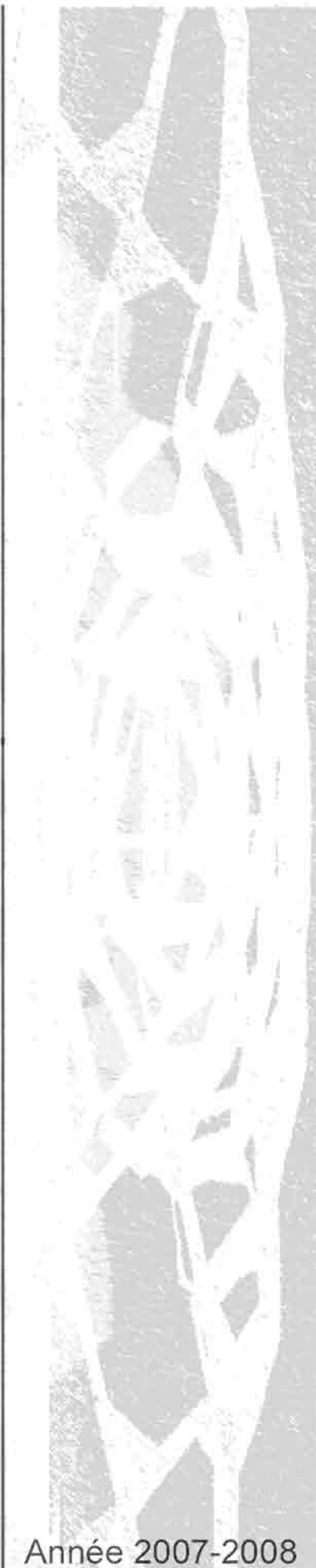


Présentation du Sujet :

**Architecture de bandes pliées,
source de formes et de sens.**

Candidate au Master 2 mention Recherche : Chloé Genevaux
Directeur de Recherche : Alain Marty
Co-directeur de Recherche : Thierry Berthomier

Laboratoire de Structures Légères pour l'Architecture, SLA,
Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, ENSAM.



Année 2007-2008

I) CONTEXTE.

A. Usages du pli.

« La division du continu ne doit pas être considérée comme celle du sable en grains, mais comme celle d'une feuille de papier ou d'une tunique en plis, de telle façon qu'il puisse y avoir une infinité de plis. », Leibniz.

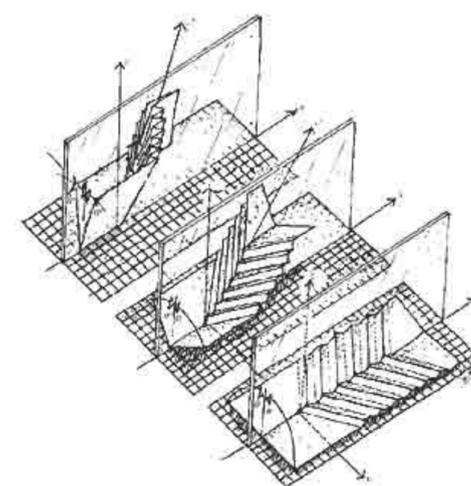
1. Usages du pli dans la nature.

Le pli revêt maintes fonctions dans l'organisation des êtres et des choses et peut être vu, selon Jean-Marie Delarue, comme un processus universel de morphogenèse régissant les règnes minéral, végétal et animal.

Partout dans la nature, des formes plissées se constituent, résultantes de nombreux facteurs en interaction. Le pli dans son rôle structurant, c'est-à-dire rigidifiant par la forme une faible quantité de matière, n'est qu'une fonction parmi d'autres. Sans toutes les énumérer, l'on peut penser au pli comme processus de croissance, de complexification ou comme mécanisme d'éclosion. « Les métamorphoses de l'embryon par exemple, pour engendrer des organes caractérisés, s'accomplissent par replis donnant lieu à des multiples interfaces d'échanges énergétiques, des compactages d'étendues proliférantes, des nervurassions consolidatrices, des mécanismes d'éclosion, des replis articulaires mobiles... puis aux rides de la flétrissure. » (JM-Delarue).

Le pli se caractérise aussi par son aptitude à la contenance, par la manière dont il donne forme à la matière, il englobe, enveloppe.

Mais plier c'est aussi déplier. Le pli, au moment de sa constitution, par les forces endogènes ou exogènes qu'il implique, se fait aussi mouvement.



ill. tirées de *the geometry of unfolding tree leaves*, H. Kobayashi, B. Kresling and J.F.V. Vincent; Center for Biomimetics, The University of Reading, UK.

2. Usages du pli dans l'art et l'architecture.

Dans l'histoire de la peinture, le pli occupe une place importante, de par son omniprésence, comme si la figure humaine n'était parfois qu'un prétexte pour peindre le jeu des drapés. C'est peut-être dans le jeu des drapés que le peintre projette sur la toile une réflexion sur la peinture elle-même, une sorte de peinture de la peinture, ou tout simplement parce que le pli, « c'est le plan qui devient volume, la troisième dimension qui surgit de la deuxième, comme sur la surface du tableau, lorsque le clair et l'obscur se font relief et profondeur. » (Caroline Chariot Dayez, Le Pli)

L'Origami, ou l'art du pliage de papier, développé au Japon a acquit aujourd'hui une grande reconnaissance dans le monde entier. De véritables artistes faisant preuve d'une grande maîtrise de la géométrie donnent naissance à d'incroyables sculptures tridimensionnelles à partir d'une simple feuille de papier. Cet art ancien et sans cesse renouvelé est aujourd'hui riche d'une très grande variété de figures. De nombreux domaines puisent dans ce vocabulaire aujourd'hui, c'est le cas de l'architecture mais aussi des nanotechnologies* par exemple.

Les liens entre origami et architecture peuvent se situer à différents niveaux.

« La pratique du pliage oblige à concilier les parties avec le tout. C'est d'ailleurs le cas dans l'architecture non-standard** et la fin des éléments monofonctionnels. Le mur et le sol sont pensés en continuité, ce qui explique une recrudescence de courbes. En origami, chaque espace de papier est dépendant du reste de la surface ce qui implique un certain sens de l'économie et symbolise pour moi un équilibre », écrit Etienne Cliquet sur son site nommé Ordigami (www.ordigami...)

C'est dans la multiplicité de ses rôles, organe qui assure une fonction, structure qui constitue le squelette ou langage plastique expressif, que le pli intéresse l'architecte.

Le pli de par son principe de résistance par la forme plus que par la quantité de matière utilisée, place l'architecture plissée dans le domaine des structures dites légères. Le pli induit la forme et inversement. De par son expressivité plastique, sa propension à accentuer ombres et lumières (comme les drapés en peinture), la répétition d'un rythme périodique apaisant et unificateur, et sa propension à générer des formes, le pli est devenu chez certains concepteurs un véritable langage.

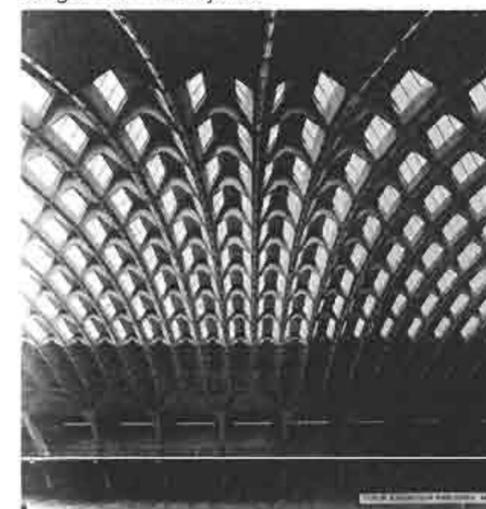
Je pense entre autres à Nervi, qui, en développant le ferrociment, alliage de métal et béton d'une épaisseur extrêmement fine, a été amené à concevoir des structures plissées.



Le Caravage, La mort de la vierge, 1605.



Origami d'Eric Gjerde



Grande halle du palais de expositions de Turin, 1947-1949. Nervi



Entrepôt expérimental en ferrociment pour la sté industrielle Nervi et Bartoli à Rome, 1946. Murs et couvertures ont une épaisseur de 3 cm. La résistance est donnée par le plissement des surfaces.

*Thèse sur les micro et nanostructures tridimensionnelles pliées, inspirées de l'origami, Tilman Buchner, 2003, MIT

** expo, architecture non-standard, centre Pompidou, 2003.

Jean Prouvé, lui aussi, a développé son art au contact du pli. C'est l'acquisition d'une nouvelle machine en 1931, la plieuse, qui l'amène à renouveler totalement l'usage du métal dans le design et l'architecture. Le travail dans la masse, à coups de sueur et de marteau, a été remplacé par le travail de la fine tôle d'acier qui trouva dans le pli la résistance qui lui faisait initialement défaut. C'est ce que décrit bien Philippe Poitier dans un article intitulé *Autour de la plieuse de Jean Prouvé*, paru dans le n°40 des Cahiers de la Recherche Architecturale.

Les recherches sur les structures plissées se poursuivent, notamment dans l'utilisation du bois, matériau pourtant traditionnellement utilisé dans sa masse. Le bois fait aujourd'hui son apparition dans le domaine des structures légères, grâce au développement de technologies permettant de le transformer et de le recomposer afin de lui donner la taille que l'on souhaite, une plus grande homogénéité ou résistance (bois lamellé-collé, aggloméré, contre-plaqué, OSB, ...). L'IBOIS, laboratoire des constructions bois à l'école polytechnique fédérale de Lausanne, mène actuellement des recherches sur les structures plissées issues de l'Origami : « Les recherches portent sur trois axes : de nouvelles géométries spatiales, une analyse du rôle structurel du pli et de la surface et les possibilités d'assemblage et de montage. » Des panneaux composés de bois massifs sont employés. Grâce aux outils de découpage numérique, il est aujourd'hui possible de réaliser, à une échelle industrielle, des assemblages à géométrie variable, d'une grande complexité. Un des outils rendant possible le développement de ce projet, c'est l'utilisation de l'informatique « qui permettra de définir la topologie des structures et de proposer un outil de modélisation géométrique. », ce qui sera également, nous le verront plus tard, l'un des enjeux de l'avancée de cette recherche.

Le but d'un projet de recherche dans le domaine de l'architecture est d'aboutir à des réalisations et des avancées concrètes, d'où la question de la mise en œuvre, de première importance. Dans ses recherches, l'IBOI travaille sur le soudage du bois par frictions*, technique qui semble très intéressante et qui serait peut-être l'un des éléments indispensable au développement de structures plissées complexes en bois.

D'autres matériaux se prêtent à la mise en œuvre de structures plissées, la brique, plus traditionnelle, mais aussi le carton, matériau nouveau dans le domaine de la construction, que l'on peut voir comme une feuille de papier à grande échelle, et qui donc aspire au pli.

Ses caractères éphémère et recyclable le relie à d'autres problématiques actuelles, telles l'écologie et le nomadisme.



Présentation d'un prototype de panneau de façade en aluminium plié à l'usine de Maxéville, Prouvé.



Recherches de l'IBOIS, 2007.

*« Cette technologie, qui a son origine dans la technique d'assemblage des matières plastiques et des métaux, est utilisée de façon similaire pour le bois. Par l'introduction ciblée d'énergie dans l'interface de liaison par friction, une transformation du bois thermique est obtenue. Le résultat est un matériau collant qui assure la liaison. La connexion entre les pièces de bois se forme en quelques secondes. »

B. Architecture et « formes libres ».

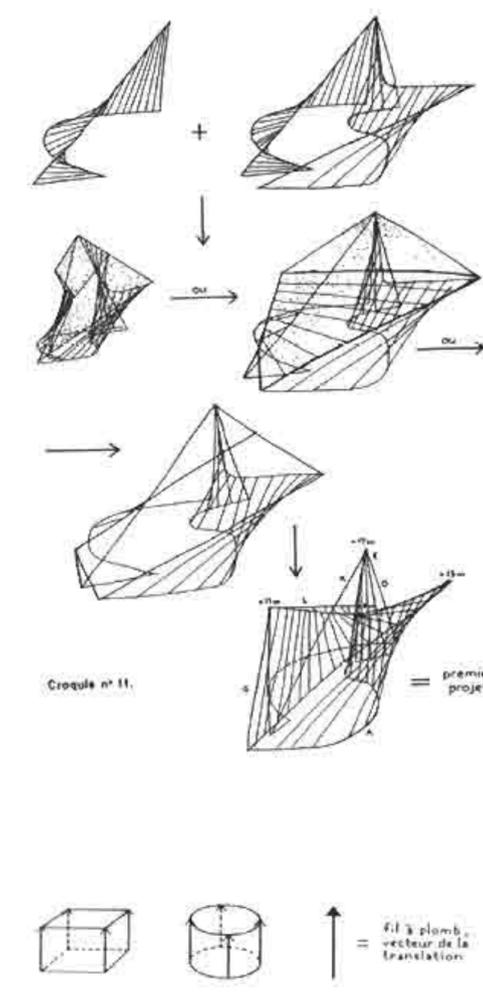
Une partie de plus en plus importante de l'architecture contemporaine use d'un vocabulaire relativement nouveau par rapport à toute l'histoire de l'architecture, celui des formes dites libres ou « free forms ». Une forme dite libre est une forme ne pouvant être représentée uniquement par les traditionnels plans et coupes. La maquette et la modélisation informatique s'avèrent alors des éléments de travail indispensables.

1. De l'architecture « de translation » à l'architecture « volumétrique », ou les début des « formes libres » selon Iannis Xenakis.

Entre 1956 et 1958, Iannis Xénakis et le Corbusier ont conçu l'un des premiers édifices entièrement constitué, dans sa structure et dans sa forme, uniquement par des paraboloides hyperboliques et par des conoïdes, et dont les voiles ainsi constitués sont autoportants. Ce pavillon devait présenter la firme Philips lors de l'exposition universelle de Bruxelles en 1958. Xenakis décrit en 1958 dans un texte intitulé « le Pavillon Philips à l'aube d'une architecture », la place particulière qu'occupe pour lui ce pavillon dans l'évolution vers une architecture nouvelle.

Il y affirme que, « depuis l'Antiquité, l'architecture n'est pas une manifestation vraiment spatiale. Elle est essentiellement fondée sur deux dimensions, elle est essentiellement plane. Les figures carrées, rectangulaires, trapézoïdales, circulaires des temples, des habitations, des palais, des églises, des théâtres, etc., sont planes. On pénètre dans la troisième dimension par translation parallèle suivant la direction du fil à plomb. » Il définit là une architecture « de translation ». L'architecture fondée par le cercle donnant naissance à la voûte, à la coupole, fait partie de l'architecture de translation, dans un sous-groupe qu'il nomme circulaire, et définit comme une étape timide mais décisive vers l'architecture « tridimensionnelle ».

C'est le béton armé, utilisé comme l'ossature bois ou la pierre au départ, et sous forme de poutres, de poteaux, de treillis par le mouvement moderne, mais dont l'essence même est la continuité, qui devait amorcer une révolution. « Le béton peut être façonné à volonté. Il peut être en forme de poutres de poteaux mais aussi en bloc massif et en coquilles aussi étendues, aussi fines, aussi planes, aussi courbes, qu'on peut le désirer. Les théories des coques et des voiles minces voient le jour. Les propriétés géométriques des surfaces courbes, cylindriques, coniques, à double courbure, etc., façonnent directement l'orientation de ces recherches abstraites d'une part, matérielles de l'autre. Couvrir une surface donnée est un problème qui doit se poser de cette façon : « Quelle est la forme géométrique que doit avoir la couverture pour que la quantité de matière qui constitue cette couverture soit minimum ? » »



Il écrit encore : «C'est à notre époque que l'Architecture de translation semble terminer sa course magnifique mais restrictive qui a donné tant de produits éternels remplis d'intelligence et de poésie. C'est maintenant qu'on assiste à l'aube d'une autre architecture, réellement à trois dimensions, plus riche, plus surprenante. C'est l'architecture du groupe volumétrique. »

Et pour finir : « Pour l'instant, le béton seul est à l'origine de l'architecture nouvelle du groupe volumétrique. Il prépare le lit où les matières plastiques de demain formeront le fleuve riche de formes et de volumes que recèlent non seulement les être biologiques mais surtout les mathématiques les plus abstraites. Le système de références du corps humain ne sera plus l'angle droit et les surfaces planes, horizontales et verticales. Sa sensibilité se façonnera par un espace courbe. Du point de vue psychologique, c'est un enrichissement nouveau, géant, aux conséquences encore imprévisibles. »

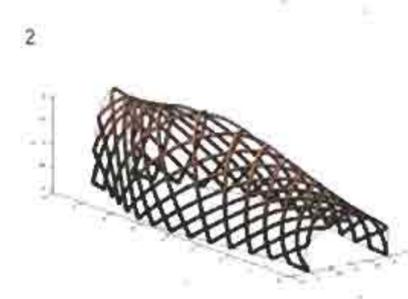
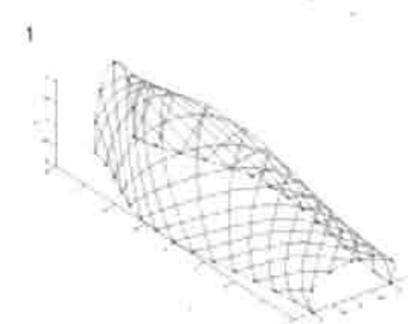
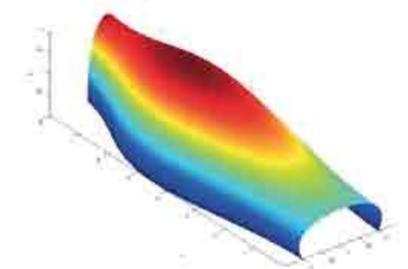
Voilà ce que pressentait Xenakis en 1958, aujourd'hui, c'est bien dans ce sens que nous allons. De nouveaux matériaux sont apparus, les résines, les textiles à haute performance,... permettant de nouvelles expérimentations. Mais c'est l'outil informatique qui a révolutionné radicalement l'architecture, permettant de concevoir des formes impossibles à dessiner à la main.

2. Architecture et informatique.

Si Xenakis, lui, devait se baser uniquement sur des PH afin de pouvoir dessiner, calculer et construire son bâtiment, l'informatique nous permet aujourd'hui de concevoir n'importe quelle forme, mais la construire reste un problème d'importance.

En cela le travail d'Alain Marty sur les outils géométriques et mathématiques permettant de maîtriser les formes gauches est intéressant. Il utilise l'outil informatique non pas afin de modéliser directement des formes gauches, ce qui n'apporterait rien à la compréhension de leurs fondements, mais à travers les langages de programmation qui viennent soutenir le raisonnement algébrique. Cette méthode de travail sera particulièrement intéressante pour avancer dans ma recherche.

La question de la conception structurelle des formes libres se pose de diverses manières. Des projets très différents se construisent, certains utilisant un maillage triangulaire, composé de barres métalliques toutes de longueurs différentes, d'autres tentent de définir une structure plus esthétique ou plus rationnelle. Dans le cadre d'un projet de recherche, l'IBOIS a développé un logiciel qui détermine des maillages géodésiques sur des formes libres et met à disposition les données géométriques nécessaires pour une découpe à l'aide d'une machine à commande numérique. La forme est définie par une surface de Bézier à l'aide de différentes courbes de contrôle issues des coupes transversales. Cet outil, assistant l'ingénieur dans un travail relativement nouveau, ouvre la voie à une utilisation accrue du matériau bois dans la réalisation de ce type d'ouvrage.



3
Lignes géodésiques appliquées à des surfaces libres, IBOIS, 2007.



Modélisation par script Rhino, Marc Fornes



Pôle d'exposition à Milan, M. Fufsas, 2005.



BMW Welt à Munich, Coop Himmelblau, 2001-2007

La question de la forme et de la structure est récurrente en architecture et se pose aujourd'hui de façon nouvelle.

Le sujet de ma recherche sera de proposer et mettre au point les outils nécessaires à une nouvelle approche dans la conception formelle et structurelle des formes libres, basée sur le pli.

II) PROBLEMATIQUE ET SUJET DE RECHERCHE.

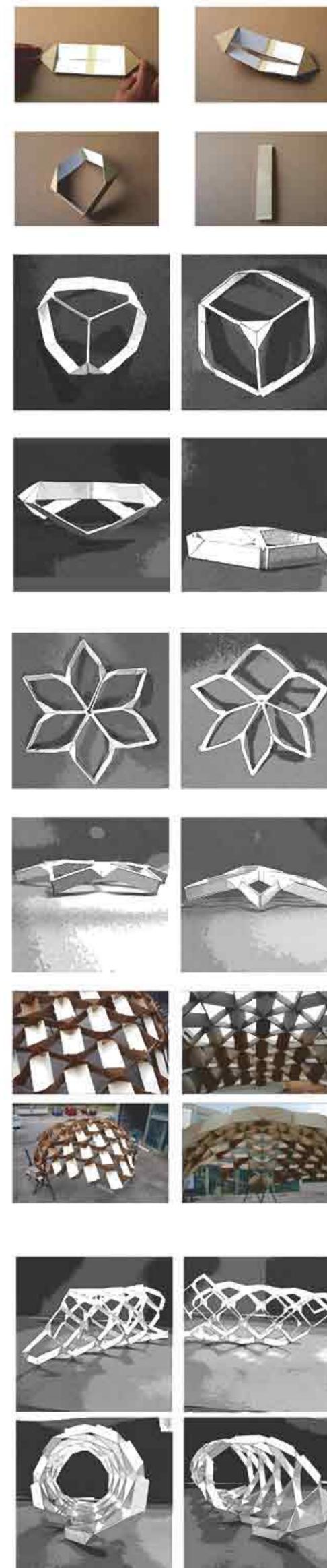
Nous ne sommes qu'aux prémises de l'architecture des formes libres et l'on aurait des raisons de se méfier d'une architecture de star-système, une architecture de l'image, formaliste et élitiste.

Mais ce type d'architecture pourrait bien être est le signe d'une évolution plus profonde de notre manière d'appréhender l'espace en trois dimensions. Il s'agira demain de lier l'architecture des formes libres, souvent débauche de moyens et de gaspillages inutiles, aux problématiques actuelles et futures que sont la crise écologique et les bouleversements climatiques. Très souvent l'architecture écologique renvoie une image passéiste, sur laquelle on greffe tout un tas de nouvelles technologies de pointe. Il me semble qu'il faut aller de l'avant. Sans renier les apports de l'architecture traditionnelle, il est temps de réinventer des espaces anticipant l'évolution de nos modes vie, afin de concilier architecture du futur et respect de la vie sur terre.

Architecture de bandes pliées, source de formes et de sens.

La genèse de formes libres ne doit pas forcément être complexe. Grâce à de simples plis, il est possible de créer une infinité de formes.

Le pli en tant que générateur de formes et élément structurant sera au cœur de mes préoccupations. Le commencement de cette histoire n'est pourtant pas une feuille de papier rectangulaire, élément sur lequel se fonde l'origami, mais des bandes de papier pliées, c'est en cela que réside le caractère novateur du procédé, que l'on doit à Thierry Berthomier, enseignant et chercheur à l'ENSAM, qui travaille depuis longtemps sur le pli de manière très originale. Ses recherches ont donné vie à des centaines de maquettes qui encomrent aujourd'hui son appartement. Qu'en faire ? L'idée est venue à certains de ses anciens étudiants, regroupés en association sous le nom de W.A.S.T.E. de donner à ces maquettes une existence nouvelle en opérant un changement d'échelle. Transposées à l'échelle de l'Homme, on allait en faire une architecture novatrice et poétique,

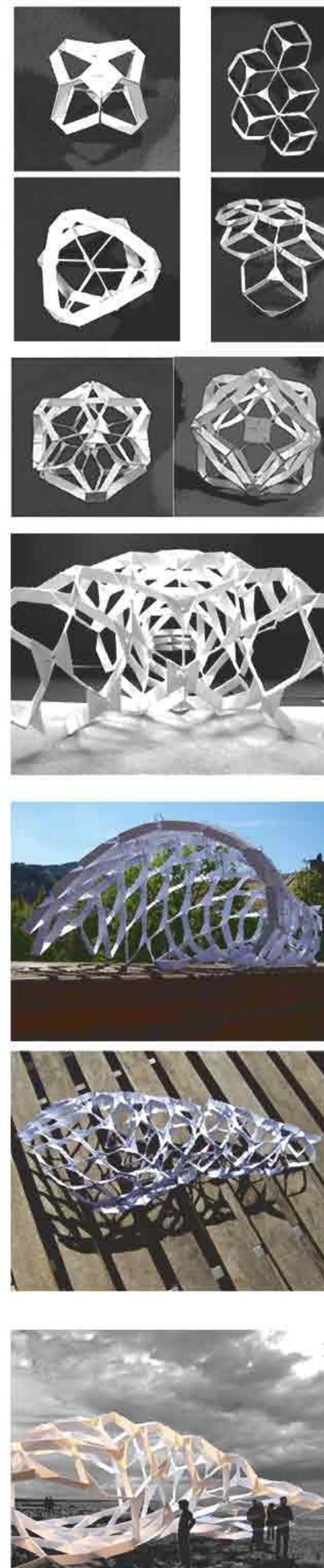


Les bandes pliées peuvent s'utiliser et se combiner de diverses manières, l'une d'elle a été jugée particulièrement intéressante : l'élément de base, que l'on nommera module, est une bande pliée symétriquement six fois selon deux plis perpendiculaires à la bande et quatre plis à angle variable formant deux triangles.

Il en existe bien sûr de nombreuses variations. Un module se plie et se déplie, c'est son degré d'ouverture qui définit la courbure qu'il génère. L'assemblage de ces modules, tous identiques, permet la genèse d'une infinité de formes différentes allant de la figure géométrique classique telle la sphère, le cylindre, l'icosaèdre, etc., aux formes libres. Il est aisé d'en saisir l'intérêt, contrairement à un maillage en triangles tous différents et parfois peu esthétique, la répétition d'un même module très simple est un avantage. Si le fait qu'un module puisse se plier à plat et faciliter ainsi le transport et le stockage est un point positif, c'est aussi là que réside le point faible de cette technique. Tout élément pliable est par nature instable, il est donc nécessaire de rigidifier la structure par d'autres éléments, une fois la forme définie.

La découverte de ce procédé soulève de nombreuses interrogations. Il est difficile pour l'instant, autrement que par un long tâtonnement en maquettes, de prévoir la forme vers laquelle on se dirige. J'ai amorcé ce travail l'an dernier, lors d'un séminaire effectué durant mon année en Autriche, au sein de la faculté d'architecture d'Innsbruck, avec Eda Schauer. Désirant adapter ce type structure de bandes pliées à une forme déjà définie, je me suis rapidement rendu compte des difficultés. J'ai alors entamé un travail de classification, des noeuds ou assemblages possibles, mais aussi des types de formes générées. Ayant été confrontée à cette difficulté, il me semble indispensable de mettre au point un outil de conception, afin de décider des formes que l'on produit, et ne plus être « esclave » de la logique propre à la géométrie de ce module, qui nous emmène où il veut bien aller.

D'où le deuxième élément capital de cette recherche, l'outil informatique, aide essentielle à la conception, mais aussi à la réalisation (en lien avec des machines de découpe à commande numérique par exemple).



III) METHODE.

La première étape sera la mise en place d'une base de calcul avec Thierry Berthomier, afin de maîtriser la géométrie des formes générées. Les calculs étant complexes et nombreux, le passage à l'outil informatique (avec Excel par exemple) sera primordial pour la poursuite des recherches.

Dans un même temps le travail de classification des nœuds et des formes engagé sera poursuivi, afin d'avoir un aperçu clair des nombreuses possibilités. Les maquettes produites seront scannées et classées, ce qui permettra de garder une trace du travail et de créer ainsi une base de donnée visitable en 3 dimensions.

La seconde étape consistera en un travail de programmation informatique avec Alain Marty, afin de créer les outils nécessaires à la modélisation en trois dimensions de ces structures (logiciels envisagés : Sketchup et programmation en langage ruby, à tester...).

Cet outil devra être une aide à la conception de ce type de structures de bandes pliées, grâce à une interface graphique prenant en compte les contraintes géométriques définies dans la base de calculs. L'outil informatique pourra aussi être utilisé dans la phase de mise en œuvre, en transmettant les informations nécessaires à une machine de découpe à commande numérique par exemple, pour les pièces particulière (contreventements, enveloppe, etc.) Les éléments de la structure, simples et tous identiques, pourront être facilement produits de façon industrielle.

La troisième étape, se déroulant tout au long de l'année en parallèle, sera un travail sur la structure elle-même, sa mise en œuvre, ainsi que sur les enveloppes. Il s'agira d'élaborer tests et prototypes, afin d'orienter les choix constructifs. Les modèles élaborés en 3D devront être vérifiés, notamment en terme de résistance.

Le projet de PFE lui-même sera une application concrète des recherches, inséré dans un site et répondant à une fonction ainsi qu'à des usages restant à définir.



