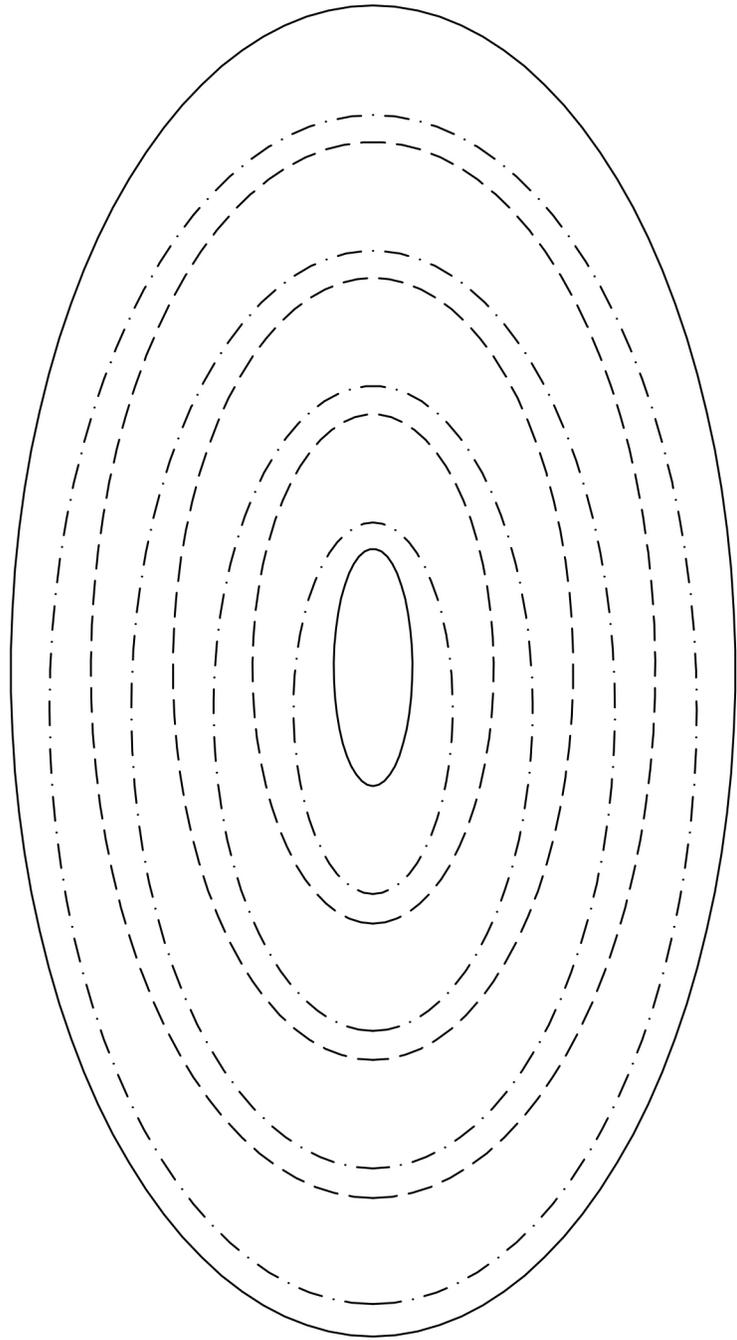


Figure 4.11 Ci-dessus : plan du motif n° 1 du Bauhaus. Voir figure 4.11a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

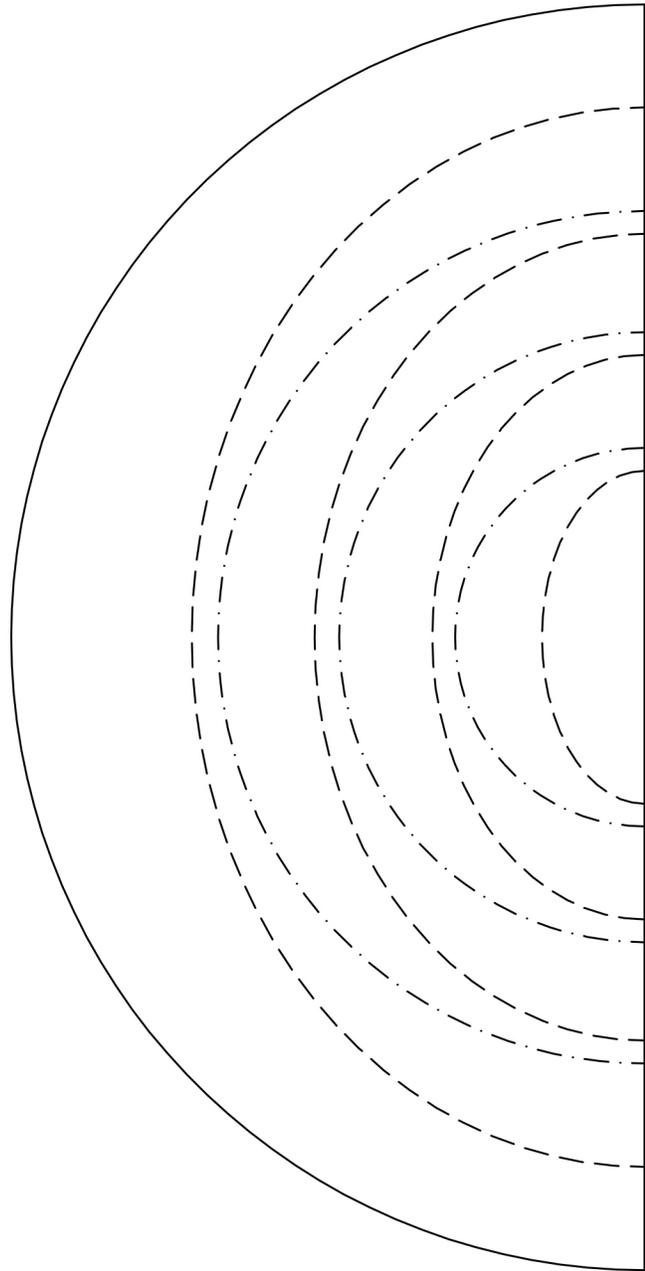


Figure 4.12 Ci-dessus : plan du motif n° 2 du Bauhaus. Voir figure 4.12a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

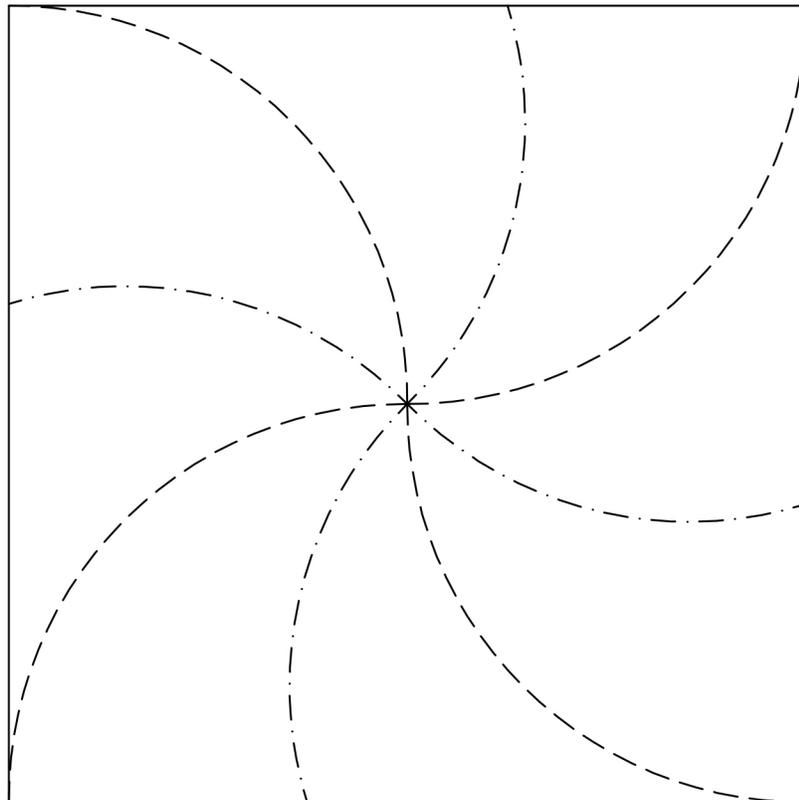


Figure 4.13 Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Huffman. Voir figure 4.13a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

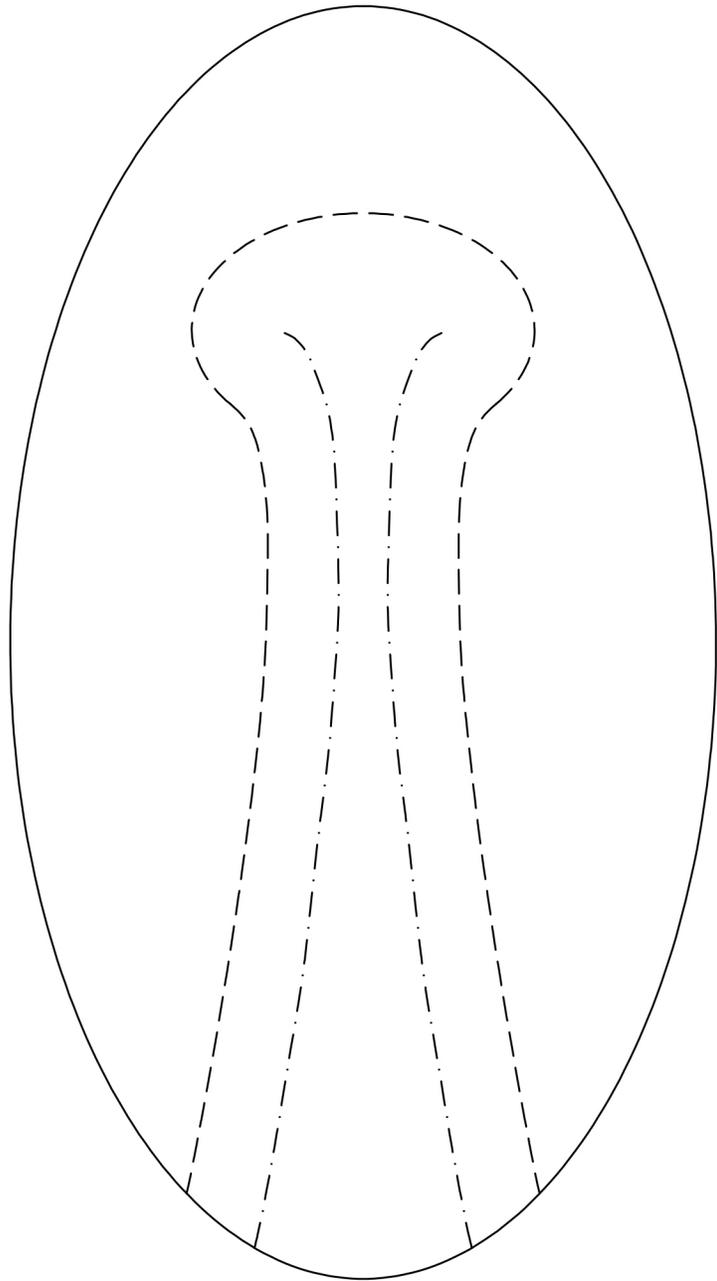


Figure 4.14 Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Huffman. Voir figure 4.14a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

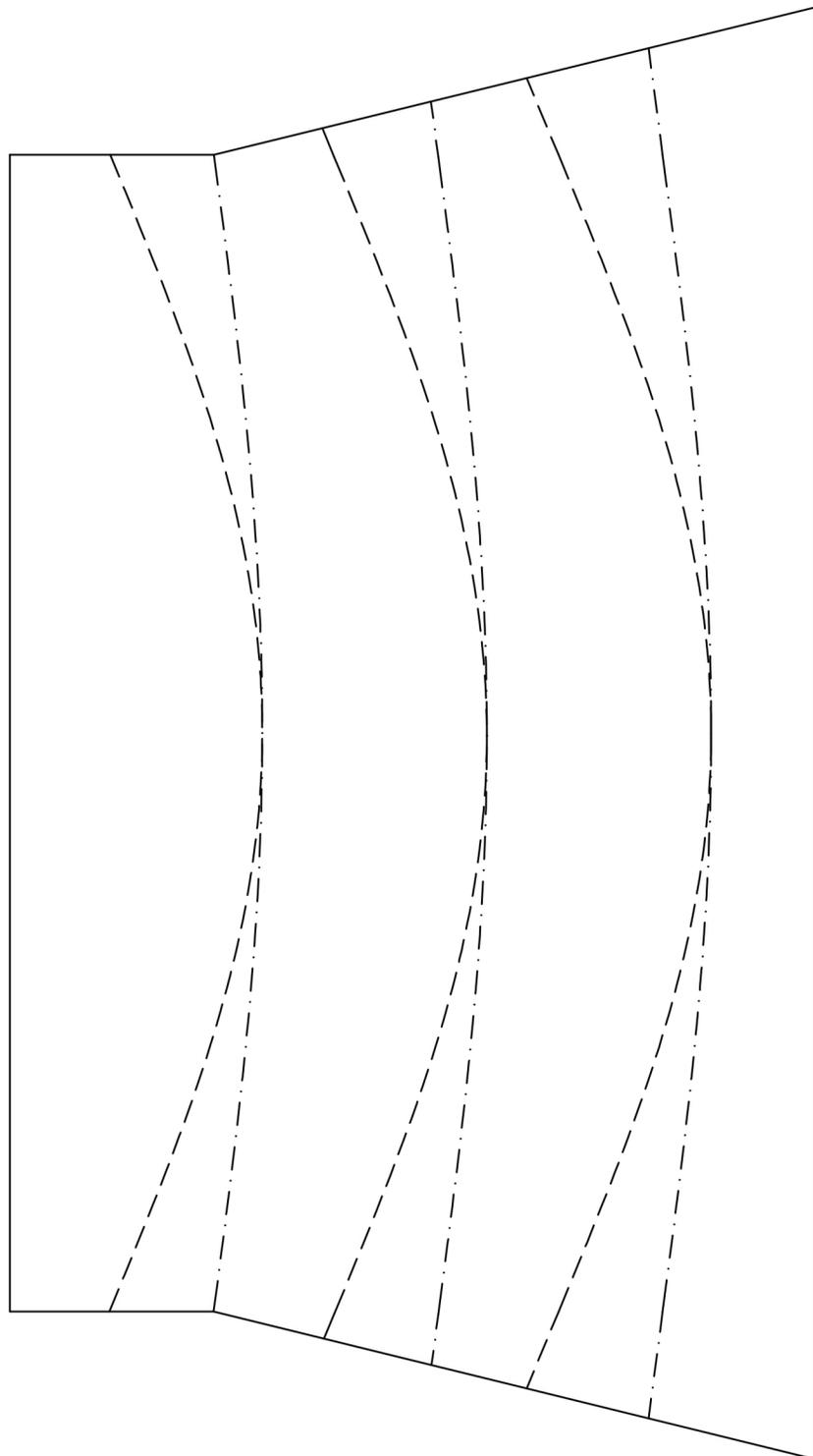


Figure 4.15 Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Lamere. Voir figure 4.15a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

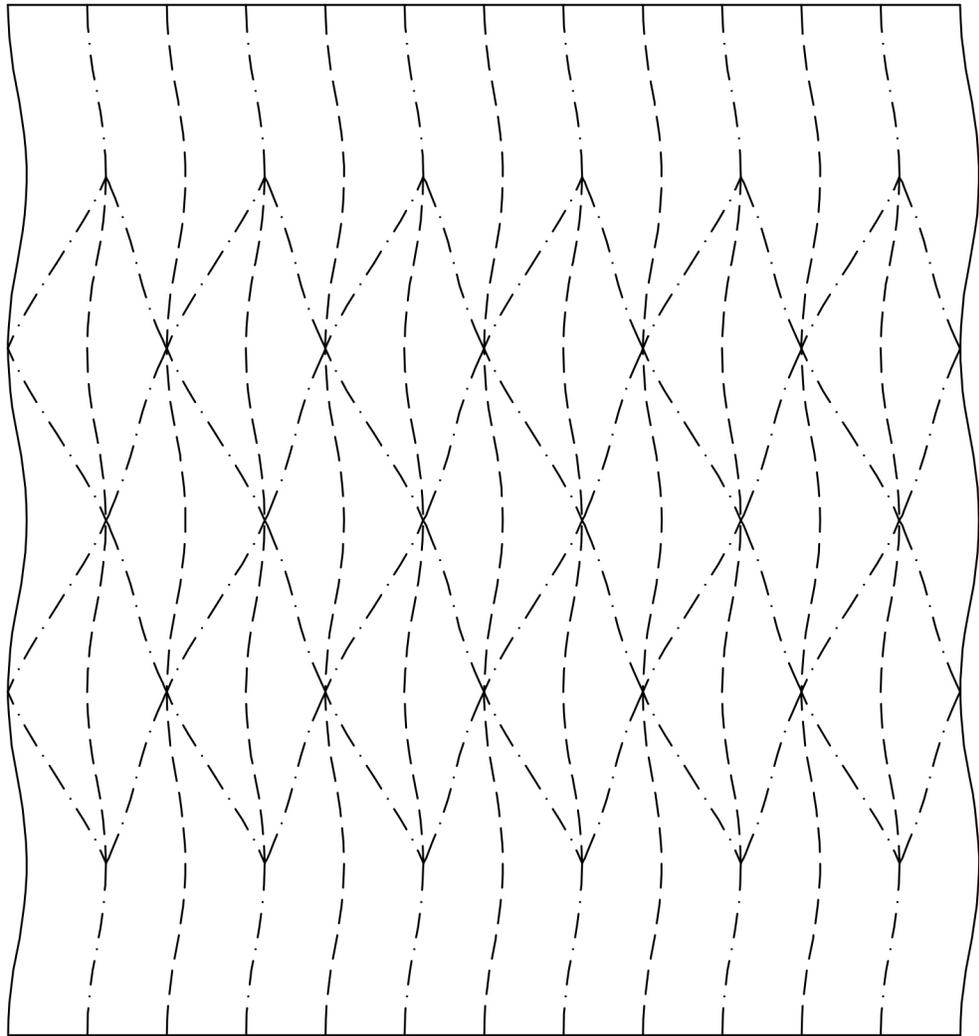


Figure 4.16 Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Lamere. Voir figure 4.16a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

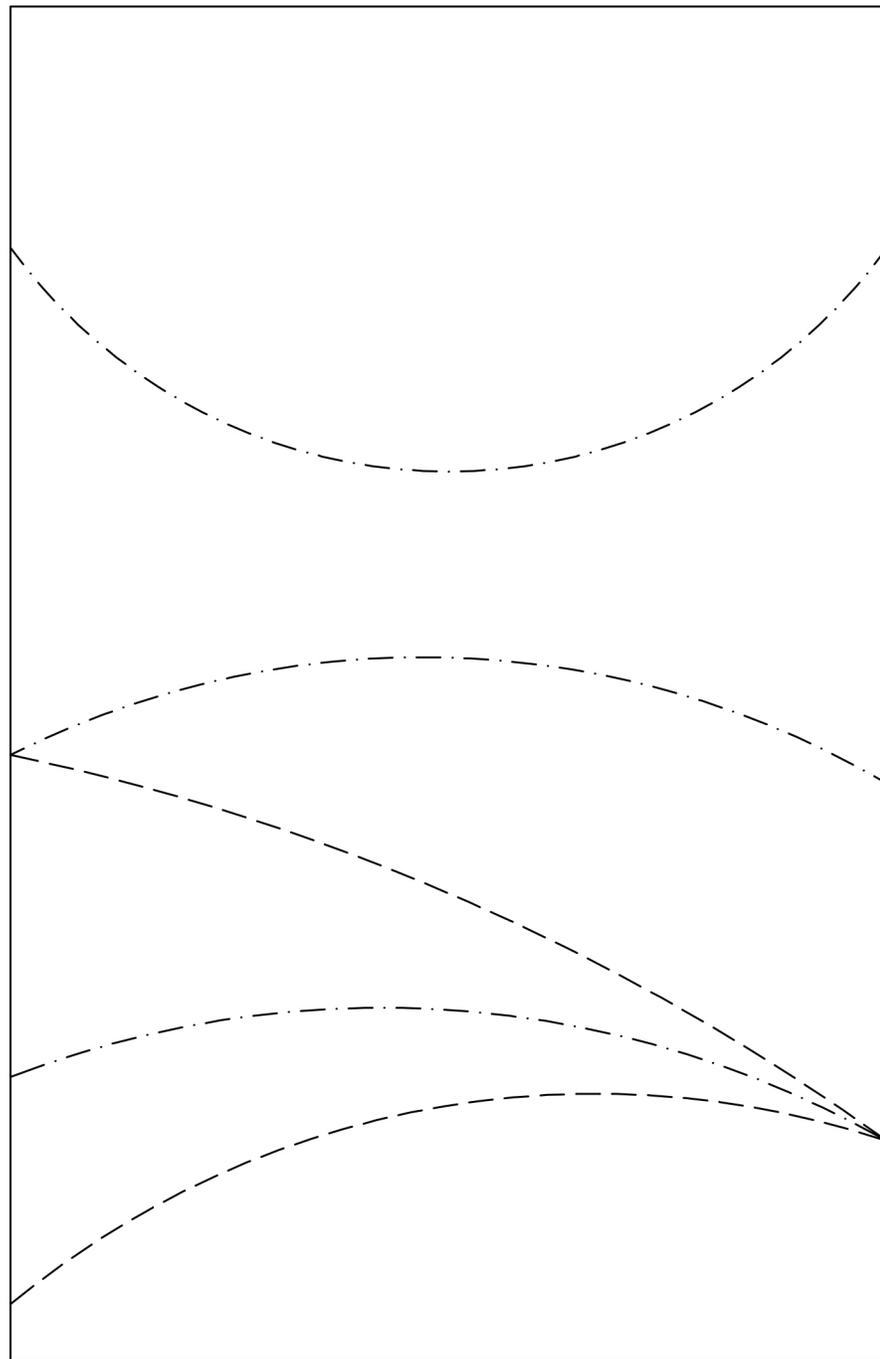


Figure 4.17 Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Mitani et Igarashi. Voir figure 4.17a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

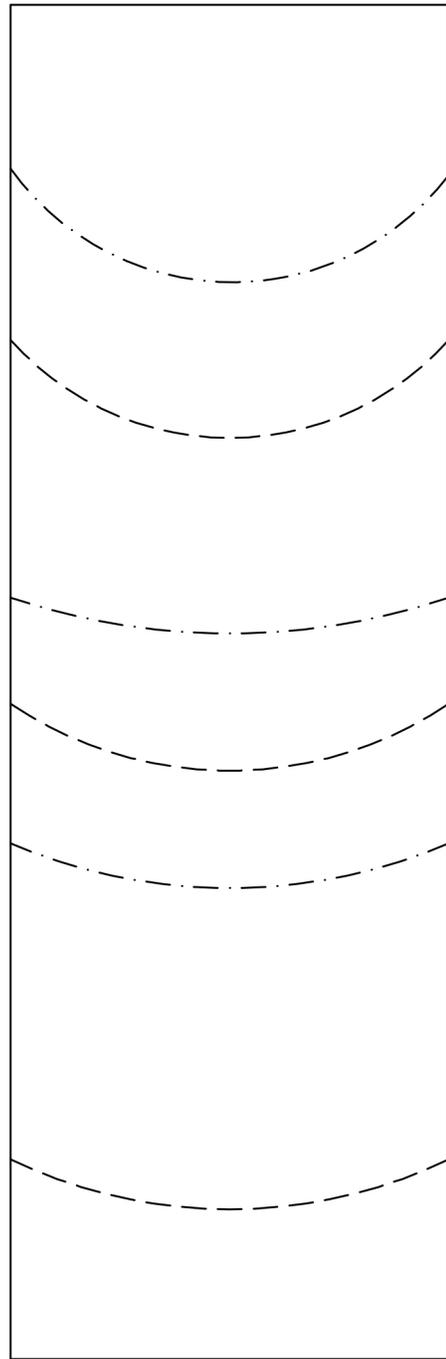


Figure 4.18 Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Mitani et Igarashi. Voir figure 4.18a à la page 98 pour une photo du motif déployé.

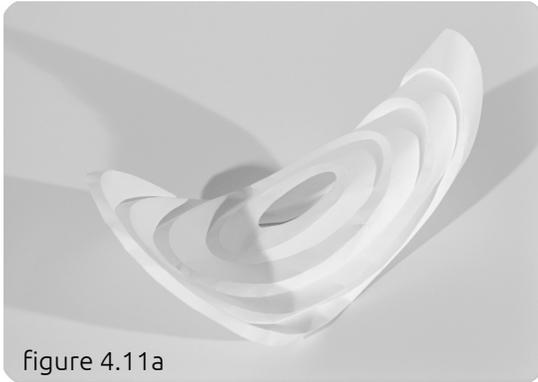


figure 4.11a

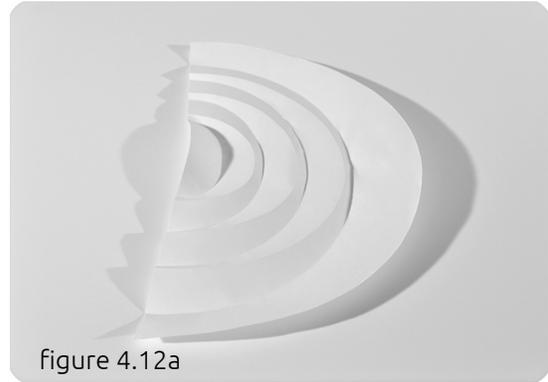


figure 4.12a

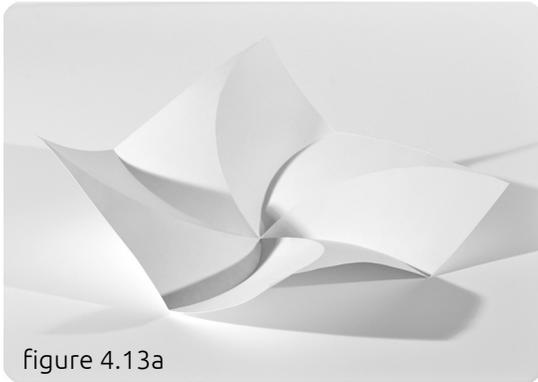


figure 4.13a



figure 4.14a



figure 4.15a

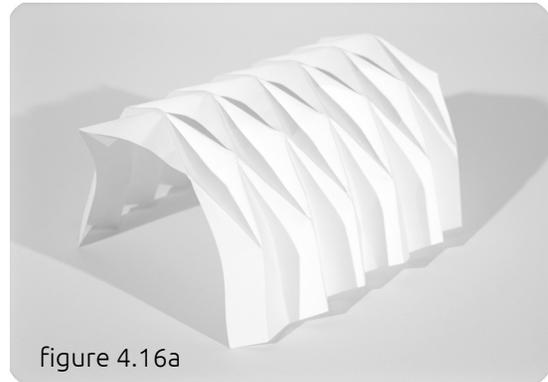


figure 4.16a

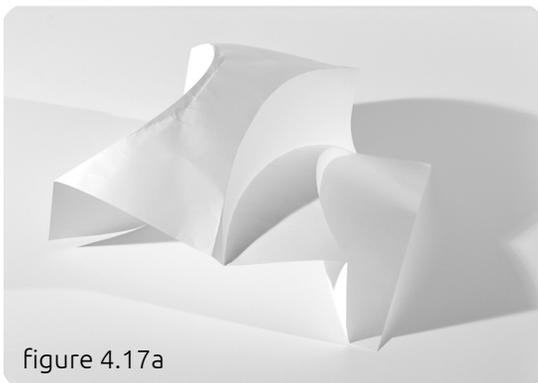


figure 4.17a

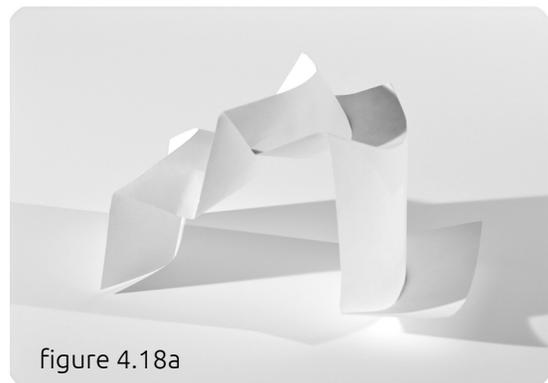


figure 4.18a

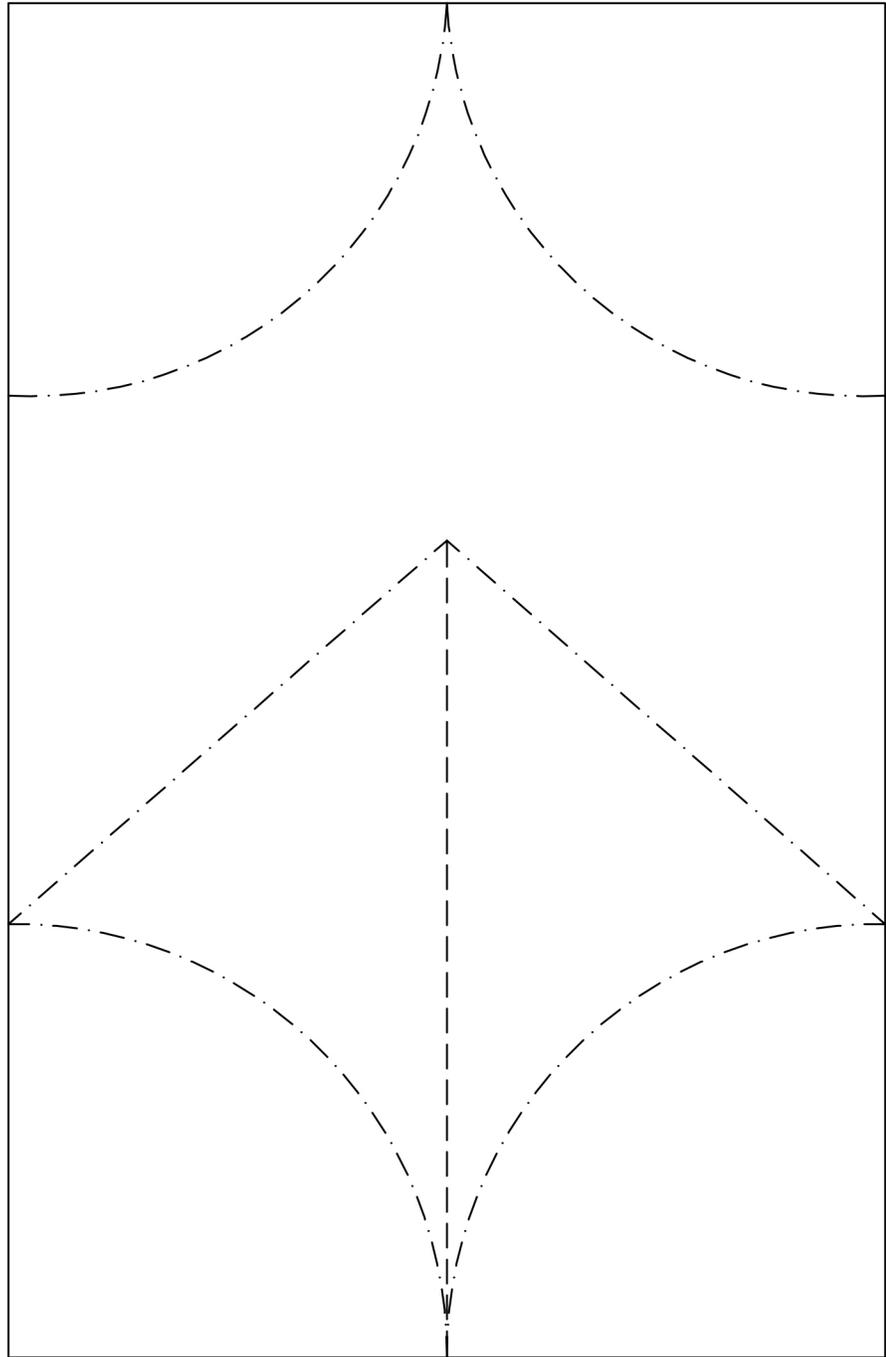


Figure 4.19 Ci-dessus : plan du motif n° 1 de Roy. Voir figure 4.19a, b, c & d à la page 101 pour des photos du motif déployé.

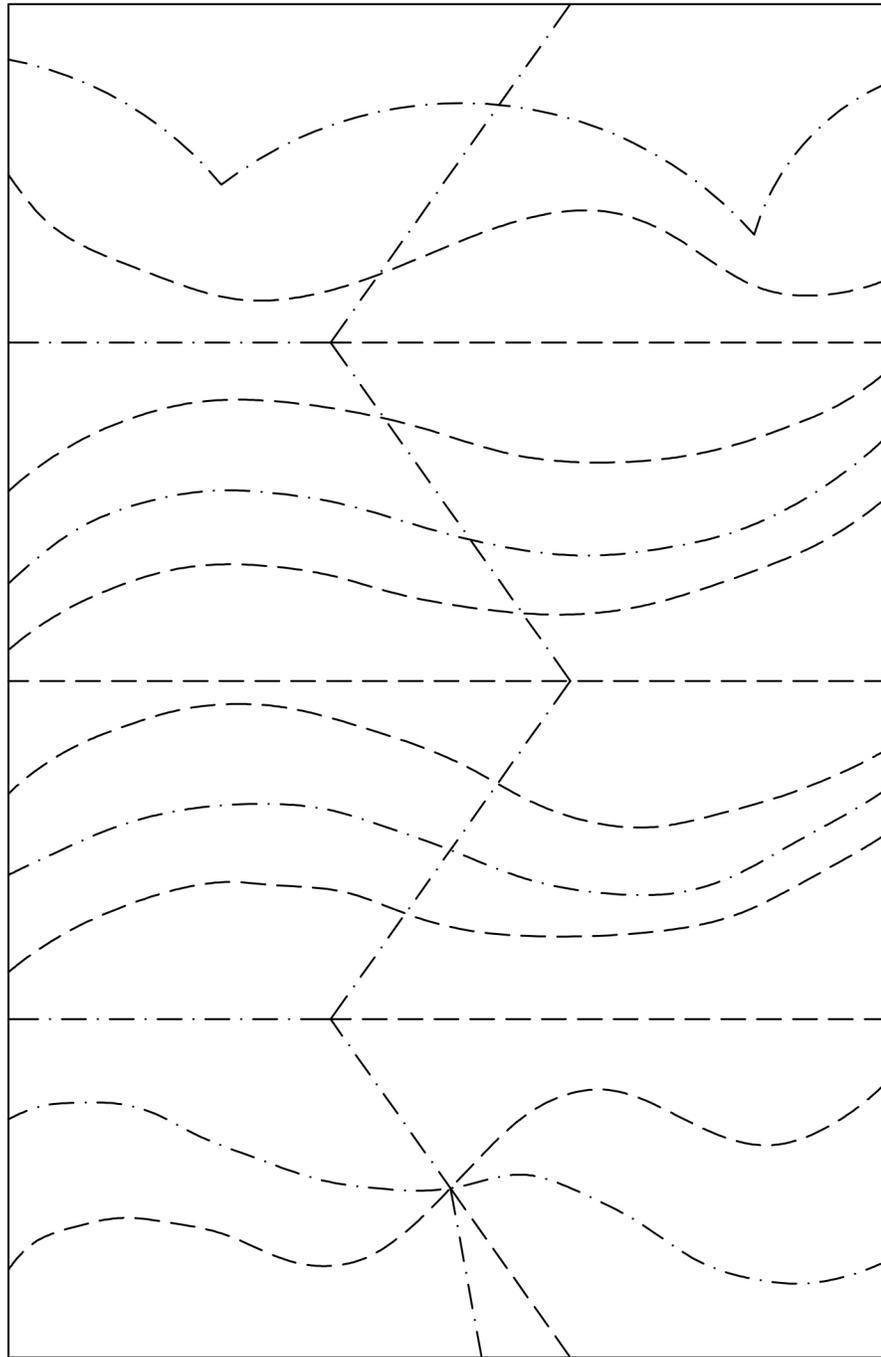


Figure 4.20 Ci-dessus : plan du motif n° 2 de Roy. Voir figure 4.20a, b, c & d à la page 101 pour des photos du motif déployé.

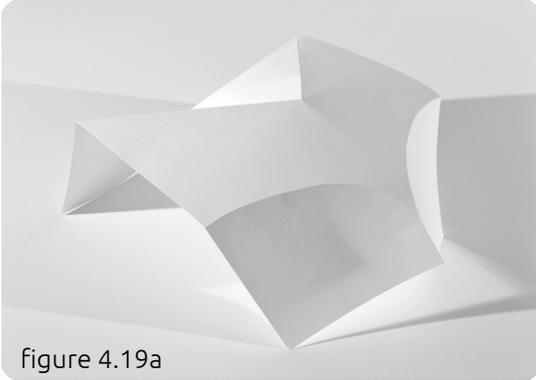


figure 4.19a

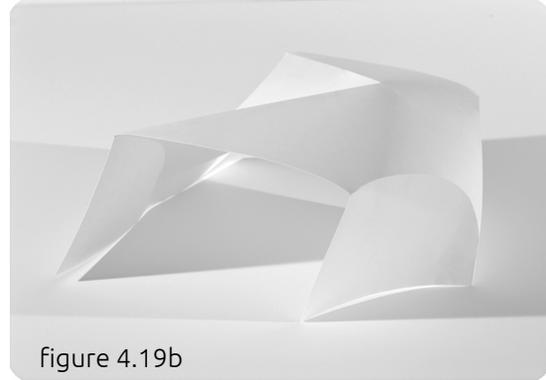


figure 4.19b

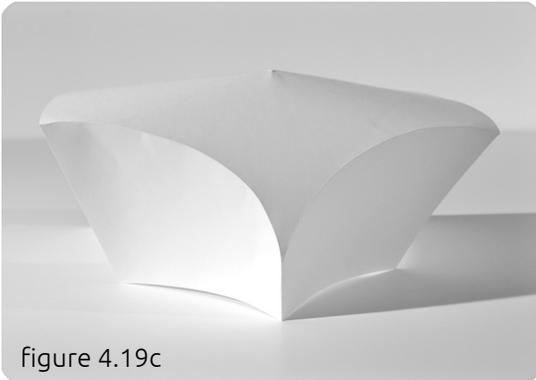


figure 4.19c

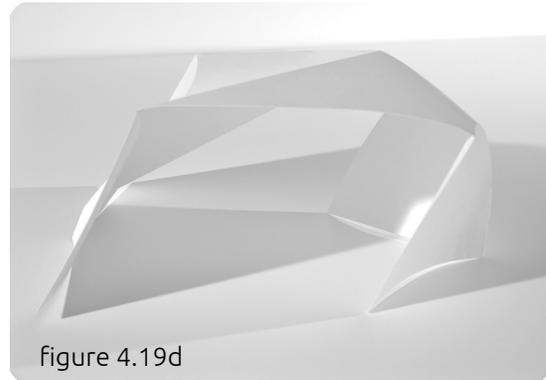


figure 4.19d

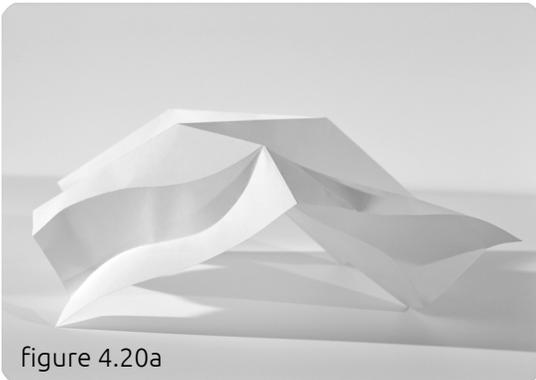


figure 4.20a



figure 4.20b

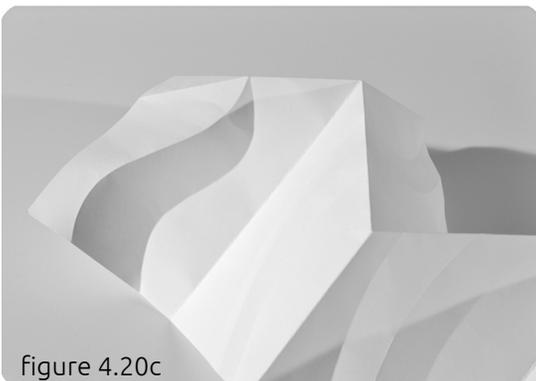


figure 4.20c

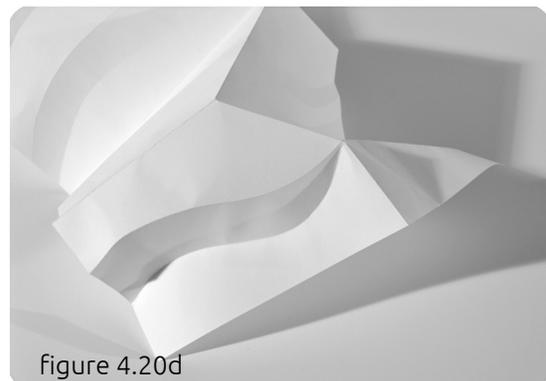


figure 4.20d

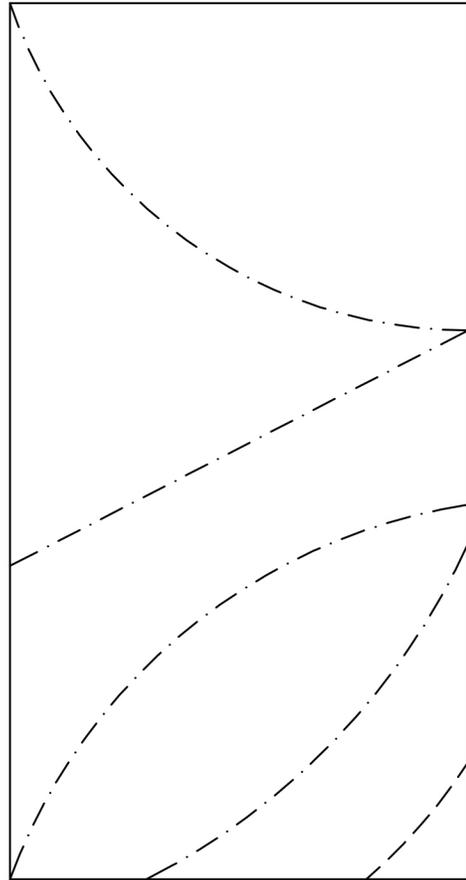


Figure 4.21 Ci-dessus : plan du motif n° 3 de Roy. Voir figure 4.21a & b à la page 105 pour des photos du motif déployé.

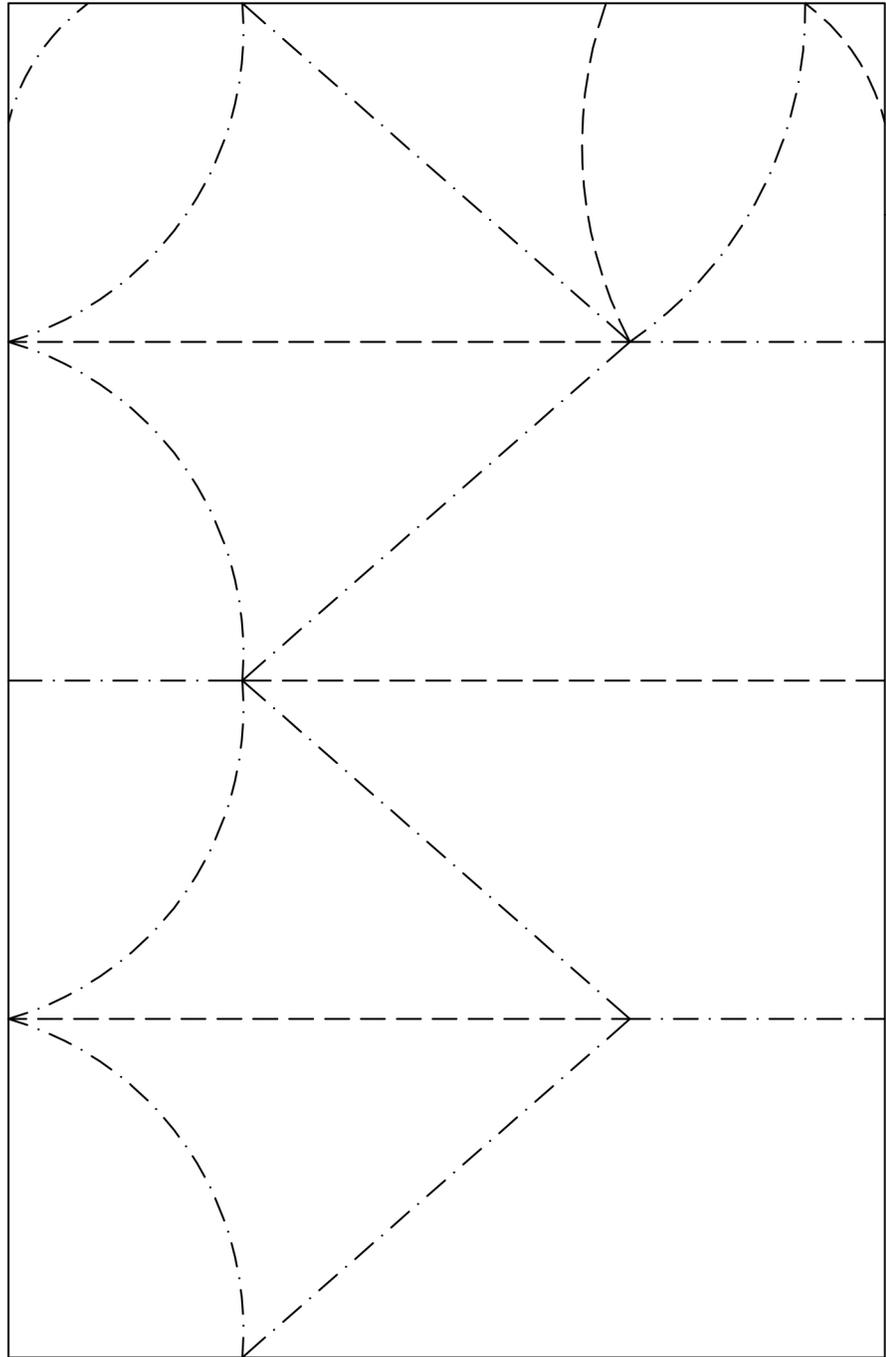


Figure 4.22 Ci-dessus : plan du motif n° 4 de Roy. Voir figure 4.22a & b à la page 105 pour des photos du motif déployé.

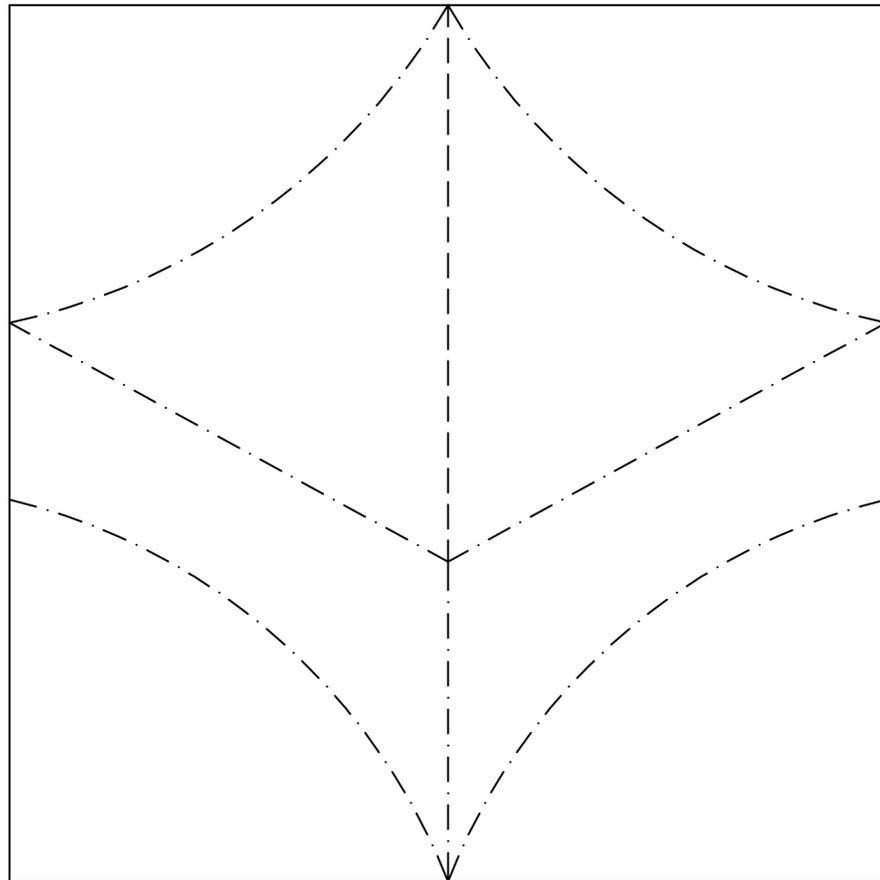


Figure 4.23 Ci-dessus : plan du motif n° 5 de Roy. Voir figure 4.23a, b, c & d à la page 105 pour des photos du motif déployé.

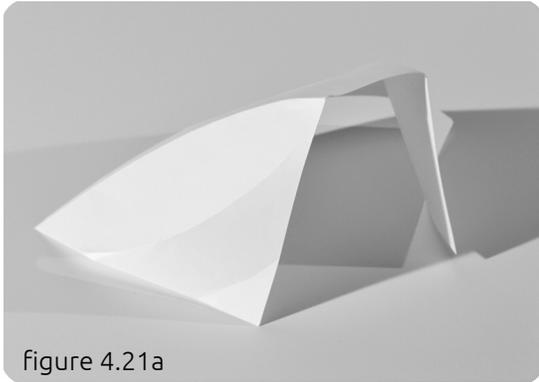


figure 4.21a

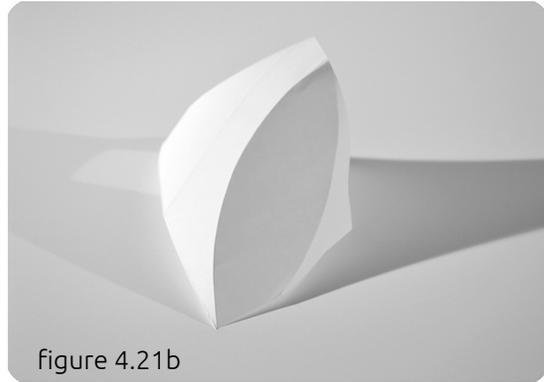


figure 4.21b

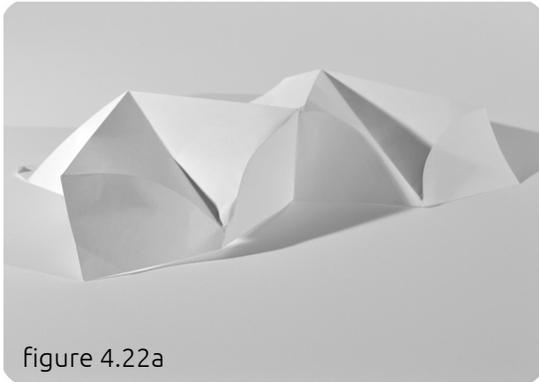


figure 4.22a

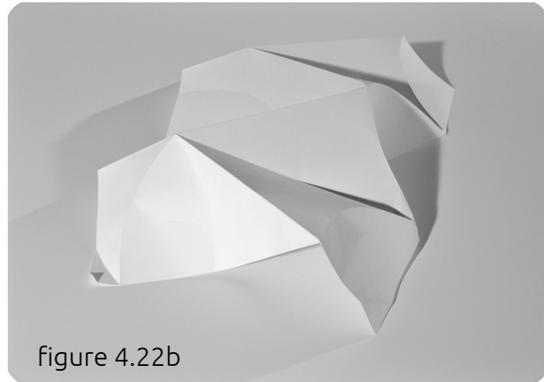


figure 4.22b

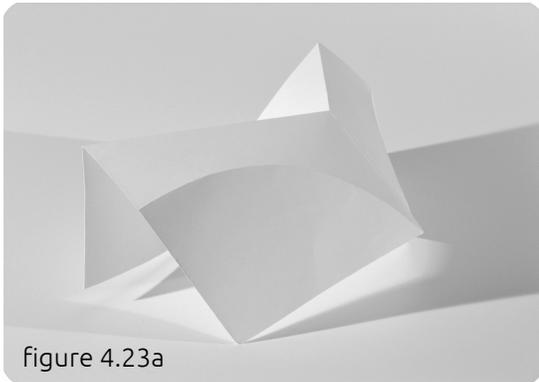


figure 4.23a

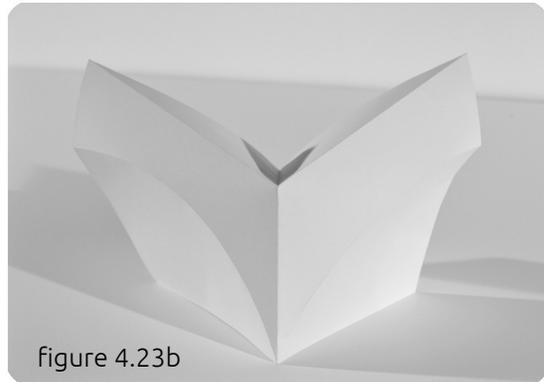


figure 4.23b

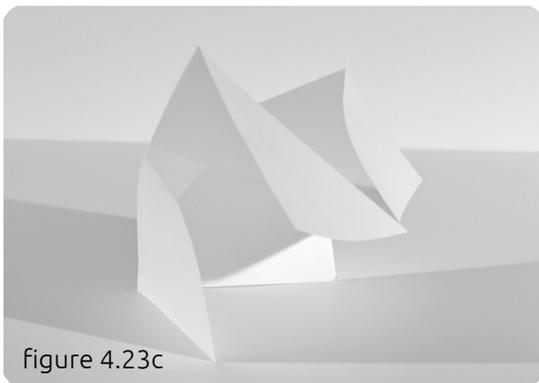


figure 4.23c



figure 4.23d

CHAPITRE V

DEUXIÈME CYCLE D'EXPÉRIMENTATION : LE PLI COMME MATIÈRE

Comment plie-t-on (le carton) à une échelle architecturale : étude avec carton plat et carton ondulé.

5.1 Introduction

Although it is very easy to make paper models of houses, palaces, temples, pyramids, or towers, few materials are more difficult to actually build with than recycled paper. What opportunities one would have if one could simply enlarge the models! Unfortunately, this is impossible, [...] Among other things, we realized that building with paper must be entirely relearned: there is simply no highly developed technology at one's disposal, as in the case when building with wood, steel, or concrete. Building with paper can only be compared, if at all, to building with textiles.⁷⁶

Comme il serait facile, en effet, de simplement agrandir les modèles développés lors du premier cycle d'expérimentation pour concevoir un système constructif à une échelle humaine. Malgré l'impossibilité d'utiliser cette stratégie à terme, force est d'admettre qu'elle fonctionne tout de même jusqu'à un certain seuil, jusqu'à une certaine limite dimensionnelle. Et même si le résultat n'est pas complètement satisfaisant, les prototypes n° 1, 2, 5 & 6 ci-après décrits sont des exemples, certes de taille restreinte, de la possibilité de simplement changer l'échelle des études en papier pour réaliser de plus grands systèmes en carton. Malheureusement, plus les prototypes grossissent, plus les failles de cette stratégie apparaissent. Il y a donc un

⁷⁶ Otto, F. (2003). Préface. Dans M. McQuaid et S. Ban. Shigeru Ban. London : Phaidon. Shigeru Ban, lauréat du Pritzker en 2014, est reconnu comme un spécialiste de l'architecture de papier. Bien que les notions d'échelle et de matérialité soient centrales à ses recherches, il est important de noter que Ban ne travaille pas avec le pli, mais plutôt avec des tubes de carton tubulaires proposant une structure géométrique à ses projets qui n'est pas sans rappeler le travail de Buckminster Fuller.

seuil dimensionnel au-delà duquel le motif en 2D doit être repensé, recalibré, pour être parfaitement adapté à l'échelle souhaitée et au matériau utilisé.

C'est essentiellement sur le changement d'échelle que ce second cycle se penche, cherchant ainsi à valider l'hypothèse de recherche, qui est de savoir, entre autres, s'il existe une limite dimensionnelle à l'application des motifs d'origami. Tels qu'énoncés à la synthèse du chapitre IV, les motifs retenus pour ce deuxième cycle ont comme caractéristiques d'être relativement simples à exécuter, de pouvoir se plier à plat, d'offrir un déploiement créant un espace suffisamment grand, et de permettre une certaine flexibilité dans le positionnement du système constructif.

5.2 Étude avec carton plat

Divers prototypes ont été réalisés avec des échantillons de carton plat (du carton non couché recyclé) de taille et d'épaisseur variée (épaisseur de 40 points et 50 points, largeur de 5'-0" à 6'-0", longueur de +/- 20'-0"). Ces premiers tests ont été dessinés, rainés et pliés à la main avec des outils rudimentaires pour rainer le carton, soit une roulette à disque métallique et des patrons d'embossage employés en industrie pour le rainage à plat. La documentation visuelle des différents prototypes se trouve à la fin du présent chapitre (pages 119 et suivantes). Pour chaque prototype, une série de photos illustrant la variation de déploiement est accompagnée d'une élévation et du plan du motif à l'échelle $\frac{1}{2}'' = 1'-0''$.

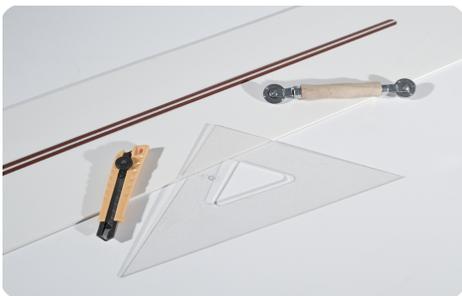


Figure 5.1 Instruments pour rainer à la main le carton plat : roulette à disque métallique, patron d'embossage, x-acto et équerre.

5.2.1 Prototype n° 1 : motif Yoshimura

À partir d'une feuille de carton de 40 points d'épaisseur, et d'une dimension de 5'-2'' par 10'-8'', une alternance de 35 plis ont permis de réaliser un premier système. Ce prototype, dont les dimensions, une fois plié, sont 27'' de large x 25'' de haut x 3½'' d'épais, est malheureusement trop petit (un être humain peut seulement être couché à l'intérieur). Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette première réalisation :

- Parce que le résultat est passablement petit et que le motif est simple, le système se pli aisément par une personne⁷⁷ ;
- Le résultat est relativement solide. Les triangles créés par les différents plis sont assez petits pour être suffisamment rigides. Le poids du carton fait également en sorte que l'ensemble est stable ;
- Les seuls points de faiblesse de ce prototype se retrouvent à la rencontre des plis vallées et des plis montagnes. Il n'est pas rare de voir une déchirure complète de bord en bord de la feuille de carton à ces pointes ;
- La mémoire du carton permet d'emmagasiner de l'énergie lors de la compression de l'ensemble (pliage à plat). Cette énergie, lorsque libérée, permet au prototype de se déployer presque automatiquement, comme un ressort, pour ainsi prendre la forme voulue de l'abri ;
- Dans sa forme pliée (pliage à plat), le prototype est passablement compact, soit environ deux pieds carrés et d'une épaisseur de 3½ pouces. De ce fait il est facilement malléable et transportable ;
- Compte tenu de sa longueur et de sa forme compacte, la variation de déploiement est quelque peu limitée pour ce prototype.

⁷⁷ Cette caractéristique fait écho au principe du «One-person fold» développé par Joel Lamere. Voir p.161-162 de l'appendice A pour une discussion sur ce principe.

5.2.2 Prototype n° 2 : motif Réflexion

Ce second essai est réalisé avec la même feuille de carton que celle utilisée pour le prototype n° 1. Par contre, 18 plis seulement sont nécessaires pour réaliser ce système qui mesure, une fois plié, 39½" de large x 33½" de haut x 1" d'épais. Avant même d'analyser le résultat final, deux constats émergent lors de l'élaboration du prototype à l'échelle ½" = 1'-0" :

- Les lignes de plis perpendiculaires à la longueur de la feuille de carton ont très peu d'incidence sur le résultat final, soit la forme en 3D;
- Par contre, la ligne principale en zigzag au centre du motif est déterminante. Voici, à titre indicatif, la variation hauteur / longueur du motif plié à plat en fonction de l'angle entre les traits de ce pli :
 - 125 degrés - hauteur : 5'-9" / largeur : 6'-0"
 - 112 degrés - hauteur : 5'-2" / largeur : 8'-9"
 - 149 degrés - hauteur : 6'-0" / largeur : 4'-10"

Voici les conclusions tirées de cette seconde réalisation :

- Ce motif, dans les proportions ici testées, n'a pas le potentiel voulu pour une échelle architecturale. Le carton de 40 points est trop peu rigide par rapport à la dimension des polyèdres et avec le temps ce système a tendance à s'écraser. Les différents polyèdres qui le composent finissent donc par courber aux jonctions avec le sol ;
- Le traçage, le rainage et le pliage de ce motif se font facilement et rapidement. La rencontre sur le même axe d'un pli montagne et d'un pli vallée ne complexifie pas l'exécution et se pli relativement aisément à la main ;
- Malheureusement, les proportions de ce motif peuvent difficilement être adaptées à l'échelle du système constructif puisque par définition, la rainure

en zigzag ne peut faire autrement que séparer la feuille de carton en deux. Même en rapetissant les baies dans le sens de la longueur de la feuille, les polyèdres demeurent trop grands pour assurer la rigidité requise.

5.2.3 Prototype n° 3 : motif Yoshimura

Cette seconde variation du motif Yoshimura permet de réaliser un système plus grand que le premier prototype, procurant une hauteur libre sous la voûte de 2'-7". Ce prototype est fabriqué à partir d'une feuille de 50 points mesurant 5'-0" x 7'-10½" et requiert 25 plis. Il est passablement compact une fois plié, mesurant 34½" de large x 34½" de haut x 1½" d'épais. Même si ses dimensions pliées à plat sont sensiblement les mêmes dimensions que celles du motif réflexion, son déploiement et son comportement dans l'espace sont très différents :

- Les proportions utilisées pour ce motif semblent bien fonctionner à une échelle architecturale, le prototype est stable et suffisamment rigide pour tenir en place tout en étant facilement manipulable par une personne ;
- Une grande variation de déploiement est possible avec ce prototype.

5.2.4 Prototype n° 4 : motif en V

Le quatrième test, quant à lui, est réalisé avec deux feuilles de carton de 50 points mesurant chacune 5'-9" x 6'-8". Ce prototype a donc été séparé en deux sections qui ont été jointes ensemble pour le pliage final. Pour ce test, une version avec 16 figures en "V" sur chaque feuille est utilisée. Considérant la feuille assemblée de 6'-8" de large x 11'-6" de long, 139 plis sont nécessaires pour réaliser le système. Cet essai a permis de conclure ceci :

- L'angle des triangles de ce motif est si aigu que le carton se délamine à la rencontre des pointes ;
- Les dimensions du système une fois plié à plat étant passablement grandes

(5'-8" de large x 3'-3" de haut x 6" d'épais), le ratio « compaction / déploiement » n'est pas aussi efficace que les précédents prototypes ;

- Le carton de 50 points est lourd et par conséquent difficile à manipuler. Un système ainsi réalisé n'est pas facilement ajustable et donc peu flexible : deux variations de déploiement sont en fait possibles, soit une forme en voûte (développement linéaire du profil du motif plié) ou alors une forme s'apparentant à un quart de sphère ;
- Malgré une apparente simplicité, ce motif n'est pas aussi facile à plier que les précédents. De plus, compte tenu de la dimension des feuilles une fois jointes, il est presque impossible pour une seule personne de plier ce système dans sa forme en 3D. Chaque section doit donc être pliée séparément pour être ensuite assemblée ;
- L'assemblage des sections est extrêmement ardu puisqu'il faut faire coïncider deux extrémités pliées en zigzag. Ce travail ne peut être fait par une seule personne et demanderait idéalement le développement d'un mécanisme d'emboitage pour faciliter l'assemblage.

5.2.5 Prototype n° 5 : motif Yoshimura irrégulier

Ce prototype a été réalisé à partir d'une feuille de 40 points mesurant 5'-2" de large x 14'-4½" de long. Le motif a été conçu dans le but de réaliser une arche pouvant abriter un être humain de taille moyenne; les dimensions intérieures projetées de l'arche étaient de 5'-7" de hauteur par 4'-6" de largeur. Pour concevoir précisément ce système constructif, une compréhension plus poussée des mathématiques guidant le motif Yoshimura fut requise. Ce prototype permit les découvertes suivantes :

- Il existe un lien mathématique entre les angles (b & c) des triangles du motif en 2D et l'angle (a) entre les différentes baies une fois le système plié à plat,

selon la formule suivante :

$$a = b - 2c$$

Sachant que $b + 2c = 180^\circ$, il est possible de calculer précisément la longueur des baies, la largeur des plis linéaires, ainsi que les différents angles du système;

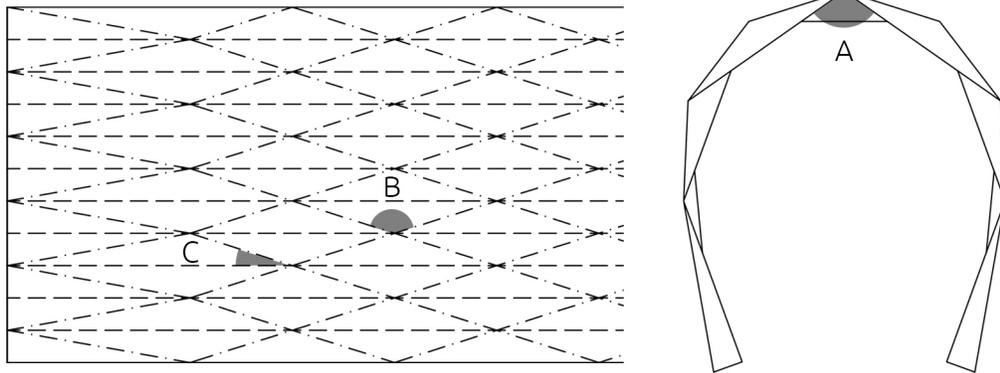


Figure 5.2 Illustration de la formule mathématique décrivant les liens entre les angles du motif Yoshimura à plat et de profil.

- Ces formules mathématiques illustrent parfaitement le concept de langage et de logique interne associé aux pliages de type origami. Il est donc illusoire de penser pouvoir modifier au gré des préférences du concepteur des motifs comme ceux précédemment mentionnés; pour la simple et bonne raison que le changement de proportion d'un seul élément (la longueur d'une baie par exemple) entraîne automatiquement des modifications aux autres éléments du système ;
- Un exemple éloquent de la relation proportionnelle des différents angles du motif Yoshimura est la différence entre le prototype projeté et le prototype réalisé. Pour obtenir une hauteur libre sous l'arche de 5'-7", la distance entre les plis vallées devait être de 5 11/16", pour une largeur totale de feuille de 5'-2 7/16". Puisque les feuilles de carton disponibles mesuraient au maximum 5'-2" de largeur, la distance entre les plis vallées fut réduite de 1/16". Cette modeste variation, qui est par ailleurs la seule différence entre le prototype

projeté et le prototype réalisé, entraîna une diminution de 4" de la hauteur libre sous l'arche, qui passa de 5'-7" projetée à 5'-3" réelle.

5.2.6 Analyse des prototypes en carton plat

À la lueur de ces premiers tests, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Pour obtenir la stabilité et la rigidité requise pour le système constructif, la tessellation de motifs en 2D doit être réalisée avec de petits polyèdres. Le carton plat offrant une résistance relative à la déformation, de grands polyèdres finissent par courber sous l'action de la gravité. Il n'est donc pas envisageable de simplement transposer les motifs développés lors du premier cycle d'expérimentation; il faut aussi adapter leurs proportions à la force structurelle du matériau ;
- Le carton plat de 40 et 50 points est passablement lourd, ce qui influence la manipulation d'un système à l'échelle humaine. Pour être efficace, un système constructif développé avec du carton plat doit trouver un équilibre entre la rigidité requise du matériau (l'épaisseur du carton) et la légèreté souhaitée du système (pour plier, modifier et transporter le système) ;
- Les limites dimensionnelles du système constructif ne semblent pas être fixées uniquement par les dimensions maximales des matériaux. En effet, à la contrainte dimensionnelle du matériau s'ajoute une contrainte ergonomique : plus la feuille de carton est grande, plus certains motifs deviennent difficiles à plier. Un seul utilisateur ne suffit plus pour plier le système, il faut alors avoir recours à plusieurs personnes qui doivent avoir un minimum de compréhension quant aux techniques de pliage du motif.

5.3 Étude avec carton ondulé, échelles variées

Compte tenu de la limite structurelle du carton plat et du travail artisanal requis pour réaliser les prototypes, de nouveaux tests ont été réalisés avec du carton ondulé. Les motifs utilisés ont été développés grâce à des outils informatiques (AutoCAD et ArtiosCAD) et rainurés par une machine CNC à l'usine de Norempac à Montréal.

Parce que les dimensions du carton ondulé sont plus limitées que celles du carton plat (une feuille mesure au maximum 8'-0" par 10'-0"), l'objectif initial de fabriquer un système constructif à partir d'une unique pièce de matériau en feuille doit être quelque peu adapté. Deux options sont alors envisageables :

1. Concevoir le système aux dimensions voulues pour ensuite le subdiviser en plus petits modules qui respectent les dimensions limites d'une feuille de carton ;
2. Lameller-coller plusieurs feuilles de carton pour produire une seule grande feuille qui sera ensuite pliée pour obtenir le système voulu.

Les prototypes n° 6 et n° 7 ont servi à tester certaines propriétés structurelles du carton ondulé plutôt que la portée spatiale du système constructif. Le prototype n° 8, quant à lui, a cherché à surmonter la limite dimensionnelle d'une feuille de carton de 8' x 10' et est par le fait même devenu un exercice d'agrégation.

5.3.1 Prototype n° 6 : motif Yoshimura

Ce premier test est réalisé avec du carton de type B (4mm) d'une dimension de 4'-1½" de large x 8'-3" de long; la cannelure étant parallèle à la largeur de la feuille. Malgré un motif plutôt simple, ce prototype est très difficile à plier; le carton cherchant à retourner à son état initial en feuille. La forme 3D a peu de corps et tend à s'écraser au sol. Pourtant, après avoir été fixé à plat par des cordages pendant des semaines, le prototype a développé une grande rigidité et tient solidement en place. Le carton ondulé semble avoir une «mémoire» qui cherche à revenir à un état d'équilibre : celui initialement manufacturé de matériau en feuille ou alors celui

compact du pliage à plat. La grande rigidité de ce type de carton ondulé fait en sorte qu'il n'est pas aussi flexible et malléable que le carton plat utilisé pour les premiers prototypes. En effet, même une fois déployé, ce prototype conserve presque intégralement les dimensions lorsque plié à plat, soit 4'-11" de large par 2'-11" de haut.

5.3.2 Prototype n° 7 : motif réflexion

Il s'agit en fait de deux essais ayant comme objectif de tester l'effet du rainage sur la cannelure du carton. Pour le premier essai, le motif est rainé de manière orthogonale sur la feuille de carton tandis que pour le second essai, le motif est rainé de manière oblique. Ces tests ne sont malheureusement pas concluants quant à l'effet de l'angle de rainage sur la résistance des cannelures, possiblement à cause des petites dimensions de ces prototypes, les feuilles à plat faisant 3'-1¼" de large par 6'-2¼" de long.

5.3.3 Prototype n° 8 : système modulaire

Le développement de ce prototype est tout d'abord passé par un travail de conception à l'échelle ½" = 1'-0". L'objectif envisagé est de réaliser des modules de différents motifs (Yoshimura, Miura-Ori et motif en V) ayant chacun des proportions variées, et qui sont tous emboîtables pour former un système constructif de dimensions satisfaisantes. Malgré leurs motifs variés, les modules sont interchangeables puisque chacun répond à un emboîtement universel. Les modules ont été réalisés avec du carton de type E, le plus mince de l'industrie (2,5 mm).

- Puisque chaque module est rainé sur une feuille relativement petite (4'-9" x 8'-0"), le pliage est facilement réalisable par une seule personne ;
- Les attaches utilisées pour ce prototype sont en velcro, à l'instar du système

développé par Matcha & Ljubas⁷⁸ ;

- Si le pliage des modules est facile, c'est dans leur assemblage que la difficulté se trouve. Comme ce fut le cas avec le prototype n° 4, les modules sont ici encore trop grands pour être facilement emboîtables par une personne ;
- L'utilisation du carton de type E n'est pas adaptée à l'échelle souhaitée : sa minceur est un désavantage lors de la manipulation, créant des faux plis non désirés le long des cannelures et rendant ainsi les modules moins rigides ;
- Le carton de type E n'a pas de « mémoire de forme » comme peut en avoir le carton de type B. Ce carton manque également de corps, par conséquent, le système est instable et les modules inférieurs ont tendance à s'écraser sous le poids des modules supérieurs.

5.3.4 Analyse des prototypes en carton ondulé

La cannelure du carton ondulé lui procure certes une plus grande résistance que le carton plat, mais cet avantage ne vient pas sans inconvénient. Il est en effet contraignant de travailler avec un matériau dont la résistance est unidirectionnelle. Bien que le carton plat ne soit pas bidirectionnel à proprement parler⁷⁹, le sens des

⁷⁸ Il s'agit d'un kiosque d'exposition en carton ondulé de 8 mm, conçu selon le motif d'origami Yoshimura, et réalisé à partir de l'assemblage de centaines de petits modules mesurant 1,60 x 1,90 m. De 10 à 20 modules sont pliés et collés ensemble pour former des unités transportables. Ces unités ont ensuite été jointes sur le lieu de l'exposition grâce à des connecteurs en Velcro. Voir Matcha, H. et Ljubas, A. (2010). *Parametric Origami: adaptable temporary buildings. FUTURE CITIES [28th eCAADe Conference]*, Actes du colloque, 15-18 septembre 2010, Zurich, Switzerland, Récupéré de http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/ecaade2010_222.content.pdf

⁷⁹ La plupart des fibres de papier sont orientées parallèlement au sens de déplacement de la feuille (sens machine). Le sens machine (sens des fibres) est donc perpendiculaire à la largeur de la feuille de carton. Cela rend toujours le carton plat plus rigide et plus solide dans ce sens. Voir Pro-Carton. (2008). *Glossaire Explication de la terminologie utilisée dans l'industrie du carton plat et les boîtes pliantes*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

fibres a une incidence moindre sur la résistance du système plié que le sens des cannelures du carton ondulé peut avoir.

Si le carton ondulé est si bien adapté à l'industrie de l'emballage, c'est entre autres parce que les plis sont toujours parallèles ou perpendiculaires aux cannelures. Avec les motifs d'origami utilisés, dont aucun angle n'est orthogonal, des faux plis apparaissent systématiquement le long de cannelures, bien souvent perpendiculairement aux points de rencontre des plis planifiés.

Pour résoudre ce problème, qui affaiblit le système constructif, il faudrait peut-être laminer deux ou plusieurs feuilles de carton en alternant l'angle des cannelures, ce qui n'est pas la même chose qu'utiliser du carton triple cannelure dont la direction de toutes les cannelures est semblable. L'alternance de la direction des cannelures pourrait simplement être perpendiculaire ou encore être positionnée précisément pour tenir compte des principaux angles de rainage. On pourrait par la même occasion produire des feuilles de plus grandes dimensions et cesser d'être limité par le standard de l'industrie (8' x 10').

5.4 Synthèse du deuxième cycle d'expérimentation

Le carton présente un potentiel certain pour la réalisation de systèmes pliés, générant, une fois déployé, un espace unique adapté à l'être humain. Par contre, pour être en mesure de réaliser un système constructif de grandes dimensions, il ne suffit pas de simplement agrandir les motifs testés lors du premier cycle; il faut modifier leurs proportions pour que celles-ci soient adaptées à la fois à l'échelle souhaitée et au matériau utilisé.

Pour répondre adéquatement à l'hypothèse de recherche, soit le développement d'un système constructif à partir du pliage d'un unique matériau en feuille, l'utilisation du carton ondulé requiert une étape intermédiaire pour produire une feuille d'une dimension satisfaisante et d'une résistance suffisante. Au contraire, le

carton plat, dont la largeur peut aller jusqu'à 11'-0", permet immédiatement de réaliser un système constructif à l'échelle humaine. De plus, les machines industrielles pour rainer le carton plat peuvent plus facilement s'adapter aux motifs d'origami que celles utilisées pour le carton ondulé.

Pourtant, au final, peu importe le choix de matériau, ce n'est pas tant le rainage du motif (mécaniquement ou manuellement) qui limite les dimensions du système, mais bien la faisabilité de le plier en trois dimensions.

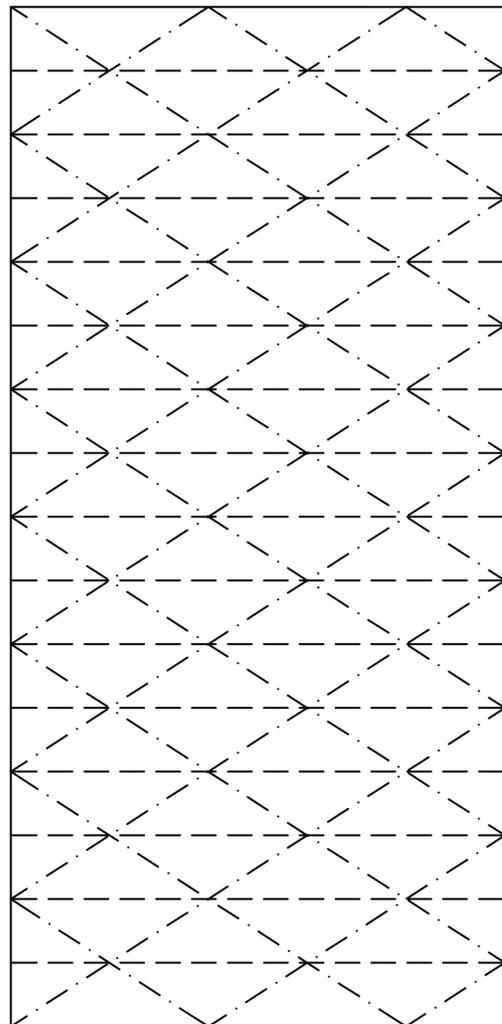
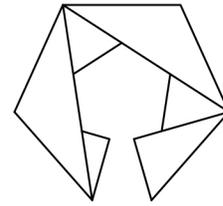
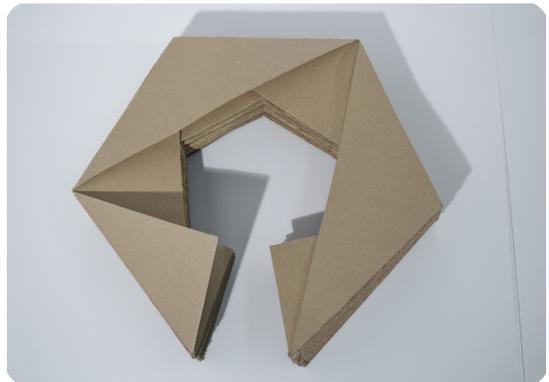
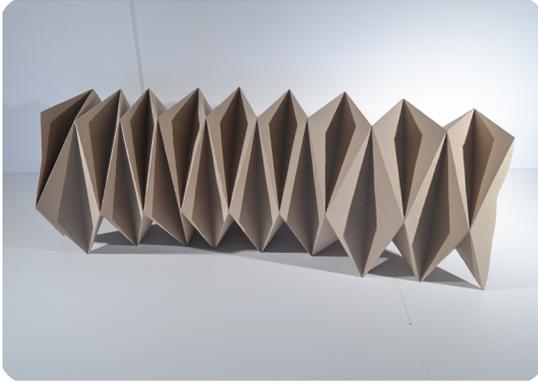


Figure 5.3 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 1 (motif Yoshimura). Page suivante : photos des différentes options de déploiement.



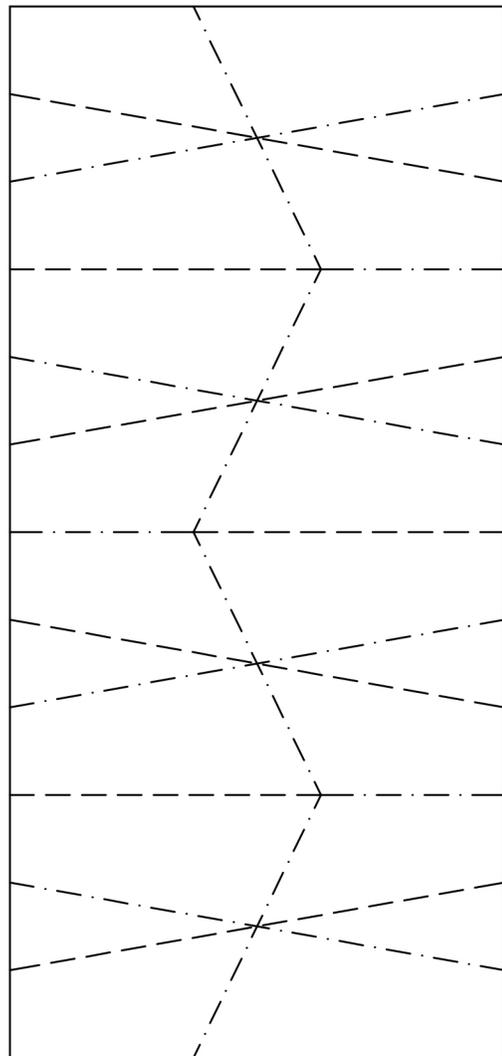
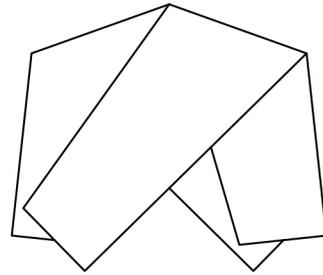
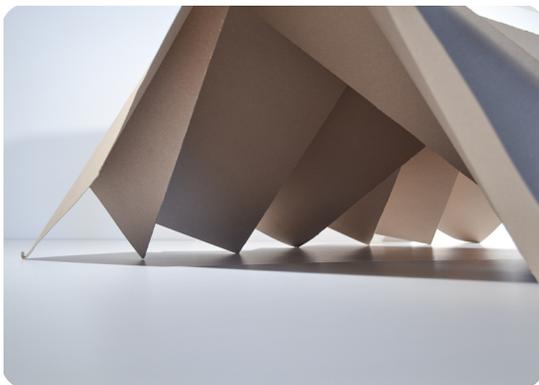
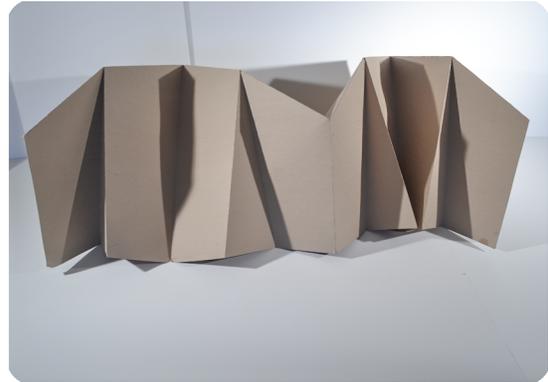
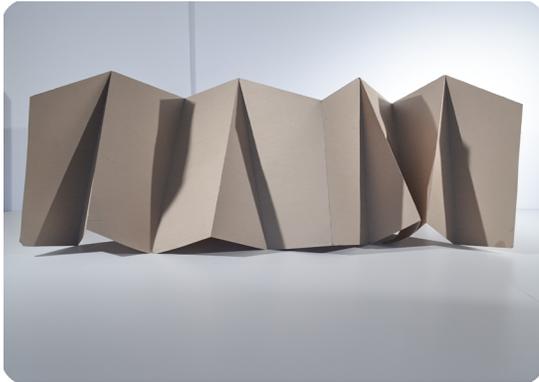


Figure 5.4 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 2 (motif Réflexion). Page suivante : photos des différentes options de déploiement.



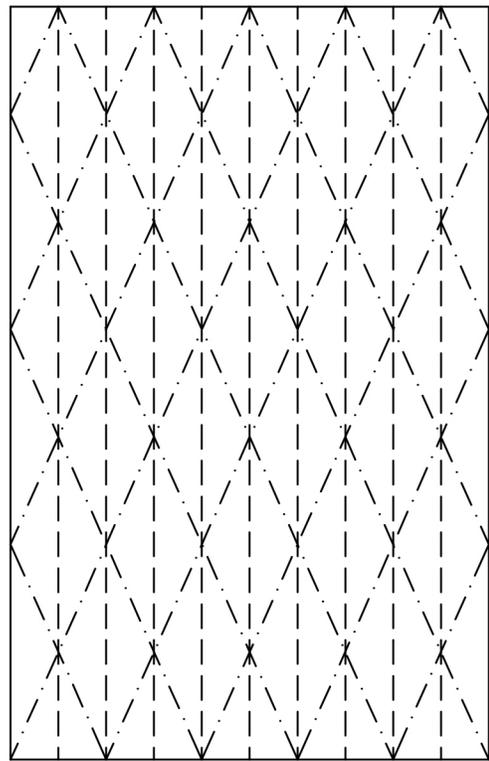
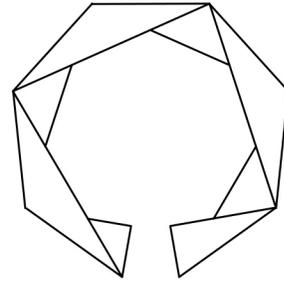
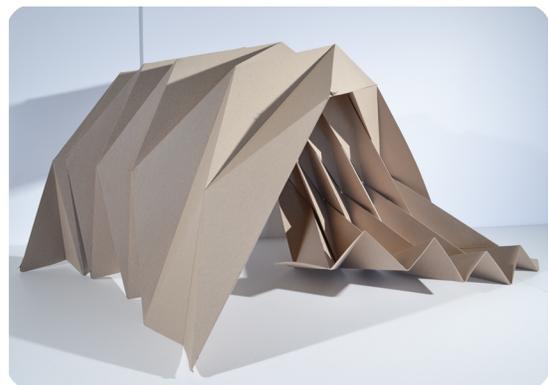
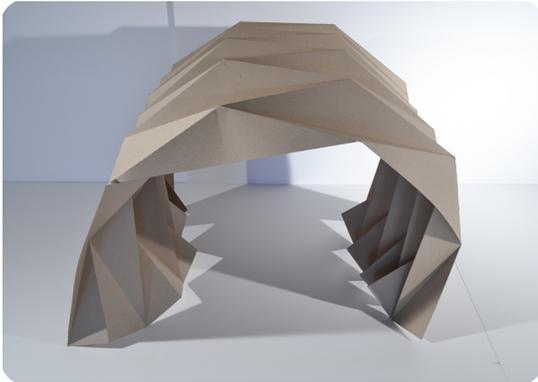
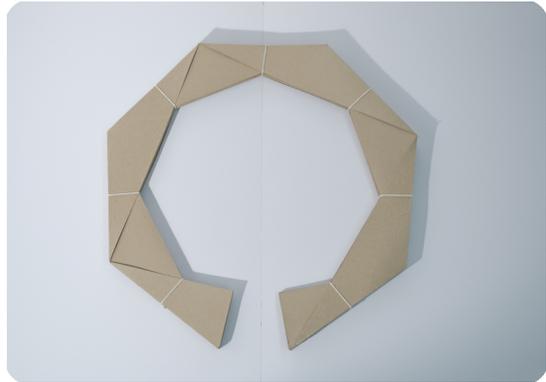


Figure 5.5 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 3 (motif Yoshimura). Pages suivantes : photos des différentes options de déploiement.





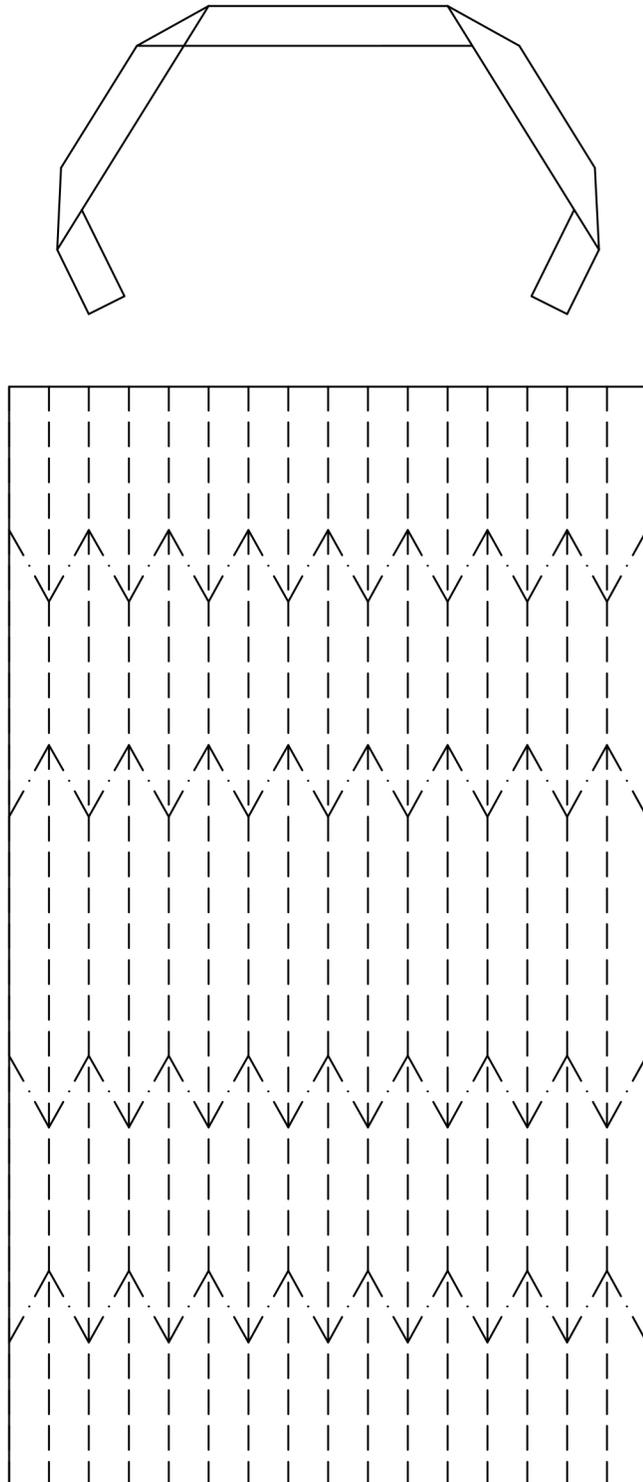
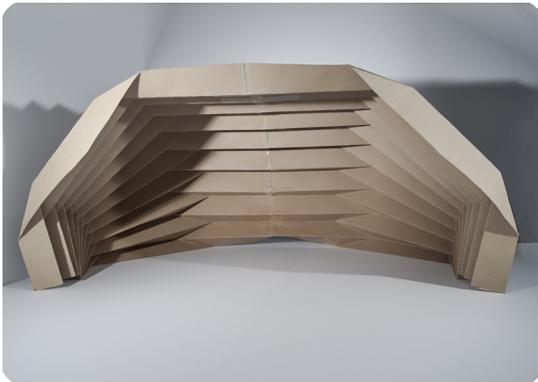
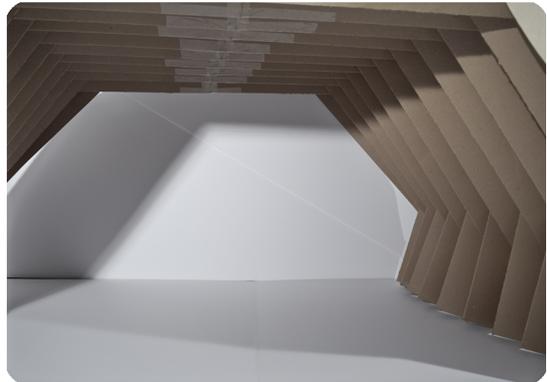


Figure 5.6 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 4 (motif en V). Page suivante : photos des différentes options de déploiement.



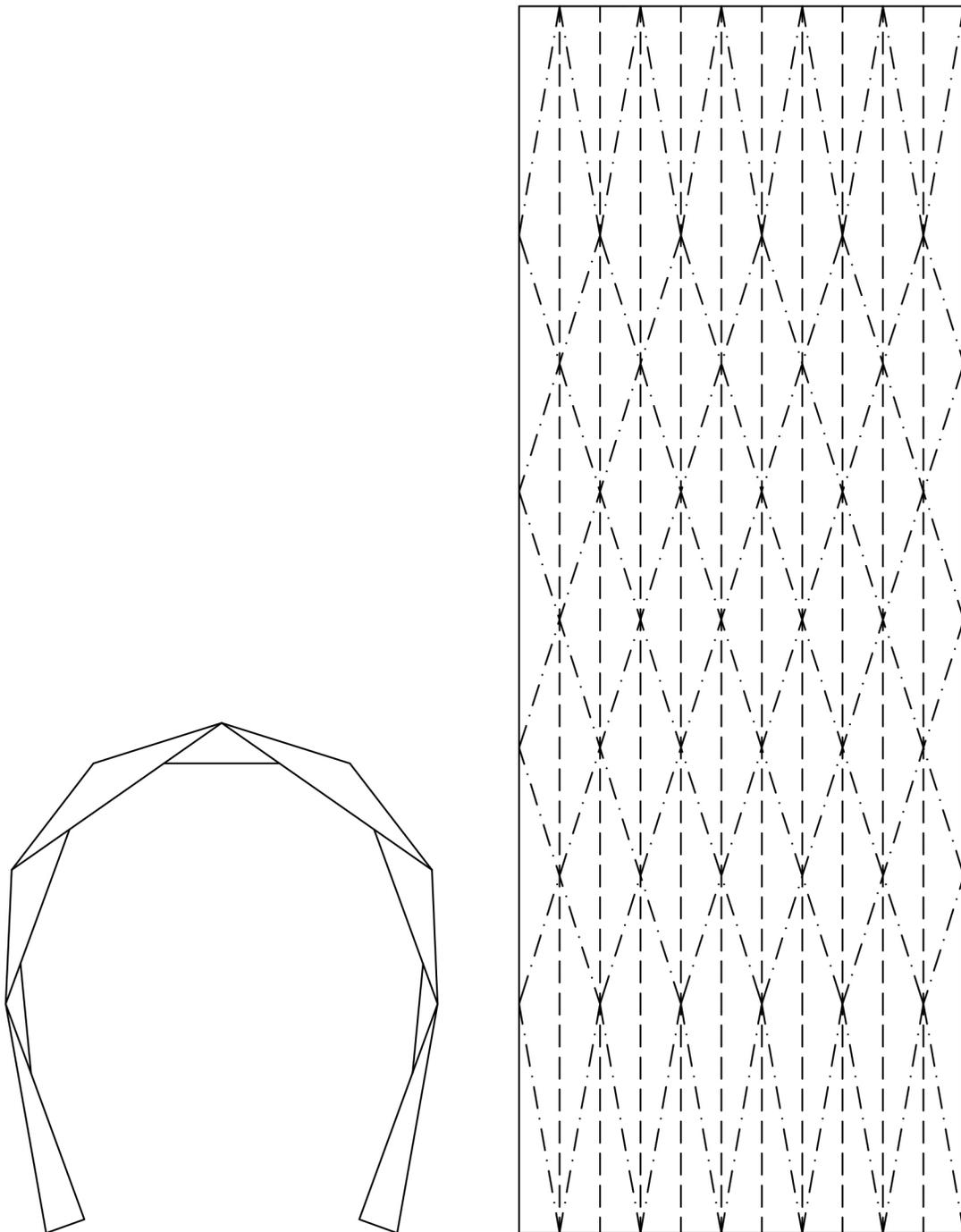
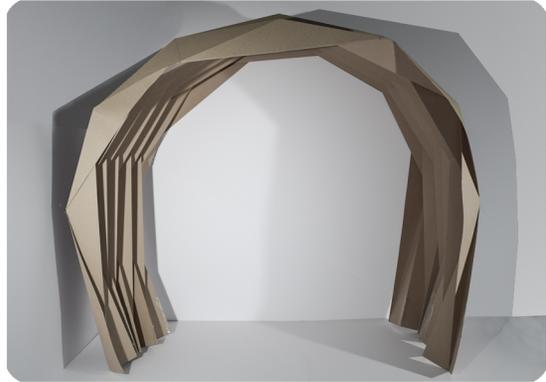


Figure 5.7 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 5 (motif Yoshimura irrégulier). Page suivante : photos des différentes options de déploiement pour le modèle en papier cartonné (trois photos du haut) et pour le prototype en carton plat.



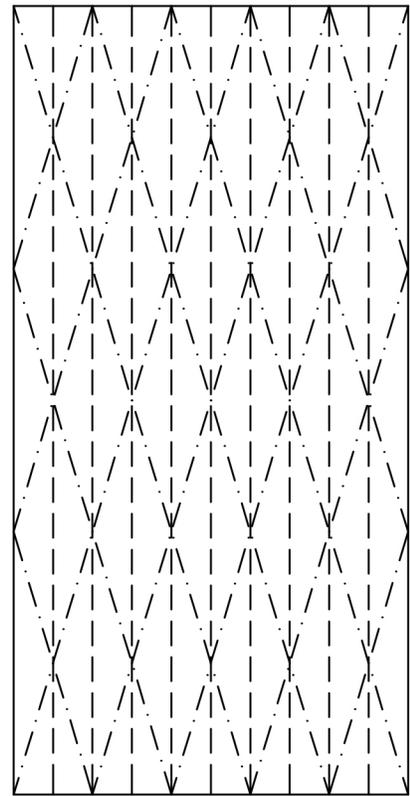
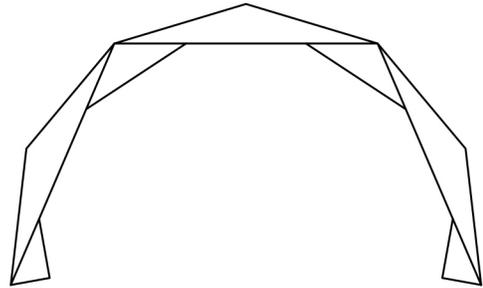


Figure 5.8 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 6 (motif Yoshimura). Page suivante : photos des différentes options de déploiement.



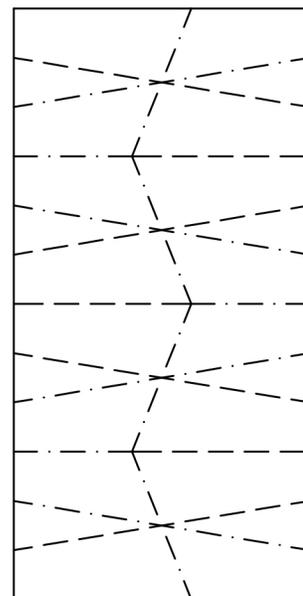
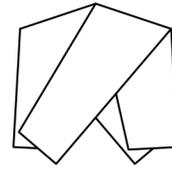
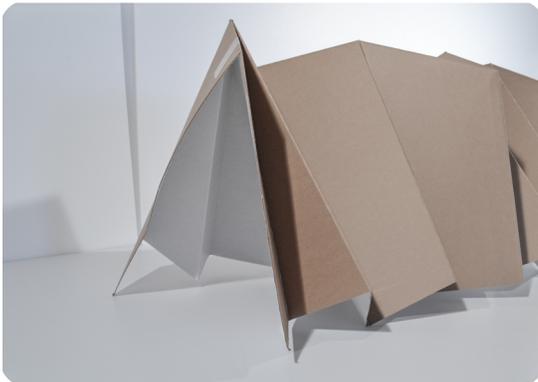
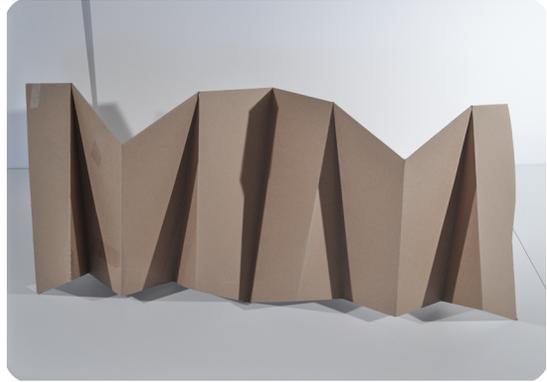
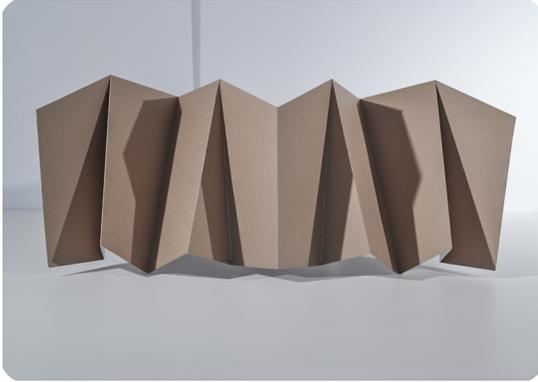


Figure 5.9 Ci-dessus : plan et élévation du prototype n° 7 (motif Réflexion). Page suivante : photos des différentes options de déploiement.



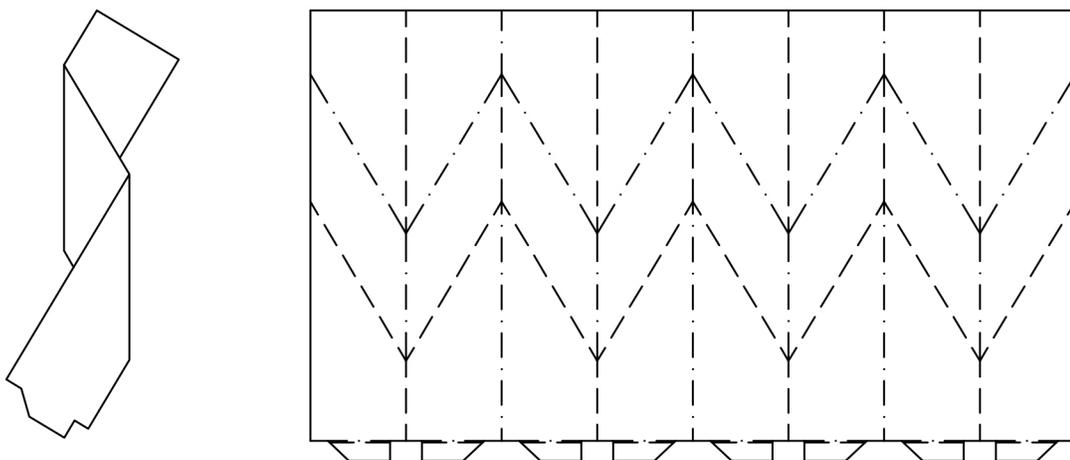


Figure 5.10 Ci-dessus : plan et élévation du module Miura-Ori pour le prototype n° 8 (système modulaire). Voir page 140 pour différentes options de déploiement.

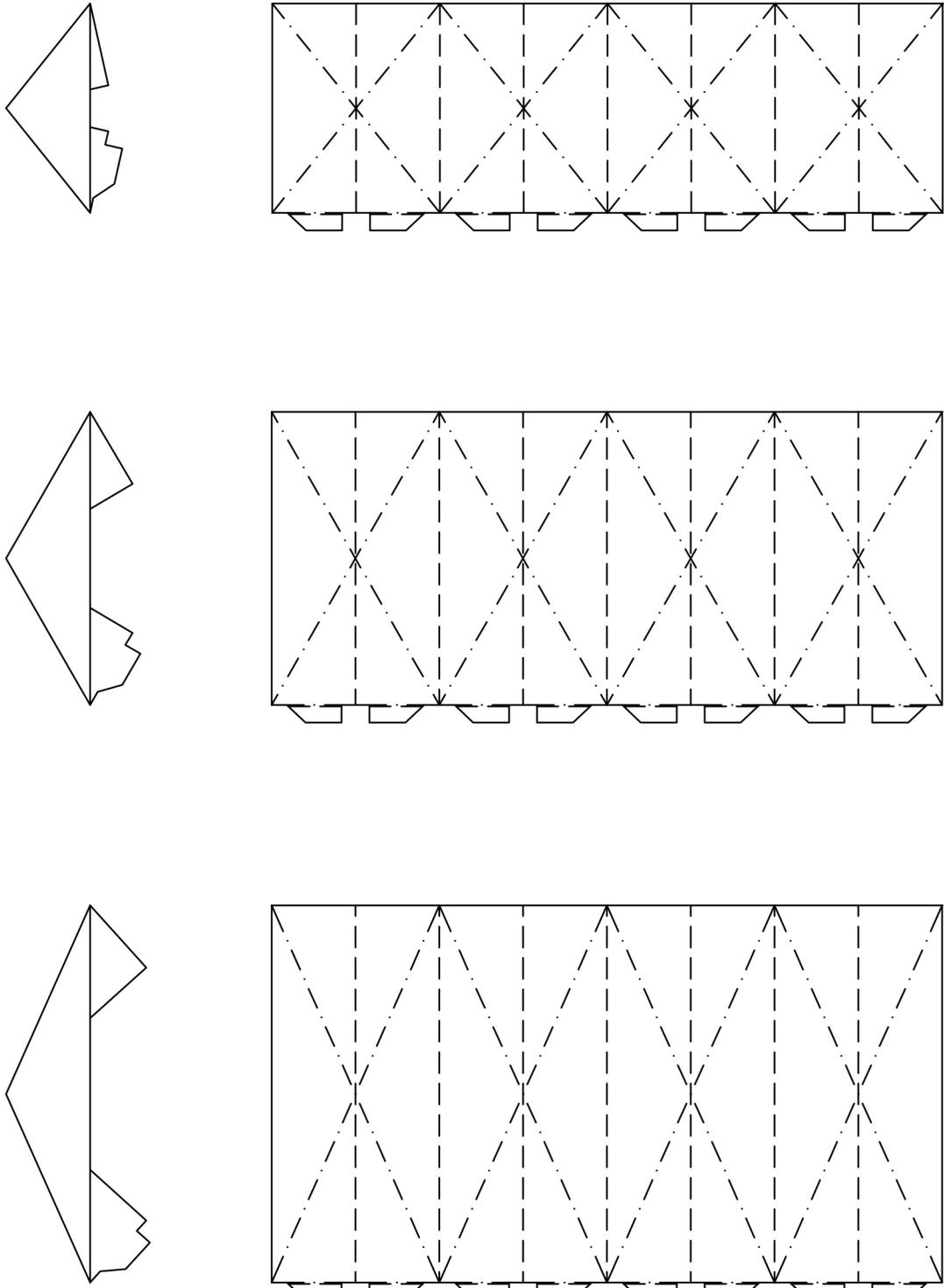


Figure 5.11 Ci-dessus : plan et élévation des modules Yoshimura pour le prototype n° 8 (système modulaire). Voir page 140 pour différentes options de déploiement.

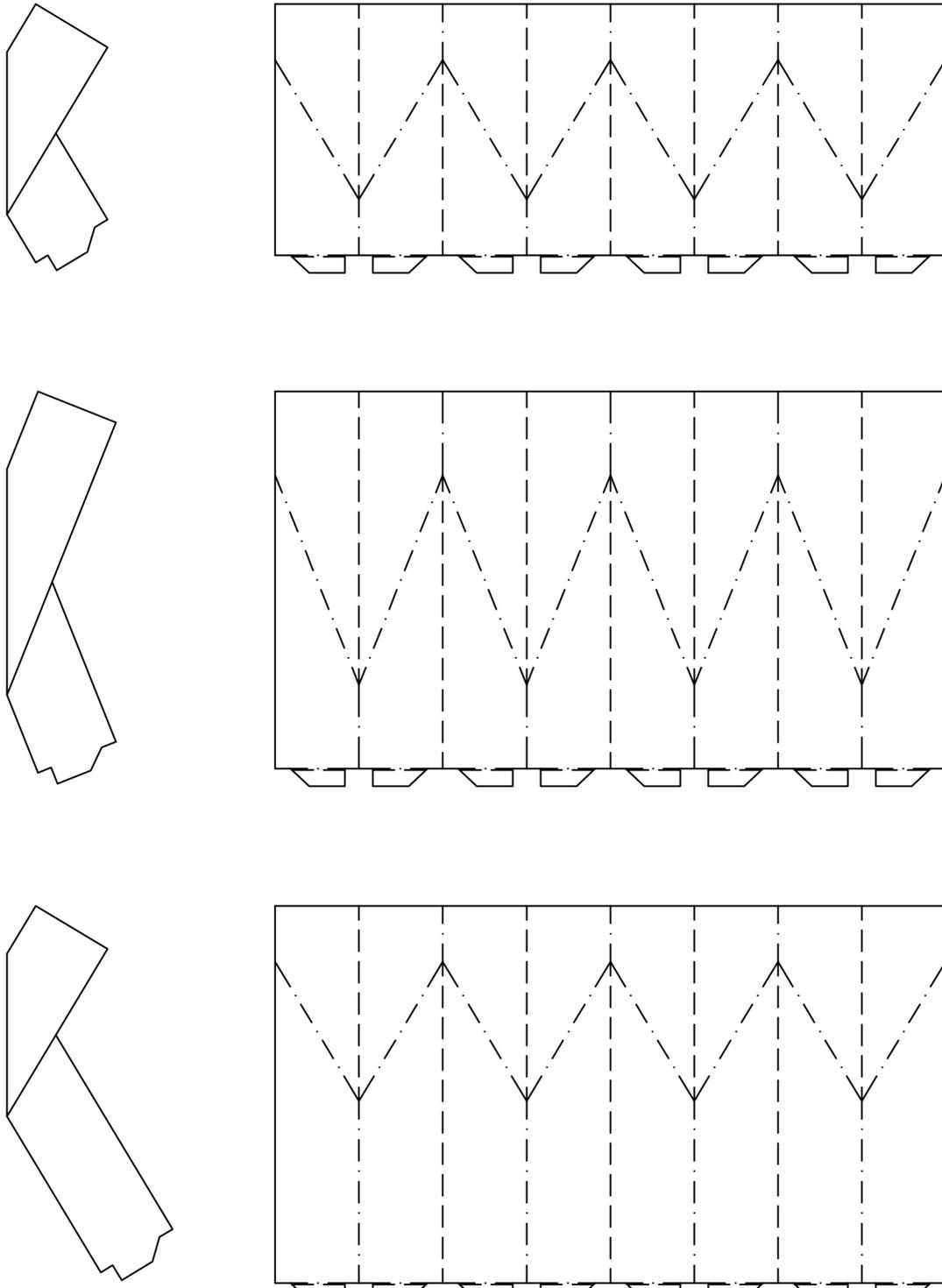


Figure 5.12 Ci-dessus : plan et élévation des modules en V pour le prototype n° 8 (système modulaire). Voir page suivante pour différentes options d'assemblage.

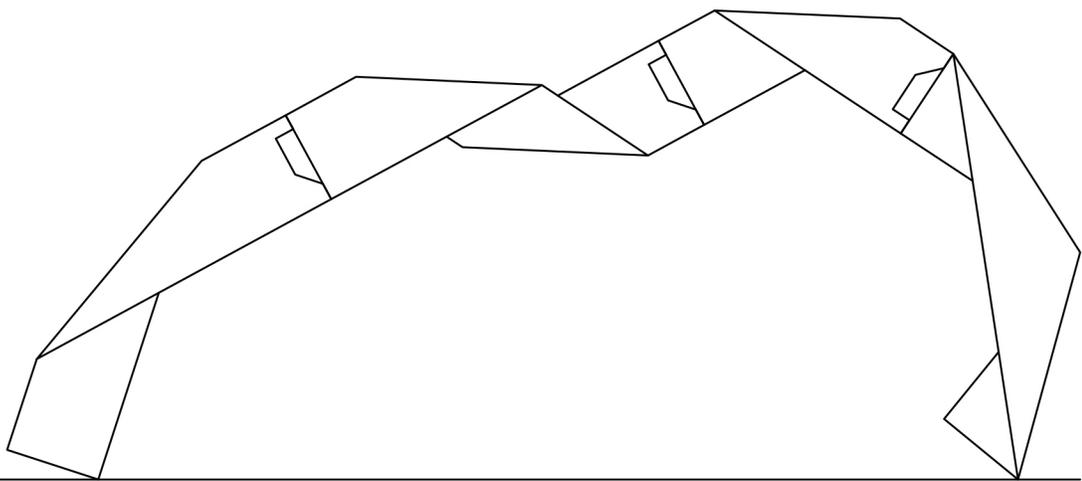
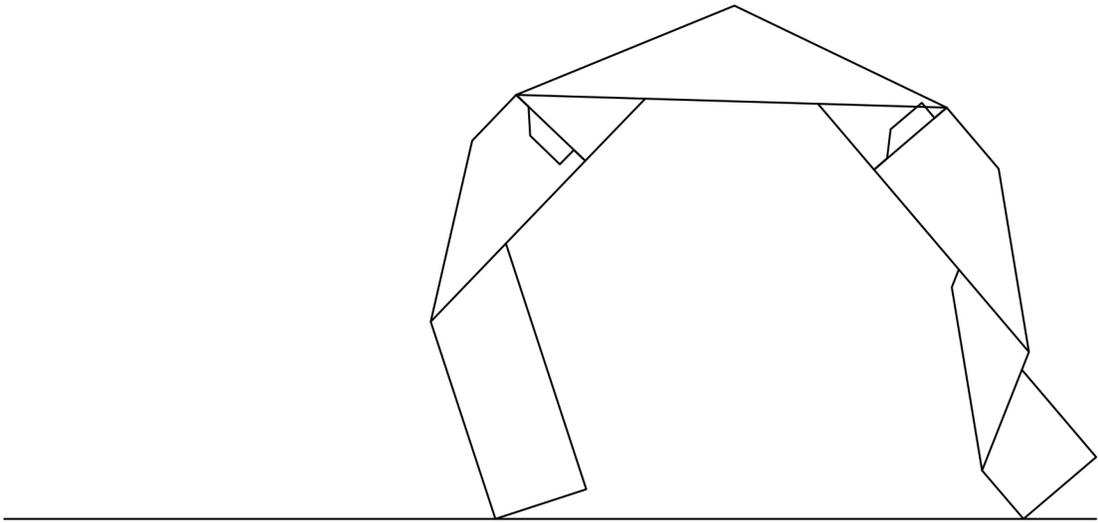


Figure 5.13 Élévations A & B de différentes options d'assemblage pour des modules variés du prototype n° 8.

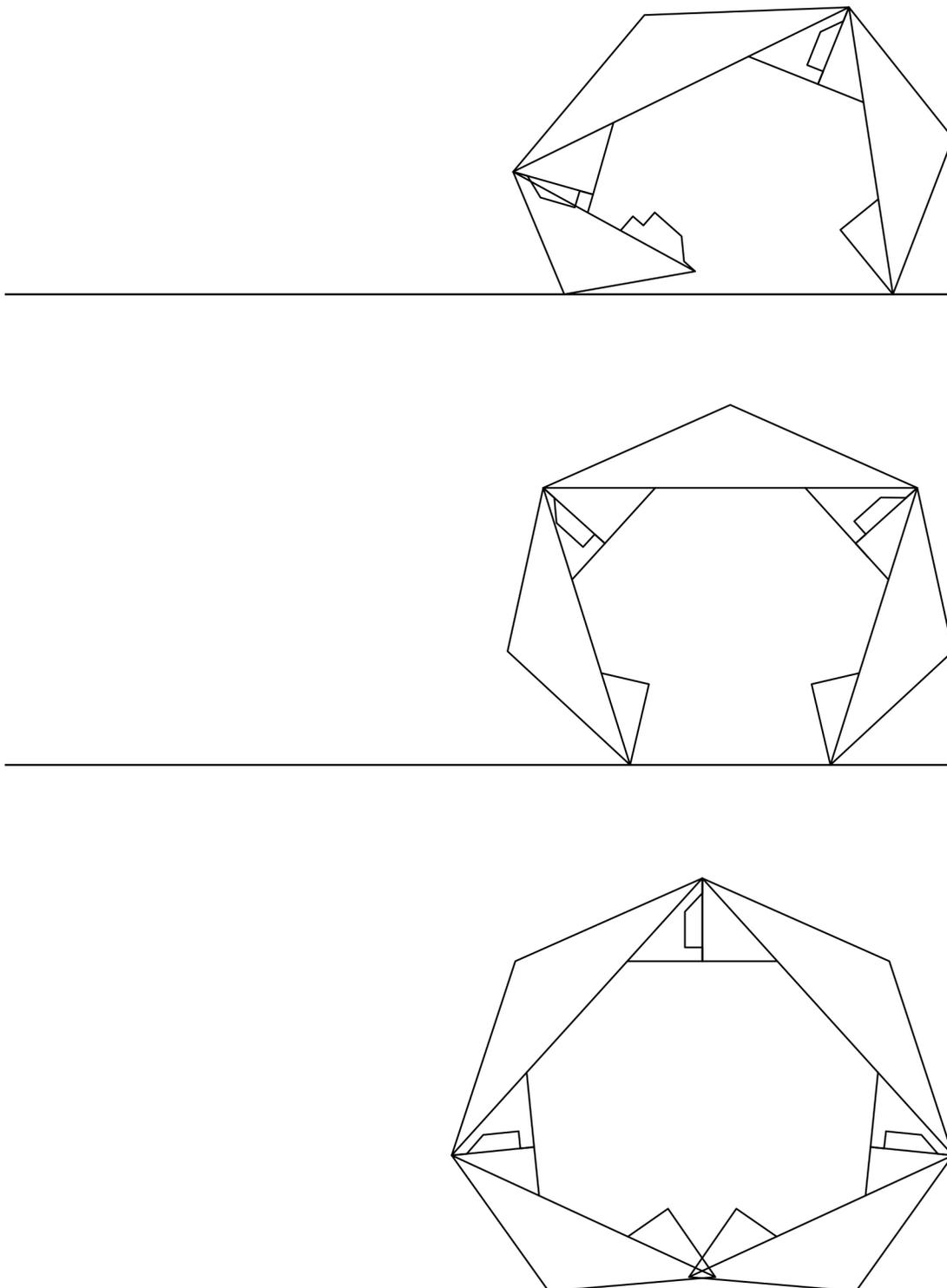
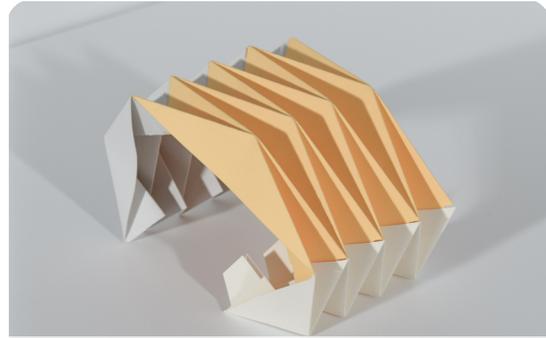
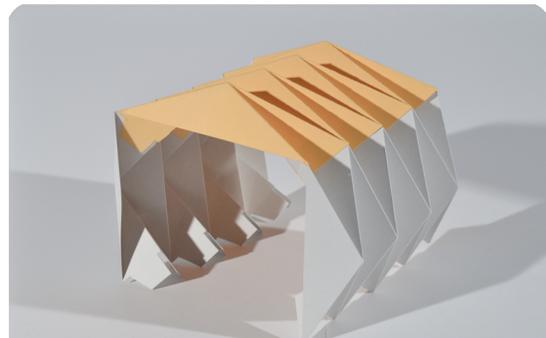


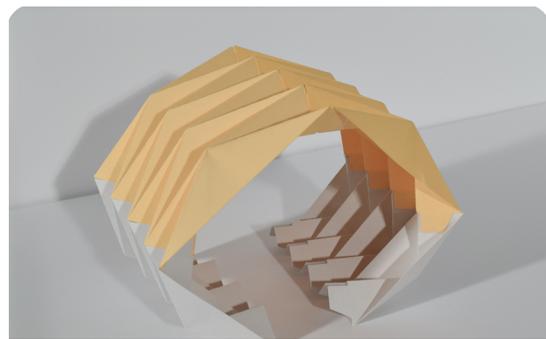
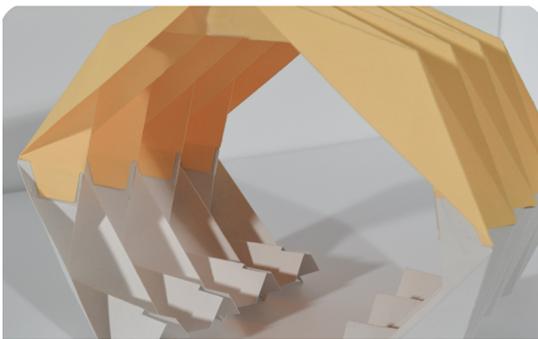
Figure 5.14 Élévations C,D & E de différentes options d'assemblage pour des modules variés du prototype n° 8. Voir page suivante pour différentes options de déploiement.



Deux photos correspondant à l'élévation C de la figure 5.14.

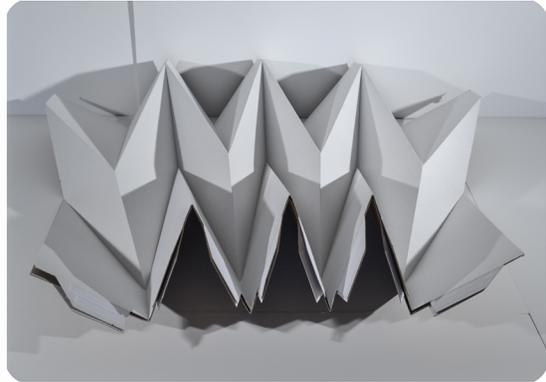
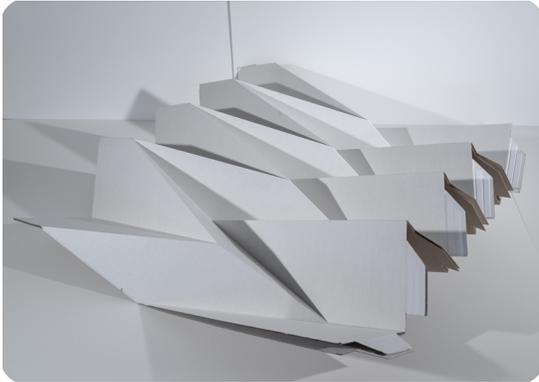
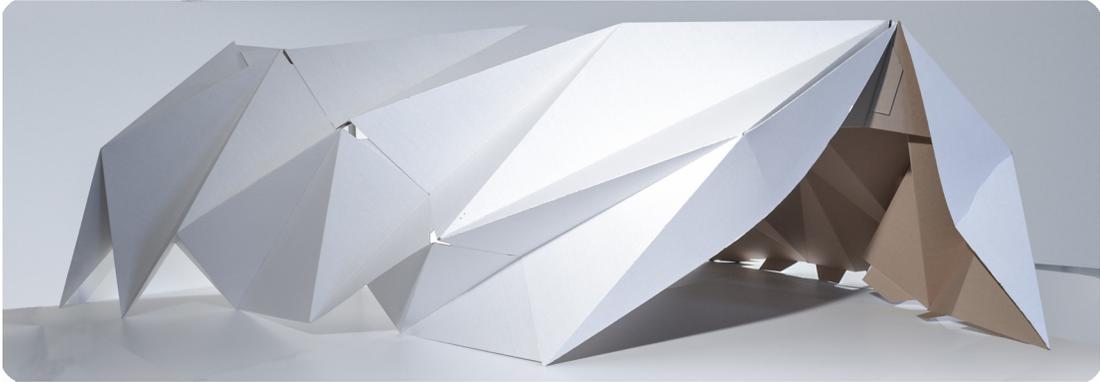
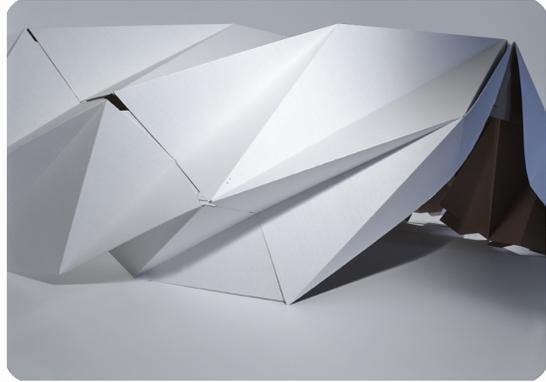


Deux photos correspondant à l'élévation D de la figure 5.14.



Quatre photos correspondant à l'élévation E de la figure 5.14.





CHAPITRE VI

CONCLUSION

La présente recherche a démontré, dans un premier temps, l'intérêt actuel et renouvelé pour le pli, intérêt qui se retrouve au sein d'un espace interdisciplinaire, où mathématique, physique, géométrie ou encore philosophie, couplés à l'origami, participent au développement d'une multitude de domaines variés (art, architecture, science, etc.). En outre, les nouvelles technologies (algorithme, paramétrique, etc.) maintenant disponibles encouragent une nouvelle façon de voir les choses et permettent d'examiner les possibilités émergentes dans ces différents domaines de recherche.⁸⁰

Les designers et les chercheurs qui travaillent avec le pli l'utilisent parfois en tant qu'abstraction théorique, une façon de plier des éléments contradictoires à l'intérieur d'un ensemble continu. Plier devient alors un processus et non un produit fini. Les postulats de Lynn et de Eisenman dans *Folding In Architecture* ont clairement défini cette vision du pli. Pourtant, malgré le caractère philosophique de cette approche, certains projets de design ou d'architecture nous informent au sujet d'une découverte en lien direct avec ces postulats, à savoir : les méthodes de construction récentes révèlent que la complexité et l'unicité des géométries n'affectent plus de manière significative les coûts de fabrication, et nous font donc réaliser que l'on peut tout aussi bien produire une série de pièces uniques avec presque le même effort que pour produire une série de masse.⁸¹ Cette découverte

⁸⁰ Agkathidis, A. (2010). *Digital manufacturing : in design and architecture*. Amsterdam : BIS Publishers.

⁸¹ Iwamoto, L. (2009). *Digital fabrications : architectural and material techniques*. New York : Princeton Architectural Press, p.6.

fait aussi écho aux propos de Peter Eisenman sur la singularité et pave la voie à la possibilité de fabriquer une multitude de systèmes constructifs pliés, à la fois similaires et uniques.

D'autres ont utilisé le pli en tant que stratégie formelle de manière à tirer avantage de la rigidité inhérente des surfaces pliées, sans réellement plier la matière. On peut penser ici entre autres à des projets d'architecture ou à des installations artistiques dont la structure est composée d'éléments juxtaposés dans des angles calquant les motifs d'origami. De cette manière, l'utilisation du pli procure une bonne rigidité sans requérir une grande quantité de matière pour circonscrire un volume substantiel. Cette stratégie formelle peut s'appliquer à des matériaux en feuille ou non, mais dans tous les cas, le ratio poids du matériau versus volume produit demeure hautement efficace.⁸²

Finalement, certains concepteurs utilisent le pli de façon littérale, soit en tant qu'action directe sur la matière. Peu importe que la méthode de conception soit intuitive, digitale ou encore paramétrique, elle doit invariablement s'arrimer avec le comportement physique des matériaux en feuille utilisés.

Making becomes knowledge or intelligence creation. In this way of thinking and doing, design and fabrication, and prototype and final design become blurred, interactive, and part of a non-linear means of innovation.⁸³

L'intelligence matérielle, le dimensionnement, l'échelle du projet, les contraintes de fabrication, de déploiement et d'assemblage sont des paramètres clés de cette approche du pli. La matière, loin d'être perçue comme inerte, est plutôt appréciée et interrogée pour sa capacité à réagir aux contraintes physiques créées par le pliage.⁸⁴

⁸² Ibid, 65.

⁸³ Speaks, Michael. Dans Iwamoto, L. (2009). *Digital fabrications : architectural and material techniques*. New York : Princeton Architectural Press, p.6.

⁸⁴ Sheil, B. et Glynn, R. (2011). *Fabricate : making digital architecture*. (1st éd.). Toronto : Riverside Architectural Press.

Ce travail artisanal du pli est bien évidemment ce qui a guidé les expérimentations de la présente recherche. Ce faisant, l'action de concevoir a été intimement liée à l'action de construire, et un riche dialogue a pu se bâtir entre le prototypage et la réflexion théorique.

6.1 Expérimenter avec des prototypes : potentiel et limite

Les cycles d'expérimentation réalisés au cours de cette recherche illustrent l'importance de l'approche matérielle du pli. Malgré leur petite échelle, les pliages de papier décrits au chapitre IV ont démontré leur potentiel, non seulement en tant que vecteurs pour l'apprentissage du langage du pli, mais également en tant que modèles acceptables pour découvrir le comportement géométrique des différents motifs testés. Des enseignements importants ont été réalisés lors de ce premier cycle, dont entre autres quelques principes fondamentaux du pliage de matériaux en feuille (capacité de certains motifs à se plier à plat, règles mathématiques des pliages rigides, etc.), le potentiel de déploiement des différents motifs, ou encore le niveau de complexité tolérable lors de la conception de motifs.

[...] within the context of current experimental form finding methods the actual practice of folding provides a case of dynamic form generation research in analogue media which remains highly relevant.⁸⁵

À notre époque hautement axée sur la technologie, où la modélisation se fait presque systématiquement de manière numérique et/ou paramétrique, il est rassurant de constater que l'apport humain a encore sa place et est toujours pertinent. Qui plus est, l'activité pratique et artisanale de plier du papier cartonné pour développer des prototypes de systèmes constructifs s'est révélée plus efficace et plus enrichissante qu'une modélisation informatique. Le travail manuel permet en effet de réfléchir sur les défis inhérents au développement de tel ou tel motif, que ce soit la complexité de rainage ou encore la difficulté de pliage. Il informe

⁸⁵ Vyzoviti, S. (2008). Out of the box and into the fold. *Falling right into place: The Fold in Contemporary Art*, p41.

également sur le processus algorithmique requis pour transformer une feuille bidimensionnelle en une surface tridimensionnelle, une information cruciale pour la suite de la recherche.

Les prototypes en carton réalisés lors du deuxième cycle d'expérimentation ont, quant à eux, permis l'étude des potentiels et des limites du matériau, et plus particulièrement de l'échelle de réalisation possible. L'intérêt de travailler avec ce matériau fut démontré :

- Le carton est un matériau brut, fait presque à 100 % de fibres recyclées, qui répond adéquatement aux impératifs actuels du développement durable ;
- Les récentes innovations technologiques permettent de produire des cartons plus performants, offrant une grande résistance au flambement⁸⁶ et une bonne stabilité structurelle. Il est, à ce titre, tout à fait justifiable d'envisager construire avec du carton ;
- La relative légèreté du carton, particulièrement celle du carton ondulé, en fait un matériau idéal pour le déploiement des systèmes constructifs, facilitant ainsi leur manipulation et permettant une variation de positionnement ;
- La mémoire matérielle du carton lui procure une certaine énergie lorsqu'il est comprimé, lui permettant ainsi de se déplier rapidement et facilement.

Les défis liés au comportement structural du matériau peuvent être relevés. Le carton plat, comme le carton ondulé, a assez de corps pour rester en place et contrer l'attraction gravitationnelle, du moment que le motif de pliage choisi soit bien adapté à l'échelle voulue et que les proportions des tessellations soient juste assez petites pour lui donner la rigidité voulue. Le choix du motif et de ses proportions

⁸⁶ Le flambement est un phénomène de déformation qui se manifeste dans des éléments élancés soumis à un effort de compression.

influence également la facilité avec laquelle le système peut être manipulé. Comme il a été démontré au chapitre IV, certains motifs manquent de flexibilité et permettent donc moins de variation de déploiement.

Malgré tout le potentiel des systèmes pliés en carton, une limite majeure demeure, soit la possibilité de le rainer et de le plier à une échelle architecturale satisfaisante. Même si certains ont été rainés mécaniquement, tous les prototypes réalisés au cours de cette recherche ont été pliés à la main. Cette méthode de pliage a rapidement démontré sa limite :

- Certains systèmes, comme celui basé sur le motif en V décrit à la section 5.2.3, ne peuvent pas être pliés par une personne. Même en scindant le motif en plus petites sections, le pliage reste laborieux ;
- Pour tous les prototypes testés, il existe un seuil dimensionnel au-delà duquel le motif ne peut pas être plié par une personne. Cela implique donc d'avoir recours à plusieurs personnes, qui doivent toutes détenir une connaissance minimale des manipulations exigées pour plier le motif.

Pour être en mesure de réaliser un système constructif à partir du pliage d'un unique matériau en feuille, il faut donc repenser les méthodes de fabrication et adapter les techniques de rainage et de pliage aux caractéristiques particulières des motifs d'origami.

6.2 Limites du pli

6.2.1 Stratégies pour rainer

Contrairement aux systèmes d'emballages industriels, qui n'utilisent que des plis vallées orthogonaux, les pliages de type origami sont composés d'une alternance ou d'une combinaison de plis vallées et de plis montagnes avec peu ou pas d'angles droits. Conséquemment, l'outillage industriel n'est pas actuellement conçu pour rainer les motifs d'origami, tels que le Yoshimura ou le Miura-Ori.

Même si les machines CNC peuvent bien évidemment rainer n'importe quel motif dessiné à l'informatique, elles ne peuvent réaliser que des plis vallées. En d'autres mots, ces machines ne sont pas équipées pour retourner automatiquement les feuilles de carton et ne peuvent rainer qu'un côté à la fois. Il faut donc prévoir un apport humain pour adapter ces machines aux motifs d'origami.

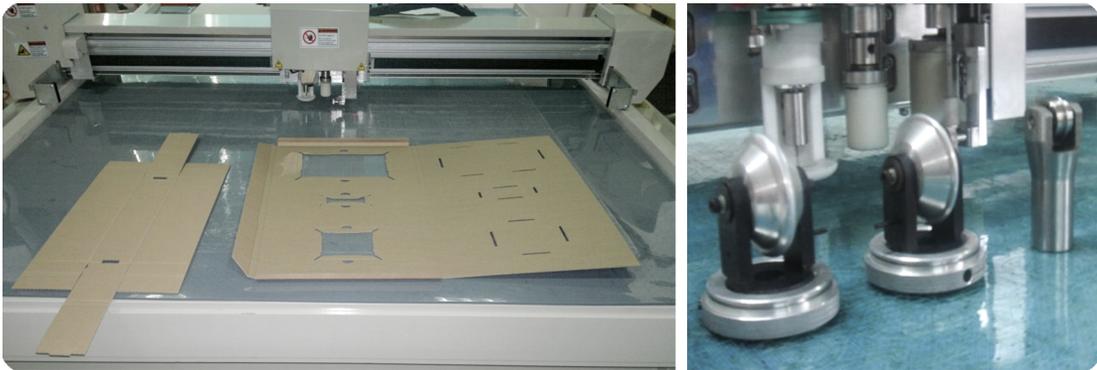


Figure 6.1 Une machine CNC (à gauche) et les têtes amovibles (à droite) pour rainer et couper du carton ondulé. Récupéré le 11 mai 2015 de <http://www.samplemakingcuttortableplottermachine.com/sell-657752-cardboard-xanita-triple-flute-corrugated-board-pp-corrugated-cnc-cad-sample-maker-cutter.html>

De leur côté, les raineuses-découpeuses rotatives utilisées par l'industrie du carton plat et du carton ondulé peuvent plus facilement être adaptées au pliage de type origami. Puisque les gabarits de découpe sont faits sur mesure, il est envisageable de produire un gabarit reprenant par exemple les angles du motif Yoshimura. Il faut par contre accepter la contrainte d'une tessellation régulière du motif puisqu'à chaque tour complet du gabarit le même motif est reproduit. Le diamètre des gabarits est une autre contrainte à considérer, limitant à son tour le dimensionnement des motifs.



Figure 6.2 Une raineuse-découpeuse rotative (à gauche) et différents gabarits (à droite) pour rainer et couper du carton plat. Récupéré le 11 mai 2015 de <http://bharattechno.tradeindia.com/boxes-rotary-die-cutting-1083325.html>

6.2.2 Stratégies pour plier

S'il est envisageable de rainer mécaniquement des motifs d'origami, il est plus difficile de trouver des solutions pour les plier. La méthode artisanale du pliage à la main ayant démontré ses limites, il apparaît essentiel de concevoir un dispositif automatisé permettant de plier les systèmes constructifs envisagés. Même si les recherches actuelles permettant de résoudre ce problème sont encore embryonnaires, différentes pistes semblent prometteuses :

6.2.2.1 Procédé et appareil pour micro-plier de façon continue

Les chercheurs Basily & Elsayed de l'Université Rutgers de New Jersey ont mis au point en 2012 une machine et un procédé pour le pliage en continu de matériau en feuille dans le but de produire différents motifs tridimensionnels. La machine de pliage présente une première série de rouleaux qui confère des plis longitudinaux à la matière. Les rouleaux suivants sont embossés avec différentes échelles de tessellation, augmentant ainsi le nombre de plis. Enfin, la dernière série de rouleaux confère un motif géométrique au matériau de feuille plié.

Bien que cet appareil ait comme principal objectif de créer de nouveaux matériaux légers avec des propriétés mécaniques améliorées, il est concevable d'imaginer une

version surdimensionnée de cette machine, permettant de plier automatiquement un motif d'origami régulier à grande échelle.

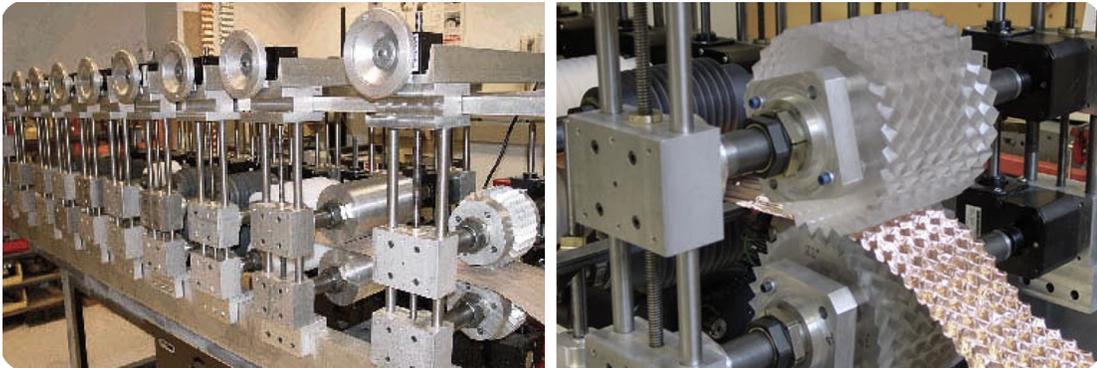


Figure 6.3 Appareil pour micro-plier de façon continue. Image tirée de Forte, C. (2005). Packaging Material Innovation: 3-D Folded Structures. [IPTA essay competition]. p.3.

6.2.2.1 Procédés d'auto-plier

Christophe Guberan, un étudiant en design industriel de l'École Cantonale d'art de Lausanne (ECAL), a adapté en 2012 une imprimante à jet d'encre qui imprime une mixture d'eau et d'encre. En séchant, cette mixture fait en sorte que le papier se contracte et se plie automatiquement le long des lignes du motif. En jouant avec la saturation et l'épaisseur des traits, il est possible d'obtenir différents angles et types de plis. Ce procédé permet présentement l'auto-plier d'une feuille de papier calque, mince et petite. Il est peut-être pensable d'utiliser une mixture similaire pour adapter de grandes imprimantes industrielles et ainsi réussir l'auto-plier d'épaisses feuilles de carton.

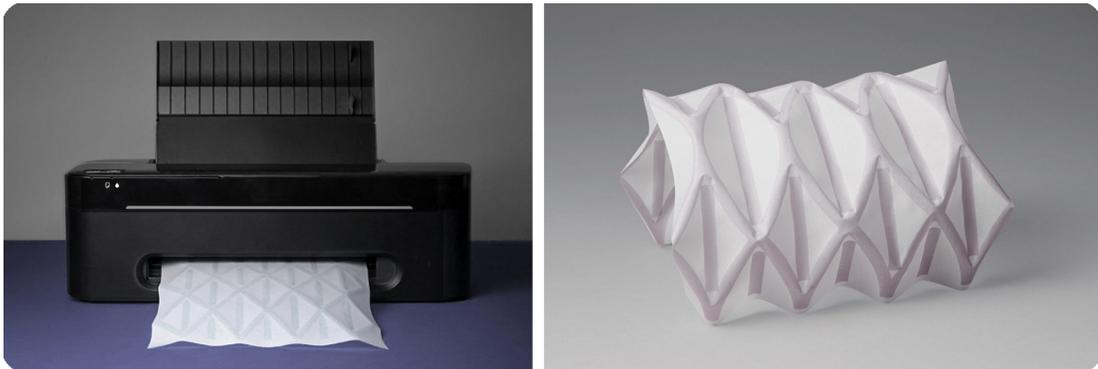


Figure 6.4 Imprimante à jet d'encre modifiée (à gauche) et papier calque auto-plié (à droite). Images récupérées le 17 mai de <http://www.christopheguberan.ch/Hydro-Fold>

Une équipe multidisciplinaire de chercheurs dirigée par Michael T. Tolley de l'Université Harvard a démontré en 2014 le potentiel d'auto-pliage des polymères à mémoire de forme sous l'action de la lumière. Un rainage d'encre noire de chaque côté d'une mince feuille de polystyrène optiquement transparent est chauffé par une lumière diffuse. Les lignes noires permettent une absorption localisée de la lumière, qui chauffe le polymère sous-jacent à une température supérieure à sa transition vitreuse. À ces températures, les régions encrées prédéfinies se détendent et se rétrécissent, provoquant ainsi le pliage de la feuille plane en un objet en trois dimensions.⁸⁷

Malgré son potentiel, cette découverte fait face à un certain nombre de difficultés pratiques. Atteindre une intensité de lumière uniforme sur de grandes surfaces est un défi en soi. En outre, il est difficile de réaliser des lignes de pliage bien définies (des arêtes vives) en utilisant des polymères à mémoire de forme. Enfin, l'utilisation

⁸⁷ Liu, Y., Boyles, J.K., Genzer, J. et Dickey, M.D. (2012). Self-folding of polymer sheets using local light absorption. *Soft Matter*, 8(6), 1764-1769.

d'une matière réagissant à la lumière en tant que matériau structural limite la résistance et le potentiel d'applications des structures formées.⁸⁸

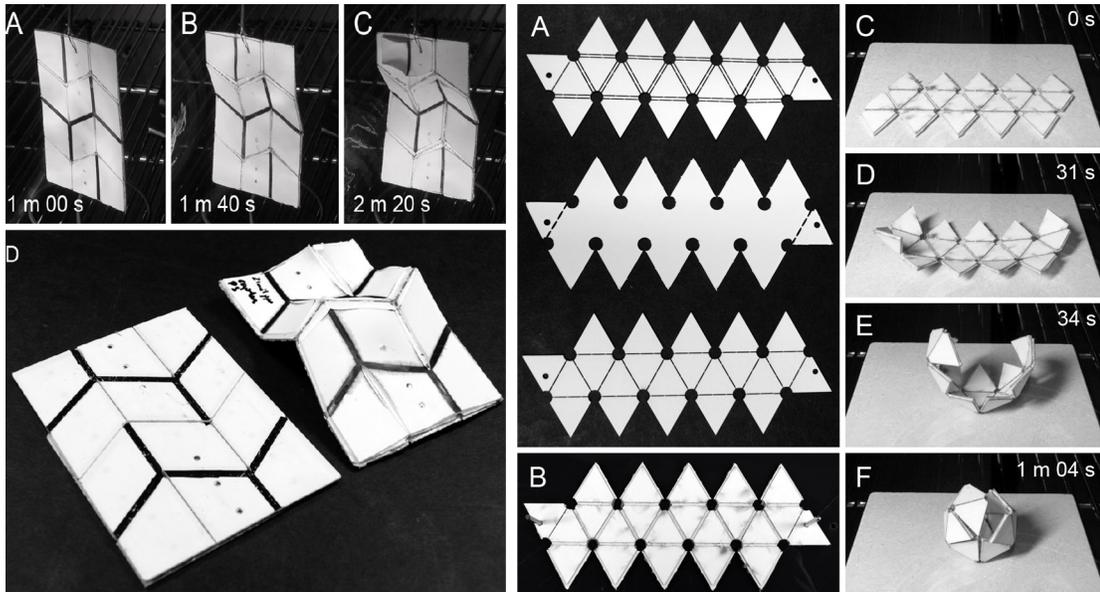


Figure 6.5 Illustration d'un auto-plier du motif Miura-Ori (à gauche) et d'un icosaèdre (à droite). Images récupérées de Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., Xu, L., Shin, B., Zhou, M., Rus, D. et Wood, R.J. (2013). *Self-folding shape memory laminates for automated fabrication. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, Actes du colloque, 2013, : IEEE.*

6.2.2.2 Transposition à une échelle architecturale des stratégies pour plier

La limite majeure à la transposition des principes de l'origami à une échelle architecturale ne se trouve ni dans la conception des systèmes, ni même dans l'embossage des motifs sur le matériau en feuille, mais plutôt dans le déploiement du système, c'est-à-dire dans l'action de plier précisément la feuille bidimensionnelle en une structure tridimensionnelle.

⁸⁸ Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., Xu, L., Shin, B., Zhou, M., Rus, D. et Wood, R.J. (2013). *Self-folding shape memory laminates for automated fabrication. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, Actes du colloque, 2013, : IEEE.*

Toutes les recherches sur de nouveaux mécanismes ou processus de pliage se font présentement à petite échelle. Une fois les stratégies perfectionnées, les différents chercheurs vont nécessairement être tentés par un changement d'échelle. Le rainage et pliage mécanique tel que développé par Basily & Elsayed est certainement une piste de solution prometteuse pour une application pratique et réaliste de l'hypothèse de recherche, tout comme pourrait l'être la combinaison d'un prépliage effectué par une raineuse-découpeuse rotative et d'une impression large format d'une mixture d'eau et d'encre pour un auto-pliage. Dans un cas comme dans l'autre, la conception devra être adaptée aux contraintes du mode de fabrication, soit l'utilisation exclusive de tessellations régulières.

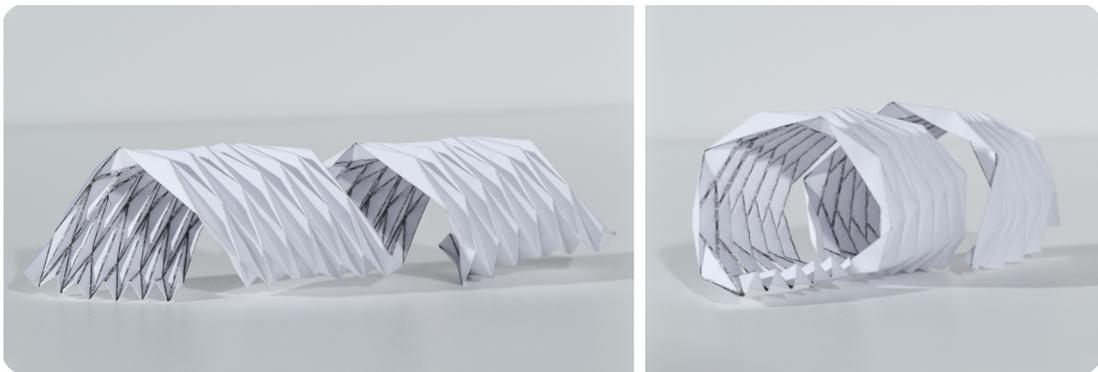


Figure 6.6 Prototype en spirale utilisant un motif Yoshimura régulier adapté à une fabrication automatisée.

6.3 Potentiels du pli

L'étude des différentes applications de l'origami est un domaine de recherche relativement jeune (une vingtaine d'années) et en pleine expansion. Des mathématiciens cherchent à en comprendre les règles géométriques, des biologistes transposent certains motifs à des échelles microscopiques, tandis que les designers de tout horizon revisitent l'aspect formel ou encore les caractéristiques structurelles et matérielles. De plus, les précédents illustrant l'approche matérielle du pli sont diversifiés et nombreux, confortant l'intérêt de poursuivre la recherche dans ce domaine.

Le biais architectural de notre recherche nous a permis non seulement d'analyser le potentiel structurel des structures pliées, mais également de réfléchir à la tectonique et aux caractéristiques spatiales qui leur sont propres. Compte tenu de l'échelle utilisée lors du premier cycle d'expérimentation, les prototypes réalisés demeurent essentiellement de petits objets pliés, permettant néanmoins d'extrapoler leur potentiel spatial à une échelle architecturale. Ces objets, qui sont appréciés et évalués de manière externe, présentent une poésie matérielle distinctive. L'ondulation induite par le pliage introduit une rythmique unique, qui à son tour procure une variation lumineuse pleine de nuances. La forme des objets est également transformable, un dynamisme qui s'exprime par l'éventail de variation de déploiement des motifs pliés. Ce caractère intrinsèquement changeant des pliages permet d'envisager des objets, et éventuellement une architecture, transitoire et versatile, faisant ainsi écho à la notion de singularité mise de l'avant par les tenants de l'approche théorique du pli.

Enfin, les prototypes en carton réalisés lors du deuxième cycle d'expérimentation ont entre autres démontré les potentialités de ce matériau pour la réalisation de systèmes constructifs. Mais plus particulièrement, ce changement d'échelle a permis la translation de l'origami-objet vers l'origami-espace.

C'est dans son aptitude à devenir conjointement organe qui exerce une fonction, structure qui assure la pérennité et sculpture expressive, que le pli intéresse celui – architecte, ingénieur, designer ou plasticien – qui procède à la mise en forme de l'espace et de la matière.⁸⁹

Construire avec le pli amène inéluctablement à la création d'espaces sans pareils, où la structure est carrément dérivée de la matière. Cette capacité à recouvrir un

⁸⁹ Delarue, J.-M. (1997). Le pli, source de formes et de sens. *Les cahiers de la recherche architecturale*(40), p.39.

espace de grandes dimensions avec une faible épaisseur est en effet une caractéristique propre aux structures pliées de type origami.

L'origami architectural peut définitivement servir de générateur d'espace, un espace qui n'est plus seulement hautement efficace, mais qui est aussi lié aux affects, permettant ainsi une interaction avec les sens des utilisateurs. En ce sens, l'origami architectural s'émancipe, n'étant plus simplement la transposition d'un objet plié, mais plutôt un véritable espace habitable.

APPENDICE A

ENTREVUE AVEC JOEL LAMERE

Ceci est la retranscription d'un entretien Skype réalisé le 18 novembre 2014 avec Joel Lamere. Cela fait suite à une première discussion informelle, toujours via Skype, qui a eu lieu le samedi 4 octobre 2014.

Joel Lamere (JL): Hi Jean-Francois, how is it going?

Jean-François Roy (JFR): Not so bad I guess, but not great either, because I am researching so many things right now and the more I research the more I see people who have done pretty much what I want to do, so, it is sometimes discouraging! I have seen, for example, a company called «Cardborigami» who is manufacturing cardboard shelters for homeless in Los Angeles. The shelter is based on the classic Yoshimura pattern.

JL: Well I think that means that there is room for innovation in a couple of ways, one of which is «different patterns that are doing slightly different things» and then the other one, to your point, might be a kind of more dimensional study of different proportions and different occupy-ability questions.

JFR: Yes, you are right about dimensional study. The latest prototype that I have

been testing is a modular system that incorporates different lengths of different folding patterns: the Yoshimura pattern, the V-shape pattern and the Miura-Ori pattern. The basic idea is modularity and adaptability: the user can decide how to make his shelter by putting together different pattern options. By doing so he can create the shape that he wants. It is a «constructive system» that anyone can play with and modify as he pleases. Right now I am looking at what kind of proportion a particular shape is having, what kind of space it is producing, etc.

JL: Are you committed to that particular pattern, or are you still exploring?

JFR: I am not fixed yet. I tried some of the curved patterns your student showed me when I visited your office last month. I also tried some curved pattern designed by Hoffman. But one of my most important questions right now is how to decide which pattern to use! How to decide which one is good, which one is the best fit for what I want to do. I have the feeling I could be testing patterns for years...

JL: Forever! Which is part of the question for me. I have been kind of doing it forever: I started folding in 2005, nine years ago, like a long, long time, right? You do not get around to the kind of complexity of the assemblies that I have without just learning it as a kind of language.

JFR: So then tell me, where do you find inspiration when designing new folding patterns?

JL: Early on, people like David Huffman were the inspiration, people who had just done things that I haven't seen before. So fairly early in the process, when I was totally new to it, then other people were a piece of that inspiration. But it should be noted that when I started nine years ago, there wasn't a lot of curved folding in the world, it was just a couple of people that were interested in that at all. It was before Erik Demaine had done any of the stuff that he's doing now, it was before the Paul Jackson book, it was before any of the origami peoples who had embraced it. It was just a couple of people doing it, and there were just a couple of images online of this really interesting historic fantasy, which was that of David Huffman.

But very quickly since then my research discovered things that no one else had been doing, like no one else was up to some of the stuff that I had figured out. And as such I lost the capacity to use other people as a kind of precedent and inspiration. So basically, everything I have seen since then is less interesting to me than the stuff I have been doing myself. That is a kind of unfair thing to say because I know other people have been doing awesome stuff. But I have developed a somewhat specific «oeuvre», and so, for me, the kind of progress that I can make sits within the realm that I have already sort of created for myself, a very specific boundary that I am interested with.

For me the inspiration and the creativity come in part just from, and I said this before, understanding what I am doing as a kind of language, a language with constraints. And then once you understand the language then you start to build bigger sentences out of it, right? You understand certain formal output form pieces you produce; you understand the rules of how they might meet from one piece into another. And it becomes like a kind of aggregation exercise, where you look at a thing that you have already made, and you critique it, and you imagine «okay, what if I just extended the surface a little further this way, or I intersect it there, then suddenly I might get something categorically different».

So the things that inspire me are actually the existing pieces that I have already done in some sense and on the other end a kind of broader look at architecture. On one end I am looking very closely at the folding that I am doing, but on the other end I am looking at the biggest architectural typologies that might be inspirational to me. Some of the work that I am doing right now, the «concrete tables and benches», uses a kind of arch, an idea that is really based on architectural history and not as much on folding, it is coincidental that it can be folded. In the end it was always about the history of architecture.

JFR: What I understand is that you are looking at architectural precedents, a much bigger scale, trying to bring it back to the scale of your experiments?

JL: Imagine, seeing them in terms of their scale, the kinds of surfaces that they created, the general form-making at the intersection that you see in those, all the kinds of basic criteria of architecture. And also other basic typologies, like the half-dome shell, which actually served as a kind of inspiration for me, trying to figure out a particular folding pattern that might produce, in a single sheet, a kind of pure hemispherical geometry. That is taking architectural typological precedent and translating it into folded methodology. So I would say those are the places where my inspiration comes from; the linguistic aspect on one end and the architectural precedent on the other.

If you were to ask an origami person that same question, the answer could be different. I was just in Singapore to teach a workshop and the origami club asks me to come speak to them. I went there and they ask me a similar question: «how do you design, or what is the inspiration used in your design?» And I gave them some of the same answer, that it is a linguistic question to me, that it is a formal question related to architecture. But for them, they said to be mostly inspired by nature. Well, you know, nature has very little to do with the kind of specific rule making that folding demands, right? Nature growth strategies and layering strategies which are implicit in nature, cellular component, the building block of nature, has really nothing to do with folding. So I find it a little bit strange that someone would be seeing the kinds of demands, rules and rigours of folding and then claimed that nature was the inspiration for it. Nature can inspire a lot of things but I do not think folding is one of those things. I think nature can inspire all sorts of structural premises, and certainly other constructive enterprises but folding doesn't seem to be in that realm.

JFR: In your opinion, how important is the modularity when folding sheet materials? If I look at two installations you did, the Overliner for MIT and 25-Arch Folium for the Evergreen Museum gardens⁹⁰, I would say that, to a certain extent, you have used a rhythmic repetition of a singular pattern. Do you always see folding sheet material as

⁹⁰ Voir p.23 du chapitre I pour des photographies des installations de Joel Lamere.

that kind of modularity or you would see it also as «every fold is a unique one and makes a unique shape»?

JL: I think you are getting to the heart of some of it! You know, one other question you ask when we last spoke was «what are the problems you encounter when you start to materialize, when you scale it up from paper models to other material?» I think that question is actually related to the answer that I am about to give you for this question of modularity, which is that, of course, the kind of studies one does with a single sheet, at the scale of a grapefruit is not going to apply to how you imagine larger scale enterprises. Because sheets come in limited scale, 4' x 8' here in the U.S.A. So knowing and acknowledging the fact that you are going to have to figure out ways to aggregate multiples is embedded in the problem of scaling up, so modularization in that sense is a necessary question. So I would answer it in kind of two ways actually, which is to say, when I am doing design work at the scale of a piece of paper, those are the ones that are proxies for pure geometric exercises to me. And so I am not considering scaling up or modules at all when I am doing those specific exercises. Because the constraint of just pretending it is a single sheet is the same constrain that pretending it is a single geometric surface. Before the question of the scaling, when you are doing just the pure geometric work, you get to better and more interesting geometries. So that would be one answer for the question, that one version of the design work that I do doesn't care about that, actually when I am just doing pure folding patterns, I say: «I don't care about scaling, I don't care about modules, I don't care about the sheet size, I just care about the geometric exercise.» That is the more linguistic act.

Then, of course, the other answer to your question is the one which I immediately engage. So if I am designing something more specifically, not doing pure experimentation but designing an object or an installation like the Overliner or the 25-Arch Folium; in both cases, when I was designing an object and I knew I had a specific scale then questions of modules, questions of discretization and pannelization are fundamental, they come to the fore rather immediately. So those

two projects actually had very different attitude in regards to modularity. In the folding of 25-Arch Folium, it is a pure single geometry, a single folded object, which is then cut apart into sheets. The detailing that I figured out are details that allow you to produce the illusion of a singular geometry out of a single sheet, which is to say, I had to figure out how to make the overlaps so that the fairness of curvature exist around there, because if I make just butt joints then they would bend very shortly and if I make the overlap too far then they will not bend as much as the other pieces would bend.

JFR: So it is basically a question of connection in that case, how to connect all the different pieces?

JL: Exactly, so you have seen, I had some stitched ones, some riveted ones, and some glued pieces. Of course, the question of sheet connection is fundamental. So in that project the modules came after: I designed the big object and then I figured out a pattern for subdividing it.

But for the Overliner installation it's very different. The intention here was to try to create something which was a single module that could be aggregated into the whole, with the exception of the top and the bottom, right, so there was a kind of regularity for the majority of the spiral and unique pieces at the top and at the bottom that responds to slightly different conditions. That project is very much like a module-born exercise where there is a kind of specific radial splay degree that it needs to have, a specific step between one to the next that it needs to have, in order to produce something which both sits very precisely above the stairs but can also be self-structured. That project is hung from the center using cables and then each of the beams just cantilevers out (by beam I really mean a folded piece) and then a little strap holds it 180 degrees across the spiral to another one so they balance one another (and rotate). So that one is a modular idea, right, you have to start with what kind of module you consider cantilevering first, then balancing second, then rotating and connecting.

So I guess I do not have a singular answer, it depends on the project. Sometimes the modules are a kind of afterthought and sometimes the modules are prime drivers for a project.

JFR: Along the line of scaling issues, I have been playing with the cardboard material and so, when I am designing my prototypes with small sheets of paper, it is fairly simple, my hands are big enough to fold it and to play with it but when it's a sheet of 5' x 10', or when I want to work with three or four of those sheets, it's more complicated. For example, I was not able to fold the V-shape pattern because it was too stiff and it was too huge. So, how do you deal with the issue of folding large sheets? Do you use robots; do you have to be a lot of people together to fold the pieces into place?

JL: You have seen what RoboFold⁹¹ can do, right? I am not a fan of the geometry they are producing, they are not being experimental enough on that end but they think of different strategies for the actual folding process, which are really sophisticated. I have approached it differently project by project. For example, for the Overliner, we stopped pretty much at the scale of what one person could fold by himself; so we thought of the modules. The modules as a kind of beam idea but also as a single 4' x 8' sheet that could be kind of pushed laterally until you could put your arms around it and then it was able to be folded. And so it was very much like the scale of the unit itself was calibrated to «single person folding».

The 25-Arch Folium, on the other end, was just the very first project where we had really scaled the stuff up at all and it was a group force strategy. We actually had four people at once, once we stitched a big cluster of sheet together, that was eight sheets of 4' x 8' at one time, it was huge, right! So we had two people over here starting at one end, two people over there, lifting it up and by the time you start lifting it you can start turning it and bringing it together to start connecting it on the

⁹¹ Voir p.24 du chapitre I pour des photographies d'un projet réalisé par RoboFold.

other side. You basically had four people just trying to control the various moments of the folding until you could bring it together. That could have been done in a better way, but that is how we did the first one. So we learned lessons from that. We learned two lessons: one of them, we applied directly to the Overliner project and just made the folding operations scaled to what one person could do. The other version that we had done before is like a kind of rig version where you, well, you know how the folding works, you have done now enough of it right, where once you get the fold started, you are in good shape.

JFR: Of course, but you got to be able to do the first fold!

JL: The first part is hard; you have to get all the pieces to fold in the right direction. Once that is started, everything goes into place. So we have been doing some experiments with fold where, in addition to cutting a fold pattern into a sheet, you also put stops on one side that are embedded, so the fold can only go one direction. Those devices actually start the fold on one direction and prevent it to fold on the other direction. They actually pre-start the bend for you.

JFR: I like your concern that one person can fold one module because that was to a certain extent my desire to try to design a shelter that one person can easily fold and carry around.

JL: Looking at the prototype you are showing me right now I think it is kind of interesting, because I think that the one person fold and the modularity that you are looking at is interesting.

JFR: Talking about how to fold, in your experience, do you think that all sheet materials are suitable for all forms, or are some forms only realizable with specific materials?

JL: Yes and no. You know that there are constants that are applied to all sheet materials, which is the degree of curvature that they can take and the thickness. So, of course, not everything is going to be usable for every project, because if it cannot

be curved, or cannot be folded for that matter, or if it can only be curved to a certain radii, then it's not going to work. Also if it's too thick and you are trying to fold it you will run into all sorts of problems with the centerline of geometry, and it will break.

So the clear answer is, of course, not every material is going to be appropriate but every sheet material has the potential to be folded, it just means you will have to encounter different problems. For instance, I have folded plywood! Plywood itself if you mill it, it will break, it will not fold at all. But if you are accepting the possibility of other things acting as the hinges for you, then you can fold it. I mill the folding lines in the plywood piece, but then I laminated the other side with canvas; and that lamination allowed the canvas to act as the hinge. These things work fine, but it doesn't mean everyone, of course, is going to be acceptable in every context.

JFR: What I have seen from you so far is that you have been working a lot with plastic. Would you say that it is your preferred material?

JL: It is because right now it is the easiest to scale up with, and it allows the most sophisticated geometries to come up with. It also has the fewest constraints: it is very easy to mill with the machines we have right now, it folds very well without breaking or cracking, it doesn't need the secondary material that, say, the wood does. It is just a really easy format to get interesting geometries out there into the world. And I happen to like the material; I like the translucency of it, I like the kind of softness that it gives. Those are just effects that I love about it, so it is a preferred material because of that. I am doing stuff in all sorts of other things, though. I have a lot of aluminum folding projects going on right now.

JFR: in your research, are you more concerned with the characteristic and specification of the material itself or with the spatial end-result? Would you say that your research is more material or form oriented?

JL: Well, of course, probably everyone you ask that question answered a nice mix of both! In some sense I reject the bifurcation of those two things at all, especially

when it comes to folding. The beauty of the form and the spatial geometry of folding is that it is inherently material. That is the thing about it that makes it so great: it is the material constraint which makes the form of folding. With all the other kinds of three-dimensional modelling stuff when you ignore the constraints of materiality you can get very seductive kinds of geometries, but they do not have any embedded relationship with the world. So I kind of reject that in the world of folding these things are actually even separate; I think that the beauty of the form comes from the constraints of materiality, and that the materialization is deeply embedded in the form, so they are kind of intermingled in some ways. So I reject the bifurcation and say, of course, I am super interested in both of those things and this is why both the catalogue of geometries is ever expanding for me and the catalogue of material in which I play with those geometries is also ever expanding.

JFR: Now for the tricky question: knowing that there is an almost infinite possibilities of folding patterns, how do you evaluate and judge the pattern that you will finally use? Is the function / use of the form a crucial characteristic for analysis?

JL: I wish I could give you the kind of reassuring answer that will help you not to be lost but I am not sure that it will do that... I think you are touching on two questions that are actually really fundamental with all this stuff. One of which we started to chat briefly about which is the question of language. So if to me folding is a kind of language, that when you are learning it you are trying to expand repertoires, you are trying to increase the vocabulary, you are trying to read and consume, you are trying to put nonsensical sentences together that might provoke possibilities. Those are the things that you are doing when learning a language and the language of folding is no different in that regard; and so, in order to qualify good language just like you would qualify good folding, or to make judgments on it, to choose one or the other, it almost requires already that you are good enough at it to say: «this sentence is a good one and this sentence is not, this problem is a good one and this problem is not». That is not going to be a satisfying answer for you because it is super loose in certain sense but I am kind of insistent that it is a language and you just can get better at reading its possibilities and as such speaking it and then deciding when you

are done writing that sentence or when you are done with that kind of object. That is one answer and I do not think it is a very good one, right?

The second one is not an answer at all but just to say that this is a problem that we are encountering in architecture in all realms right now. You are in a moment where I would call it «the moment of computational adolescence» right, where the tools we are using are producing just an enormous set of possibilities, constantly turning out an abundant matrix of things. Everything we design these days we design parametrically and as such we do not design a thing, we design a thousand things; and we have to choose the one thing among the categories that we produce. That problem then of categorizing, qualifying, choosing among possibilities, is just the current of architectural problem. It is the problem that you are faced with at this moment because the tools are getting ahead of us in terms of the kind of categorization and qualification they required. It is a situation my students encounter all the time; I have to lean on kind of longer standing precedents that allow us to characterize and qualify. Some of those precedents are architectural precedents, some of those are rules of geometry that have a long-standing discourse around them, right, like you know you can characterize and qualify rule surfaces and other kinds of surfaces. So the kind of geometries that are just blobs and cannot be qualified tend to be the ones that are less productive for architectural purposes. So the answer to the question, in part, is that you have to lean on other things, right, other precedents, other histories, other discourses.

The third answer that I will give, and maybe the only one that is going to be helpful for you today, is to know that you have to impose your own set of qualifiers that are going to limit the range of possibilities for you, right, like you have to set up your own criteria. One of your criteria, which you have already said, is maybe proportion. If I were in your position right now, I would look at the shelter not as an object that needs to be folded but as an object that needs to be occupied. And I would draw five diagrams of people living in that, so that you start to get shapes and geometries of behavior that you want to imagine inside this thing. Like, what happens in one of

these shelters, once you fold it what are the things that need to fit it there, etc. It is exactly the same operations that I would use to deal with the design of a bedroom!

JFR: It is quite interesting because I have been so focused on the material, on the shell itself, that I have forgot to examine how to use the shelter, what would go on inside!

JL: I would draw sectional diagrams showing occupation in five different conditions and then you have to build your shell around those occupations in some way. And that is the key position of criteria that are then not just about the folding. If you are only ever dealing with the folding then the enterprise can get infinite: you can get interested with other new folds, and there are a millions out there, you will keep playing with proportions as a folding problem, all those matters, but, there are only going to be limited for you if you have other criteria already imposed. So I think the occupy-ability criteria would be suggestion number one for me. The other possibilities I think are the things you might already be confronting, which are: budget limitations, tooling limitations and material limitations (this one I know you are already dealing with). But any one of those other sets of constraints are going to take this infinite morpho-space of possibilities and at least bracket a couple of zones for you that are going to be a little bit more useful. That is I think it, those are the only answers I can give to that query.

JFR: Well thank you for that insight. It is ironic that I have been thinking about this folding system for quite a long time and never thought about how it would be used inside.

JL: Yes, is not that funny?

JFR: It is. And my background is architecture; my background is not industrial design!

JL: I can understand though. You have your head so close to the thing; it's hard to step back. What you need is a critic on occasion to come by. I need this too, I need feedback all the time when I am working on something and I get too narrowly

focused on a kind of particular bandwidth of a problem.

JFR: Obviously I am also researching the theory of folding and not just the practical, more material aspect of it. The main literature I have found on the subject is the monograph *Folding in Architecture*. Was that book a base for you in the beginning of your work?

JL: No, I did not even know it existed! I think so many architects have missed the mark on folding, right, totally miss the mark, like some people talk about folding in the sense where they fold floor plates to the wall to the ceiling. I find that just to be a really bad analogy and I am just super disinterested.

My take comes from an inherently tectonic place, a place that comes from questions of fabrication. If I had to define what I am trying to be up to, it is not necessarily about folding. Folding is one avenue that I do, but what I really want to do is expand the set of production possibilities available to architecture. All my agenda comes from that particular focus, and so I look at folding as actually an untapped region within the potential to increase productive possibilities in architecture; and fabrication and construction, actually literally construction possibilities in architecture. And so all the precedents that were out there already had very little to do with what I am interested in. But you know, the literature set has gotten a little bit better; I am clearly of a generation which is invested in installation projects, material experimentations, and all those are actually a little bit more relevant now. Those are the ones that I think are a little bit closer to the stuff that I am paying attention to. If you would be looking at my bookshelf, you would see books on digital fabrication questions, installation projects that have been out there; and a lot of those have folding as kind of a piece of their puzzle, so that is actually more the realm. So I would say there are things now that I might say are pretty interesting but the so-called folding conversation of the past I am just totally disinterested in. The Deleuze-Guattari take on folding is super interesting but it has nothing to do with actual folding! It is a proxy for other very interesting ideas but not for folding.

JFR: You are right; when I looked into that book, I realized that they were talking about folding concepts, parameters, but not about folding material. In a sense, would it be fair to say that your theoretical research is sort of embedded in your more hands-on folding research? That they go hand-in-hand?

JL: Yes, for some of it. But I am doing other researches, other sheet research, and not all of it is folding. Some of it is sheet intersection. I am doing an inflation project right now that uses the sheet but then inflates it. But yes certainly folding is a big chunk of the kind of research that I am up to right now. And the hands-on part of that is key.

JFR: Can you say something about the role of digital versus analogue production? How does the back and forth between analogue and digital design influencing the process and the end-result? Is there a dialogue between those two?

JL: Yes, there has to be because the moment we are at computationally it doesn't allow the materialization and the material intelligence to be embedded in how we model. Like I said, I think the folding is inherently material in some ways; the geometry of development and the geometry of folding is a pure enterprise. I understand that, so when I model things digitally I have at least already some materiality embedded in it. But all the real problems of materiality aren't embedded in that: the kind of hinging, the amount of curvature which is possible, the thickness of the material, etc. And so, there has to be a back and forth, right, you have to model very intelligently three dimensionally and digitally, but then you have to make it of paper first and then go back, then you have to make it with enough material thickness and then go back. The generic answer is, of course, there is a constant back and forth between those two things. But I do want to qualify that ever so slightly by saying that because folding is already embedded with some material thinking and logic, then the digital modelling itself does have some material intelligence built in. It's just not as much as maybe the end game would be for me, right? So I am trying to get slightly more sophisticated computer models that at least can imagine, not all the things - thickness is very, very hard - but maximum and minimum bending radii

for various materials can be embedded in the thinking, right, so you know that plywood doesn't bend that much but thin aluminum can bend very, very easily. And so, because that is a kind of pure, actually relatively simple sort of computational constant, it is quite easy to embed that thinking into the three-dimensional modelling realm before you even have to physicalize it. So you can start to get more and more there, shove more in the digital process because things are so much more applicable still in the digital process, that is its benefit. But in the end you have to make it, right, to have to build things.

JFR: Can you tell me what type of software you use when you do your digital tests?

JL: Well for now, because I also teach, and pedagogy and teaching are so important to how I work, I use platforms that are ubiquitous platforms that my students would be using. I do not want to use anything too specialized about folding because it could mean that my students cannot take it on. I do not want to be using things that are inaccessible to people that I work with. So the platform that I use is Rhino, with, of course, the Grasshopper and Kangaroo plug-ins that are connected to it.

JFR: I think that sums it up pretty much, those were my questions. Thank you, Joel.

JL: I am happy to help and I am interested in what you are up to and I would definitely like to see it progress. So shoot me email if you want a little bit of feedback and hopefully I will be able to throw a couple of sentences your way here and there.

JFR: Ok, it is very much appreciated. Thank you and talk to you soon.

JL: Ok, bye.

BIBLIOGRAPHIE

- Agkathidis, A. (2010). *Digital manufacturing : in design and architecture*. Amsterdam : BIS Publishers.
- Antonioli, M. (2010). *Les plis de l'architecture*. Récupéré de <http://leportique.revues.org/2491>
- Aarhus School of Architecture et OOOJA architects (2011). *Folded structures : digital physical workshop*. San Francisco : Blurb.
- Arkin, E.M., Bender, M.A., Demaine, E.D., Demaine, M.L., Mitchell, J.S., Sethia, S. et Skiena, S.S. (2004). When can you fold a map? *Computational Geometry*, 29(1), 23-46.
- Basily, B.B. et Elsayed, A.E. (2012). *Applications of Folding Flat Sheets of Materials into 3-D Intricate Engineering Designs*. [document de travail 07-015]. Rutgers University. Piscataway, New Jersey.
- Besenal, V. (1988). *La fabrication du carton ondulé*. Paris : F. Nathan.
- Brott, S. (1998). THE FORM OF FORM: The Fold and Architecture. *Architectural Theory Review*, 3(2), 88-111. <http://dx.doi.org/10.1080/13264829809478347>
- Buri, H. et Weinand, Y.(2008, 2-5 june.) ORIGAMI – Folded Plate Structures, Architecture. Dans Communication présentée à /au 10th World Conference on Timber Engineering (p. 8 p.) Miyazaki, Japan
- Cascades. (2010). *Le carton non couché recyclé*. [Brochure technique].

- Chudoba, R., van der Woerd, J., Schmerl, M. et Hegger, J. (2014). ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. *Advances in Engineering Software*, 72(Juin 2014), 119-127.
- De Souza, P. (2013, 18 septembre). *Origami folding patterns in the work of F. LL Wright. Fisrt Conference Transformables*, Actes du colloque, 18 septembre 2013, Seville, Spain : Editorial Starbooks.
- Delarue, J.-M. (1997). Le pli, source de formes et de sens. *Les cahiers de la recherche architecturale*(40), 39-46.
- Demaine, E.D., Demaine, M.L., Hart, V., Lacono, J., Langerman, S. et O'Rourke, J. (2009, 11–13 novembre.) (Non)existence of Pleated Folds: How Paper Folds Between Creases Dans Communication présentée à /au 7th Japan Conference on Computational Geometry and Graphs (JCCGG 2009) Kanazawa, Ishikawa, Japan
- Demaine, E.D., Demaine, M.L. et Koschitz, D.(2008) Curved Crease Origami Dans Communication présentée à /au Advances in Architectural Geometry (AAG 2008) p. 29–32. Vienna, Austria
- Demaine, E.D., Demaine, M.L. et Koschitz, D. (2010, 3–17 juillet). *Reconstructing David Huffman's Legacy in Curved-Crease Folding. 5th International Conference on Origami in Science, Mathematics and Education (OSME 2010)*, Actes du colloque, 3–17 juillet 2010, Singapore
- Demaine, E.D., Demaine, M.L., Koschitz, D. et Tachi, T. (2011, 19–23 Septembre). *Curved Crease Folding: a Review on Art, Design and Mathematics 17th International Conference on DNA Computing and Molecular Programming (DNA 2011)*, Actes du colloque, 19–23 Septembre 2011, Pasadena, California

- Dimension+ (2011, 10-23 novembre). *Fold Me Workshop. International Festival KIBLIX*, Actes du colloque, 10-23 novembre 2011, Maribor, Slovenia
- Dimitriou, M. et Vyzoviti, S. Liveneau, P. et P. Marin (dir.). (2012, 29-30 novembre). *The grasping hand as form generator. Generative modelling in physical and digital media. MC2012 Symposium: Materiality in its Contemporary Forms: Architectural perception, fabrication and conception*, Actes du colloque, 29-30 novembre 2012, Lyon, France : Villefontaine: les Grands ateliers.
- Dureisseix, D., Gioia, F., Motro, R. et Maurin, B. (2011, 9-13 mai). *Conception d'une Enveloppe Plissée Pliable-Dépliable. 10e Colloque National en Calcul des Structures*, Actes du colloque, 9-13 mai 2011, Presqu'île de Giens (Var)
- Eisenman, P. (1992). Visions unfolding: architecture in the age of electronic media. *Domus*, 734, 17-21.
- Epps, G. (2014). RoboFold and Robots.IO. *Architectural Design*, 84(3), 68-69.
- Feast, L.(2006) The Discrete and the Continuous in Architecture and Design. Dans Communication présentée à /au IADE International Conference (p. 14 p.) Lisbonne : Design Research Society.
- Forsyth, A. et Crewe, K. (2006). Research in Environmental Design : definitions and limits. *Journal of Architectural and Planning Research*, 23(2), 160-175.
- Forte, C. (2005). Packaging Material Innovation: 3-D Folded Structures. [IPTA essay competition]. 12p.
- Gönenç Sorguç, A., Hagiwara, I. et Arslan Selçuk, S. (2009). Origamics in Architecture: A Medium of Inquiry or Design in Architecture. *Journal of the Faculty of Architecture, Middle East Technical University*, 26(2), 235-247.
<http://dx.doi.org/10.4305/METU.JFA.2009.2.12>

- Hauberg, J. (2011). *Research by design: a research strategy*. Hovsepian, T. (2014). *Portable Shelter Structure and Manufacturing Process*. United States of America.
- Huffman, D.A. (1976). Curvature and creases: A primer on paper. *IEEE Trans. Computers*, 25(10), 1010-1019.
- Iwamoto, L. (2009). *Digital fabrications : architectural and material techniques*. New York : Princeton Architectural Press.
- Jackson, P. (1993). *L'encyclopédie du papier origami, art, création*. Paris : Fleurus.
- Jackson, P. (2011). *Techniques de pliage pour les designers : papier, plastique, métal, tissu*. Paris : Dunod.
- Kilian, M., Floery, S., Chen, Z., Mitra, N.J., Sheffer, A. et Pottmann, H.(2008, 11-15 août) Curved Folding. Dans Communication présentée à /au ACM SIGGRAPH 2008 (9p.) Los Angeles, California.
- Krauel, J. (2009). *Architecture et design contemporain : conception et fabrication numériques*. Barcelona : Links.
- Lalloo, M. (2014). Applied origami. *Ingenia online*, (61), 32-37. Récupéré de
- Lamere, J. (2011, 10 février). Entrevue avec McNichol, D. *The Accidental Architect*. blog People + Projects : Boston Society of Architects/AIA. Récupéré de <http://www.architects.org/news/accidental-architect>
- Lamere, J. (2014, 18 novembre). Entrevue avec Roy, J.-F. *Research discussion*.
- Lancri, J. (2006). Comment la nuit travaille en étoile et pourquoi ? , p. 9-20.
- Leblois, O. (2008). *Carton : mobilier, éco-design, architecture*. Marseille : Parenthèses.

- Liu, Y., Boyles, J.K., Genzer, J. et Dickey, M.D. (2012). Self-folding of polymer sheets using local light absorption. *Soft Matter*, 8(6), 1764-1769.
- Lynn, G. (2004). *Folding in architecture*. (Rev. éd.). Chichester : Wiley-Academy.
- Matcha, H. et Ljubas, A. (2010, 15-18 septembre). *Parametric Origami: adaptable temporary buildings. FUTURE CITIES [28th eCAADe Conference]*, Actes du colloque, 15-18 septembre 2010, Zurich, Switzerland, Récupéré de http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/ecaade2010_222.content.pdf
- McQuaid, M. et Ban, S. (2003). *Shigeru Ban*. London : Phaidon.
- Meyer, J., Duchanois, G. et Bignon, J.-C. (2014, 18-20 juin.) Le pli, une figure d'interface entre architecture et ingénierie. Dans Communication présentée à /au SCAN'14: Séminaire de conception architecturale numérique. Luxembourg.
- Mitani, J. et Igarashi, T. (2011, 21 – 23 septembre) Interactive Design of Planar Curved Folding by Reflection. Dans Communication présentée à /au Pacific Graphics 2011 (p. 5) Kaohsiung, Taiwan.
- Mitchell, C.T. (2002). *User-responsive design : reducing the risk of failure*. New York : Norton.
- Miura, K. et Tachi, T. (2010, 23-28 août) Synthesis of Rigid-foldable Cylindrical Polyhedra. Dans Communication présentée à /au ISIS-Symmetry: Art and Science p. 204-213. Gmuend, Austria : Journal of ISIS-Symmetry, Special Issues for the Festival-Congress.
- Miyake, I., Fujiwara, D. et Kries, M. (2001). *A-Poc making : [Issey Miyake & Dai Fujiwara : Vitra Design Museum Berlin June 1-July 1, 2001]*. Weil : Vitra Design Museum.
- Moussavi, F. et López, D. (2009). *The Function of Form*. Barcelona Cambridge, Mass. : Actar ; Harvard University, Graduate School of Design.

Nikolic, D., Stulic, R. et Sidjanin, P. (2012, 19-21 avril). *On the Flexibility of Deployable Dome Structures and their Application in Architecture. 1st International Conference on Architecture & Urban Design (1-ICAUD)*, Actes du colloque, 19-21 avril 2012, Tirana, Albania : Epoka University, Department of Architecture.

Nishiyama, Y. (2012). Miura folding: Applying origami to space exploration. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 79(2), 269-279.

Ogawa, H. (1971). *The Art of Papercraft*. Londres : B.T. Batsford.

Oxman, R. et Oxman, R. (2010). New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies. *Architectural Design*, 80, 14-23.

Mouvement français des plieurs de papier. (2015). *Solfège*. [Brochure]. Paris.

Pell, B. (2010). *The articulate surface : ornament and technology in contemporary architecture*. Basel : Birkhäuser.

Pro Carton. (2008). *Glossaire Explication de la terminologie utilisée dans l'industrie du carton plat et les boîtes pliantes*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

Pro Carton. (2008). *Fact File Part 5 : Cartonboard*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

Pro Carton. (2008). *Fact File Part 4 : the Pulping Process*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

Pro Carton. (2008). *Fact File Part 6 : Folding Cartons*. [Brochure technique] : Association Européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages.

Roth, L. et Wybenga, G.L. (2012). Corrugated Containers *The packaging designer's book of patterns* (p. 351-358) : John Wiley & Sons.

- Scalbert, I. (2008). *The Yokohama International Port Terminal. Selected Writings*.
Récupéré le 31 janvier 2014 de http://cicarchitecture.org/selected_writings/is_yok.htm
- Schenk, M. (2012). *Origami in Engineering and Architecture An art spanning Mathematics, Engineering and Architecture*. [Diaporama électronique].
Cambridge: University of Cambridge : Récupéré de http://www.markschenk.com/research/teaching/ArchEng2012_lecture_web.pdf.
- Schenk, M., Allwood, J.M., S.D. et Guest (2011, 25-30 septembre). *Cold Gas-Pressure Folding of Miura-ori Sheets. International Conference on Technology of Plasticity (ICTP 2011)*, Actes du colloque, 25-30 septembre 2011, Aachen, Germany.
- Šekularac, N., Ivanović-Šekularac, J. et Čikić-Tovarović, J. (2012). Folded structures in modern architecture. *Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering*, 10(1).
- Sheil, B. et Glynn, R. (2011). *Fabricate : making digital architecture*. (1st éd.). Toronto : Riverside Architectural Press.
- Stavric, M. et Wiltsche, A.(2013, 05/2013.) Investigations on Quadrilateral Patterns for Rigid Folding Structures – Folding Strategies - Rigid and Curved Folding.
Dans Communication présentée à /au Open Systems: Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (p. 232) Singapore : The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia.
- Tachi, T. (Producer). (2010, 13 avril 2015). Architectural Origami : Architectural Form Design Systems based on Computational Origami. Récupéré de http://courses.csail.mit.edu/6.849/fall10/lectures/L23_images.pdf
- Tachi, T. (2010). Freeform variations of origami. *J. Geom. Graph*, 14(2), 203-215.

- Tachi, T. (2014). Origami and UTokyo. *Tansei*, (13). Récupéré de http://www.utokyo.ac.jp/en///about/publications/tansei/13/innovation_4_3.html
- Tachi, T. et Epps, G. (2011, March 14-16, 2011). *Designing One-DOF Mechanisms for Architecture by Rationalizing Curved Folding. ALGODE TOKYO 2011*, Actes du colloque, March 14-16, 2011 2011, Tokyo, Japan : International Symposium on Algorithmic Design for Architecture and Urban Design.
- Tolley, M.T., Felton, S.M., Miyashita, S., Xu, L., Shin, B., Zhou, M., Rus, D. et Wood, R.J. (2013). *Self-folding shape memory laminates for automated fabrication. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*, Actes du colloque, 2013 : IEEE.
- Trautz, M. et Herkrath, R. (2009). *The application of folded plate principles on spatial structures with regular, irregular and free-form geometries. Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings*, Actes du colloque, 2009, : Editorial Universitat Politècnica de València.
- Trautz, M. et Hoffmann, S. (2011). *Folds and Fold Plate Structures in Architecture and Engineering. Structural Morphology Group International Seminar*, Actes du colloque, 2011.
- Trebbi, J.-C. (2012). *The art of folding : creative forms in design and architecture*. Barcelona, Spain : Promopress.
- Vyzoviti, S. (2003). *Folding architecture : spatial, structural and organizational diagrams*. Amsterdam : BIS.
- Vyzoviti, S. (2006). *Supersurfaces : folding as a method of generating forms for architecture, products and fashion*. Amsterdam : BIS Publishers.

- Vyzoviti, S. (2008). Out of the box and into the fold. *Falling right into place: The Fold in Contemporary Art*, pp. 39-42.
- Vyzoviti, S. (2011). *Soft shells : porous and deployable architectural screens*. Amsterdam : BIS Publishers.
- Vyzoviti, S., Voyatzaki, M., S., Constantin (dir.). (2012, 30-31 août). *Pleat and Play. Rethinking the Human in Technology Driven Architecture*, Actes du colloque, 30-31 août 2012, Chania, Grèce : ENHSA-EAAE.
- Vyzoviti, S. et De Souza, P. (2012, 15-17 novembre 2012). *Origami tessellations in a continuum. Integrating design and fabrication in architectural education. SCALE LESS - SEAM LESS Performing a less fragmented architectural education and practice*, Actes du colloque, 15-17 novembre 2012, Münster, Germany : ENHSA – EAAE.
- You, Z. et Kuribayashi, K. (2003, 25-29 juin). *A novel origami stent. Proceedings of Summer Bioengineering Conference*, Actes du colloque, 25-29 juin 2003.