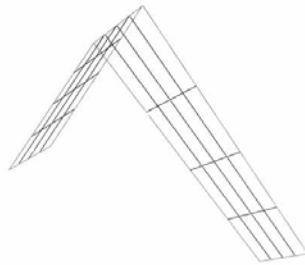


Mémoire de Master Design Global, spécialité « Modélisation et Simulation des Espaces Bâti »

# Collaboration à la Conception des Opérateurs Morphosémantiques

## Elaboration d'un Outil pour la Conception de Formes Numériques 3D

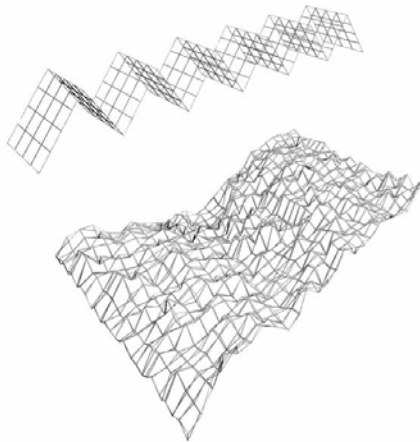
Pli



Plisser



Froisser



**Présenté par Felipe Aranda V**  
**Sous la direction de : Jean Claude Bignon**  
Octobre 2007

**Laboratoire d'accueil :**  
**CRAI, Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie.**

École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy  
École Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg  
Institut National Supérieur des Sciences Appliquées de Strasbourg  
Institut National Polytechnique de Lorraine  
Université Henri Poincaré (Nancy 1)

*Opérateurs Morphosémantiques; Elaboration d'un outil pour la conception de formes numériques.*

## Sommaire

1) Introduction, contexte de la recherche.....	
2) Problématique et objectifs. ....	
3) Corps d'étude / Etat de l'Art.....	
3.1) - Définitions des Architectures Numériques.....	
3.2) - Opérateurs existants pour un Pli Paramétrique.....	
3.3) - Une Sémantique du Pli.....	
3.4) - Exemples Morphologiques.....	
3.5) - Expérimentation Tactile.....	
4) Un modèle pour l'opérateur plier. ....	
4.1)- Opérateur du Pli.....	
4.2)- Concepts paramétrables du Pli.....	
4.3)- Un algorithme pour le Pli.....	
4.4)- Deux modèles : Pli, Plisser.....	
4.5)- Validation de l'outil.....	
5) Conclusions et Perspectives.....	
6) Bibliographie.....	
6.1) Références bibliographiques.	
6.2) Web graphie.	
6.3) Références images.	

## 1 ) Introduction, contexte de la recherche.

Les avancements et besoins d'une pensée numérique puissante et présente, ont stimulé depuis quelques années le développement et l'implémentation de nombreux CAD softwares pour le design. Leur élaboration a conceptualisé une connaissance et un savoir faire dans la forme des outils génériques ; (modélisation, animation, représentation, simulation et calcul des scènes 3D ou 2D). Ces outils font partie actuellement des processus de conception dans diverses aires de production.

Nos architectures n'échappent pas à cette réalité émergente qui nous entoure et qui nous propose de nouvelles façons d'agir. Dès les architectures, les plus classiques ou standard jusqu'à celles dites non standard<sup>1</sup>, se servent actuellement de ces outils pour réaliser des expériences exploratoires et pour concrétiser numériquement des idées ou images préconçues par le concepteur. Dans ce processus de morphogenèse numérique, on peut décrire et nommer certaines approches opératoires basées sur les concepts et les outils de conception qui les définissent, créant ainsi quelques typologies d'architectures possibles.

Dans ce travail, on collabore à la création de nouveaux outils pour la conception architecturale. On propose ainsi l'élaboration d'un outil spécifique pour la génération de formes numériques 3D sur une surface. On le nomme « PLIER ». L'approche vise d'abord l'encadrement de l'outil au sein d'une typologie des opérateurs existants pour la conception, comprenant ainsi les concepts qui soutiennent telles géométries. On développe ensuite des parties consacrées à la sémantique, la morphologie et l'expérimentation tactile du pli. Finalement on présente un modèle pour l'opérateur et l'on valide au moyen d'une modélisation 3D.

Ainsi, par le biais de ce travail, on effectue une révision générale des nouvelles méthodologies opératoires qui entourent le paysage de la conception numérique et on propose un outil spécifique de modélisation qui appartient à l'une des typologies préalablement définies.

## 2 ) Problématique et objectifs.

Conception et Outils

Objectif : Elaboration d'un outil numérique pour la modélisation 3D.

Aujourd'hui nos environnements numériques et leurs outils ne nous font pas seulement penser à ce qu'on conçoit comme produit final. On réfléchit également aux outils mêmes et aux processus de conception qui sont à l'origine de ces éléments conçus. On réfléchit au < *comment faire* > et aux implications d'un tel engagement. Le potentiel génératif, itératif et paramétrique offert par les outils numériques nous ouvre une dimension d'exploration. On peut faire une révision et un constat des états de l'objet face aux incertitudes existant pendant le processus de conception architecturale.

---

<sup>1</sup> Les standards changent : ainsi, un standard dans tel domaine apparaîtra comme un non standard dans un tel autre. On propose une limite à l'usage du terme « non standard », non standard étant alors pris comme ce qui est « en dehors du paradigme dominant ». *Burry M, Architectures non standard, p42, 2003.*

Dans ce travail, nous élaborons un outil numérique (Plier), encadré par la thèse des opérateurs morphosémantiques (Wetzel et al, 2005). *Un opérateur morphosémantique est identifiable à travers des verbes d'action comme étirer, dilater, tordre, pousser, plier... Ces verbes connotent des actions physiques attachées aux formes et renvoient... à des idées ou des références formelles que l'architecte atteindre à évoquer. Les opérations morphosémantiques sont des actions sur la forme qui traduisent ce savoir-faire gestuel. Elles sont généralement composés de plusieurs opérations géométriques dotées d'un ensemble de paramètres (axe, angles, portée...) pouvant être évalués afin de produire des résultats différents. Les opérateurs sont des compositions d'opérations géométriques élémentaires (rotation, translation, union...) manipulées par les utilisateurs comme des fonctions intégrées qui leur confèrent leur sens.* (Wetzel et al, 2005)

Ainsi, cette proposition cherche à comprendre et par la suite définir quels sont les concepts et paramètres mis en jeu pour la construction d'un modèle pour l'opérateur « **plier** ». La démarche de ce mémoire repose sur deux étapes principales : un corpus d'étude et un modèle pour l'opérateur comme résultante. Dans notre corpus d'étude, on définit d'abord différentes typologies d'architectures numériques afin d'encadrer notre opérateur, «**Définitions des Architectures Numériques** », pour ensuite expérimenter, parmi des logiciels et outils existants, quelques opérateurs qui pourraient développer diverses formes de plissage, «**Opérateurs existants pour un Pli Paramétrique** ». On présente aussi une partie liée au sens « **Sémantique** » du pli (*pli, plisser, froisser*) qui essaie de rapprocher divers points de vues et significations du terme plier ayant pour objectif une compréhension ample et commune. La partie des « **Exemples Morphologiques** » s'enquête sur la pertinence de l'outil parmi quelques exemples construits dont le pli aurait été l'une des opérations possibles pour leur conception. Finalement la dernière, « **Expérimentation Tactile** » a été construite à partir des expériences matérielles du pli sur une surface de papier.

La procédure d'approche vers notre objectif se structure donc autour des rapports entre une analyse des cas d'état du pli existants dans notre monde et une analyse de l'expérimentation tactile du pliage dans la gestuelle, dans l'action même de plier. L'opération « **plier** » vue comme état statique conçu et vue comme processus dynamique.

Cependant on souligne qu'afin de cerner le champ de recherche et concrétiser un outil, (au minimum en forme conceptuelle) notre démarche définit une surface planar comme entité d'analyse et d'application opérationnelle. De même, la composante des phénomènes physiques liée à la matérialité de l'élément plié, n'a pas été mise en question, en lui considérant un ensemble de paramètres plus complexes, qui dépassent le temps et la portée de ce travail. *La forme résultante du pli est composée du pli comme concept, mais aussi de la structure physique matérielle où on l'a généré.*

On pense à la surface pliée, conçue comme un <espace-surface> au delà d'une surface enveloppe. On réfléchit aux capacités morphologiques d'une surface, dont le pli peut générer une continuité dans l'espace et dans la structure construite du support. On infère en conséquence « **un outil qui peut gérer la continuité dans une surface à partir des inflexions locale** ».

### 3) Corpus d'étude / Etat de l'Art. Recherche documentaire et Analyses

#### 3.1) Définitions des Architectures Numériques.

Une architecture numérique fait référence aux processus de conception et de transformation d'une forme au moyen d'outils numériques dans un environnement de même nature. Quelques architectures peuvent être ainsi identifiées et nommées en raison aux concepts qui soutiennent leurs formes de génération. (B. Kolaveric, 2000). Une morphogenèse numérique qui rend possible une morphologie numérique.

Dans la conception numérique, on a recours à diverses méthodes, on parcourt un chemin d'essais et d'explorations à travers les outils dont on dispose au moment formel d'une étape de conception. L'idée de décrire certaines approches numériques face aux processus de conception a pour but de montrer diverses opératoires au dessous un même système ou organisme de conception, (soit dans ce cas un organisme numérique, l'ordinateur) et encadrer notre opérateur dans une typologie

#### **Evolutionary Architecture.**

L'« Evolutionary Design » a constitué l'un des axes-concepts les plus attirants et les plus avant-gardistes dans le champ de la conception architecturale durant la dernière décade. Son application comprend l'utilisation de diverses techniques de simulation d'intelligence artificielle AI, afin de générer toute une gamme de solutions. La méthodologie d'une architecture évolutionnaire consiste à utiliser l'algorithmique comme mécanisme de croissance et d'optimisation d'un univers des solutions spatiales innovantes et en accord avec les règles implémentées dans l'algorithme. Cette approximation, basée sur le modèle néo-darwinien, combine les idées de la théorie génétique de Mendel avec celles de l'évolution de Darwin, exprimant ainsi le processus d'évolution naturelle. (E. Lyon, 2004)

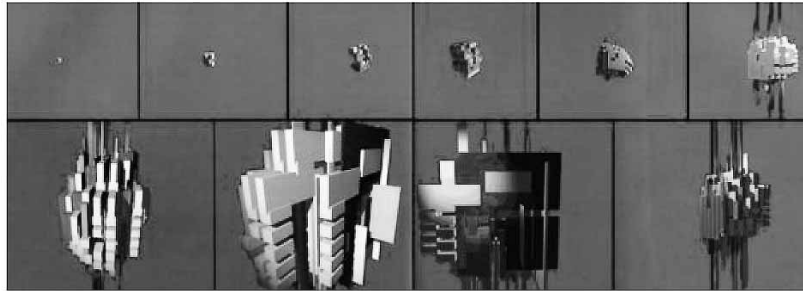
Dans l'architecture évolutionnaire de J.Frazer (1995) les concepts architecturaux sont exprimés comme des règles génératives, décrits dans un langage génétique qui produit, selon un code script, des instructions pour la génération de formes. Le développement peut être accéléré ou testé au moyen de modèles numériques qui simulent leurs performances dans des environnements numériques. De nombreuses étapes d'un processus peuvent être générées dans une période de temps réduite ayant pour résultat des formes complètement inattendues. (B. Kolaveric, 2000)

#### **Algorithmes Génétiques**

Les algorithmes génétiques ont été introduits en 1975 par J. Holland. Les premières recherches les concernant avaient été mises en relation avec les fonctionnements des systèmes naturels ou artificiels, mais aujourd'hui leurs applications ont été répandues et amplifiées dans diverses aires concernant principalement l'optimisation des solutions existantes.

Les algorithmes génétiques sont appliqués à une population initiale d'individus, chacun d'entre eux incluant un génotype et un phénotype correspondant. Les phénotypes sont des collections de paramètres et les génotypes sont des versions codées des phénotypes.

Chacun des paramètres codés est dénommé par un gène. Une collection de gènes constitue un génotype qui normalement représente un string. Dans le processus évolutionnaire, les artifact-génotypes combinent leurs structures, produisant de nouvelles versions (entités), lesquelles seront sélectionnées à partir d'un concept de fitness. (E. Lyon, 2004)



*Fig\_01.J Frazer The form Generator Model.*

### **Neural Networks**

Dans le champ de la conception architecturale, on peut représenter conceptuellement les réseaux neuronaux comme des collections d'entités qui possèdent une fonction définie ou par des éléments procéduraux qui peuvent être activés afin de produire une action, dans ce cas morphologique. Par exemple, la réplique du mouvement d'une foule dans un espace défini, en utilisant des algorithmes AI, permet la définition de paramètres qui peuvent être réutilisés dans une simulation de comportement entre un nombre d'unités qui peuvent représenter des personnes dans une situation définie. La technique simule un ensemble neuronal et son comportement une fois qu'il est activé. Les applications dans l'aire du design dérivent du fait que tout design particulier définit des paramètres uniques qui peuvent être stockés puis testés. (E. Lyon, 2004)

Les réseaux neuronaux représentent un système capable d'apprendre, qui met en œuvre un principe d'induction, un apprentissage par l'expérience. Par confrontation avec des situations ponctuelles, le réseau infère un système de décision intégré dont le caractère générique est fonction du nombre de cas d'apprentissage rencontrés et de leur complexité par rapport à celle du problème à résoudre. (wikipedia)

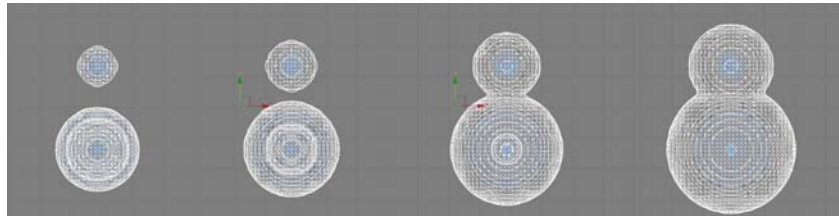
### **Shape Grammars**

Shape Grammars a été utilisé pour analyser et décrire les formes du design et de même pour produire les variations d'une forme basée sur la même grammaire. Une grammaire des formes est constituée par shapes, labels, shape rules et une initial shape. Les shapes rules modifient la forme initiale puis les opérations successives au moyen des shape rules (règles de grammaire) qui produisent des designs. Les règles de composition déterminent quelle forme (ou shape) doit être substituée et de quelle façon elle le sera.

## Architecture Isomorphe

Le blobs ou metaballs représentent des surfaces isomorphes. Ce sont des objets anamorphes composés d'une part par l'assemblage des conditions paramétriques propres à chacun des objets en jeu et constitués d'autre part par les forces internes entre les masses des objets y compris. Il existe ainsi des champs ou régions d'influence qui peuvent se présenter de façon additive ou soustractive. La nouvelle géométrie est construite par le calcul des aires d'influence entre les parties comprises des objets et se modifie en fonction des variations d'intensité et à l'endroit spécifique de l'application.

Les surfaces isomorphes ouvrent un autre univers formel où les formes produites peuvent varier en base aux aires et facteurs d'influence. Les objets interagissent au lieu de simplement se superposer dans l'espace et deviennent connectés par une couture isomorphe qui rend possible la nouvelle géométrie. (B. Kolaveric, 2000)

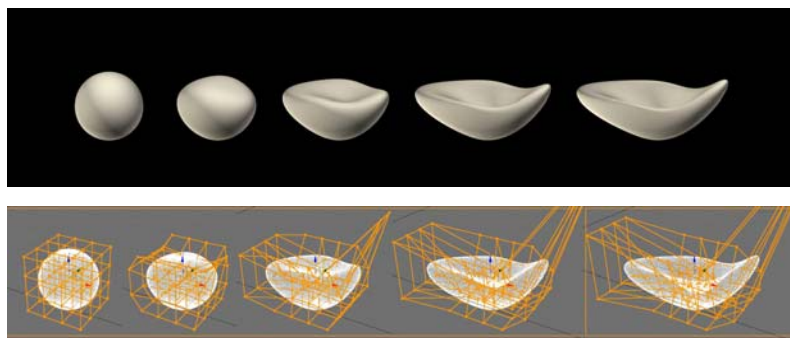


*Fig\_02. Isomorphic Surfaces.*

## Architecture Métamorphique

La génération des formes métamorphiques inclut diverses techniques, telles que Keyshape animation, des déformations par bounding box, (*lattice ou FFD deformers*), spline curves ou path animation deforms pour dire quelques unes.

Les formes géométriques sont obtenues à partir des états intermédiaires ou changements dans la morphologie des objets et en fonction de l'application des techniques précédemment dites. Dans l'exemple d'une keyshape animation, les changements dans la géométrie sont stockés comme keyframes (*keyshapes*), puis on calcule par ordinateur les morphologies entre états. Une architecture métamorphique est celle qui a été modifiée dans sa structure en subissant un processus de métamorphisme numérique. (B. Kolaveric, 2000)



*Fig\_03. Metamorphic surfaces.*



## Architecture Animée

En 1999, Greg Lynn fut l'un des premiers architectes qui tenteraient les capacités des logiciels d'animation (softwares animations) comme outils pour la génération de formes ; au delà des représentations d'images de synthèse. Selon G. Lynn, une Architecture Animée se définit par la co-présence des mouvements et des forces au moment formel de la conception. Une force comme condition initiale devient la cause d'un mouvement et d'une inflexion particulière de la forme physique. L'énergie d'un mouvement ou d'une force implique une action et l'animation dans le temps une évolution. Il y a donc des rapports entre formes, forces, mouvements, espace et temps, qui donneront une qualité particulière à l'objet conçu. Dans ses projets, Lynn a utilisé tout un répertoire de techniques de modélisation animée, telles que l'animation par clé, cinématique et cinématique inverse, champs de forces dynamiques et émission de particules.

Dans l'architecture animée, les phénomènes cinématiques et dynamiques sont calculés en termes mécaniques réels, ils sont physiquement simulés. La cinématique pour étudier le mouvement d'un objet ou d'un système hiérarchisé des objets enchaînés prend en compte les propagations et transformations dans l'ensemble. La dynamique pour considérer les effets des forces et des mouvements aussi externes aux objets.

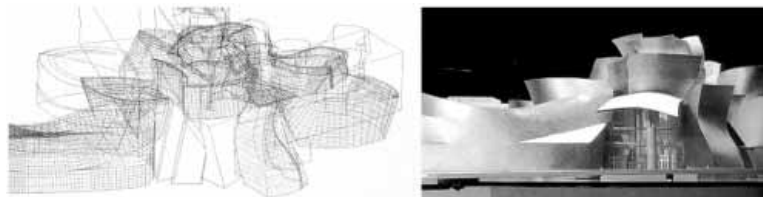
Les propriétés physiques telles que masse, densité, élasticité, statique, friction peuvent être définies, gravité, vent ou vortex peuvent aussi s'appliquer. Enfin, la détection des collisions ou obstacles (*deflectors*) est dynamiquement calculée et simulée par l'ordinateur. (B. Kolaveric, 2000)



*Fig\_04. Animate Architecture. Lynn`s Port Authority Bus Terminal , New York. Exemple de l`utilisation de systèmes de particules afin de visualiser les variations dans les champs d'attraction présents dans le site, à partir des forces associées au flux de mouvements des piétons, voitures et buses.*

## Architecture Topologique

Le point de départ d'une architecture topologique est la représentation des volumes de la géométrie euclidienne, (soit par maillages *poly\_surf*, *subdivision\_surf*) et l'utilisation extensive des géométries NURBS, (*non-uniform rational B-splines courbes et surfaces*) dans l'espace cartésien afin de définir un objet quelconque. Dans l'espace topologique, la géométrie est représentée par des fonctions paramétriques explicites qui décrivent l'objet en termes de faces, arêtes, sommets, *control points*, *weights* et *knots*; ceux qui permettent une gamme de possibilités opérables. En modifiant la place géométrique des diverses parties topologiques d'un objet, on produit une diversité de courbes et de surfaces ou volumes qui pourraient définir l'élément différemment ; tant au niveau plastique que spatial. L'objet conçu est produit à partir des opérations directes de l'utilisateur sur la topologie. (B. Kolaveric, 2000)



*Fig\_05. Topological Architecture Gehry`s Guggenheim museum, Bilbao*

## Architecture Paramétrique

Une architecture paramétrique est celle où les parties d'un modèle sont paramétrées à partir des structures externes paramétrables déclarées sur l'objet; ou par des objets pré-conçus par des paramètres (ex : *librairies paramétriques*). L'opération dans cette géométrie de formes ne modifie pas directement les niveaux topologiques un par un, (*faces, arêtes, sommets, control points, weights et knots*), mais intervient d'abord sur l'ensemble ou sur une partie définie d'un volume ou d'une surface. En modifiant les paramètres, l'objet peut basculer dans un autre élément complètement différent.

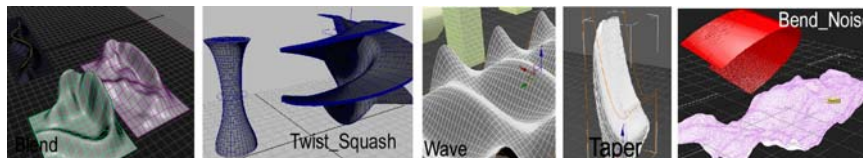
Des équations peuvent décrire les relations entre les objets, définissant ainsi des géométries associatives; des interdépendances sont établies, puis des comportements et des transformations définis. On a la capacité de configurer ou reconfigurer les relations géométriques en fonction des valeurs spécifiques. (B. Kolaveric, 2000)



Fig\_06. Parametric Architecture : Marcos Novak's, *algorithmic spectaculars*

Une architecture paramétrique peut aussi se servir d'une description procédurale algorithmique de sa géométrie. Dans « *Algorithmic Spectaculars* » M. Novak (1996) construit des modèles mathématiques et des procédures génératives de géométries, qui sont soumis à de nombreuses variables. Les explorations de Novak concernent plutôt la manipulation des relations et les champs d'influence entre les objets au-delà de la manipulation même d'un seul élément. Une architecture paramétrique n'implique pas nécessairement le développement des géométries prédictibles ou stables. (B. Kolaveric, 2000)

Les modificateurs ou *deformers* (nommés selon le logiciel), rentrent dans cette typologie. Ce sont des outils capables de modifier une géométrie et ses propriétés à partir d'une structure externe paramétrable. Des outils tels que *Twist, Bend, displace, Wave, Distortion, Taper, Noise, Wire*, etc... peuvent générer des opérations de transformation formelle dans l'espace et la forme plastique d'un élément 3D; on peut au moyen d'eux donner sens à une morphogenèse paramétrique.



Fig\_07. Opérateurs paramétriques, *Max, Maya*.

Notre opérateur Pli se propose dans le contexte d'une architecture paramétrique. Il nous faudra donc d'abord tester les modificateurs existant comme références d'approximation à l'opération de transformation visée, soit Plier.

## **Bilan Architectures Numériques**

Une architecture numérique propose et produit des changements dans les processus liés au design, à la production et à la construction architecturale. Elle ouvre les portes vers nouvelles incertitudes et questionnements qui pourront trouver réponse, à notre avis, dans des habilités cognitives et perceptuels du concepteur parmi l'application pratique d'un outil. Le pourquoi de penser aux outils numériques comme des outils conçus tant au moyen expérimentiel que théorique.

On peut trouver des semblances entre une Architecture Evolutionnaire et une architecture paramétrique, dans le sens où les paramètres des opérateurs peuvent être modifiés et testés par l'utilisateur produisant une gamme des solutions. Les paramètres représentent une stratégie des restrictions ou permissions pour la conception de notre objet à générer.

Ainsi lorsque les architectures sont forme mais également fonction, les architectures numériques auront toujours besoin d'une stratégie du design pour pouvoir être, ce qui parvient dans une opératoire de conception pour manipuler l'entité à concevoir. Précisément c'est cette stratégie celle qui s'ouvre avec un outil numérique paramétrique morphosémantique.

## 3.2) Opérateurs existants pour un Pli Paramétrique.

Modificateurs / Deformers \_ Max & Maya

Les Modificateurs, Deformers, ou Space warps, (dépendant du logiciel) sont des outils qui permettent la manipulation et le contrôle d'une géométrie et de ses composantes topologiques enchaînées, tant pour la modélisation que pour l'animation. Cette procédure de manipulation s'effectue à partir d'une structure paramétrable externe à l'objet. Un modificateur ou deformer donne ainsi la possibilité de sculpter une géométrie. Il peut changer et modifier les propriétés géométriques d'un objet. Les modificateurs ajoutés à un élément sont stockés dans l'histoire de l'objet, pouvant reconstruire une étape antérieure, ajouter un autre modificateur ou détruire l'histoire de l'objet rendent permanente la transformation géométrique.

On peut appliquer un nombre indéterminé de modificateurs à un objet, mais si on supprime un modificateur, les changements géométriques de l'objet disparaîtront. On a la capacité de copier et coller des modificateurs configurés avec des valeurs déterminées sur un autre objet. Cependant l'ordre d'application des opérateurs modifiera également la forme géométrique finale. Quelques modificateurs opèrent en référence à l'espace universel des coordonnées (World USC system), mais d'autres opèrent directement par rapport au système de référence de l'objet à transformer.

L'action d'un modificateur sur un objet quelconque représente une perturbation dans la structure physique de l'entité. Cette modification s'exerce ou est émise depuis un < émetteur >, lequel est source de perturbation, son influence générant des changements morphologiques dans la surface. **Les Opérateurs ou modificateurs sont des instruments d'action morphologique paramétrables.**

### Classes d'opérateurs.

Unary Operators : Morphologique. / (wetzal et al 2005)

Binary Operators : Composition. / (wetzal et al 2005)

Reproductive Operators : Reproduction.

A) Opérations sur des objets isolés, transformation Morphologique  
Une transformation particulière qui agit sur la morphologie d'un objet.

B) Opérations d'ensemble, composition d'objets.

b.1\_Association d'objets \_ attach objets

b.2\_Isolation d'objets ou parties de l'objet \_ detach objets

C) Opérations de reproduction; soit sur des objets isolés ou sur des ensembles composés.

C.1\_Reproduction linéale \_ multiply , copy, mirror...etc. Array

C.2\_Reproduction aléatoire à base d'un code ou de variables.

L'opérateur plier appartient à la classe des opérateurs unitaires et paramétriques. Les références suivantes correspondent à quelques opérateurs existants qui permettent le développement d'une opération de transformation telle que plier. On analysera leurs limites et leurs avantages.

### 3.2.1) FFD, Lattices\_Deformers

Les opérateurs FFD (*Free Form Deformers, 3dsMAX*) ou lattice deformer (*Maya*) permettent la déformation libre d'un objet quelconque en fonction d'une structure de contrôle qui entoure la forme géométrique à modifier. (*par exemple 3X3, soit neuf points sur chaque côté du treillis*)

Le Lattice deformer ou FFD est lui-même une entité déformable. Pour créer une déformation, soit on édite des points de contrôle du treillis, changeant ainsi leur position, échelle ou rotation, soit on ajoute des modificateurs sur le lattice directement, en obtenant par conséquent une influence ou variation sur la géométrie de notre objet à modifier.

Si bien premièrement cet outil a été conçu pour faciliter les effets de la déformation dans les animations numériques, également et sous l'approche plastique qui mène cette investigation, le FFD ou Lattice deformer présente une puissance conceptuelle et pratique dans le processus de morphogenèse d'une forme. Car il permet la compréhension de l'entité à modifier comme une matrice de sub-entités reliées au niveau topologique par les aires d'influence entre elles, donnant ainsi la possibilité d'une édition partielle et totale d'un objet en fonction un même contrôleur.

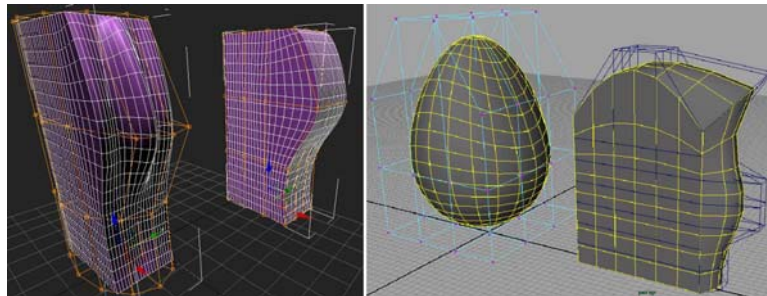


Fig 08. Lattice max, FFD

Lattice maya

#### Interface et Contrôle Géométrique.

- **Points de contrôle** : Sélection et manipulation des points de contrôle du treillis, un par un ou en groupes.

- **Sous objet gizmo, treillis / Lattice** : Matrice des lignes qui relie les points de contrôle en formant une grille, donnant une aide graphique pour comprendre l'action de l'opérateur sur l'objet. Cet élément représente l'opérateur sur l'objet et son aire ou ses points d'influence. On peut positionner, faire pivoter ou modifier l'échelle du treillis indépendamment de la géométrie à modifier, ayant ainsi la possibilité d'appliquer une déformation locale sur un sous ensemble des sommets de l'objet à modifier.

- **Définir volume / Set volume** : On peut ajuster avec plus de précision le treillis aux objets dont la forme est irrégulière, ce qui donne un meilleur contrôle lors des déformations.

- **Dimension du treillis / Lattice shape** : Définit la cardinalité de la structure du treillis sur l'objet dans l'espace X Y Z (ex : 3x3x3 / 2x2x2 / 3x5x2)
- **Base lattice** : L'effet de déformation de l'objet est basé en raison à la différence entre le treillis d'influence modifiable et le treillis de base qui fait référence à la forme initiale de l'objet. On peut afficher ou cacher le volume source.
- **Tension continuité / Local influence s, t, u** : Fait référence à l'intensité dans l'aire d'influence entre les points de contrôle.

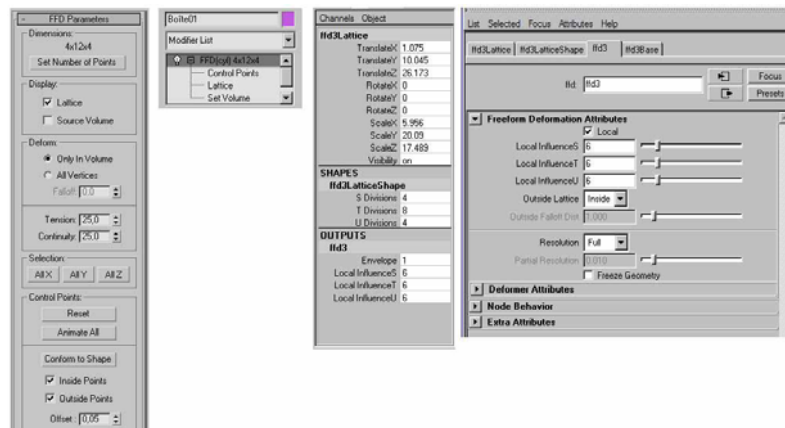


Fig 09. Interface Max (gauche) et maya (Droite)

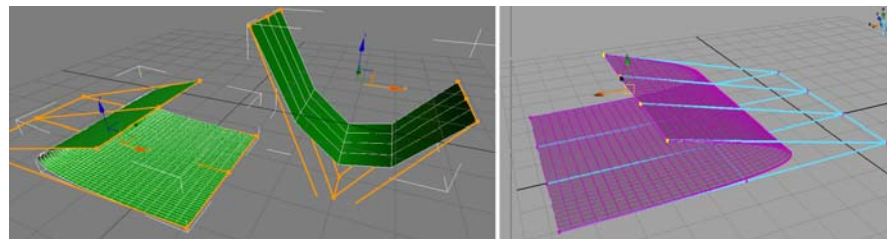


Fig 10. FFD ou Lattice/ Max, Maya

### Bilan\_FFD\_Lattice deformers

- Le lattice nous permet un contrôle direct de la géométrie de l'objet comme entité, introduisant le concept d'influence entre leurs noeuds ou points de contrôle.
- Le volume, source ou base lattice, est créé généralement en base à une forme carrée ou cylindrique, limitant le champ d'expérimentation. Le « treillis » de contrôle pourrait amplifier ses capacités de modification et d'influence sur un objet à partir d'une autre forme de treillis de contrôle initial, *base lattice* (exemple : cercle, sphérique, aléatoire, triangles, pyramides, choix utilisateur, etc.)
- La structure divisible et paramétrable du lattice permet différemment une compréhension décomposée et de même reliée des parties de l'objet à modifier. La structure du FFD donne accès au traitement total et partiel de l'objet.

- On peut seulement sauvegarder les coordonnées de position ( $x, y, z$ ) des points de contrôle, lors d'un processus de création, au moyen des key shapes. Celles on peut les intervenir ou éditer dans le grapheditor. Cependant, on considère qu'afin de pouvoir revenir vers une étape antérieure dans le processus, il existe d'autres outils complémentaires qui pourraient être développés.
- Le lattice s'approche du pli dans le sens d'une opération de courbure d'un élément.
- Le lattice pourrait présenter l'option d'adopter directement une forme géométrique réduite de l'objet à modifier, facilitant ainsi la manipulation de l'objet.
- Le Lattice ne permet pas le plissage droit ou linéal. Si on essaie de plier à partir des points de contrôle, le pli est courbe et déforme l'entité à plier. (Voir, Fig. 10)
- L'opération avec le FFD déforme la dimension physique d'une surface. En effectuant l'opération, la géométrie de l'objet est allongée ou superposée selon la situation.
- Il y a toujours un rapport entre la densité du maillage et la qualité de définition du pli. Dans une surface plus dense le pli est plus adouci par la surface. (Voir, Fig. 10)

### 3.2.2) Bend, Courbure \_Deformers

Le modificateur Bend ou Courbure vous permet d'incurver un objet jusqu'à 360 degrés sur un seul axe. Ce qui produit une courbure uniforme dans la géométrie d'un objet dépendant de la densité du maillage de l'objet. L'opérateur bend est utile tant pour l'animation que pour la modélisation. On peut contrôler l'angle et la direction de la courbure sur chacun des trois axes. On peut également limiter la courbure à une section de la géométrie.

#### **Interface et Contrôle Géométrique, Graphique**

- **Gizmo sous-objet** : On peut transformer et animer le gizmo comme n'importe quel autre objet. La translation, la rotation et la mise à l'échelle du gizmo s'effectuent par rapport à son centre.
- **Center sous-objets** : On peut repositionner et animer le centre, ce qui modifie la forme du gizmo Courbure et celle de l'objet incurvé.
- **Angle curvature** : Définit l'inclinaison de l'angle par rapport au plan ou axe vertical. On peut modifier la valeur de l'angle à travers le panneau déroulant.
- **Direction** : Définit la direction de la courbure par rapport au plan horizontal.

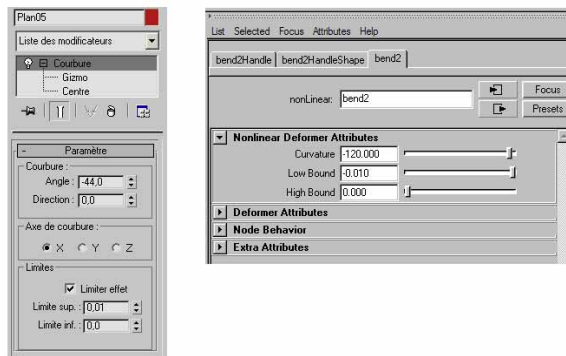


Fig 11. Bend / panneau déroulant Max, (gauche), Maya(droite).

- **XYZ** : Spécifie l'axe à courber. L'axe est local au gizmo Courbure. En maya on exerce une rotation directement sur le gizmo pour spécifier l'axe à courber.

- **Limite supérieure** : à partir du point central de la courbure, la borne supérieure au-delà de laquelle la courbure n'affecte plus la géométrie.

- **Limite inférieure** : à partir du point central de la courbure, la borne inférieure au-delà de laquelle la courbure n'affecte plus les formes géométriques.

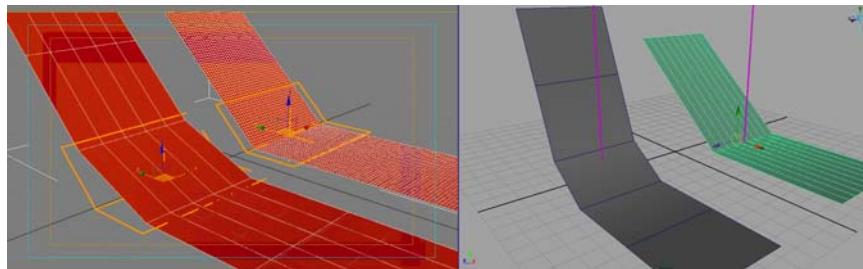


Fig 12\_A. Bend / Max maya

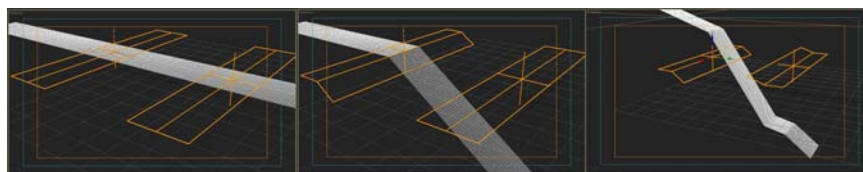


Fig 12\_B. Bend / Max

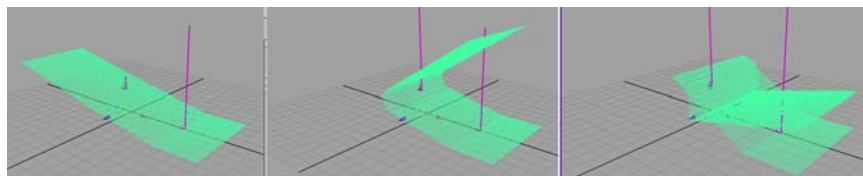


Fig 12\_C. Bend / maya



### **Bilan\_Bend\_Courbure deformers**

- L'opérateur ne modifie pas le niveau topologique de l'objet transformé (Fig 12\_A). Si on veut développer un pli linéal, on doit d'abord changer la densité du maillage de la surface, et positionner l'opérateur sur une arête existante de la surface.
- Avec Bend beformer le pli ne se développe pas comme un outil intuitif, ses caractéristiques générales dénotent d'abord de la compréhension de l'opérateur pour la courbure d'un volume.
- L'opérateur ne permet pas de changer l'angle du plissage directement dans l'interface écran viewport avec le gizmo. Il faut le faire dans le panneau déroulant. On pourra développer l'opération morphologique directement sur l'objet dans l'Interface utilisateur- objet - viewport.
- L'opérateur se présente comme un opérateur général de courbure, ses capacités sont limitées par rapport à une opération spécifique de plissage.
- Le gizmo ne maintient pas son alignement sur la surface à modifier. Si on applique plusieurs opérateurs bend sur une surface et qu'on commence à les plier un par un, ils ne restent pas alignés sur la surface à plier, ce qui produit des transformations non souhaitées. (Fig 12\_B et C.)
- La qualité du plissage obtenu dépend des niveaux et de la densité topologique de l'objet.
- L'opération bend déforme la dimension physique d'une surface. En effectuant l'opération, la géométrie de l'objet est allongée, superposée ou contractée selon la situation.

### **Bilan Opérateurs.**

En général quand on procède au moyen d'opérateurs paramétriques, on génère un objet de contrôle et de représentation de la transformation, le « Gizmo-deformer » qui est capable de conduire la déformation. Il représente le point, le volume ou la surface d'émission de l'opération « émetteur ». Il apporte une aide graphique visuelle à l'utilisateur, afin de comprendre ce qui se passe autour de l'objet modifié. Il permet une relation et une interaction directes avec le panneau déroulant pour paramétrer les aires d'influence et la valeur d'incidence de la transformation de notre objet. Les opérateurs suivent toujours une relation directe avec la topologie de l'objet à modifier, on ne travaille donc pas avec une pâte à mouler. On pourrait amplifier leur portée, en ayant la possibilité de redéfinir les niveaux topologiques de l'objet à transformer, et avec une option de configuration aléatoire de ses paramètres de contrôle donnant ainsi l'opportunité d'obtenir une forme non préconçue.

Un outil pour historier les états des objets dans le processus de conception serait également utile, car la pile ou le noeud des transformations acquis par l'objet, et représenté dans le panneau déroulant, n'est plus qu'une accumulation des actions sur l'objet. Cette pile ne permet pas de sauvegarder les paramètres particuliers qui ont sculpté une forme déterminée à un moment donné.

Finalement on fait mention de quelques concepts pour la construction de l'opérateur :

- < Gizmo\_objet > UCS universal < Gizmo\_deformer\_objet > UCS local
- < Émetteur > (Point, Surface, Volume) < Axe central géométrique > < Limites d'action >
- < Points, ou aires d'influence > < Points, ou aires de contrôle > < Option Aléatoire >
- < Centre géométrique >

### 3.3) Un Sémantique du Pli. *Pli, Plier, Plisser, Froisser.*

Vers une compréhension commune

#### Pli :

- A. Double épaisseur obtenue en rabattant sur elle-même une matière souple.
- B. *Couture* / Double épaisseur de tissu disposée d'une manière déterminée et maintenue par des points de couture ou par repassage.
- C. Ondulation, mouvement sinueux que présente un tissu flottant ou trop ample.
- D. *BEAUX-ARTS* / Représentation plastique des sinuosités d'une draperie.
- E. [Le suj. désigne une pers.] (Avoir, prendre...) un pli, son pli; prendre le pli de (qqc.), de (faire qqc.). Adopter un comportement, une attitude morale, et ne plus en changer.
- F. *GÉOL.* Déformation des couches de terrain résultant de la contraction de l'écorce terrestre, et présentant des courbes de niveau.

#### Plier :

- A. Rabattre une chose souple contre elle-même, mettre en double une ou plusieurs fois.
- B. Courber une chose flexible.
- C. Rabattre l'une sur l'autre, les parties d'un ensemble articulé.
- D. Rapprocher les parties articulées (d'un objet, d'un ensemble) en les rabattant les unes sur les autres.
- E. Courber fortement une chose flexible au moyen d'une charge ou en exerçant une pression.
- F. Se courber, s'incliner (sous l'effet d'une pression, d'une charge).

#### Plisser :

- A. Couvrir de plis. Modifier une surface souple en y faisant un arrangement de plis.
- B. L'idée d'une déformation sans déchirure d'un élément ou d'un ensemble. [Le compl. désigne un tissu, un habit] Faire des faux plis (à quelque chose).
- C. Former des plis, une série de plis dans (un tissu); en partic., en les couchant dans le sens voulu puis en les marquant par la pression des doigts, en les maintenant par une couture ou par un repassage.

#### Froisser :

- A. Écraser (en général par pressions successives) au point de provoquer une déchirure. (endommager par frottement ; vexer)- froisser du papier, un tissu.
- B. Froissable,. Qui est susceptible d'être froissé, de se froisser. Caractère de ce qui est froissable. La froissabilité d'un tissu.

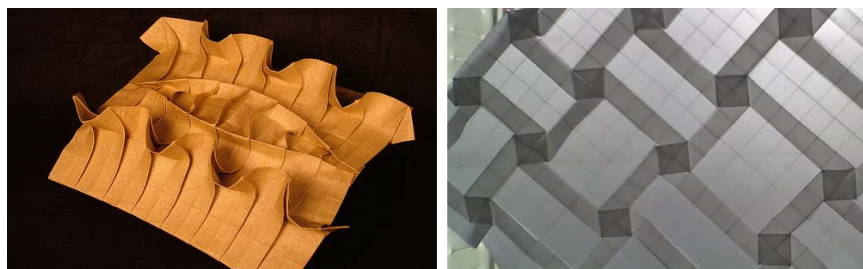
Source : <http://www.cnrtl.fr/lexicographie> (Centre national de ressources textuelles et lexicales)

#### Pli / Plier / Plisser / Froisser

Pli, énergie et action sont mis en forme ou en situation. Si on se réduit au pli, plisser et froisser, afin de représenter une ample gamme des synonymes et concepts qui pourraient être associés en donnant sens au terme de plier, les deux premiers aspects qui les différencient sont, d'une part leur cardinalité, et d'autre part, leur représentation formelle. Cependant, dès l'unité d'un seul **pli**, en passant par l'ensemble organisé dans le fait de **plisser**, jusqu'à l'aléatoire d'un **froissement**, on trouve également un trait dominant. Il est que le pliage en tant que concept présente la *résistance d'être traduit et compris dans un seul sens. Plus précisément, ce sont les manipulations formelles et sémantiques du pliage, celles qui incorporent des forces et des éléments externes divers dans sa figure résultante. Permettant une représentation physique ou situationnelle, également résistante d'être défini* ou encadré dans un seul point de vue; d'une seule façon. (G.Lynn, 1993, *Folding in Architecture*)

On trouve des plis partout : papier, métal, tissus, peau, pâte, feuilles, plastique, bois, béton, roches...etc. Le pli est une articulation entre parties différentes, mais adjacentes. « *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, les uns plus petits que les autres, sans que le corps se dissolve jamais en points ou minima* »...« *L'unité de la matière, le plus petit élément du labyrinthe est le pli, non pas le point qui n'est jamais une partie, mais une simple extrémité de la ligne....Le dépli n'est donc pas le contraire du pli, mais suit le pli jusqu'à un autre pli* » (G. Deleuze, 1988) . Il nous renvoie aux changements fluctuants d'une continuité, aux capacités plastiques et élastiques de la matière, dont un caractère de souplesse tant linéal que courbe, peut se représenter dans le corps où il a été conçu.

Si on pense à la **musique** et le **pli**, le pli est accent, beat, mais il pourrait devenir rythme, plisser, dans la répétition d'un ensemble, et aussi arythmie dans le fait de froisser. Une espèce de géométrie musicale. La musique parfois est non seulement riche en autosimilarités mais aussi chaotique, donc elle devient également plissée. En permanence et dans une continuité répétitive les plis de la musique reviennent sur eux-mêmes. Ces plis et replis des mélodies construisent une richesse des mélismes dans la musique. Par exemple, la fugue dans le baroque et également des nombreuses musiques contemporaines, techno rave ou populaires, révèlent davantage une structure plissée des rythmes dans lesquels deux ou plusieurs mélodies musicales s'entremêlent dans l'imitation ou la réitération de différentes tonalités et temporalités.



*Fig 013 \_ Expérimentation origami*

En **origami**, on pourra interpréter telle organisation continue de plis comme une symphonie morphologique rangée d'une façon particulière, donnant forme à une représentation géométrique déterminée. Une **histoire** se déplie : il y donc un avant et un après, un passé et un avenir. Puzzle linéaire ou anachronique, une énigme explicite. L'histoire d'une chose n'est pas différente de son processus. On peut comprendre l'histoire au moyen du processus et on peut revoir le processus grâce à la compréhension de l'histoire.

En **géologie**, le terme est lié aux formes de la surface terrestre. *Un pli est une structure courbe issue d'une déformation ductile anisotrope de la roche. La connaissance de la forme avant la déformation (histoire) permet de la quantifier. Le cas le plus simple est le pli de roches sédimentaires, dont la structure et les marqueurs sont planaires avant la déformation<sup>2</sup>.*

<sup>2</sup> Pli Géologie, wikipedia. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pli> Une surface plane courbée admet localement un arc de cercle pour description. L'inverse de ce rayon est nommé ici courbure de la surface. Plus cette surface est proche d'un plan, plus sa courbure est faible et plus le rayon du cercle associé est grand. Cette définition correspond à la notion de courbure. Ainsi la courbure de la terre est plus faible que la courbure de n'importe quel pli observable. La région du pli où la courbure est maximale est la charnière du pli. Les régions de courbure minimale, situées de part et d'autre de la charnière sont les flancs du pli. Dans le cas d'un pli dans une roche sédimentaire, les charnières de chaque couche définissent un axe du pli sur une coupe. En volume, ces axes définissent un plan axial du pli. Dans un pli, le sens de la courbure est donné par la direction de sa

*Le pliage géologique n'utilise ni l'agitation ni l'éviscération mais une souple superposition des couches (G.Lynn, 93). Il génère de multiples strates superposées, qui par compression et expansion deviennent lentement pliées et compactées, produisant la sédimentation des éléments minéraux.*

Ce fait produit la morphogenèse d'une tectonique, dont les forces internes de la terre modèlent les formes géographiques du plissage terrestre, donc nos paysages. (falaises, plateaux, baies, caps, golfes, chaînes, vallées etc....) « *Les plis sont des accidents tectoniques, c'est-à-dire des déformations affectant la croûte terrestre. Aussi sont-ils plus connus, à tel point que l'on parle généralement de « chaînes plissées » pour désigner les chaînes de montagnes, dont ils déterminent la structure et la morphologie* »<sup>3</sup>

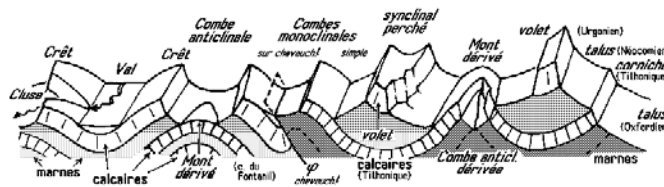


Fig 014 \_ Plis géologiques, une roche (gauche) Typologie des plis géologiques.



*En Couture tout comme en Architecture, plier et couper sont deux gestes indissociables et correspondent au fait de cacher en minimisant ou agrandissant des surfaces connotés. Selon G Bammes, le pli est de tradition artisanale et d'importance pour la sculpture occidentale et la représentation plastique, car elle est l'expression de l'individualité et des facteurs d'ordre. Une coupe, une césure est quelque chose d'irrévocable tandis que le drapé offre toujours de nouvelles possibilités. Par le jeu conjugué des deux, on peut à souhait envelopper un corps, le décrire, c'est-à-dire le façonner et le transformer. (Lehmann E, 2007)*



Fig 015 \_ Plis en Couture.

*Pour réaliser des plis avec un matériau et pour les représenter, on doit, comme le dit G Bammes, tout d'abord en décoder les normes. Un pli dépend toujours des influences externes, plus exactement du corps et de sa position en raison des forces exercées (Tension - Pression).*

---

convexité. Ainsi, une Antiforme a sa convexité vers le haut et une Synforme a sa convexité vers le bas. Les expressions anticlinales et synclinales désignent des antiformes et des synformes dans des roches dont on connaît l'âge relatif des couches.

<sup>3</sup> Pli Géologie, wikipedia. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pli>

Dans des matériaux plus malléables, les points fixes (plus élastiques) déterminent et réduisent les plis comme un seul, en entretenant une force reconstructrice propre à leurs capacités plastiques. De cette façon, le pli conserve un équilibre structurel tout en repositionnant les parties compromises d'un élément ; le pli pourrait ainsi être considéré entropique dans le sens d'une transformation d'énergie géométrique des parties d'un élément.

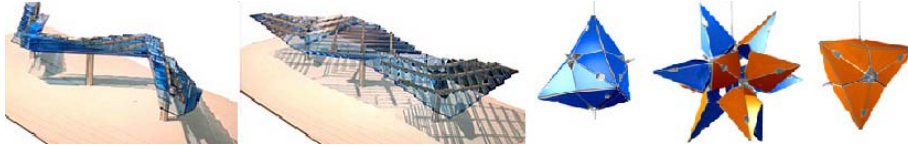
*De tout temps, nous trouvons toutes sortes de plis, les plus divers. Les problèmes rencontrés pour comprendre exactement les différentes sortes de plis sont dus, d'une part à la représentation (Spatio - Corporelle), d'autre part au rendu du modèle ( jeu d'ombre et de lumière). De plus, les rapports sont d'une grande importance : Devant / derrière, largeur/ longueur / hauteur, pliage/ gonflement (bouillonnement). Ceux-ci forment une unité expressive comme les lignes de mouvements des actions d'un dessin animé, qui reposent sur le corps, l'habit, l'espace et l'entre deux, le vide. Ainsi, le pli est un mouvement spatial, temporel et matériel allant du fluide au solide, un procédé mental, une unification des parties féminines et masculines, ce qui rend le pli androgyne. (Lehmann E, 2007)*

Dans **notre vie** quotidienne, nous plions les choses souvent pour qu'elles prennent moins de place. Nous voulons qu'elles prennent moins de place, soit pour les ranger afin d'agrandir notre surface habitable, soit pour être transportées plus facilement. Dans **notre vie**, en tant qu'êtres sociaux, le concept d'un pli, d'une inflexion, d'une courbure semble être une manière de prendre le contre-pied des conventions, des situations. Plier peut être associé dans le langage courant à deux attitudes : résister d'une coté et forcer le destin de l'autre, tordre le cou aux conventions par exemple. Le pli induit donc un rapport de forces, une réorganisation des forces. Il s'agit peut être d'abord du sens de l'énergie et de contraintes qu'imposent toute implication humaine. Un pli peut signifier également une déformation ou l'inflexion de principes ou règles déjà établis. Plier renvoie donc aux limites autant qu'aux possibilités que peut connaître telle ou telle autre situation, artistique, politique, scientifique,... etc. (E.cliquet, 2007.)

En **Architecture**, plusieurs mots basés sur le concept ou le fait de plier, tels que - pli, plisser, fléchir, infléchir, tresser, froisser, chiffonner, plicatile, plica, courber, courbure, souple, ployer, replier, déplier..., pour n'en nommer que quelques-uns, peuvent être appelés pour décrire une sensibilité architecturale des connexions intensives entre espaces, situations et événements divers. Le pli comme concept rassemble une multiplicité de connexions locales à l'intérieur d'un système continu qui reste ouvert aux fluctuations. Les termes sont ainsi constructifs, spatiaux et structurels dans la continuité de leurs actions morphologiques.

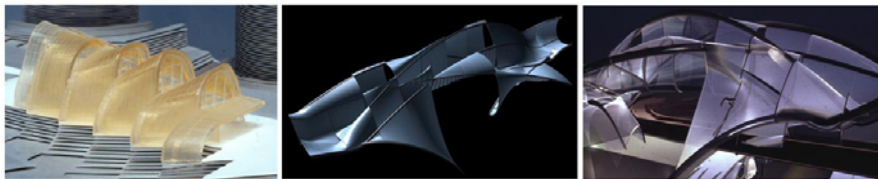
G. Lynn fut l'un des premiers pionniers en matière de plis, exigeant un dialogue entre le bâtiment et son contexte. Par la possibilité d'adoucir (smooth) les objets, il arrive à articuler ses liaisons. C. Hoberman penche au contraire vers le dépliage. Il ne s'agit pas d'un état gelé mais d'un processus de transformation cinétique. Ses constructions sont à la fois stables et mobiles, en partant d'un système compact avec une articulation ou des charnières à des constructions de planche ou plaque ou encore de coupole. On a affaire à des structures très économes car elles sont faites à partir de pièces identiques dont la rigidité est déduite par la forme. (Lehmann E, 2007)

*Opérateurs Morphosémantiques; Elaboration d'un outil pour la conception de formes numériques.*



*Fig 016 Chuck Hoberman Responsive architecture: Adaptable sunshade development in 2006 for the Building Centre Trust in London..(gauche) Mobile structure design.(droite) "Tetrahedron" at the Papagayo Children's Interactive Museum, Tabasco, Mexico: It begins as a three-sided pyramid, or tetrahedron, that is orange. It then unfolds and expands into a twelve-pointed star, having a span of five meters. As it continues to transform, it folds into a second tetrahedron that is blue.*

*Selon Lynn, s'il y a un effet produit par le pli dans l'architecture, ce sera la capacité d'intégrer des éléments indépendants dans un nouveau mélange continu. Une sensibilité du pli dans l'architecture valorise des alliances au-delà des conflits entre éléments, impliquant d'abord une flexibilité interne, puis une dépendance aux forces externes qui les définissent. Ainsi, à la différence d'une architecture de contradictions, superpositions et collisions accidentelles, un système pliable possède la capacité de créer des raccordements non prévus parmi des éventualités contextuelles, culturelles, selon divers programmes, structuraux et économiques. (G.Lynn, 93)*



*Fig 017 \_ G.Lynn\_Hydrogen pavillion Austria, (gauche) / Port Authority Bus Terminal , New York.(droite)*

*Une forme pliée en architecture risque rapidement de devenir un signe de catastrophe. Le succès des architectes qui ont utilisé le pliage dans leurs oeuvres ne devrait pas être attribué à leur capacité de représenter la théorie de catastrophe en forme architecturale mais plutôt à leur habilité à combiner des géométries et des topologies, en fonction des connexions entre des événements probables, modelant ainsi des systèmes flexibles pour l'organisation des éléments disparates dans l'espace continu. (G.Lynn, 93)*

*« Plier-déplier ne signifie plus simplement tendre-détendre, contracter-dilater, mais envelopper-développer, involuer-évoluer» (G. Deleuze, 1988).*

### 3.4 ) Exemples morphologiques / Spatialité et Structure

Observation d`exemples dans différents domaines. Architecture, Design, Industrie, Origami.

Dans ces images appartenant à divers domaines (Architecture, Design, Industrie, Origami ou autres) ON reconnaît l'existence des traces qui accomplissent l'action de plier comme procédure de transformation morphologique d`un élément. Deux ou plusieurs éléments, *soient par exemple, fauteuils, chaises, origamis, serviettes, architectures, etc...* peuvent ainsi être conçus au moyen d'une même opération, mais sans une finalité en commun. Cela veut dire que le pli est effectivement une *opération de conception*. (Boudon, 2004).

< Exemples morphologiques >

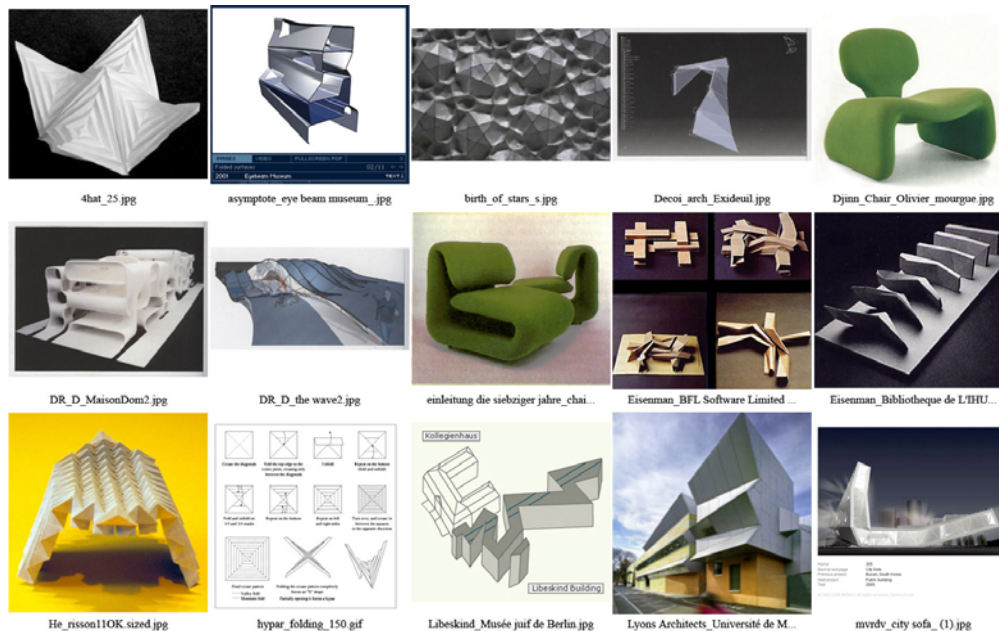


Fig 018 \_ Exemples Morphologiques.

Le pli sur une surface permet la génération d'un espace et une forme continue. L'échelle d'approximation de l'objet vient à redéfinir sa perception et ses possibilités d'habitabilité. Le projet de Kovac Architecture « Ikon Tower » dans une zone très urbanisée de San Francisco, nous montre l'application du pli comme une partie de la stratégie de conception spatiale.

« Ikon Tower »



...La forme fluide et ondulante du bâtiment... résulte des modulations successives de la surface d'un parallélépipède allongé, chaque étape gardant trace, au final, de la précédent... ; Elle est immanente et semble se plier et déplier d'elle-même. L'architecture libère donc des potentiels de génération formelle aboutissant à des corps dessinés de vagues, de vibrations, de rythmes, de divisions, de plis, des gonflements et rétractions mais à des corps toujours contenus dans une globalité homogène où les parties, soumises à la variation, engendrent du même et non de l'identique.

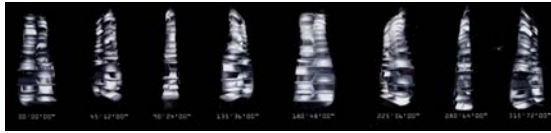


Fig 019. Architectures non Standard, 2003, p122.

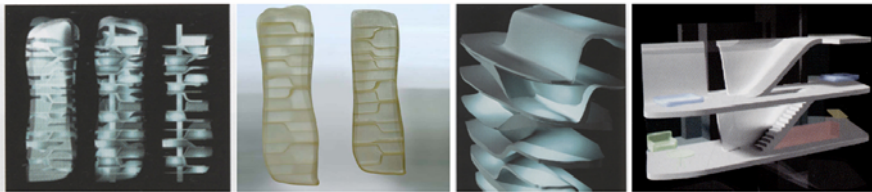


Fig 020. Ikon Tower, San Francisco, USA, 1998, Kovac Architecture.

Le pli modifie la structure topologique d'une surface et, par la suite, ses capacités structurelles. Dans la surface, le pli est l'expression d'un changement des attributs structurels, intervenant sur les trois dimensions de l'élément. L'opération du pli donne une continuité aux parties, créant la possibilité de générer un ensemble fluide des connexions matérielles et spatiales. Le pli permet ainsi la conception du sol, mur, plafond ; longueur, hauteur et largeur d'un espace en même temps. La solution fait partie d'un ensemble continu, tant dans la forme plastique que dans l'espace produit. Le pli nous oblige à penser la conception d'une façon tridimensionnelle.

Dans une même structure, le pli peut présenter des continuités de différents degrés, linéales droites, linéales cubiques, bicubiques, etc... Cependant, dans tous les cas, on peut trouver l'axe où il a défini une inflexion. L'«axe» devient alors un concept qui appartient au modèle paramétrable du pli.

Les exemples de l'origami nous montrent le pli comme une structure d'ensemble coordonné, qui peut agir sur toute la surface. Dans la surface d'un origami déplié, on reconnaît une structure régulière de répétitions des plis enchaînés les uns aux autres. Ces plis recouvrent l'élément et permettent le contrôle des parties.



Cette structure est produite par le fait de *tesseller*<sup>4</sup> une surface. On plie et déplie les parties d'une surface générant une tessellation, afin de produire un origami. Le concept de *tessellation* devient donc une structure géométrique et topologique qui peut contrôler un ensemble de plis, soit le fait de plisser une surface.

Les liens conceptuels qui associent l'origami aux technologies et aux mathématiques sont évidents : diagrammes, complexité, équations cubiques, etc. D'un point de vue formel, 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 mono-fonctionnels. 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 qui symbolise l'équilibre. (Etienne Cliquet, 2006. *Architecture non-standard*)<sup>5</sup>

<Exemples Morphologiques>

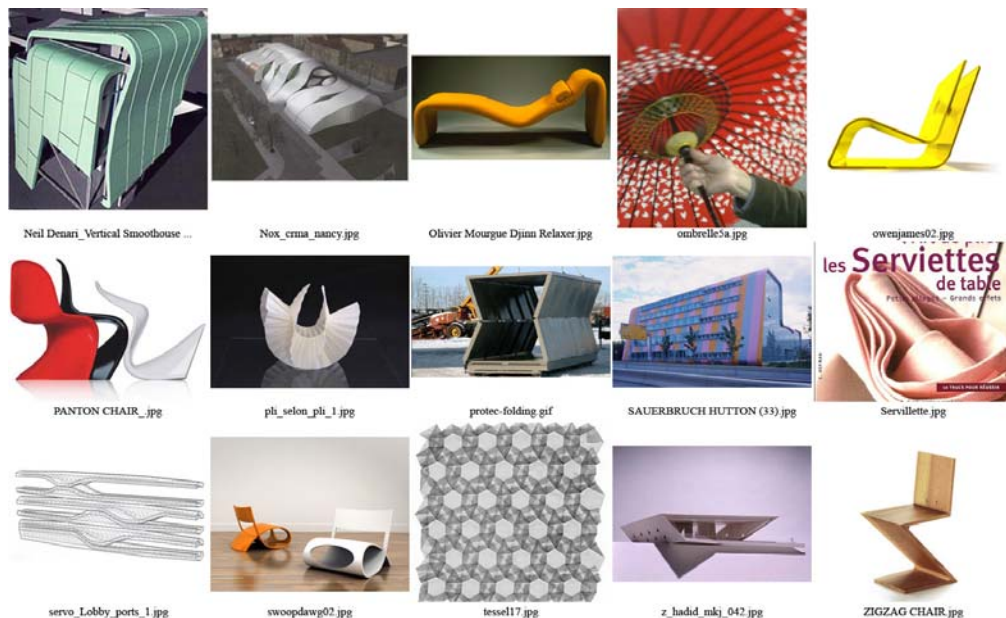


Fig 021 \_ Exemples Morphologiques.

Enfin, notre dernière référence des exemples morphologiques, pour l'implémentation et la compréhension de notre opérateur, s'est construite sur la base des « axiomes de Huzita-Hatori, 1992 ». Ces axiomes sont le premier groupe formel de règles relatives aux principes mathématiques pour le pliage du papier<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Tesseller, Tessellation: On définira la « tessellation origami » comme la répétition en mosaïque d'un *pattern* ? sur une surface pliable. On différencie ainsi la définition du terme de celle qui existe dans les logiciels d'image de synthèse, en relation avec la tessellation des maillages pour le rendu 3D, afin d'obtenir une meilleure qualité des contours ronds des images.

<sup>5</sup> <http://www.origami.net/node/50?PHPSESSID=6ecc830459fc6c6c19>

<sup>6</sup> Huzita-Hatori axioms. En utilisant ces axiomes, il est possible : Solve all quadratic, cubic, and quartic equations with rational coefficients; Trisect an arbitrary angle; Construct cube roots, including the famous problem of "doubling the cube"; Construct a regular N-gon for N of the form  $2i3j(2k3l+1)$  when the last term in parentheses is a prime (a so-called Pierpont Prime); etc... [http://en.wikivisual.com/index.php/Huzita-Hatori\\_axioms](http://en.wikivisual.com/index.php/Huzita-Hatori_axioms) <http://origami.ousaan.com/>

Ils décrivent les opérations de pliage dans les constructions géométriques de l'origami. Les axiomes assument que les opérations soient toujours implémentées sur une surface de papier, et que tous les pliages soient de caractère linéal ou droite.

Axiomes / 1-6 Huzita-Hatori / 7 Koshiro Hatori

- 1- Ayant deux points  $p1$  et  $p2$ , il existe un seul pli qui passe par  $p1$  et  $p2$  en même temps.
- 2- Ayant deux points  $p1$  et  $p2$ , il existe un seul pli qui place  $p1$  sur  $p2$ .
- 3- Ayant deux lignes  $l1$  et  $l2$ , il existe un seul pli qui place  $l1$  sur  $l2$ .
- 4- Ayant un point  $p1$  et une ligne  $l1$ , il existe un seul pli perpendiculaire à  $l1$  et qui passe aussi par  $p1$ .
- 5- Ayant deux points  $p1$  et  $p2$  et une ligne  $l1$ , il existe un pli qui place  $p1$  sur  $l1$  et qui passe par  $p2$ .
- 6- Ayant deux points  $p1$  et  $p2$ , et deux lignes  $l1$  et  $l2$ , il existe un pli qui place  $p1$  sur  $l1$  et  $p2$  sur  $l2$ .
- 7- Ayant un point  $p$  et deux lignes  $l1$  et  $l2$ , il existe un pli qui place  $p$  sur  $l1$  et il est perpendiculaire à  $l2$ .

Axiomes

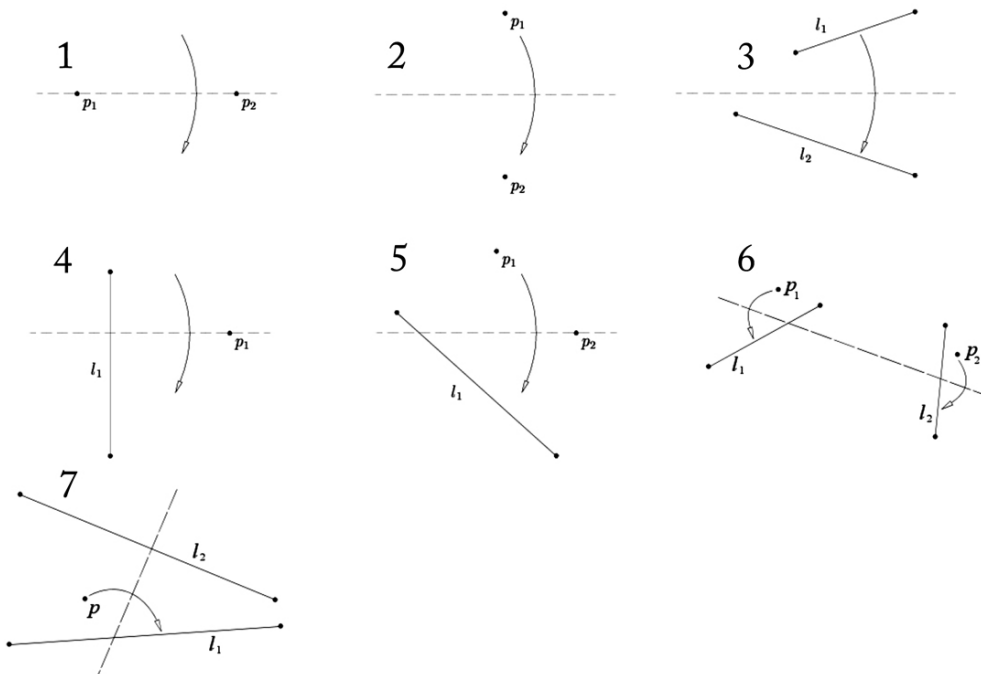


Fig 022\_ Axiomes / 1-6 Huzita-Hatori / 7 Koshiro Hatori

### 3.5 ) Expérimentation Tactile

Au moyen de l'expérience tactile, on tente de franchir le pont de déconnexion qu'on génère à chaque fois qu'on essaie de faire une description, seulement comme observateur, laissant hors champ notre monde du monde à enquêter. On acquiert ainsi une expérience cognitive du sujet et du processus. (Maturana, Varela, 1984)

#### Expériences Pliage Unitaire, Pli.

##### Exp1\_Axe de Contrôle



Fig 023 \_ Expérience Axe Contrôle

À partir de la disposition d'un axe sur une surface, on peut définir un pli. L'orientation géométrique et la longueur de l'axe déterminent l'influence du pli sur la surface. Ce pli est un pli linéal de rayon égal à 0. Notre concept paramétrable «Axe du pli», est défini directement par la ligne du pliage.

##### Exp2\_Points de Contact

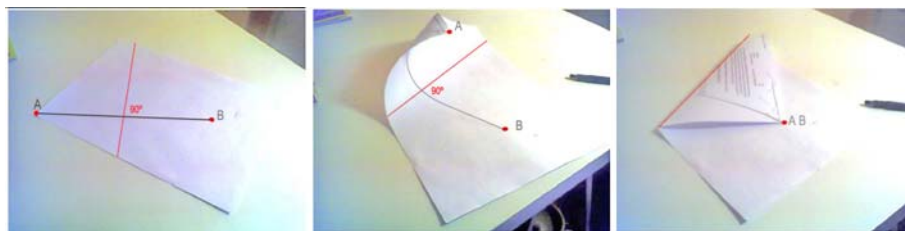


Fig 024 \_ Expérience Points de Contact

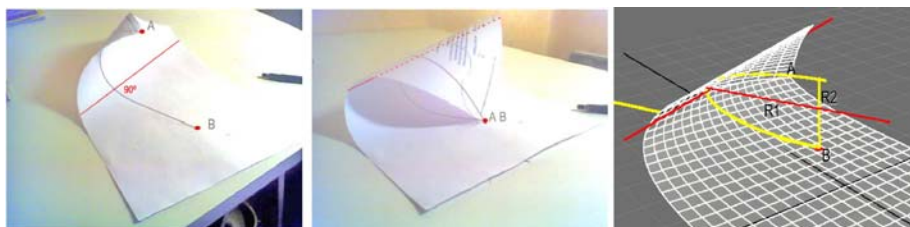
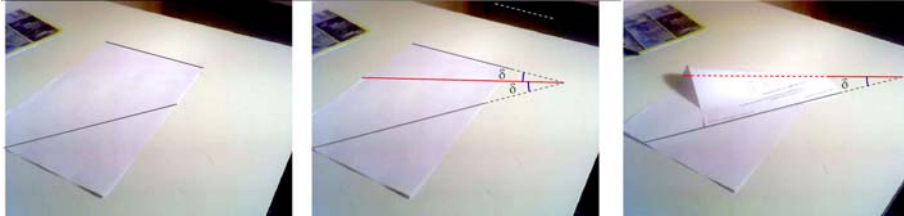


Fig 025 \_ Expérience Points de Contact

Le contact entre deux points d'une surface peut générer un axe, puis un pli. L'axe est défini en raison de la position géométrique des points de contact ; il est dessiné par une droite perpendiculaire, dans la moyenne de la ligne générée entre les deux points en question, A et B. Si les points de contact changent leur position, l'axe redéfinira leur position par rapport aux points. L'axe de rotation => forme ellipsoïdale, parabolique => Ratios > 0. Les ratios du plissage varient de  $R > 0$  vers  $R=0$ . Il existe ainsi des fonctions mathématiques capables de décrire la courbe dessinée par le pli, qui sont du type «  $y = ax^2 + bx + c$  », parabole, «  $(x^2/a^2) + (y^2/b^2) = 1$  », ellipse, paramétrisation «  $x = a \cos t$  et  $y = b \sin t$  » fonctions pour surfaces paramétriques.

### Exp3\_Arêtes de Contact



Fig\_026 \_Arêtes de Contact



Fig\_027 \_Arêtes de Contact



Fig\_028 \_Arêtes de Contact

Le contact entre deux arêtes peut générer un axe, puis un pli. On peut définir l'axe du pliage à partir d'une droite tracée lors du point d'intersection des arêtes de contact et en raison au moyen de l'angle existant entre elles (fig. 025). Cependant il existe une situation limite, celle qui est produite par deux arêtes parallèles, et qui doit être analysée particulièrement (fig. 027). Dans l'exp3, on obtient aussi un axe de rotation qui dirige l'opération de transformation. La description mathématique de la courbe dessinée par le pli est du même type que dans le cas antérieur. L'axe redéfinira leur position par rapport aux nouvelles arêtes.

## Expériences Pliage Multiple, Plisser.

Dans les exemples ci-dessous, on peut voir un ensemble de plis intervenant sur une surface. Notre expérience a pour objectif la compréhension du pli comme opération d'ensemble, (soit plisser) et de même la recherche des capacités spatiales et formelles que peut acquérir une surface au moyen de cette opération. On suppose que le plissage multiple, ou le fait de plisser, est le fait d'enchaîner de multiples plis dans un même système. Cette relation devient une structure de contrôle de l'élément où l'on a appliqué. *\_Plisser* : Couvrir de plis. Modifier une surface souple en y faisant un arrangement de plis.

### Exp1 \_plisser Libre:



Fig\_029\_ Plisser Libre A



Fig\_030\_ Plisser Libre B



Fig\_031\_ Plisser Libre C

La figure 029 A, montre une surface découpée et puis ses parties plissées. On revient ici à d'autres outils qui pourraient être complémentaires à l'opération du pli : la coupe de ciseaux sur une surface. L'espace produit est un ensemble mixé, un continuum de matière et d'espace, de vides et de structures portantes. On obtient les qualités d'un labyrinthe, où l'espace peut accueillir en mélangeant un programme qui contient diverses activités, sans les croiser nécessairement.

Le pli dans cet exemple nous a permis de concevoir l'envers et le reverse en même temps, mais également l'espace qui existe entre eux. Le concept du pli respecte la continuité dans la matière; on génère alors un espace extérieur et intérieur et leur transition dessous une seule opération.

Dans la figure 030 B, le pli fait partie d'un continu sur toute la surface; les découpes sont mineurs et interviennent sur le sommet ou toiture de l'espace généré. La figure produit un espace unitaire où la structure du plissage devient aussi la déclaration directe d'un espace de même qualité, unitaire: une grande enveloppe dont le pliage représente un seul geste recouvrant la totalité de la surface.

La figure 031 C présente un mélange des situations précédentes, permettant la coexistence d'un espace unitaire et partitionné à la fois. On aperçoit ici la courbure du pliage au milieu de la surface. Ce pliage a été généré en découpant des lignes à l'intérieur d'une surface qui finalement a été pliée. Dans cet exemple, le pli nous permet de concevoir l'envers et l'endroit de l'élément. Les formes irrégulières des courbes de pliage dans les coupes de notre élément nous renvoient aux capacités physiques de la matière où on a développé le pli.

*Exp2\_ plisser Origami:*

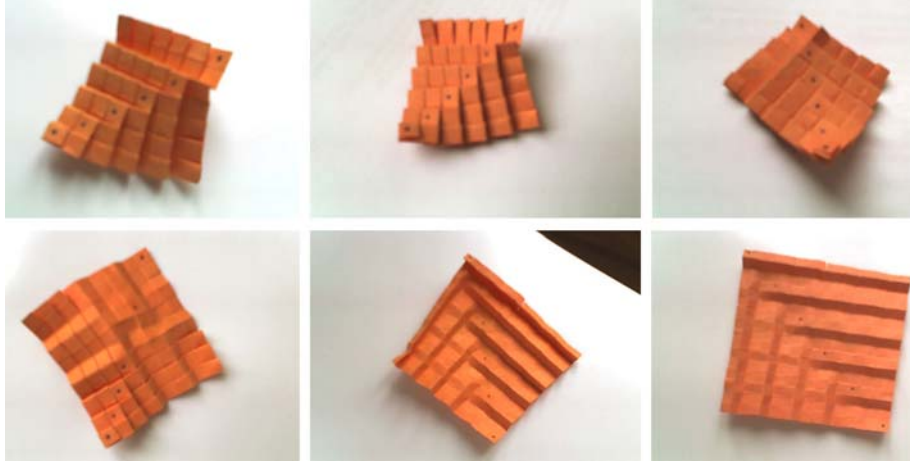


*Fig\_032\_ plisser Libre origami*

Dans la figure 032, le concept de tessellation dans l'origami devient un exemple flagrant de la structure de contrôle qu'un ensemble de plis peuvent produire. Cette structure de tessellation cachée dans les plis de notre surface permet de modifier la condition et la forme de notre feuille pliée. On passe d'un plissage de caractère spatial vers un plissage qui génère un élément plus volumétrique (voir étoile 4 points). La feuille de papier devient un élément malléable à cause de la tessellation existante; la structure topologique de notre élément change, augmentant le nombre d'arêtes, sommets et faces à force de plier.

Est-ce que l'on pourra exporter le modèle d'une telle tessellation en tant que modèle opérationnel pour notre opérateur ?

Exp2\_plisser Origami:



Fig\_033\_Plisser Libre origami

Le pli peut se présenter avec un caractère fractal dans l'origami ; la feuille d'exemple s'est pliée en soit même à partir d'un pattern de répétition et de plissage. Dans une surface idéale ou fictive on pourra ainsi développer des plis à l'infini, les uns sur les autres. Dans le pli fractal, à l'intérieur d'un pli, on peut construire des structures dépendantes et reliées au même figure initial en dessinant plusieurs plis ou niveaux qui génèreraient la totalité d'une même forme.

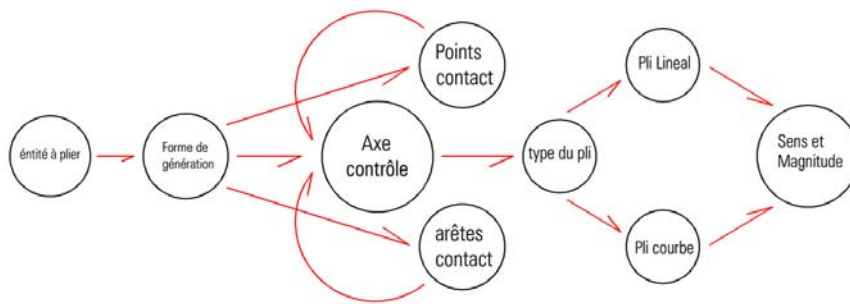
Finalement, le pli est une opération de transformation morphologique. Le pli unitaire définit un axe de repère sur une surface et, autour de cet axe, on génère finalement le pliage. Le pli unitaire travaille de façon localisée, ce qu'on appelle un « Local tool ». Le pli peut aussi opérer comme une structure d'ensemble au moyen du concept de *tessellation* ; soit le fait de plisser. Le pli peut se plier sur lui-même : il est pliable ; on peut plier une feuille déjà pliée. Le pli peut traverser toute la surface ou agir sur une partie seulement. Il modifie la structure topologique d'une surface, en générant de nouvelles arêtes, sommets et en multipliant les faces. Il peut amplifier les capacités structurelles et formelles d'une surface, accueillant une architecture continue dans l'espace et son support matériel.

## 4) Un Modèle pour l'opérateur du Pli

### 4.1) Opérateur du pli / Instances.

- A) - Déclarer l'entité à plier.
- B) - Sélectionner la forme de génération de l'axe du pli.
- C1) - Déclarer l'axe de contrôle du pli.
- C2) - Déclarer les points de contact.
- C3) - Déclarer les arêtes de contact.
- D) - Déclarer le type de pli, linéaire ou cubique.
- E) - Déclarer le sens et la magnitude du plissage

### Un modèle opératoire



### 4.2) Concepts Paramétrables du Plissage / Contrôle du Pli.

\* **Axe de rotation** / élément conceptuel et graphique

- Axe de rotation => axe du plissage => Paramétrisation => Sens.
- Rayons = 0 => Pli absolu linéal, droite.
- Limites d'action définies par la taille de l'axe de rotation.

\* **Points de contact** / éléments conceptuels et graphiques

- Deux points de contact permettront la définition de l'axe du plissage puis une paramétrisation et un sens.

\* **Arêtes de contact** / éléments conceptuels et graphiques

- Deux arêtes de contact permettront la définition de l'axe du plissage puis une paramétrisation et un sens.

\* **Sens de rotation** / Positif ou négatif en raison de l'orientation du gizmo

- Manipulable en interface directe et paramétrique.

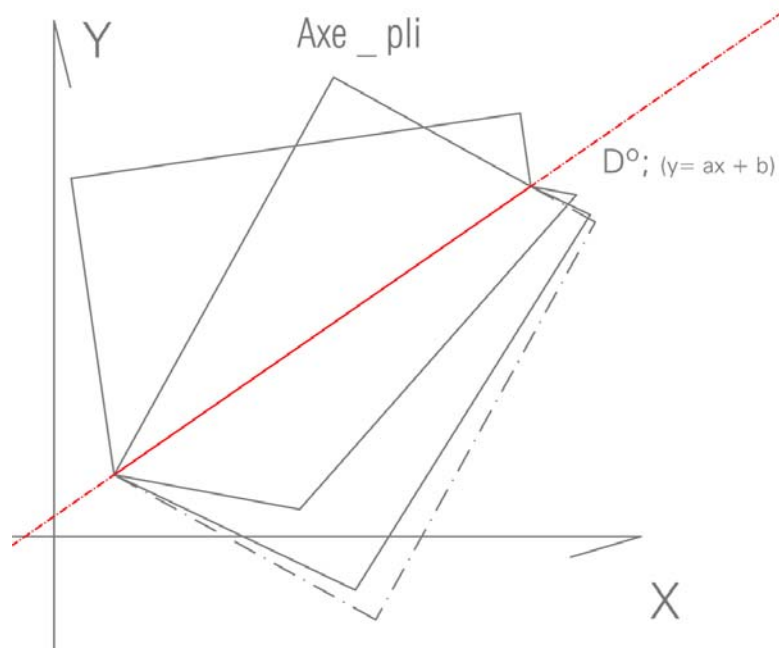
En bref, l'opérateur est composé d'abord par les éléments (*axe, points de contact, arêtes de contact*) qui nous permettront de définir un axe de rotation pour le pliage. Puis, par la paramétrisation d'une fonction qui donnera la forme du pli. Il nous faudra donc générer une interface et un algorithme capable de gérer l'opérateur comme les paramètres présentés ici.



### 4.3 ) Vers un Algorithme pour le Pli .

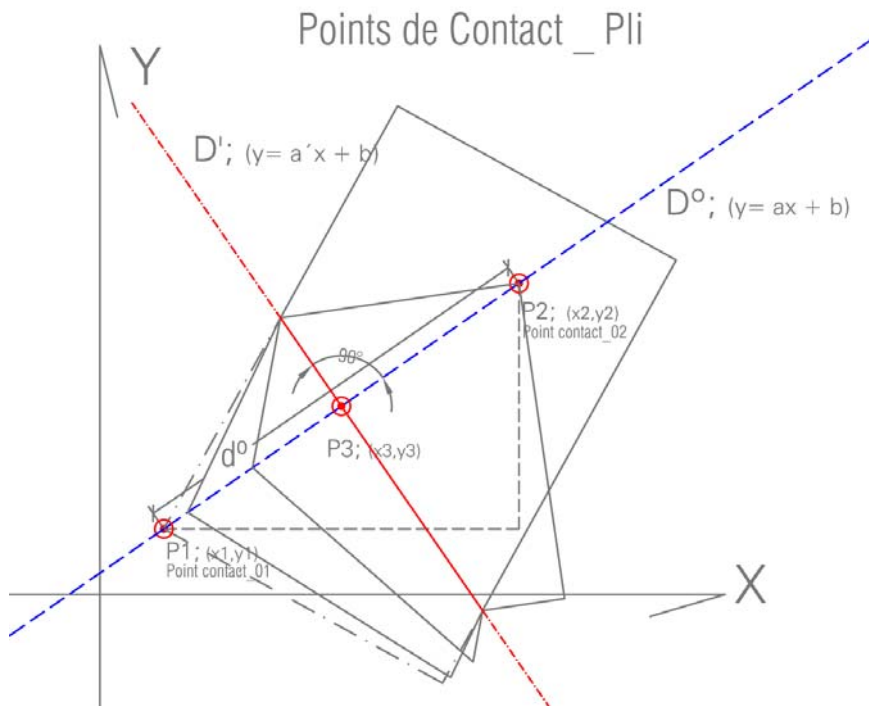
#### Géométrie analytique pour l'algorithme d'un pli linéal

- 1) Système de référence **UCS**. Local à l'objet en transformation.
- 2) Axe du plissage. (  $D^\circ$  )
- 3) Droite qui définit l'axe du plissage. (  $D^\circ$  )  $\Rightarrow y = ax + b$



Fig\_034. Schema axedu pli

- 4) Points de contacts (  $P1, P2$  ) ---- soit (  $x1, y1$  ) ; (  $x2, y2$  ) ;  
définis par l'utilisateur en interface graphique.
- 5) Droite définit par les points de contact. (  $D^\circ$  )  $\Rightarrow y = ax + b$  dont  $P1, P2 \in D^\circ$
- 6) Droite perpendiculaire à  $D^\circ \Rightarrow D^\circ \perp D' \Rightarrow y = a'x + b$  dont  $aa' = -1$
- 7) Distance entre (  $P1, P2$  ) =  $di^\circ \Rightarrow di^\circ = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2}$
- 8) Point moyen de  $D^\circ \Rightarrow P3$  soit  $P3 = (x3, y3) = ((x2 + x1) / 2, ((x2 + x1) / 2))$
- 9) Droite perpendiculaire  $D' \Rightarrow y = a'x + b$  dont  $P3 = (x3, y3) \in D'$



Fig\_035 .Schema Points de Contact \_Pli

9) Droites arêtes de contact ( **AC1** ) et ( **AC2** ) ; définis par l'utilisateur en interface graphique.

On obtient ( **AC1** ) =>  $y = (ac1)x + (bac1)$  ; dont **ac1** et **bac1** sont deux réels fixés.

On obtient ( **AC2** ) =>  $y = (ac2)x + (bac2)$  ; dont **ac2** et **bac2** sont deux réels fixés.

10) Point d'intersection entre ( **AC1** ) et ( **AC2** ) => **P4** ---- Soit ( **x4, y4** )

**P4** = ( **AC1** ) ∩ ( **AC2** ) => On obtient **P4** par equation aux abscisses.

$$(ac1)x + (bac1) = (ac2)x + (bac2) \Rightarrow x4 = ((bac2) - (bac1)) / ((ac1) - (ac2))$$

11) Angle  $\alpha$  entre ( **AC1** ) et ( **AC2** ). Comment trouver l'angle ?

**Fonction définir Angle  $\alpha$**

$$(ac1) = \text{tg } \theta1 ; (ac2) = \text{tg } \theta2 ; \alpha = (\theta1 - \theta2)$$

12) Angle  $\beta = \alpha/2$  entre ( **AC1** ) et ( **AC2** ).

13) Définir coefficient angulaire ( **AC3** ) Axe du pli \_ arêtes de contact => **ac3** = ?

$$(\alpha/2 + \theta1) + \epsilon1 = 180 \Rightarrow \epsilon1 = 180 - (\alpha/2 + \theta1) \Rightarrow \epsilon1 + \theta3 = 180$$

$$\theta3 = (180 - \epsilon1) \Rightarrow ac3 = \text{tg } \theta3$$

14) Définir valeur de l'ordonnée (AC3) Axe du pli \_arêtes de contact =>  $bc3 = ?$

$$P4 = (x4, y4) \Rightarrow y4 = (ac3)x4 + bc3 \Rightarrow bc3 = y4 - (ac3)x4$$

$$\text{Axe pli arêtes de contact, droite (AC3)} ; y = (ac3)x + bc3$$

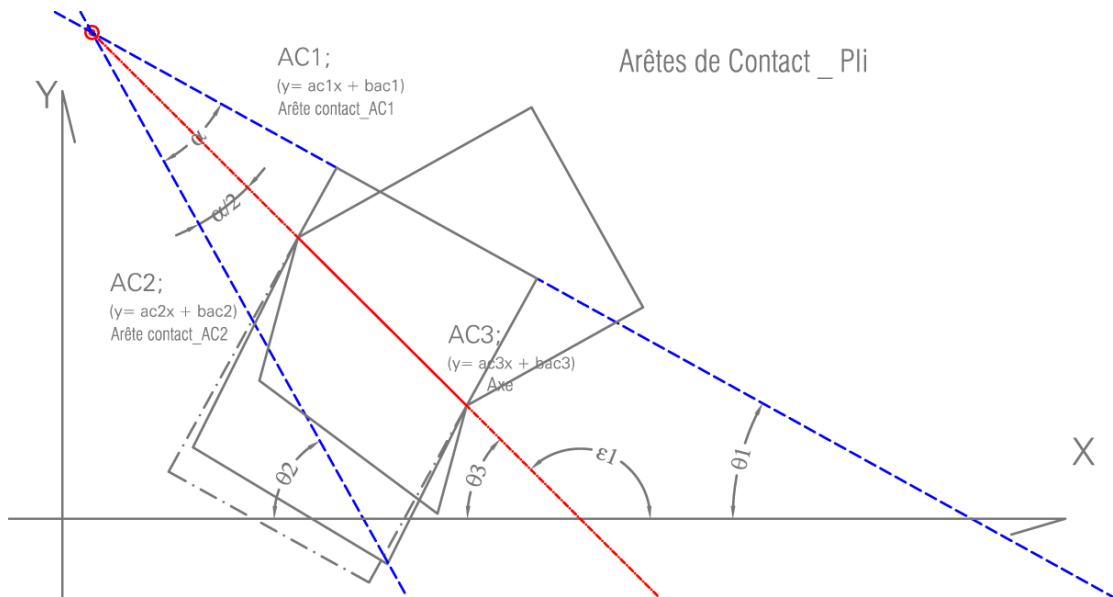
15) Exception arrêtes de contact ; IF (ac1) = (ac2) et (bac1)  $\neq$  (bac2) =>

$$(AC1) // (AC2) \Rightarrow \text{Axe plissage} = (D^\circ) \Rightarrow y = (ac1)x + ((bac1) + (bac2)) / 2$$

16) Exception Droite parallèle ou perpendiculaire au repère UCS.

Une droite ( $D^\circ$ ) parallèle à l'axe des ordonnées, telle droite ( $D^\circ$ ) a pour équation:  $x = k$  (constante)

Une droite ( $D^\circ$ ) parallèle à l'axe des abscisses, telle droite ( $D^\circ$ ) a pour équation:  $y = L$  (constante)



Fig\_036 . Schema Arêtes de Contact \_Pli

## Fonctions impliqués pour un Pli linéal

0) Fonction définition repère UCS :

- Fonction co-planar, rend Vrai ou Faux selon le type de surface.
- Rend un plan et un gizmo UCS repère parallèles à la surface à plier.
- Référence géométrique pour les calculs.

1) Fonction Axe contrôle :

- Rend une droite de la forme  $y = ax + b$
- Ajoute des arêtes et des sommets à l'objet. *Fonction définir arêtes et sommets*
- Rend et définit un repère de sens de rotation.

2) Fonction Points de contrôle :

A partir de deux points de contrôle, deux variables  $p1$  et  $p2$  définies par IU.

- Rend et définit une droite  $D1$ ;  $p1p2$
- Rend la distance  $di^0$  entre  $p1p2$
- Rend le point  $p3$ . moyen entre  $p1p2$
- Rend une droite Axe  $D'$  passant par  $p3$  et  $\perp$  à  $D1$

3) Fonction Arêtes de contrôle :

A partir de deux arêtes de contrôle, deux variables (droites de référence)  $AC1$  et  $AC2$  définies par IU.

- Rend et définit un point d'intersection entre les droites  $AC1$  et  $AC2$ .
- Rend et définit un angle  $\alpha \Rightarrow \alpha/2$
- Rend et définit le coefficient angulaire de ( $AC3$ )  $\Rightarrow ac3$
- Rend et définit la valeur de l'ordonnée de ( $AC3$ )  $\Rightarrow bc3$
- Rend et définit l'axe du pli des arêtes de contact  $\Rightarrow$  droite ( $AC3$ );  $y = (ac3)x + bc3$

4) Fonction exception Arêtes de contrôle :

A partir de deux arêtes de contrôle, deux variables (droites de référence)  $AC1$  et  $AC2$  définies par IU.

- Identifie deux arêtes parallèles.
- Rend et définit une droite dans la moyenne de l'ordonnée entre  $AC1$  et  $AC2$   
 $\Rightarrow bc3 = (bc1 + bc2/2)$

5) Fonction création nouveaux sommets et nouvelle arête.

A partir d'une droite Axe de plissage du type :  $y = ax + b$

- Génère des sommets dans l'intersection de l'axe\_Pli et le maillage topologique de l'objet
- A partir des sommets on génère la nouvelle arête dans le maillage et sur l'axe du Pli.
- Génère le gizmo axe du pli pour réaliser l'opération.

7) Fonction définir angle.

A partir du Gizmo ou par IU ; interface utilisateur.

- On définit la magnitude et le sens du pli.

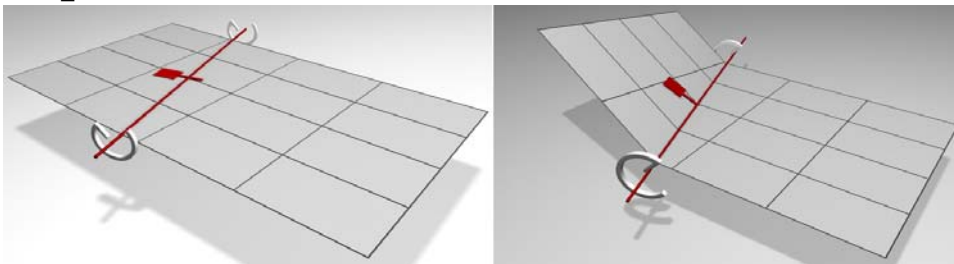
#### 4.4 ) Deux Modèles : Pli, Plisser.

On propose deux modèles, plier et plisser. Ceux-ci correspondent à la compréhension du pli comme unité puis comme ensemble. Les modèles visent une approche conceptuelle et graphique vers une interface d'utilisateur.

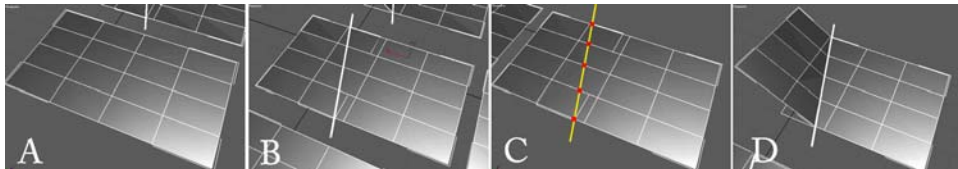
##### Pli Unitaire

Un contrôleur spécifique unitaire du pli, *l'axe du pli* est situable librement par l'utilisateur tout au long de la surface à modifier; l'utilisateur peut choisir quel côté de la surface sera plié et sa magnitude au moyen d'un *gizmo* propre à l'opérateur. L'élément qui représente à l'opérateur dans la scène est en soi modifiable par les transformations génériques (soient échelle, rotation et translation), modifiant la portée du pli. On peut modifier les rayons de l'axe du plissage obtenant un pli linéaire ou cubique. Les limites d'influence du modificateur sont mises en évidence par la taille de l'élément sur la surface.

*Pli\_Axe Contrôle*



*Fig\_037\_Modèle Pli Unitaire*



*Fig\_038\_Modèle Pli Unitaire*

##### Processus

A) Etat initial sans modification : L'objet initial possède une géométrie propre qui changera une fois que l'opérateur sera appliqué.

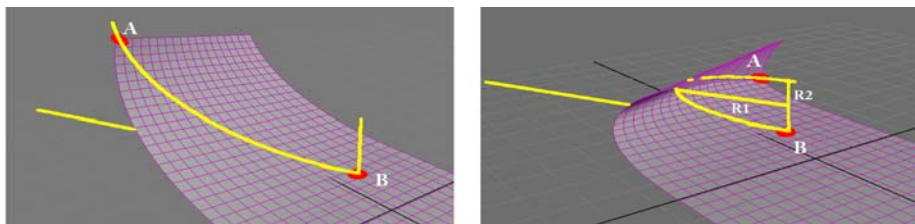
B) L'opérateur appliqué sur la surface : L'opérateur modifie la géométrie de l'objet, ajoutant arêtes, sommets et faces. À partir de la position géométrique de l'axe, on génère la fonction mathématique et par la suite ses paramètres de contrôle. La position géométrique de l'axe est obtenue dans un système de référence (*usc\_objet*) propre à l'objet. (Voir géométrie analytique pour l'algorithme.)

C) On cache l'opérateur pour mieux visualiser le changement dans la topologie de l'objet. On trouve une nouvelle arête et de nouveaux sommets faisant partie de la structure géométrique locale qui soutient le plissage.

D) Le pli est appliqué sur la surface, il est contrôlé à partir de l'axe et le gizmo de magnitude.

Dans le cas unitaire, le pli est considéré comme une seule entité-opérateur, un pli correspondant à une opération unitaire spécifique sur l'objet. On peut appliquer plusieurs plis sur la même surface. Il n'est pas un contrôleur de surface sinon un modificateur spécifique d'une partie de la géométrie de la surface. Un local tool.

#### *Pli\_ Points contrôle*



*Fig\_039\_Modèle Pli Unitaire*

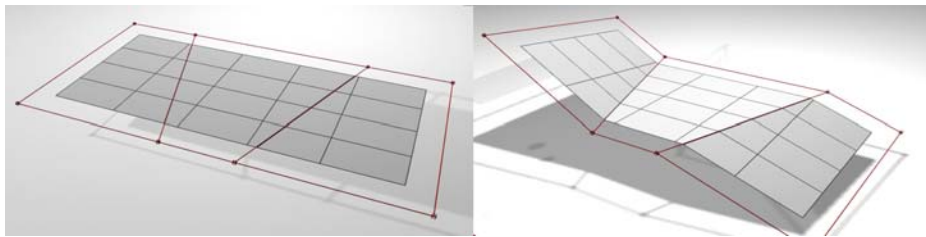
Les plis conçus au moyen des points de contrôle ainsi que ceux par arêtes de contact, doivent d'abord définir leurs positions géométriques dans une interface graphique. Une fois nos repères définis, on obtient l'axe et la fonction qui décrivent paramétriquement la parabole ou l'ellipse qui représente la forme de notre pli. La limite maximale de distance doit être égale à la distance existant entre A et B, de cette façon on ne déforme pas la longueur originale de la surface.

$$F_{\text{dist}}(A,B) = F(R_1, R_2) \Rightarrow (x^2/a^2) + (y^2/b^2) = 1 \Rightarrow x = a \cos t \text{ et } y = b \sin t$$

### Plisser \_ Le pli comme structure d'ensemble.

On propose plisser comme un contrôleur général de la surface ainsi que ses plis possibles. Cet opérateur est basé sur un treillis de contrôle similaire aux FFD ou Lattice. Il est défini au moyen des axes (*lignes du treillis*) et des points de contrôle (*points du treillis*) qui peuvent modifier la direction et l'angle du plissage, une espèce de maillage de tessellation, mais pour le contrôle géométrique des parties intervenues. Le gizmo général de l'opérateur génère le rapport à l'univers de travail UCS, et permet à l'utilisateur de changer la position, l'échelle et la rotation du même. La structure devient une tessellation de contrôle pour l'objet.

#### Plisser \_ Structure Contrôle

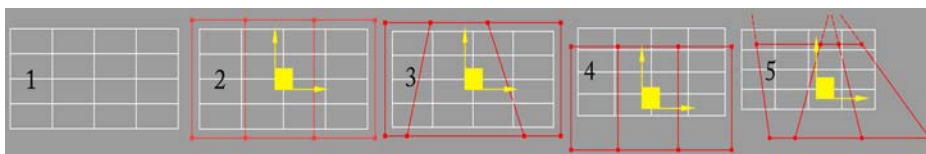


Fig\_040\_ \_Modèle Plisser.

La tessellation de contrôle pour plier agit sur l'objet entier comme ensemble, les lignes du treillis représentant les axes du plissage et ses points permettant à l'utilisateur de positionner l'axe où on le souhaite. La dimension du tessell est déterminée par une interface utilisateur. ( ex = 2 x 4, soit 2 axes en X et 4 axes en Y)

Une fois l'opérateur appliqué, les plissages sont acquis par la surface à plier et la surface maillage prend quelques marques graphiques. Si on bouge l'opérateur, on bouge les plis et ses marques. L'opérateur vient trianguler l'objet à modifier, afin d'avoir un support structurel pour développer le pli.

#### Plisser \_ Structure Contrôle



Fig\_041\_ \_Modèle Plisser.

- 1) Objet initial : Sans modification
- 2) Objet initial + maillage de tessellation contrôleur. On peut voir les axes pour plisser et aussi leurs points de contrôle.
- 3) Objet initial + maillage de tessellation contrôleur modifié. On peut bouger les points de contrôle pour ainsi ajuster la direction des axes et du plissage.
- 4) Objet initial + maillage contrôleur modifié. On peut bouger le maillage complet comme une unité. Le gizmo de contrôle général nous permet de repositionner notre contrôleur par rapport à la surface à modifier.
- 5) Objet initial + maillage contrôleur modifié. On peut repositionner le maillage et aussi bouger les points de contrôle. La projection des axes nous permet d'intervenir sur la totalité de la surface. L'utilisateur peut donner un sens et une magnitude à chacune des axes qui font partie du tessell.

## 5 ) Conclusions et Perspectives.

Le travail développé pendant le stage au sein du CRAI nous a permis tout d'abord de réfléchir aux architectures numériques en reconnaissant les concepts et procédés qui les génèrent, les soutiennent mais qui également les différencient. Dans la première partie, on a pu décrire quelques typologies possibles : *Evolutionary Architecture*, *Architecture Métamorphique*, *Architecture Isomorphe*, *Architecture Topologique*, *Architecture Animée*, *Architecture Paramétrique*. De même, comme résultat d'une démarche théorique et expérimentiel, on a proposé un outil pour la conception de formes numériques 3D, « **Plier** ».

Cet outil vient renforcer la thèse des opérateurs morphosémantiques, dont les opérations de conception sont guidées en fonction des verbes qui décrivent des actions physiques attachées aux formes. (*Gonfler, pousser, étirer, tordre, etc...*). A partir des opérations morphosémantiques, on a pu reconnaître non seulement une nouvelle formalité plastique sculpturale extérieure, mais aussi des qualités spatiales innovantes qui changent nos concepts et le caractère de l'espace intérieur habitable. Cette richesse des spatialités résultantes, au regard de ce mémoire, nous ouvre des champs d'exploration architecturale.

Dans notre cas d'étude, la surface **pliée** est capable de générer et d'accueillir des qualités spatiales complexes; elle évoque la continuité de l'espace dans la matière. On conçoit l'envers, reverse et la transition en même temps. Une architecture continue dans l'espace et son support matériel, un espace en équilibre. Le pli se présente ainsi comme une opération de transformation morphologique. Il modifie les capacités structurelles et formelles d'une surface intervenant au niveau topologique afin de générer une structure de support.

Quoi qu'il en soit la méthode du plissage, axe rotation, points de contact ou arêtes de contact, l'opération du pli emporte toujours la génération d'un axe. Autour duquel on génère la transformation et on calcule la fonction paramétrique de contrôle. Dans le modèle proposé pour l'outil, les fonctions mathématiques correspondent aux paramètres et concepts géométriques ressortis pour calculer et générer l'algorithme d'un pli linéal. Il nous faudra donc implémenter ces fonctions en raison à l'opérateur du modèle présenté, obtenant finalement un algorithme qui permet de tester la fonctionnalité d'une telle opération de conception. En raison du temps restreint du stage et des connaissances basiques en programmation, l'implémentation de notre outil est en cours du développement.



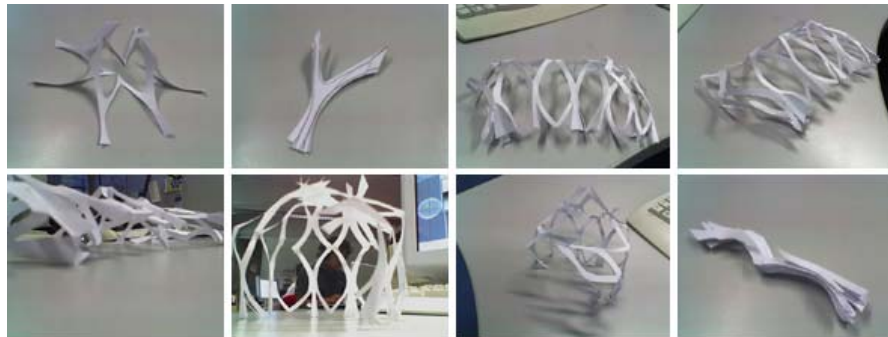
### **Perspectives :**

Finalement, au moyen de l'outil proposé et de ses capacités de production plastique ainsi que spatiale, on laisse une voie ouverte aux questionnements et possibilités quant à l'exploration de nouveaux opérateurs morphosémantiques des surfaces. Cependant, on souligne quelques axes d'intérêt pour lesquels on propose une future recherche et un développement.

- Implémentation concrète et fonctionnelle de notre outil en forme de plugin pour softwares tels que Maya ou 3ds Max. On pense qu'en comprenant tout d'abord les concepts du pli qui agissent sur une surface, on pourra dans le futur générer une approche qui puisse élargir leur application également aux volumes. Actuellement ce travail est développé au CRAI par Jp Wetzel.

- Développement et approfondissement d'un modèle pour le pli comme opération d'ensemble, soit le fait de plisser.

- Développement d'un opérateur « **Couper** » complémentaire à « **Plier** ». Plier, couper et déplier en créant des structures déformables transformables. Cet outil en particulier n'a pas encore de semblables formulés en applications numériques, raison pour laquelle il attire notre attention et nos envies. Il nous invite à penser aux géométries intelligentes qui pourront avoir des propriétés de translation rotation et échelle attachées aux niveaux topologiques.



*Fig\_042\_Expérimentation outil perspective Plier et Couper*

## 6) Bibliographie

### 6.1) Références Bibliographiques

#### Livres

- Boudon** Philippe. *Conception*, Editions de la Villette, Paris, 2004.  
**Deleuze** Gil. *Le Pli*, Edition de Minuit, Paris, 1988.  
**Maturana** Humberto, **Varela** Francisco, *El Arbol del Conocimiento*, Editions Universitaria, Santiago, 1984.  
**Architectures non Standard**, Exposition présentée au Centre Pompidou 10 Dec 2003- 1 Mars 2004, Editions Du Centre Pompidu, Paris, 2003.  
**Ceccarini** Patrice, **Montes** Stefano. *Langage, Architecture : Prolégomènes à une théorie de la notation de l'objet Architectonique; Morphogenèse architecturale et Conception du projet*, Editions Fratelli Palombi, Rome, 1997.  
**Fiell** Charlotte & Peter. *Decorative Art 70's*, éditoriel.Taschen, Köln, 2000.  
**Fiell** Charlotte & Peter. *Decorative Art 60's*, éditoriel.Taschen, Köln, 2000.  
**Bony** Anne. *Les années 60*, Editions du Regard, Paris, 1983.  
**Prost** Robert. *Concevoir, inventer, créer : Réflexions sur les pratiques*, Editions L'Hartmann, Paris 1995

#### Articles

- Wetzel** Jean-Paul, **Bignon** Jean-Claude, **Belblidia** Salim. A Study for Parametric Morpho-Semantic Operators to Assist Architectural Conception at the Drafting Stage, MAP CRAI UMR n°694,CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.  
**Wetzel** Jean-Paul. Specification of an operator for the design of architectural forms: "Pleating".  
**Wetzel** Jean-Paul, **Bignon** Jean-Claude, **Belblidia** Salim. Use of Morphological Operators to Assist Architectural Design in Early Stage", MAP CRAI UMR n°694, CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. *June 14-16, 2006 - Montréal, Canada Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*.  
**Wetzel** Jean-Paul, **Bignon** Jean-Claude, **Belblidia** Salim. "Proposition d'un modèle utilisant des opérations paramétriques d'assistance à la création de formes architecturales", MAP CRAI UMR n°694,CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.  
**Wetzel** Jean-Paul, **Bignon** Jean-Claude, **Belblidia** Salim. Proposition d'opérateurs morpho-sémantiques paramétriques d'assistance à la conception de formes architecturales, MAP CRAI UMR n°694,CNRS, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.  
**Wetzel** Jean-Paul, **Bignon** Jean-Claude, **Belblidia** Salim. A Proposal for Morphological Operators to Assist Architectural Design, MAP CRAI UMR n°694, CNRS, 1Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy.  
**Soddu** Celestino. The DESIGN OF MORPHOGENESIS. An experimental research about the logical procedures in design processes, Demetra Magazine # 1,1993. [www.celestinosoddu.com](http://www.celestinosoddu.com)  
**Soddu** Celestino. Generative Natural Flux , GA2001, Milan. [www.celestinosoddu.com](http://www.celestinosoddu.com)  
**Soddu** Celestino, **Colabella** Enrica. Artificial Intelligence and Architectural Design, Singapore, 1995.  
**Katodrytis** George, Studionova Architects. The Autopoiesis and Mimesis of Architecture, Igorithms and the breeding of digital forms (Extract), ASCAAD, April, 2006.  
**Lyon** Eduardo. Artificial Intelligence and Emergence in Architecture: A Multi-Agent Based Model for Design Processes. College of Architecture, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA USA, Sigradi 2004.  
**Dritsas** Stylianos. Design Operators, Memoire Master of science in architecture studies.M.I.T, Department of Architecture, USA, June, 2004  
**Kolarevic** Branko. Digital Morphogenesis and Computational Architectures, University of Pennsylvania, USA, Sigradi, 2000, Rio de Janeiro.  
**Moraes Zarzar** K. Challenges and Fallacies in Computer Applications of the Evolutionary analogy in Design Methodology: Biology and Computation to Revolutionize Design Practice, / Mai 2002.  
**Ochoa** Gabriela. Morphogenesis, Lindenmayer Systems and Generative Encodings. [www ldc.usb.ve/~gabro/](http://www ldc.usb.ve/~gabro/)  
**Folding in Architecture**, Architectural Design Magazine,1993.  
**Lehmann Erik**, Appréhender la forme et la conception à partir des méthodes et outils utilisés dans le domaine vestimentaire, Memoire TPFE, ENSAN, 2007.

## 6.2) Web/ Bibliographie.

- <http://mit.edu/edgsrc/www/genr8/index.html> GENR8: Generative Form Modeling 2001
- <http://accad.osu.edu/~mlewis/aed.html> Visual Aesthetic Evolutionary Design Links
- <http://www.asymptote-architecture.com/#>
- <http://www.oosterhuis.nl>
- [http://www.future-systems.com/architecture/architecture\\_list.html](http://www.future-systems.com/architecture/architecture_list.html)
- [http://www.noxarch.com/flash\\_content/flash\\_content.html](http://www.noxarch.com/flash_content/flash_content.html)
- [http://www.lexilogos.com/francais\\_langue\\_dictionnaires.htm](http://www.lexilogos.com/francais_langue_dictionnaires.htm)
- <http://www.virtualsculpture.org>
- <http://www.cybsoc.org/EA.html> ( *enciclopedia autopietica* )
- <http://www.virtualsculpture.org/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/>
- <http://www.infinitee-designs.com/Tutorials-Maya-1.htm>
- <http://www.highend3d.com/maya/tutorials/>
- <http://www.origami.net/>
- <http://www.paperfolding.com/math/>
- <http://origami.ousaan.com/>
- <http://www.origami.net/bookmarks> ( Links )

## 6.3 ) Références Images.

- Fig\_01.J Frazer The form Generator Model. / Source **Kolarevic B**, 2000.  
Fig\_02. Isomorphic Surfaces. / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_03. Metamorphic surfaces. / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_04. Animate Architecture. Lynn`s Port Authority Bus Terminal , New York. / Source **Kolarevic B**, 2000.  
Fig\_05. Topological Architecture Gehry`s Guggenheim museum, Bilbao / Source **Kolarevic B**, 2000.  
Fig\_06. Parametric Architecture : Marcos Novak`s, algorithmics spectaculars / Source **Kolarevic B**, 2000.  
Fig\_07. Opérateurs paramétriques, Max, Maya / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_08. Lattice max, FFD Lattice maya / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_09. Interface Max (gauche) et maya (Droite) / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_10. FFD ou Lattice/ Max, Maya / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_11. Bend / panneau déroulant Max, (gauche), Maya(droite) / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_12A,B,C Bend / Max maya / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig 013. Expérimentation origami. / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig 014. Plis géologiques, une roche (gauche) Typologie des plis géologiques. / Source <http://fr.wikipedia.org/wiki/>  
Fig 015. Plis en Couture. Source recherche Internet, **Aranda F**, 2007.  
Fig 016.Chuck Hoberman Responsive architecture: 2006, Building Centre Trust in London./ "Tetrahedron" at the Papagayo Children`s Interactive Museum. Source recherche Internet, **Aranda F**, 2007.  
Fig 017. G.Lynn\_Hidrogen pavillion Austria, (gauche) / Port Authority Bus Terminal , New York.(droite)  
Fig 018,021. Exemples Morphologiques Source recherche Internet, **Aranda F**, 2007.  
Fig 019,020. Ikon Tower. San Francisco,USA,1998, Kovac Architecture.Architectures non Standard, 2003, p122.  
Fig 022. Axiomes / 1-6 Huzita-Hatori / 7 Koshiro Hatori  
Fig 023. Expérience Axe Contrôle / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig 024,025. Expérience Points de Contact / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_026,027,028. Arêtes de Contact / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_029,030,031. Plisser Libre A,B,C / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_032,033, plisser Libre origami. / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_034.Schema axe du pli / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_035.Schema Points de Contact \_Pli / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_036.Schema Arêtess de Contact \_Pli / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_037, 038, Fig\_039. Modèle Pli Unitaire / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_040, 041.Modèle Plisser. / Source **Aranda F**, 2007.  
Fig\_042.Expérimentation outil perspective Plier et Couper / Source **Aranda F**, 2007.