



HAL
open science

Proposition d'un modèle et d'un outil dédiés à la conception morphologique architecturale en phase esquisse.

Jean-Paul Wetzel

► To cite this version:

Jean-Paul Wetzel. Proposition d'un modèle et d'un outil dédiés à la conception morphologique architecturale en phase esquisse.. domain_other. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2009. Français. NNT: . tel-00557992

HAL Id: tel-00557992

<https://theses.hal.science/tel-00557992v1>

Submitted on 20 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE (INPL)

ECOLE DOCTORALE IAEM

Doctorat

Spécialité : Sciences de l'Architecture

Jean-Paul Wetzel

*Proposition d'un modèle et d'un outil dédiés à la conception
morphologique architecturale en phase esquisse.*

Thèse dirigée par Pr Jean-Claude Bignon

Soutenue le 26 Juin 2009 à 14h

à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

Jury :

Président : M. Jean-Claude Bignon
Rapporteurs : M. Gérard Hégron
M. François Guéna
Examineurs : M. Farid Ameziane
M. Ye-Qiong SONG

Remerciements

J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Jean-Claude Bignon pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer mon travail et pour améliorer sa qualité.

Ensuite je tiens à remercier Salim Belblidia pour m'avoir suivi tout au long de mon travail de thèse et notamment sur la partie portant sur l'implémentation du modèle.

Un grand merci à M. Gérard Hégron et M. François Guéna qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.

J'exprime aussi ma gratitude envers Olivier Lehmann maître assistant à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg qui a réalisé l'image de la page de garde du présent mémoire à partir de l'implémentation de l'opérateur « plier ».

L'aboutissement de cette thèse a aussi été encouragé par de nombreuses discussions avec des collègues de disciplines variées. Je ne citerai pas de noms ici, pour ne pas en oublier. Je tiens à remercier aussi les membres du laboratoire MAP/CRAI qui m'ont permis développer mon travail.

Je remercie tout particulièrement Yann-Eric Guerin qui m'a été d'une aide précieuse pour les traductions de mes publications en anglais, ainsi que Claire Hamann, Sylviane Husson et Dominique Husson qui ont réalisé un formidable travail de relecture.

Enfin, et surtout, je tiens à remercier ma famille et mes amis, pour m'avoir soutenu tout au long de mon travail.

Résumé

Le renouveau actuel du vocabulaire formel dans l'univers des architectures dites « non standards » s'appuie largement sur l'utilisation de modeleurs tridimensionnels. Dans cette démarche de conception, la stratégie de modélisation d'objets relève moins de l'utilisation directe de la géométrie que de la formalisation d'une idée. En effet, le travail de recherche morphologique, de la forme idée à la forme visée, nécessite de nombreux ajustements incompatibles avec une démarche linéaire de modélisation géométrique. Nous émettons l'hypothèse que la genèse des formes résulte d'opérations successives de transformation de forme fondées sur des objectifs sémantiques et guidées par une ou plusieurs images mentales.

Ce cheminement se fait par des variations importantes entre différents états de la forme et par de nombreux ajustements de cette forme.

Pour répondre à ce processus itératif nous proposons une approche paramétrique de la modélisation qui s'appuie sur des modificateurs de forme de haut niveau. Nous nommons opérateurs morphologiques ces outils d'action sur la forme qui permettent à partir d'une fonction de transformation morphologique (bomber, torsader, plisser...) de trouver par différentes solutions alternatives et par ajustement une forme satisfaisante. Notre travail aborde plus spécifiquement les opérateurs plier, plisser, froisser.

Mots clés : opérateurs morphologiques, modélisation 3D, conception architecturale.

Abstract

The current renewal of formal vocabulary in the world of architecture, so-called "non-standard", relies heavily on the use of three-dimensional modelers. In this design strategy, object modeling falls under the direct use of geometry as the formalization of an idea. Indeed work with such forms requires many adjustments incompatible with linear geometric modeling. We assume that the genesis of forms results from successive operations processing form that are founded on semantic objectives and guided by one or more mental images.

This semantic path is a variation between different states of the form and numerous adjustments to the form.

To formalize this iterative process, we propose a parametric approach based on high level modifiers of form. Morphological operators are action tools that allow finding a satisfactory form through a morphological transformation (bulging, twisting, pleating...) and adjustment.

Keywords : morphological operator, 3D design, architectural conception.

Laboratoire

MAP-CRAI

Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy

2 rue Bastien-Lepage

B.P. 40435 - 54001 Nancy Cedex

Table des matières

INTRODUCTION	1
1. LA CONCEPTION EN ARCHITECTURE.....	3
1.1. LES CARACTÉRISTIQUES DE LA CONCEPTION ARCHITECTURALE	3
1.1.1. la conception comme processus	3
1.1.1.1. Les différents types d'activités de conception.....	5
1.1.1.1.1. <i>L'activité exploratoire</i>	5
1.1.1.1.2. <i>L'activité de génération de solutions</i>	6
1.1.1.1.3. <i>L'activité d'évaluation</i>	7
1.1.2. Les différents moments de la conception architecturale.....	7
1.1.2.1. Les étapes de conception	7
1.1.2.2. Les phases de la conception	8
1.1.2.3. Les représentations dans la conception architecturale	9
1.1.2.4. Les différents types de représentations	10
1.1.2.4.1. <i>Les représentations graphiques</i>	10
1.1.2.4.2. <i>Les représentations spéculatives</i>	11
1.1.2.4.3. <i>Les représentations descriptives</i>	12
1.1.2.4.4. <i>Les représentations prescriptives</i>	12
1.1.2.4.5. <i>Les représentations procédurales</i>	12
1.1.2.4.5.1. Les verbes d'action ou opérateurs locaux de conception	1
1.1.2.4.5.2. Les schèmes ou opérateurs globaux de conception	1
1.2. LES FORMES LIBRES EN ARCHITECTURE, DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION.....	16
1.2.1. Les formes libres.....	16
1.2.2. L'architecture non standard	18
1.3. CONCLUSION	20
2. ETAT DE L'ART DES OUTILS NUMÉRIQUES EMPLOYÉS DANS LE CHAMP DE LA MORPHOGÉNÈSE.....	22
2.1. LES OUTILS NUMÉRIQUES UTILISÉS PAR L'ARCHITECTE	22
2.1.1. Les logiciels généralistes.....	22
2.1.2. Les logiciels orientés architecture	23
2.2. LES MODELEURS 3D ET PRINCIPES DE MODÉLISATION 3D	24
2.2.1. Modèles de données tridimensionnelles.....	24
2.2.1.1. « Splines »	25
2.2.1.2. « Nurbs »	27
2.2.1.3. Modélisation polygonale	27
2.2.1.4. Subdivisions de surfaces	29
2.2.2. Les opérateurs morphologiques (modificateurs)	29
2.2.3. Modélisation géométrique itérative	30
2.2.3.1. Modélisation solide.....	30
2.2.3.2. Modélisation par contraintes.....	31
2.2.3.3. Historique de modélisation.....	31
2.3. EVALUATION DES LOGICIELS.....	32
2.3.1. Protocole d'expérimentation.....	33
2.3.2. Etude de la modélisation d'un objet.....	34
2.3.2.1. Autocad	34
2.3.2.2. Archicad	35
2.3.2.3. 3D Studio Max	35
2.3.2.4. SketchUp	36
2.3.2.5. Conclusion	36
2.3.3. Etude de la modélisation d'une partie d'un bâtiment	37
2.3.3.1. Autocad	38
2.3.3.2. Archicad	38
2.3.3.3. 3D Studio Max	39
2.3.3.4. SketchUp	40
2.3.3.5. Conclusion	40

2.4. LES OUTILS EN PHASE DE RECHERCHE	41
2.4.1. Outils génératifs	42
2.4.2. Outils proposant un principe de modélisation.....	43
2.4.3. Outils proposant une interface spécifique.....	47
2.5. CONCLUSION	51
3. ELABORATION D'UN MODÈLE APPLICABLE À LA MORPHOGÉNÈSE ARCHITECTURALE	53
3.1. ETABLISSEMENT D'UN MODÈLE.....	53
3.2. LES OPÉRATIONS APPLICABLES À UNE GÉOMÉTRIE POLYGONALE.....	54
3.2.1. Les opérations géométriques	54
3.2.2. Les opérations morphologiques	55
3.2.3. Les opérateurs morphologiques.....	56
3.2.3.1. Méthode d'identification des opérateurs morphologiques	57
3.2.3.2. Analyse d'un corpus.....	57
3.2.3.2.1. <i>Guardiola House</i>	57
3.2.3.2.2. <i>Dancing House</i>	58
3.2.3.2.3. <i>La maison embyonnaire</i>	60
3.2.3.2.4. <i>Federation square, l'université de Cornell, Bell-Hoe winery</i>	61
3.2.3.2.5. <i>Gare ferroviaire, Shuhej Endo</i>	62
3.2.3.2.6. <i>"House with one wall"</i>	62
3.2.3.2.7. <i>OIC Headquarters</i>	63
3.2.3.3. Evaluation des opérations mises en évidence	64
3.2.3.3.1. <i>Bomber, Pousser, Tirer</i>	64
3.2.3.3.2. <i>Etirer, Serrer</i> 65	
3.2.3.3.3. <i>Onduler</i> 65	
3.2.3.3.4. <i>Tordre</i> 66	
3.2.3.3.5. <i>Plier, Plisser, Froisser</i>	67
3.3. CONCLUSION	67
4. VALIDATION DU MODÈLE DE MORPHOGENÈSE ARCHITECTURALE EN PHASE ESQUISSE	68
4.1. RECONSTRUCTION/MODÉLISATION PARAMÉTRIQUE D'OBJETS EXISTANTS	68
4.1.1. « House with one wall » par Christian Kerez.....	68
4.1.1.1. Analyse du processus de formalisation.....	69
4.1.1.2. Reconstruction par une modélisation	70
4.1.2. « The new Zollhof » par Frank O. Gehry	70
4.1.3. « Turning Torso » par Santiago Calatrava	74
4.1.4. « AluFelt Chair » par Marc Newson	75
4.1.5. « Zig-Zag Chair » par Gerrit Rietveld	78
4.2. CONCLUSION	80
5. PROPOSITION D'UN OUTIL D'AIDE À LA CONCEPTION ARCHITECTURALE EN PHASE ESQUISSE : « DE'FORMS »	81
5.1. MISE EN APPLICATION DU MODÈLE DANS UN OUTIL	81
5.2. SPÉCIFICATION DES OPÉRATEURS MORPHOLOGIQUES « PLIER, PLISSER, FROISSER » (CARACTÉRISATION ET PARAMÉTRISATION)	82
5.2.1. « Plier » 82	
5.2.1.1. Principes envisagés	83
5.2.1.2. Evaluation.....	86
5.2.1.3. Principe retenu	88
5.2.1.4. Principe d'implantation.....	91
5.2.1.4.1. <i>Définition directe</i>	92
5.2.1.4.2. <i>Définition indirecte</i>	92
5.2.2. « Plisser »	93
5.2.2.1. Spécification existante	94
5.2.2.2. Etude de cas.....	94
5.2.2.3. Principes envisagés	96
5.2.2.4. Généralisation et introduction d'irrégularités.....	97
5.2.2.4.1. <i>Système aléatoire</i>	97
5.2.2.4.2. <i>Maîtrise des irrégularités par une courbe « Nurbs »</i>	99
5.2.2.4.3. <i>Maîtrise des irrégularités par une « polyligne »</i>	101

5.2.3. « Froisser »	101
5.2.3.1. Principe numéro 1	102
5.2.3.2. Principe numéro 2	103
5.2.3.3. Evaluation	104
5.2.3.4. Système génératif aléatoire contrôlé	104
5.3. L'INTERFACE UTILISATEUR	105
5.3.1. Algorithme de conversion d'un point 2D dans un environnement 3D	107
5.3.2. L'interface et sa gestuelle	109
5.3.2.1. La navigation	109
5.3.2.2. Les transformations	112
5.3.3. Gestuelle spécifique à l'opérateur « Plier »	113
5.3.4. Gestuelle spécifique à l'opérateur « Plisser »	116
5.3.5. Gestuelle spécifique à l'opérateur « Froisser »	118
5.4. APPLICATION DE CES OPÉRATEURS À LA MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE D'UN OBJET ARCHITECTURAL	119
5.4.1. Conception d'un Musée à Louvain-la-Neuve à partir de l'opérateur morphologique « plier », PFE de Gilles Pignon	120
5.4.2. Conception d'une maison d'habitation à Altkirch à partir de l'opérateur morphologique « plisser » (BAAM Architecture)	123
5.4.3. Conception de la toiture pour le concours du musée de Louvain-la-Neuve à partir de l'opérateur « froisser » (BAAM Architecture)	128
5.5. CONCLUSION	132
6. CONCLUSION	133
ANNEXES	135
A.1. Les modificateurs paramétriques de 3D Studio Max	135
A.2. Complément du corpus d'exemples architecturaux mis en correspondance avec des opérations morphologiques	149
A.3. Documents produits par Gilles Pignon durant la conception du Musée de Louvain-la-Neuve.	161
A.4. Documents produits par Baam Architecture durant la conception de la maison Doll à Altkirch.	163
A.5. Documents produits par Baam Architecture durant le concours du Musée de Louvain-La-Neuve.	167
GLOSSAIRE	170
LISTE DES FIGURES	174
BIBLIOGRAPHIE	185

Introduction

L'émergence de l'outil informatique a généré de nouveaux comportements dans le monde de la conception architecturale. Cependant dans les premières phases de conception, les architectes tardent encore à l'utiliser pleinement et, le crayon et le papier restent toujours des médias très utilisés. Cette situation est probablement liée au fait que dans le domaine de l'assistance à la conception, la plupart des outils de figuration sont plus des outils de représentation d'objets préalablement conçus que des outils adaptés à la « labilité » des figures développées en conception (Schatz, 1997). De même, du côté des outils de simulation, les outils actuels sont plus souvent fondés sur des critères physiques et mesurables que sur des critères qualitatifs et préservant de l'incertitude dimensionnelle. Bien qu'utiles dans des phases avancées de vérification-contrôle, de tels outils ne participent que peu aux stades les plus en amont de l'activité de conception.

Partant de ce constat, le but de notre travail est d'exploiter les nouvelles possibilités offertes par les outils numériques en mettant en cohérence les potentialités de la CAO et les attitudes conceptuelles des architectes durant la conception d'un projet en phase esquisse. En acceptant le postulat que la mise en forme représente le cœur de l'activité architecturale, nous proposons de focaliser notre travail sur le processus que l'on qualifiera de morphogénèse architecturale.

Dans cette démarche de recherche de la forme, l'enjeu est de donner à l'architecte les moyens d'aboutir à des résultats en explorant avec des outils numériques les différents champs possibles. Ainsi il pourra prendre en compte un nombre important de données et les traiter simultanément. La difficulté d'une telle approche réside dans l'instrumentation informatique d'une sémantique architecturale qui reste peu définie et sur laquelle nous devons apporter des précisions.

Notre proposition aura pour objectif de présenter un modèle permettant de générer en 3D des formes appartenant au vocabulaire de l'architecture et de créer un outil permettant d'explorer de nouvelles morphologies (Ehret, 2007).

Afin de restreindre le champ des univers morphologiques de l'architecture nous nous situons dans le mouvement qualifié d « Architecture non standard » ("Architecture non standard", 2003).

Ce concept emprunté aux mathématiques de l'infinésimal permet de désigner des univers morphologiques dont le point commun est de se fonder sur des éléments géométriques ou des caractères physiques non réguliers.

« In all our recent designs there is NOT A SINGLE building component that is the same. All elements are unique, the big challenge of Non Standard Architecture is that it opens the ways for a new architectural language which is no longer based on repetition. » (Oosterhuis, 2006)

L'intérêt de l'approche non-standard pour notre travail est double. C'est un courant architectural dans lequel la forme est surdéterminée par les outils numériques que ce soit au stade de la conception (on parle aussi d'architecture numérique) ou au stade de la réalisation (les machines à commandes numériques indispensables à leur réalisation). C'est une approche qui a fait émerger des morphologies qui sortent des approches routinières sur lesquelles se sont largement développés les outils numériques que nous utilisons aujourd'hui.

Une telle situation nous paraît donc propice à questionner les outils numériques et à en repenser les fonctions.

Nous introduirons notre étude par un rappel des caractéristiques de la conception architecturale afin de comprendre les mécanismes invoqués par l'architecte durant la phase esquisse.

Puis nous ferons un état de l'art des outils de représentation numérique utilisés par les architectes durant cette même phase. Nous analyserons ces outils dans le but de vérifier si les caractéristiques identifiées précédemment sont prise en compte.

Partant des constats de cette analyse, nous nous intéresserons plus particulièrement aux opérations et aux opérateurs de transformation de forme dont nous proposerons un modèle que nous validerons en reconstituant des phases concrètes de morphogénèses sur des objets références. Nous implémenterons quelques uns de ces opérateurs dans un outil dédié à la conception architecturale, que nous validerons en le mettant en action sur des projets d'architecture. Notre choix s'est porté sur les opérateurs appartenant à la famille des transformations par pli (plier, plisser, froisser) qui apparaissent fréquemment dans les architectures non standards.

Enfin, le dernier chapitre conclura notre exposé en présentant les avantages, les limites et les perspectives de notre proposition.

1. La conception en architecture

1.1. Les caractéristiques de la conception architecturale

1.1.1. la conception comme processus

Depuis les années 60, la recherche autour des sciences cognitives a déplacé les questions théoriques en architecture. Alors que de Vitruve à Le Corbusier l'architecture était abordée dans les écrits essentiellement comme un « art de bâtir », elle devient, avec en particulier les travaux de H. Simon (Simon, 1957), un « art de concevoir ». Ce changement n'est pas neutre car il fait de l'architecture non plus un objet à édifier dont les traités et doctrines définissent le contour mais un objet de connaissances que les théories doivent construire.

De nombreux travaux (Epron, 1981; Mitchell, 1990) se sont donc intéressés à cet objet de savoir définissant en particulier l'architecture comme un processus, c'est à dire comme un ensemble d'opérations successives organisées en vue d'obtenir un résultat déterminé.

Ainsi pour Philippe Boudon la conception est « un processus diachronique qui implique une transformation progressive de ce qui est en projet et, partant, des modèles répétés ». Les opérations sont ce qui règle le passage d'un état à un autre dans un tel processus (Boudon, 1994).

Plusieurs publications caractérisent ce processus comme étant complexe et lent (Prost, 1992; Simon, 1969). Il est complexe parce qu'il doit prendre en compte un nombre élevé de paramètres qui ont des degrés d'importances différents et comportant plusieurs niveaux. Il est également décrit comme lent parce qu'il correspond à des activités itératives répondant à divers questionnements afin d'obtenir une solution « acceptable » (Asimow, 1962; Conan, 1990).

Différents modèles ont été proposés pour tenter d'exprimer ce processus dont le plus connu est celui de John Christopher Jones. Celui-ci met au premier plan la part d'inconnu existant dans l'activité créative. Il définit alors le concept de la boîte noire (Gordon, 1961; Jones, 1970; Osborn, 1963) qu'il différencie du concept de la boîte de verre.

La notion de la boîte noire représente un concepteur produisant un résultat satisfaisant sans pour autant en comprendre les raisons. « La conception serait le fruit d'un travail opaque du cerveau dont on ne saurait décrire que ce qui y entre et ce qui en sort » (Conan, 1990).

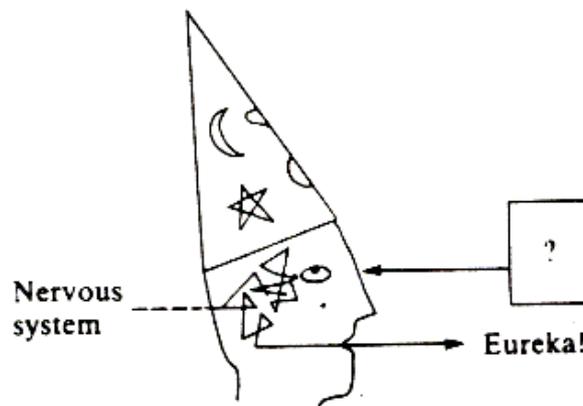


Figure 1. Le concepteur magicien (boîte noire).

La boîte noire se situe en opposition au concept de la boîte de verre qui caractérise un concepteur « machine » qui à partir de données d'entrée va produire la meilleure solution possible. Ce système décrit un processus qui optimise une solution de façon itérative.

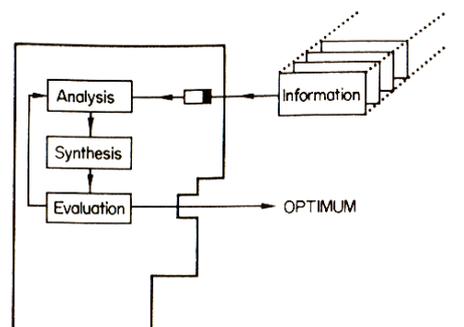


Figure 2. Le concepteur ordinateur (boîte de verre).

Ces deux modèles restent extrêmement réducteurs pour caractériser la conception car si la complexité de cette dernière la rend difficilement exprimable dans un modèle totalement formalisable, plusieurs des activités qui s'y rattachent peuvent faire l'objet d'explicitations.

Ainsi la communauté scientifique s'accorde à dire que l'activité de conception se caractérise par un processus itératif d'exploration, de génération de solutions et surtout d'évaluation constante.

Dans la suite de notre exposé, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'activité de l'architecte en phase esquisse. Cette activité qui concerne les premiers moments de la conception constitue pour nous une activité importante qu'il est intéressant d'étudier. C'est en effet au stade de l'esquisse que se définissent les concepts fondamentaux caractérisant

le projet et la morphologie générale du bâtiment. C'est également à ce moment que la pensée est la plus « hésitante » et doit faire appel à des modes d'exploration et de figuration très « élastiques » (Hamburger & Thiebaut, 1995).

1.1.1.1. Les différents types d'activités de conception

Le processus de conception fait appel à trois types d'activités cognitives distinctes, l'exploration, la génération de solutions et l'évaluation. Dans l'activité de conception, l'architecte doit répondre à des problèmes qui sont en général mal ou partiellement définis. De plus la définition des contraintes évolue au fur et à mesure que le projet se concrétise. Avançant avec des hypothèses partiellement établies, le concepteur va dans un premier temps explorer les contraintes et ainsi établir un champ du possible. A partir de ses observations, il va envisager des solutions en faisant abstraction de certaines contraintes. Ces solutions potentielles vont ensuite être évaluées en tenant compte de l'ensemble des contraintes du projet en vue de modifier, d'écarter, de valider ou de reformuler certaines contraintes ou solutions (Conan, 1990; Prost, 1992). Pour représenter ces alternatives, le concepteur va le plus souvent réaliser des croquis synthétique.

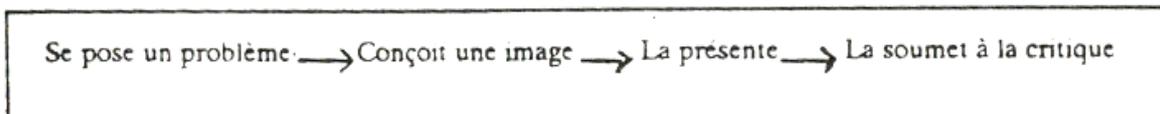


Figure 3. Cycle de conception (Conan, 1990)

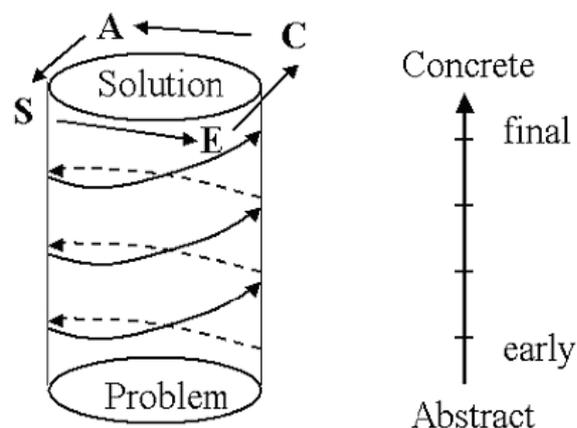


Figure 4. Cycle de conception (Asimow, 1962)

1.1.1.1.1. L'activité exploratoire

L'activité exploratoire constitue une activité de recherche qui met en jeu le savoir et l'expérience parallèlement à des données externes que le concepteur doit recueillir pour les assimiler. Il pourra ainsi délimiter les contraintes du projet à concevoir.

Ernest Edmonds et Linda Candy dans leurs travaux présentent la connaissance comme un élément clé dans l'exploration des idées et des alternatives (Edmonds & Candy, 2002). Les architectes vont ainsi utiliser des retours d'expérience pour concevoir ou améliorer leur projet. Ces retours d'expérience peuvent venir de la pratique propre du concepteur et former un système de références réutilisables dans des activités de conception similaires.

Ils peuvent également appartenir à des savoirs partagés par la communauté professionnelle et culturelle à laquelle le concepteur appartient. Ainsi le « pattern language » de Christopher Alexander vise à construire un langage de modèles partageables (Alexander, 1977).

L'activité exploratoire se présente donc comme une activité transversale qui utilise des connaissances qui seront examinées, évaluées et interprétées pour nourrir les futures activités.

1.1.1.1.2. L'activité de génération de solutions

La génération de solutions est une activité basée sur l'expérimentation. L'acte de conception architecturale étant un processus visant à faire évoluer un projet, il opère sur des hypothèses de solutions. Il s'inscrit dans une démarche itérative visant à la génération de propositions acceptables. Ces solutions sont obtenues par la synthèse des connaissances du concepteur mais aussi par l'essai et la spéculation à partir des questionnements et des contraintes formulées durant l'activité exploratoire.

Ce travail s'organise autour de propositions de formes comme les formes des espaces, ou celles des éléments physiques. Pour désigner cette activité nous empruntons au domaine des sciences du vivant le terme de morphogénèse.

Le préfixe « Morpho- » vient du grec *morphê* qui désigne la « forme », et le suffixe « -génèse » vient du latin *genesis* qui indique une « naissance, une formation, une production ».

Par similitude avec les acceptions du terme dans les sciences du vivant, le processus de morphogénèse en architecture résulte de la confrontation entre des forces internes (exprimées par les intentions de l'architecte) et des conditions externes (le contexte du projet).

Par différence avec ce qui se passe dans le domaine du vivant, l'activité de mise en forme est une activité largement consciente et volontaire orientée par le concepteur. Une particularité résulte de cette situation. Selon Ernest A. Edmonds et Linda Candy (Edmonds & Candy, 2002) le concepteur doit garder simultanément plusieurs approches ou chemins parallèles pour favoriser l'apparition de nouvelles idées. C'est l'évaluation de chacune des solutions proposées qui permet d'avancer sur le chemin le plus favorable

1.1.1.1.3. L'activité d'évaluation

Lorsqu'une solution potentielle est générée, le concepteur passe à une activité d'évaluation de la solution par rapport à toutes les contraintes énoncées durant l'activité exploratoire ou celles rencontrées pendant l'activité de morphogénèse. Cette évaluation peut se faire au regard des données du programme (surfaces, exigences fonctionnelles, couts...) ou des intentions de l'architecte (cohérence de la solution, lisibilité des concepts, ambiances...).

Par l'évaluation, l'architecte va modifier, reformuler ou écarter la solution, celle-ci constituant soit la solution ultime soit un nouveau point de départ pour favoriser l'émergence de nouvelles solutions. Ce caractère d'évaluation donne une grande importance à cette activité dans la conception architecturale (Rowe, 1987), et en fait un processus itératif. De plus l'évaluation permanente entraîne une modification de l'espace de solutions, ce qui permet l'émergence de nouvelles explorations et solutions.

1.1.2. Les différents moments de la conception architecturale

1.1.2.1. Les étapes de conception

Le processus de projet résulte d'un ensemble d'actions qui se déroulent dans le temps et combinent les différentes activités abordées précédemment.

Par exemple pour Santiago Calatrava, le processus créatif est une stratification d'éléments figuratifs d'une image mentale. Ces éléments sont organisés entre eux et permettent de suivre le cheminement cognitif du concepteur. « Pour commencer, on visualise la chose mentalement ; cela n'existe pas sur le papier, mais on commence alors à faire de simples croquis et à organiser les choses, et ensuite, on procède couche après couche... C'est vraiment un dialogue » (Lawson, 1994).

Edith Girard décrit également ce déroulement en mentionnant des étapes. « L'architecte doit, à la fois inventer et contrôler en permanence la manière dont il invente, en sachant précisément où il en est dans l'évolution de son projet, par quelles étapes il est passé, en gardant à l'esprit les principales bifurcations de son itinéraire et le chemin qui lui reste à parcourir. » (De Biasi, 2000)

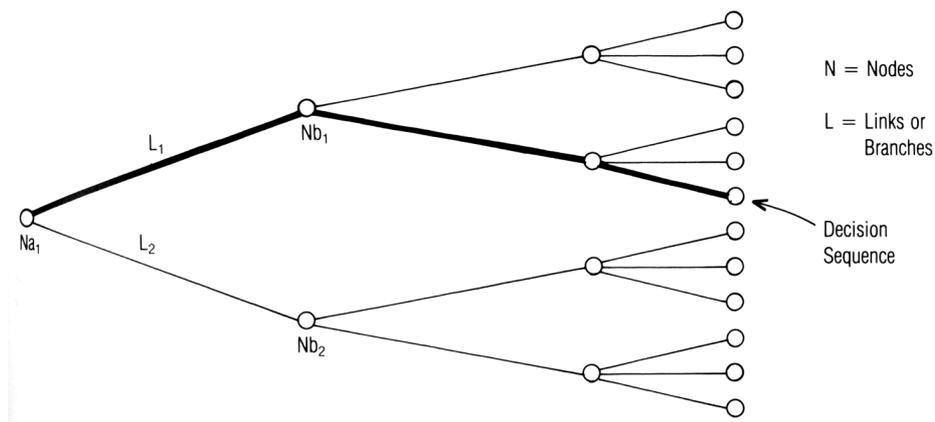


Figure 5. Arbre décisionnel (Rowe, 1987).

On peut représenter ce cheminement par un arbre décisionnel qui retrace l'évolution du projet, depuis un état initial jusqu'au résultat final, à travers une série d'états intermédiaires (Figure 5). Chaque nœud représente un état du projet et chaque arc figure une action transformant l'état courant en état suivant. A chaque état (nœud), la question du choix entre plusieurs solutions (arcs) peut se poser. L'état final du projet est représenté par un chemin unique, succession de nœuds et d'arcs.

Pendant tout travail de production, bien au-delà du champ de la conception architecturale, comporte des phases de retour en arrière, pour développer une solution alternative à partir d'un état antérieur.

Mentionnons également que la particularité de la démarche de conception, est de faire coexister plusieurs solutions alternatives, parce qu'elles comportent chacune des avantages et des inconvénients, et qu'il est souvent nécessaire de les développer en parallèle avant de pouvoir opter définitivement pour l'une ou l'autre. Cela exige de maintenir, simultanément dans l'arbre de décision, plusieurs chemins potentiels, représentant les variantes du projet. Il est alors nécessaire d'utiliser des graphes qui comportent des cycles et des arcs convergents pour mieux représenter la conception.

1.1.2.2. Les phases de la conception

La conception architecturale correspond pour une part à une activité créative. L'architecte va observer différentes phases en vue de produire un bâtiment. Ces phases sont définies en France par loi MOP et sont aux nombres de quatre, esquisse, avant-projet, projet et exécution. Durant ces phases l'architecte utilise les trois activités, exploratoire, de générations de solution et d'évaluation dans le but d'aboutir à une ou plusieurs étapes du projet en cours de conception. A la fin d'une phase lorsqu'une solution est jugée satisfaisante par le concepteur et les acteurs du projet, le concepteur va clôturer la phase en cours et commencer la phase suivante avec comme point de départ l'étape validée. Les étapes ainsi que les relations qui les lient constituent le cœur de chaque phase. Dans une

phase, chaque étape dispose d'une représentation pour la caractériser, il s'agit maintenant d'en définir les types.

1.1.2.3. Les représentations dans la conception architecturale

Tous les concepteurs et toutes les études portant sur la conception caractérisent d'essentiel le rôle de la représentation graphique dans l'activité de conception. Plusieurs explications sont avancées.

Pour Peter G. Rowe, la représentation constitue plus qu'un moyen de projection des idées, elle induit intrinsèquement la qualité des solutions du possible (Rowe, 1987). En effet, chaque type de représentations que l'architecte emploie lui permet d'explorer un ensemble du champ des solutions. Par exemple une coupe peut permettre la validation de l'échappée induite par l'emplacement d'un escalier, ou un croquis en perspective peut permettre de simuler les proportions d'un projet.

Pour Jean-Charles Lebahar qui définit la conception comme un travail heuristique avançant par simulation graphique, la figuration permet à l'architecte de cristalliser ses idées dans la forme du projet. Le concepteur représente ainsi «l'objet en création et la pensée qui le crée» (Lebahar, 1983).

Michael Graves identifie « la réciprocité inévitable qui se produit dans un processus architectural de conception entre l'acte du dessin et la pensée qui lui est associée - entre «l'image » et « l'esprit » » (Graves, 1977). Cette interprétation met l'accent sur l'existence d'un lien entre représentation d'un objet et l'objet abstrait en cours de conception. L'étude de ce lien pourrait permettre une meilleure compréhension de la manière dont émergent les idées durant l'activité cognitive en cours de conception.

Nous pouvons donc affirmer que l'utilisation de la représentation, quel que soit le média exploité, ne se limite pas à être une simple figuration d'éléments préalablement conçus, mais est aussi un outil heuristique indispensable à la conception. Le dessin favorise le dialogue de l'architecte avec lui-même et avec ses partenaires et permet l'élucidation et la mise au jour des idées du projet.

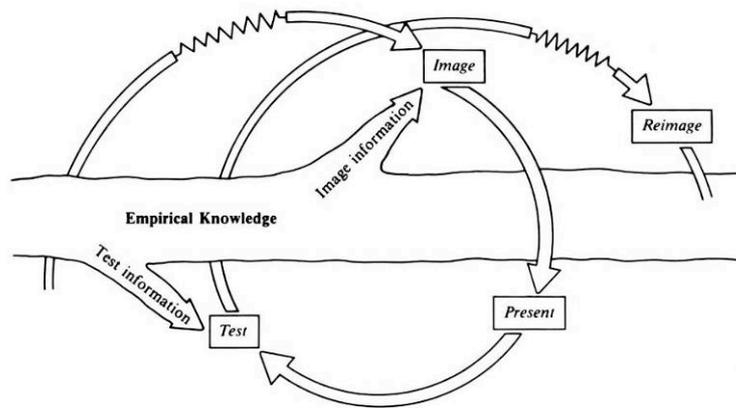


Figure 6. Utilisation heuristique de l'image comme base empirique à la prise de décision (Zeisel, 1984)

1.1.2.4. Les différents types de représentations

Nous distinguerons dans le présent chapitre deux types de représentations. Les représentations déclaratives définissent un état des objets à concevoir ou conçus. Elles ont une forme prédicative en désignant ce que sera l'objet réalisé.

Les représentations graphiques appartiennent à cette première catégorie. Elles tentent par un rapport analogique plus ou moins codifié de construire un modèle visuel du projet. Véritable « analogon » du but à atteindre, les représentations déclaratives sont essentiellement statiques.

« Les représentations procédurales décrivent au contraire des processus visant à atteindre un but exprimé. Elles ont une forme opératoire et se situent du côté des actions à conduire pour avancer dans l'activité de conception. Elles appartiennent au registre des savoir faire et même pour certains auteurs à celui des traitements. (Hoc, 1987)»

Les représentations par des verbes d'actions localisées (accrocher) ou plus généraux (agrandir) appartiennent aux traitements dynamiques qui servent à opérer des transformations d'états.

Les deux modes de représentation sont étroitement liés au point que l'on parle parfois de système de représentation

1.1.2.4.1. Les représentations graphiques

Afin de caractériser les types de représentations graphiques utilisées durant le processus de conception architecturale nous nous appuyons sur les qualificatifs utilisés par Daniel Estevez pour distinguer les dessins d'architecture, à savoir spéculatif, descriptif et prescriptif (Estevez, 2001).

Pour Daniel Estevez, le dessin descriptif constitue pour l'architecte un vecteur de communication en montrant le projet. Le dessin prescriptif, plus technique va permettre la construction du bâtiment. Enfin, le dessin spéculatif représente le support principal de l'activité créative et conceptuelle. Toutefois cette classification du dessin d'architecture et des représentations ne constitue pas un cloisonnement étanche, en effet ces trois grandes fonctions s'entremêlent et s'influencent durant le processus de conception.

1.1.2.4.2. Les représentations spéculatives

L'architecte utilise des représentations spéculatives principalement au début de la phase de conception. Ces représentations vont au-delà d'un simple dessin ou d'une maquette car ils intègrent une certaine abstraction visant à valider par sa représentation un concept ou une idée. L'architecte va alors s'appuyer sur ces représentations comme instrument pour valider les orientations d'un projet. Elles vont le lui permettre d'obtenir des variations et forment une sorte de dialogue entre le concepteur et l'objet représenté.

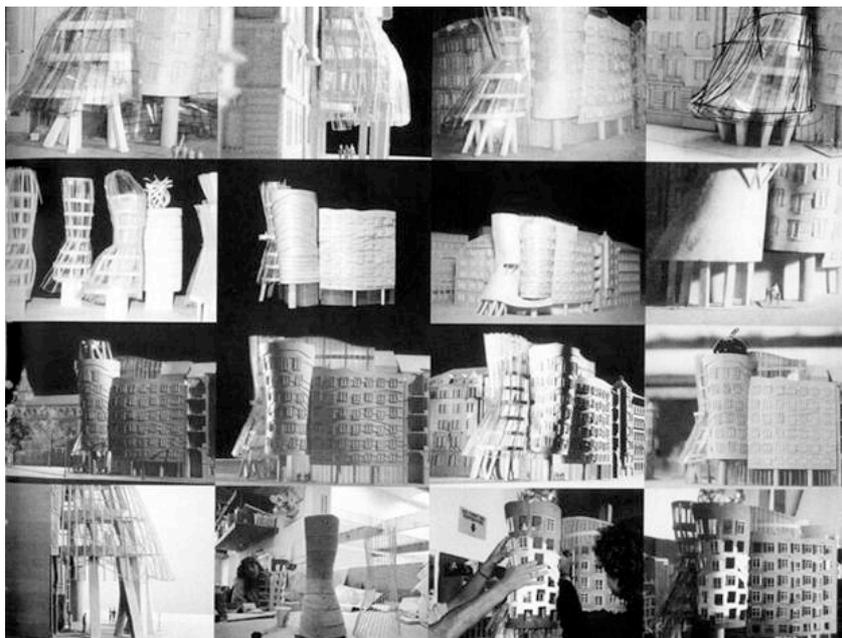


Figure 7. Exemples de maquettes réalisées pour le bâtiment Dancing House à Prague, Frank O. Gehry.

La mise en relations successives entre ces représentations et les contraintes du projet permettent une évaluation rapide des réponses ainsi représentées et permettent la recherche de cohérence par « réduction d'incertitude » (Lebahar, 1983). Ces représentations spéculatives peuvent être issues de supports divers. Certains architectes comme Frank O. Gehry adoptant une approche très formelle préféreront le travail en maquette, d'autres utiliseront l'écriture ou le dessin.

Ce type de représentation ne dispose pas de règles de représentation et la précision de la mesure ou d'échelle ne sont pas forcément respectées. Il devient pour l'architecte « un

moyen de simplifier la réalité pour illustrer une intention en allant à l'essentiel » (Estevez, 2001). De part leurs concision et imprécision liées à l'aspect « flou » du raisonnement en cours de conception, ces représentations constituent un prolongement de la pensée de l'architecte.

Le concepteur garde par ce biais des traces de son activité cognitive et dispose d'une mémoire constituée de manière empirique dans laquelle il va pouvoir puiser durant toutes les phases de l'activité de conception (Figure 6).

1.1.2.4.3. Les représentations descriptives

Les représentations descriptives permettent à l'architecte de communiquer son projet. Ces représentations comportent une part d'indéfinition dans le but de ne pas figer complètement le projet. Elles illustrent les idées et les concepts mis en place par le concepteur. Les techniques utilisées pour ce type de représentation sont principalement la perspective et la maquette parce qu'elles permettent d'être comprises par le plus grand nombre. Ces représentations sont réalisées principalement à la fin de la phase de conception et à la fin de chaque phase de la production du bâtiment (APS, APD, PC,...) dans le but d'obtenir l'approbation du commanditaire.

1.1.2.4.4. Les représentations prescriptives

Contrairement aux représentations descriptives, les représentations prescriptives ne comportent pas d'imprécisions. Elles servent à décrire le bâtiment dans le but de le produire. Elles doivent répondre à des codes graphiques permettant d'être compris par les acteurs intervenant durant la construction. Ces représentations constituent une concrétisation technique des autres types de représentation. Le passage à ce niveau de précision permet de supprimer toutes ambiguïtés dans la définition de l'objet conçu. L'espace de solution se réduit alors à la solution choisie et la réversibilité des choix devient alors moins évidente.

1.1.2.4.5. Les représentations procédurales

Pour illustrer cette approche nous nous appuyerons sur les démarches de deux concepteurs. Le premier, le sculpteur Richard Serra a développé à la fin des années 60 une stratégie de conception fondée explicitement sur des verbes transitifs conjugués à l'infinitif. Il construit une « verb list » fonctionnant comme un véritable protocole d'action qui le guide dans son travail de façonnage de la matière. Le second, l'architecte et sociologue Dominique Raynaud, dans un travail sur l'architecture comparée s'attache à comprendre la dynamique des formes en architecture en développant la notion de schème empruntée à la psychologie cognitive et en particulier aux travaux de Piaget.

1.1.2.4.5.1. Les verbes d'action ou opérateurs locaux de conception

A partir de 1967, Richard Serra utilise dans ses œuvres des verbes d'actions (Figure 8) qui donnent un sens aux opérations formelles réalisées. Ces verbes liés au processus de réalisation de l'œuvre sont chez Serra des représentations sémantiques élémentaires. Ils désignent autant des actions concrètes sur la matière que des actions sur l'espace des œuvres. Véritables concepts-en-acte ces verbes ou mouvements s'enchaînent et s'utilisent comme des outils pour mettre en forme l'œuvre au cours de sa conception.

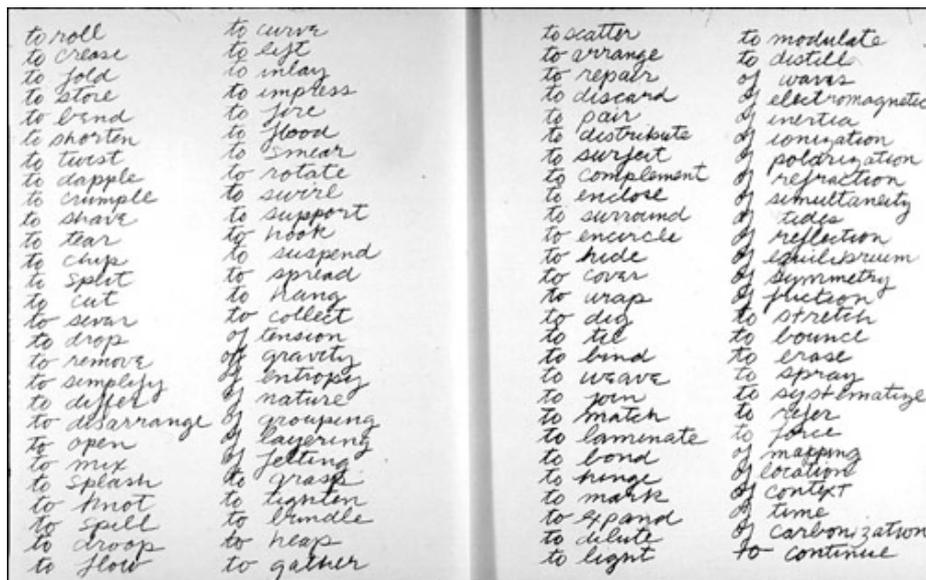


Figure 8. Liste de verbes de Richard Serra 1967-68. (Serra, 1990).

« En 1967 et en 1968, j'ai écrit une liste de verbes comme moyen d'appliquer des actions diverses à des matériaux quelconques. Rouler, plier, courber, raccourcir, raboter, déchirer, tailler, fendre, couper, trancher... Le langage structurait mes activités en relation avec des matériaux qui occupaient la même fonction que des verbes transitifs (Serra, 1990). » Nous caractérisons ces verbes d'actions qui sont des représentations sémantiques de la pensée par des schèmes.

Opérateurs de morphogénèse, ces verbes peuvent être utilisés de manière indépendante ou combinés et former ainsi une représentation de l'œuvre à des niveaux de globalité différents.

Bien qu'utilisés de manière répétée, leur combinaison restent propre à chaque œuvre et à chaque situation et les transformations opérées sont toujours circonstanciées. On peut parler d'opérateurs essentiellement locaux.

1.1.2.4.5.2. Les schèmes ou opérateurs globaux de conception

Les travaux d'analyse menés par Dominique Raynaud s'attachent à mettre au jour des opérateurs plus « ensemblistes » se rapprochant des travaux de Piaget sur les schèmes (Piaget, 1936).

Ainsi Dominique Raynaud dans « Architectures comparées » (Raynaud, 1998) définit le schème comme un « descripteur d'une opération de conception ».

Dominique Raynaud va caractériser vingt quatre actions à travers des exemples empruntés à l'histoire de l'architecture. Le schème est défini par une caractérisation formelle de l'image mentale du concepteur sur l'ensemble d'un projet. Il va ainsi définir trois classes de schèmes :

- les « schèmes divergents » qui « manifestent un mouvement centrifuge, qui produisent un écartement, une séparation ou une dissociation »,
- les « schèmes avergents » qui « composent une classe de mouvements aisément reconnaissables à ceci qu'ils ne divergent ni ne convergent, qu'ils ne sont ni centrifuges, ni centripètes,
- les « schèmes convergents » qui impliquent un mouvement de resserrement.

Schèmes		
Divergents	Avergents	Convergents
Monter	Tourner	Contenir
Rayonner	Passer	Couvrir
Ouvrir	Onduler	Descendre
Commencer	Être	Unir
Séparer	Répéter	Lier
Clôturer	Entourer	Diminuer
Sortir	Croiser	Finir
Grandir	Battre	Entrer

Figure 9. Listes des schèmes caractérisés par Dominique Raynaud (Raynaud, 1998).



Figure 10. Exemple de l'utilisation du schème « onduler » par Alvar Aalto dans la bibliothèque Viipuri (Frampton, Korvenmaa, Pallasmaa, Reed, & Treib, 1998).

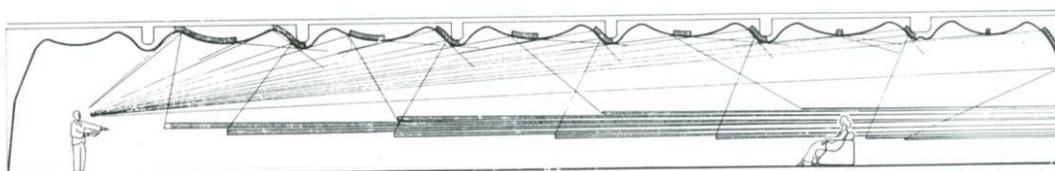


Figure 11. Coupe de la bibliothèque Viipuri (Lahti & Holma, 1996).

Dans une autre publication, Dominique Raynaud va affiner sa définition en la rendant plus générale (Raynaud, 1999). Le schème n'est plus présenté comme une seule action générale sur la forme menée par l'architecte, mais un ensemble d'actions morphologiques élémentaires invoquées par le concepteur durant une phase de morphogénèse. Dans cette optique, les schèmes constituent un ensemble d'opérateurs élémentaires visant à formaliser une idée par une action sur une partie ou sur tout un projet.

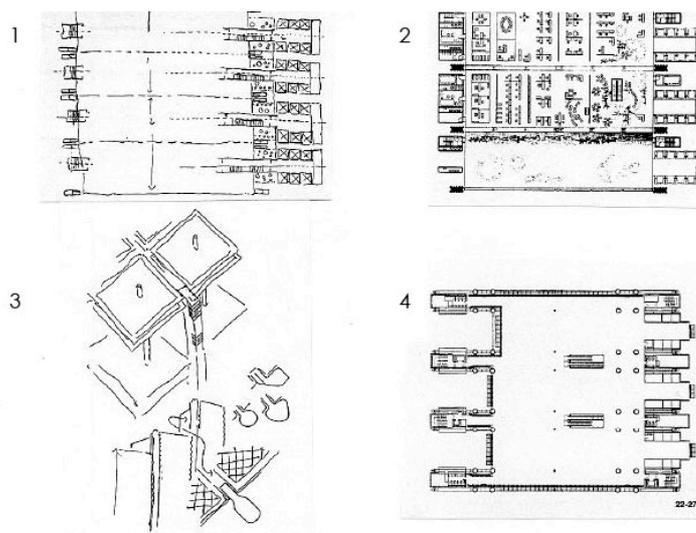


Figure 12. Croquis et plans montrant le glissement des escaliers de l'intérieur vers l'extérieur du bâtiment conçu par Norman Foster. (Raynaud, 1999)

Par exemple durant la conception du projet de la Hongkong Banking Corporation en 1986, Norman Foster opère un déplacement des escaliers de l'intérieur vers l'extérieur. Cette opération peut être décrite par l'opérateur sortir (Figure 12)(Raynaud, 1999).

Sortir (escalier, façade) = escalier extérieur

Grâce à ces opérateurs, il devient possible de représenter l'ensemble du processus de conception d'un projet comme une suite d'opérations élémentaires menant à un ou plusieurs états finaux en passant par des états intermédiaires.

1.2. Les formes libres en architecture, dans le processus de conception

L'expression « formes libres » est un terme générique qui permet de désigner un ensemble de courants architecturaux qui privilégient la forme dans le processus de conception. Nous procéderons à la définition de l'architecture à forme libre ainsi que l'une de ses composantes la plus récente l'architecture non standard.

1.2.1. Les formes libres

Nous qualifions de « forme libre », un projet architectural qui dispose d'une forme complexe, c'est à dire d'une forme qu'on ne peut désigner, représenter et/ou réaliser à partir de moyens communs. Pour concevoir ces formes l'architecte est alors amené à utiliser des outils évolués de conception qui sont dérivés des mathématiques modernes et des possibilités offertes par l'informatique. Dans ce type de projet, la recherche formelle est souvent prédominante, elle est le résultat d'une démarche le plus souvent métaphorique comme nous allons le voir sur quelques exemples.

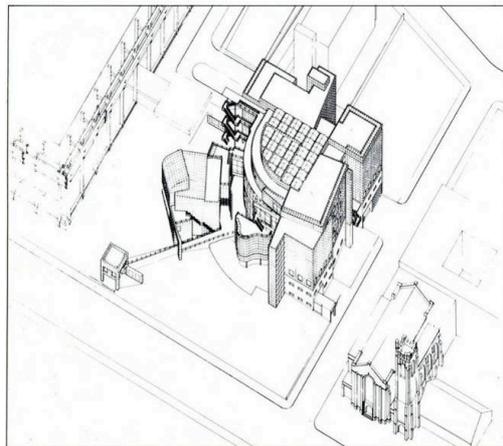


Figure 13. High Museum par Richard Meier, Atlanta (Meiss, 1986).

A partir des années 50 grâce aux progrès des mathématiques et de la géométrie, la complexité formelle se manifeste de façon plus marquée dans le projet d'architecture. Cette complexité intervient à différents niveaux. Par exemple, elle peut se manifester par déviation d'une norme ou être le résultat d'un écart avec une symétrie. Le High Museum de Richard

Meier à Atlanta illustre (*Figure 13*) cette pratique de la forme architecturale. L'orthogonalité du bâtiment est volontairement cassée par l'introduction de plusieurs pivotements des axes générateurs du plan.

Une autre attitude permettant d'aborder la complexité de la forme peut être caractérisée par l'utilisation de la géométrie descriptive et des surfaces gauches visant à générer la forme d'un bâtiment. La conception du pavillon Philips réalisé pour l'exposition universelle de Bruxelles de 1958 par Le Corbusier aidé par Iannis Xenakis en constitue un exemple caractéristique. Ce bâtiment utilisant des formes issues des mathématiques a pour but de présenter une œuvre musicale contemporaine d'Edgar Varèse, « Poèmes électroniques ».

A partir de paraboloides hyperboliques et de conoïdes ajustés petit à petit, l'architecte est parvenu à obtenir une forme fluide et constructible. Ce sont également des contraintes d'ordre constructif qui ont édicté une partie de la forme du bâtiment. (Xenakis, 1971)

Les câblages nécessaires à la réalisation de l'enveloppe en béton précontraint d'une épaisseur de 5 cm sont mis en place grâce à la géométrie descriptive. La forme du bâtiment a d'ailleurs dû être modifiée à plusieurs reprises pour satisfaire le protocole complexe de mise en œuvre mis au point par les ingénieurs. Les conoïdes ont notamment été transformés en paraboloides hyperboliques et certains paraboloides hyperboliques concaves sont devenus convexes pour stabiliser le bâtiment.

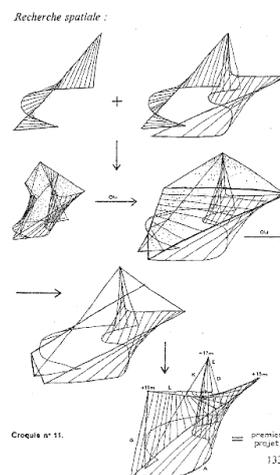


Figure 14. Pavillon Philips, Le Corbusier, Xenakis, Exposition Universelle de Bruxelles, 1958.

« Le pavillon Philips de par son architecture s'insère non seulement dans une démarche plastique nouvelle mais de plus a provoqué la découverte d'un moyen original et général de mise en œuvre sans coffrage de ces surfaces difficiles, qui réalisant ainsi une mise en œuvre bâtie en tout point originale, appartient à une nouvelle architecture révolutionnaire, l'architecture volumique. » (Xenakis, 1971)



Figure 15. Photo de la maquette du Pavillon Philips présentée durant l'exposition temporaire sur Le Corbusier au musée d'art moderne et contemporain de Lisbonne (Photo : Jean-Claude Bignon).

L'architecture à forme libre est constituée par un ensemble de courants architecturaux qui utilisent les sciences et techniques (mathématique, informatique, géométrie,...) pour concevoir un projet présentant des formes complexes ne se conformant à aucun traité d'architecture.

Ainsi, à partir des années 80 parallèlement à l'avènement des outils issus des technologies de l'information, nous avons assisté à une complexification sans précédent de la forme des bâtiments construits.

1.2.2. L'architecture non standard



Figure 16. Terminus du Tramway de Hoenheim par Zaha Hadid, Strasbourg.

La démocratisation de la CAO a donné aux architectes des outils permettant de travailler sur la géométrie globale du bâtiment et non plus sur des vues partielles, comme les plans ou

les perspectives. La géométrie descriptive et la perspective ne sont plus des exercices longs et complexes mais sont mis en œuvre en temps réel dans les outils de modélisation 3D. Les grandes agences d'architecture celles de Zaha Hadid ou Frank O. Gehry les utilisent pour leur souplesse et pour la description de formes qu'il serait difficile voire impossible de dessiner d'une autre manière.

Figure 17. Découpage par jet plasma-arc d'éléments en acier pour le pavillon conçu par Oosterhuis.nl pour l'exposition internationale d'horticulture les Floriades 2002 à Haarlemmermeer au Pays-Bas (Boer & Oosterhuis, 2004).

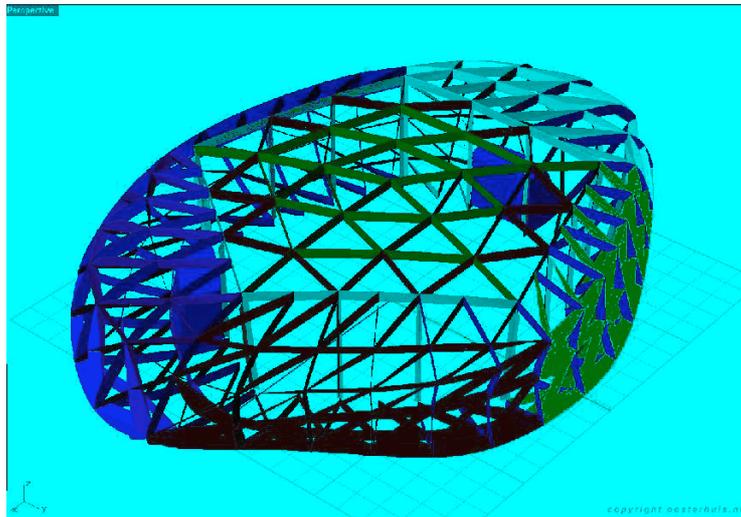


Figure 18. Représentation dans un logiciel 3d du pavillon conçu par Oosterhuis.nl pour l'exposition internationale d'horticulture les Floriades 2002 à Haarlemmermeer au Pays-Bas (Boer & Oosterhuis, 2004).

Non seulement les outils numériques permettent la description de formes complexes, mais ils permettent aussi leur réalisation à l'échelle 1. Les modeleurs 3D actuels sont facilement interfaçables avec des outils de découpage numérique issus de l'industrie mécanique (Figure 17). L'architecte peut alors entièrement concevoir un bâtiment avec des outils numériques. Grâce à la notion de « continuum digital » entre la conception et la réalisation, le concepteur dématérialise tous les actes, de la conception jusqu'à la matérialisation du projet. Nous pouvons donner l'exemple de Frank O. Gehry ou d'Oosterhuis.nl qui utilisent des outils issus de l'aéronautique dans la phase de réalisation de leurs bâtiments.

Nous qualifions ces architectures d'architecture non standard. Ce courant architectural dans lequel les outils numériques sont présents autant au stade de la conception (on parle aussi d'architecture numérique) qu'au stade de la réalisation (les machines à commandes numériques indispensables à leur réalisation) se caractérise par un langage formel fort (Figure 19) qui a comme particularité de rendre visible l'ensemble du processus de

conception. Il s'inspire aussi des techniques issues de la production industrielle et les met en œuvre durant toutes les phases et étapes de conception du projet.

« La notion de "non standard" est apparue en mathématiques en 1961 avec les travaux d'Abraham Robinson. Les implications en sont multiples et touchent à toutes les disciplines où des systèmes algorithmiques peuvent être appliqués, par exemple l'intelligence artificielle, mais aussi la morphogénétique (le développement des formes). » ("Architecture non standard", 2003)

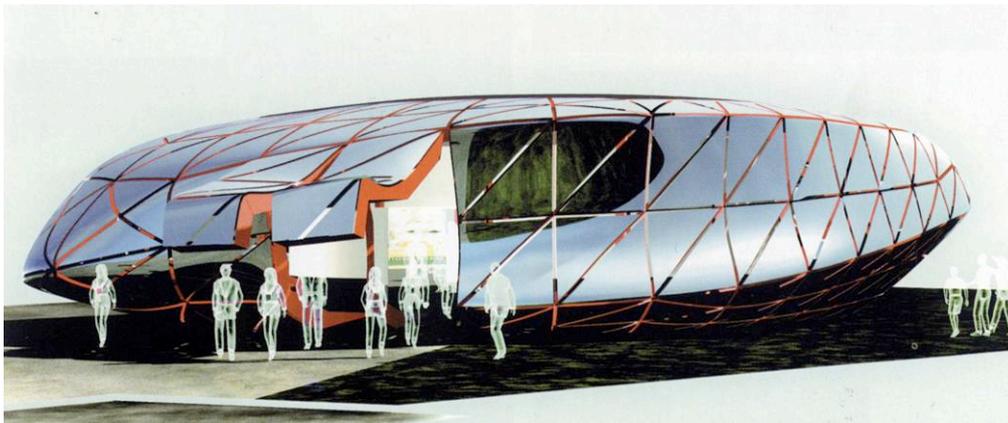


Figure 19. Bâtiment conçu par Oosterhuis.nl pour l'exposition internationale d'horticulture les Floriades 2002 à Haarlemmermeer au Pays-Bas ("Architecture non standard", 2003)

L'intérêt de l'approche non-standard pour notre travail réside dans l'aptitude de ce courant à faire intervenir les outils numériques non seulement dans la conception mais aussi dans la fabrication. Elle rend ainsi représentable et constructible des formes appartenant par le passé au domaine de l'utopie.

Afin de restreindre le champ des univers morphologiques de l'architecture nous situerons notre domaine d'étude dans ce mouvement. Pour enrichir ce nouveau langage architectural, l'enjeu réside dans la conception d'outils informatiques utilisables par l'architecte en phase esquisse. Nous pensons qu'en donnant à l'architecte de tels outils en cours de la morphogénèse d'un bâtiment, la forme obtenue serait plus en accord avec l'image mentale du concepteur.

1.3. Conclusion

A partir de notre rapide analyse de la conception architecturale et au regard de notre approche sur la morphogénèse, nous pouvons définir la conception comme un processus de transformation de forme qui s'appuie sur des représentations graphiques adaptées au niveau de conception et des traitements procéduraux permettant le changement d'état. Dans ce processus, les schèmes ou les verbes d'actions qui les constituent apparaissent comme des dispositifs particulièrement pertinents dans les phases créatives de recherche formelle. Ils sont pour nous des opérateurs permettant de passer d'une « forme-source » à une « forme-

but ». La « forme-source » étant la forme initiale définie par l'architecte du projet et la « forme-but » étant la forme finale ou une forme intermédiaire du projet voulue par l'architecte.

En partant de l'analyse d'un corpus de projet de type non standard afin de faire ressortir puis définir ces opérateurs, nous proposerons l'implémentation informatique de ces opérateurs dans un outil de modélisation 3D en vue d'instrumenter les premières étapes de conception dans un projet d'architecture.

2. Etat de l'art des outils numériques employés dans le champ de la morphogénèse

Nous allons dans ce chapitre identifier les fonctionnalités présentes dans les logiciels de CAO (plan 2D, orienté objet, modélisation 3D par Splines, par NURBS, polygonale, par subdivision de maillage, par opérateur morphologique, modélisation géométrique itérative). Après une présentation des principes de fonctionnement et de modélisation 3D des logiciels de CAO et modeleurs existants, nous allons évaluer ces outils, par rapport à une activité de conception en phase esquisse, en procédant à une modélisation 3D d'un objet et de ces variations. Nous allons ainsi mettre en évidence l'outil le plus adapté à ce type de pratique et faire ressortir les pistes de recherche à exploiter.

2.1. Les outils numériques utilisés par l'architecte

Les outils offerts aux architectes peuvent se classer suivant deux catégories, les logiciels de dessin filaire disposant de fonctions permettant de « monter » des objets en trois dimensions et les logiciels orientés objets utilisant des entités comme des murs ou des portes. Nous allons mener une analyse de ces outils dans le but de vérifier leur niveau d'adaptation à une phase esquisse. Les critères retenus pour cette analyse sont inhérents aux caractéristiques de cette phase qui comporte de nombreux allers et retours sur les opérations réalisées et où l'architecte travaille sur des objets partiellement définis. Il convient alors de vérifier si ces outils sont capables de retranscrire l'ensemble des opérations mises en œuvre par le concepteur et de les faire varier, ainsi que de travailler avec un modèle géométrique pouvant être modifié par les opérations de manière implicite.

2.1.1. Les logiciels généralistes

Les logiciels généralistes proposent une démarche quasiment axée sur la représentation graphique de plans avec la possibilité d'en effectuer une modélisation en trois dimensions. Ces outils sont destinés à des phases plus en aval de la conception architecturale et ont comme principal objectif la production de plans permettant la construction d'un bâtiment. Le modeleur 3D présent dans ces logiciels permet des modélisations par splines ou des modélisations polygonales. Les contraintes « mal définies » caractérisant une phase amont de conception ne peuvent alors être mises en œuvre de façon cohérente dans ce type

d'outil. Ces outils prennent exemple sur la sémantique réinterprétée du dessin au « Rotring » sans vraiment aller plus loin au niveau de leurs mises en œuvre. En effet, les représentations tirées de ces outils sont plus proches d'un dessin technique que d'un croquis spéculatif.

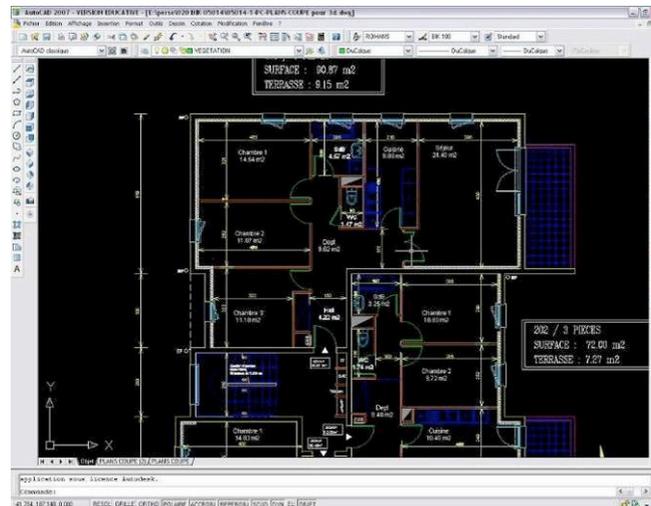


Figure 20. Un logiciel de CAO 2D/3D (Autocad).

De plus par une démarche très linéaire liée à la logique interne du logiciel, il devient quasiment impossible à l'architecte d'utiliser ce type d'outil en amont des activités de conception d'un projet. Toutefois ils trouvent pleinement leur place lors de la réalisation de l'objet représenté.

2.1.2. Les logiciels orientés architecture

Le développement du concept d'« objet » dans les années 80 a donné naissance à des « modeleurs professionnels » prenant mieux en compte les entités et concepts manipulés en architecture. Le concepteur ne manipule plus simplement des lignes, des surfaces ou des prismes mais des murs, des planchers, des fenêtres... L'encapsulation de données « métier » au sein d'une même classe d'objets a permis un saut qualitatif dans le développement des modeleurs en leur conférant une partie de la sémantique bâtiment

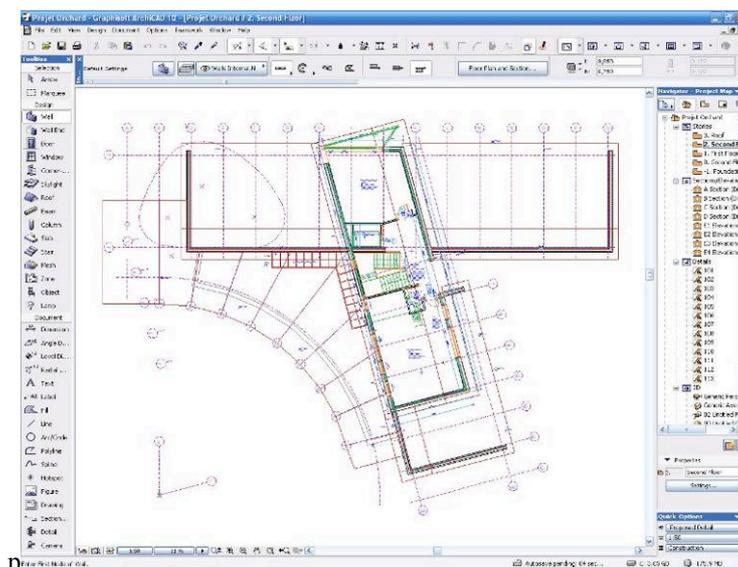


Figure 21. Un logiciel orienté objet (Archicad).

Il faut cependant constater que ces logiciels dans leurs majorités ne disposent pas d'autres principes de modélisation 3D ce qui a pour contre-effet de limiter l'inventivité des concepteurs en enfermant ces derniers dans des modèles de formes standards. Les logiciels de ce type ne peuvent par nature intervenir qu'à des niveaux de représentation « descriptif » et « prescriptif » (Estevez, 2001).

Il est significatif de voir que les projets récents ayant manifesté le plus d'inventivité sur le plan morphologique ont été pensés avec des logiciels peu orientés bâtiment ou selon des méthodes qui mixent des recherches de formes en maquette et des représentations numériques.

2.2. Les modeleurs 3D et principes de modélisation 3D

Les logiciels de modélisation tridimensionnelle offrent pour la plupart des principes de modélisation proches les uns des autres. Des logiciels comme 3d Studio Max, Maya ou Blender fonctionnent à partir du même modèle tandis que des logiciels comme Rhinoceros ou Sketch'up se focalisent sur un principe simple en développant des fonctions implicites.

2.2.1. Modèles de données tridimensionnelles

La plupart des modeleurs utilisent des objets composés d'un maillage sur lequel l'utilisateur applique diverses opérations. Le maillage est un ensemble de sommets reliés entre eux par des arêtes, pour créer des faces et des polygones. Lorsque des faces ou des polygones sont créés, ils constituent alors des surfaces. L'action de créer et de manipuler des faces, des polygones, des arêtes ou des points, à partir d'une primitive standard, est appelée modélisation polygonale. Nous allons décrire les trois types de modélisation (Ehret,

2006) les plus utilisés en modélisant pour chaque principe un même objet la « AluFelt Chair » de Marc Newson.

2.2.1.1. « Splines »

La modélisation par « Splines » constitue un des plus anciens principes de modélisation tridimensionnelle. Une « Spline » est une courbe qui est connectée à deux points ou plus. Il existe différentes variantes de ces « Splines », il existe les « Splines » « droites » et les courbes de Bézières aussi appelées « B-Splines ». Elles permettent à des logiciels de CAO, comme Autocad ou 3D Studio Max, la génération de surfaces à partir d'un minimum de deux « Splines ».

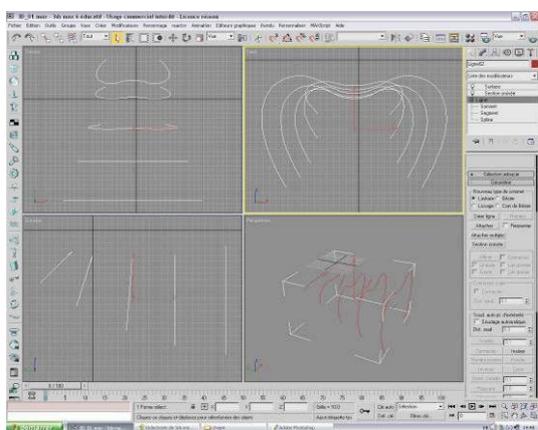


Figure 22. Dessin du profil de la chaise avec une « Spline ».

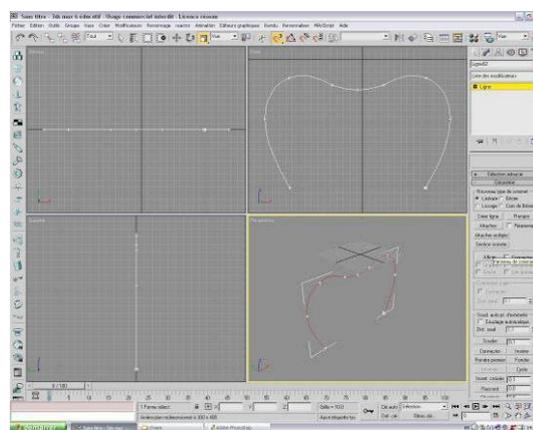


Figure 23. Duplication des « Splines » suivant un réseau.

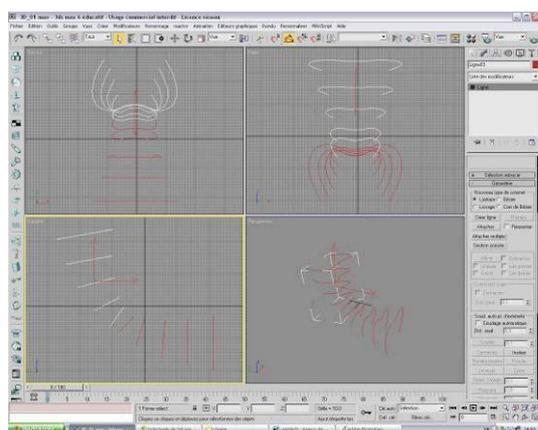


Figure 24. Réalisation d'une symétrie du réseau de « Splines ».

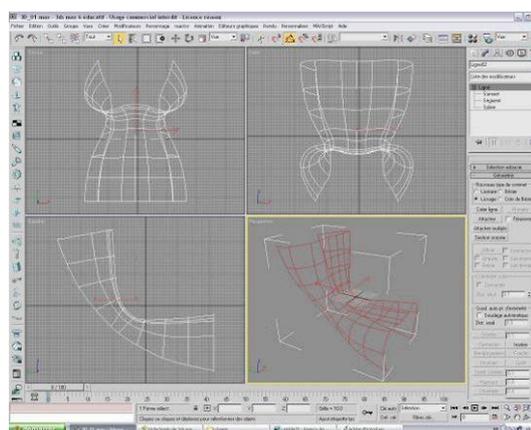


Figure 25. Mise en place d'une « Section croisée » en vue d'obtenir un objet uniforme.

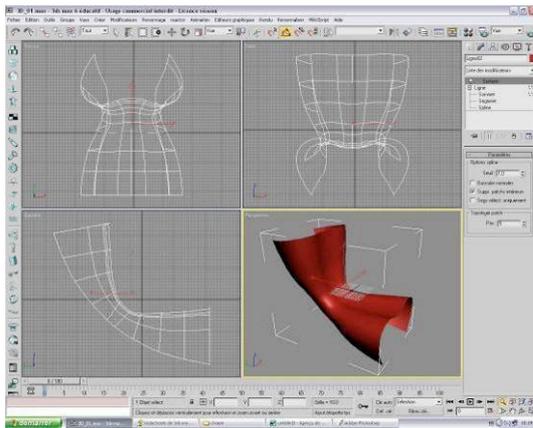


Figure 26. Création d'une surface avec les « Splines ».

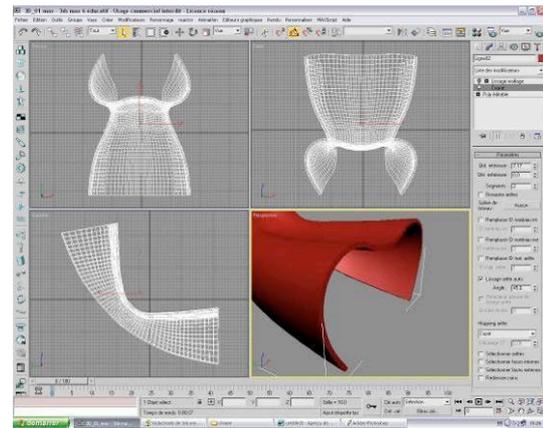


Figure 27. Application du modificateur « Coque » pour donner une épaisseur à la surface.

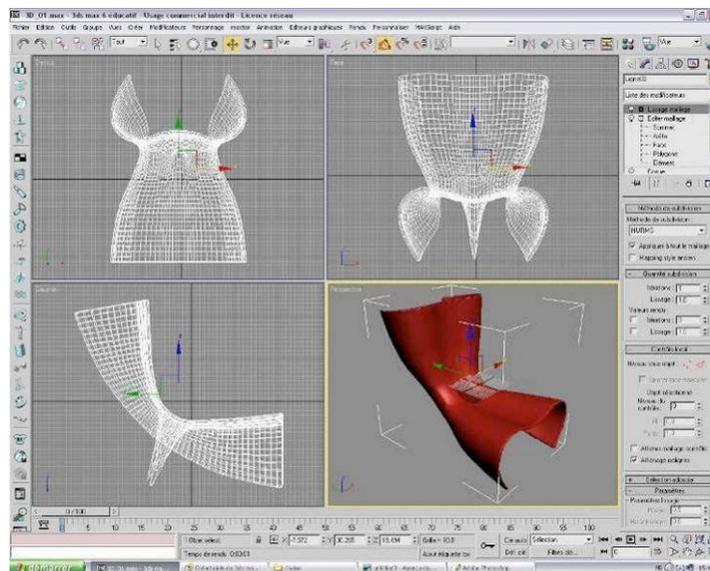


Figure 28. Réalisation du pied à l'aide d'une édition du maillage en un point et application du modificateur « Lissage maillage ».

La modélisation par « Splines » se réalise de la manière suivante, l'utilisateur commence par créer des « Splines » qui correspondent à des sections de l'objet à modéliser (Figure 22, Figure 23 et Figure 24). Ensuite, il connecte ces profils suivant un plan perpendiculaire (Figure 25) pour enfin créer les faces correspondantes (Figure 26). Une fois la surface principale de l'objet à modéliser créée, il est possible de lui donner une épaisseur grâce à l'application du modificateur « Coque ». Le modèle 3D est ensuite lissé après avoir été éventuellement retouché (Figure 28).

La modélisation par des « Splines » est un principe qui nécessite la connaissance de l'objet à modéliser dans son entier. Elle permet la modélisation de formes courbes mais ne laisse que peu de place à la modification, une fois que la forme est réalisée. Dans la plupart des cas, lorsque l'utilisateur veut modifier ou affiner une forme, il devra passer par une nouvelle modélisation de la partie incriminée.

2.2.1.2. « Nurbs »

Les « Nurbs » ou plutôt Nonuniform Rational B-splines sont une généralisation de 2 types de « B-spline ». L'éditeur du logiciel Rhinocéros la définit de la manière suivante : «Elles sont les représentations mathématiques qui peuvent décrire de manière précise n'importe quelle forme 3-D organique compliquée - surface ou solide - à partir d'une simple ligne 2D, d'un arc, d'un cercle ou d'une courbe. Grâce à leur flexibilité et leur précision, les modèles réalisés à partir de « Nurbs » peuvent être utilisés dans n'importe quel processus d'illustration, d'animation ou de fabrication.»

La modélisation par « Nurbs » consiste en un réseau de courbes créé grâce à des points de contrôle. L'interpolation des courbes entre ces points peut se faire automatiquement selon un algorithme « [Nurbs](#) », par la manipulation de tangentes de [courbes de Bézier](#), ou encore par modification des paramètres d'interpolation. Ce principe de modélisation 3D est proche de la modélisation par « Splines » en substituant les arêtes droites par des courbes de Bézier. Il permet ainsi la modélisation 3D de formes « molles ».

2.2.1.3. Modélisation polygonale

La modélisation polygonale constitue une pratique remontant au début des jeux vidéo. Le peu de mémoire utilisée par le modèle qui en découle en est son principal avantage. Dans la modélisation polygonale le modèle est assimilé à un ensemble de polygones. Le polyèdre obtenu est décrit par la liste de ses sommets et de ses arêtes. Cependant cette stratégie de modélisation est indissociable d'une fonction de lissage pour obtenir un rendu optimal. En effet, le principe de modélisation polygonale donne une forme qui apparaît comme anguleuse. Les opérations utilisées agissent sur les faces, les arêtes et les points. Ces opérations sont les suivantes :

- la translation,
- la rotation,
- l'extrusion,
- la coupe,
- la soudure,
- la révolution.

Il en résulte que non seulement l'opérateur interagit avec des points comme pour les « Splines » ou les « Nurbs », mais également avec des segments et des faces.

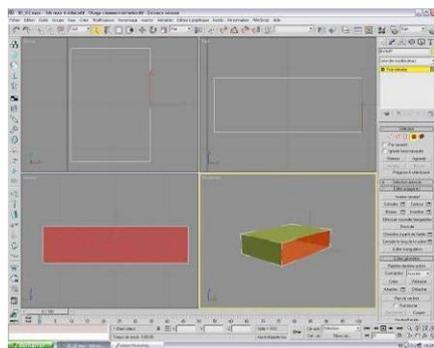


Figure 29. Réalisation d'un cube et sélection d'une face.

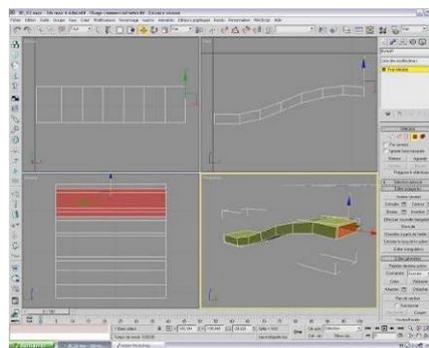


Figure 30. Extrusion d'une face du cube de départ.

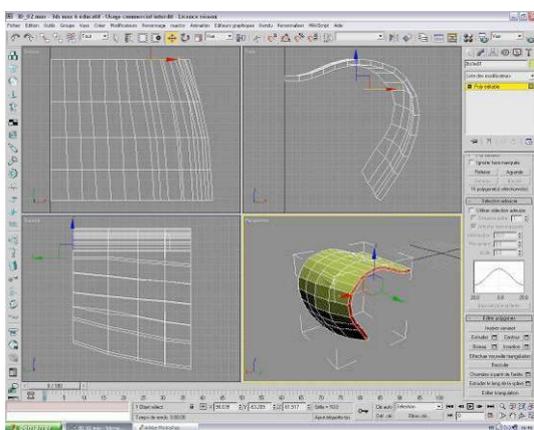


Figure 31. Extrusion dans l'autre sens d'une face.

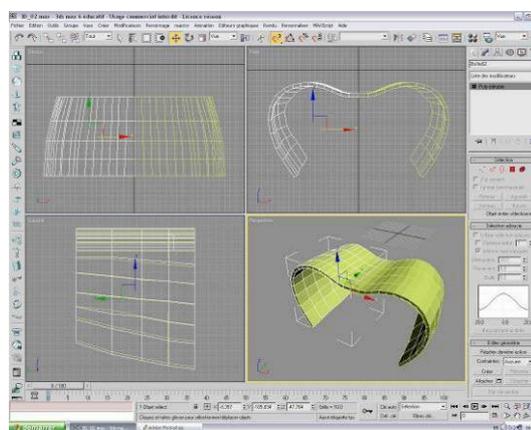


Figure 32. Opération d'une symétrie sur l'objet obtenu.

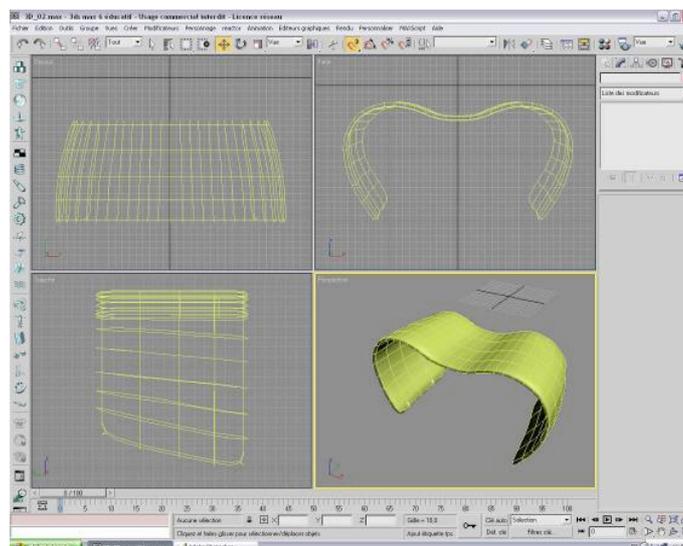


Figure 33. « Lissage du maillage ».

La modélisation polygonale part la plupart du temps d'une boîte (Figure 29), sur laquelle l'utilisateur va opérer des extrusions de faces pour obtenir le volume à modéliser (Figure 30

et Figure 31). L'objet obtenu étant anguleux, la modélisation se termine par l'application d'un modificateur de lissage du maillage pour obtenir une surface lisse.

La modélisation polygonale constitue un moyen léger de modélisation 3D mais il est laborieux et surtout comme la modélisation par « Splines » il est impossible de revenir efficacement sur une géométrie pour ajuster ou adapter à la forme voulue par le concepteur.

2.2.1.4. Subdivisions de surfaces

La méthode de modélisation par subdivision de surfaces constitue un procédé hybride entre la modélisation polygonale et la modélisation par « Nurbs ». Elle consiste à améliorer le processus en utilisant une subdivision automatique localisée sur une géométrie d'une surface. Elle se rapproche de la modélisation polygonale par les techniques employées lors de la création de la forme, et de la modélisation par « Nurbs » en ce qui concerne le rendu de la surface via des « B-splines ». Son utilisation permet la modélisation des formes organiques complexes demandant un niveau différent de précision. L'exemple de la modélisation d'une main en est le plus représentatif. Le but est alors d'ajouter des détails à certains endroits de la géométrie, sans se soucier du nombre de faces comprises sur la globalité de l'objet.

2.2.2. Les opérateurs morphologiques (modificateurs)

L'utilisation de « modificateurs » paramétriques (au sens dans lequel ils sont implantés dans le logiciel 3D Studio Max) revient à établir un ordre, une arborescence dans le modèle 3D. Le but de cette approche est d'interagir en temps réel sur les paramètres des différents « modificateurs » et de pouvoir interagir avec eux pour la suite de la modélisation.

Prenons un exemple simple de modélisation à partir de « modificateurs », la modélisation d'une surface courbe. Le cintrage d'une surface par un « modificateur » « Courbure » peut être modifié entraînant une actualisation de la surface en temps réel. L'ajustement de la forme devient alors plus aisé (Figure 34).



Figure 34. Exemple de l'application du « modificateur » « Courbure » sur une surface.

Partant du même principe, en appliquant un « modificateur » « torsion » sur un volume, la forme obtenue sera transformable suivant les paramètres dudit modificateur. Ainsi lors d'une

recherche formelle en phase esquisse, ce principe de modélisation se révèle particulièrement souple, par rapport à une modélisation par « Nurbs » ou « Splines » qui obligerait à constamment détruire la surface acquise afin de revenir aux courbes originelles et finalement reconstruire tout le modèle.

Malgré ces constatations, actuellement l'utilisation d'un principe paramétrique comporte quelques limites qui proviennent notamment du fait qu'il existe peu de « modificateurs » opérationnels. Cependant en développant le nombre de « modificateurs » (Annexe 1) et en adaptant les paramètres de plusieurs d'entre eux, cette méthode de modélisation pourrait être utilisée par l'architecte en phase de recherche.

2.2.3. Modélisation géométrique itérative

Nous nous intéresserons dans cette partie aux méthodes de modélisation qui permettent d'inscrire dans un objet ou un projet, la manière dont il a été fabriqué.

Un objet résulte de la succession des opérations menées sur ses états antérieurs. Mais la particularité des approches que nous allons étudier est de permettre l'action a posteriori sur les états et/ou opérations antérieures pour modifier implicitement le résultat. En quelque sorte, l'objet est doté d'un historique actif.

2.2.3.1. Modélisation solide

La modélisation par solides, appelée aussi modélisation CSG (Constructive Solid Geometry) est probablement l'une des premières méthodes basées sur ce principe d'historique actif.

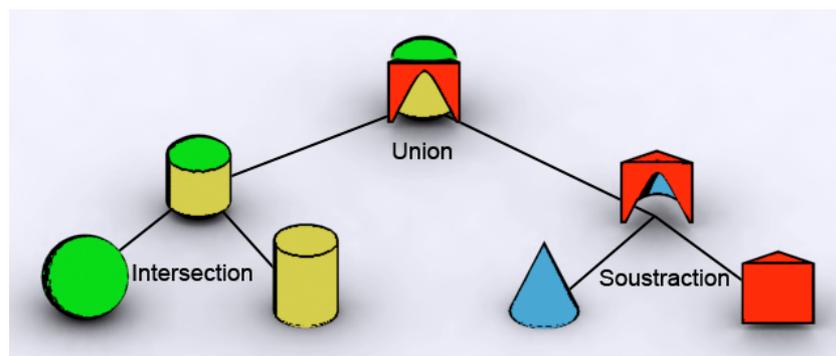


Figure 35. Exemple de modélisation CSG.

Les objets sont des primitives géométriques, auxquelles sont appliquées des transformations géométriques de base. Le recours aux opérations booléennes (union, intersection, soustraction) permet de créer, à partir de deux objets existants, un nouvel objet et ainsi de suite.

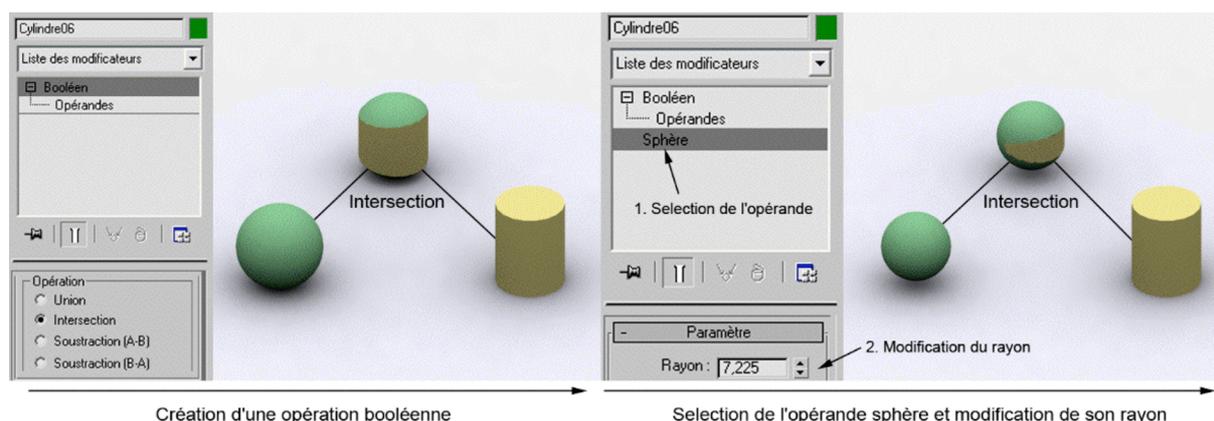


Figure 36. Exemple de modification d'un opérande d'une opération booléenne.

L'objet est représenté par un graphe de modélisation. Le remplacement d'une primitive ou d'une opération booléenne dans le graphe modifie la géométrie de l'objet résultant (Figure 36). Les opérations solides des modeleurs actuels héritent de cette approche. Ils permettent, pour certains¹, l'édition de primitives mais, dans la majorité des cas, l'objet résultant est décrit uniquement par ses frontières sans qu'il soit possible de revenir sur les nœuds de l'arbre de construction.

2.2.3.2. Modélisation par contraintes

La modélisation par contraintes couvre des méthodes diverses, regroupées parfois aussi sous l'appellation de modélisation paramétrique (Monedero, 2000). Ces approches partagent le principe de dépendance entre les objets. Le graphe de dépendance n'est pas représenté mais la modification d'un objet source permet la mise à jour dynamique des objets sources qui en dépendent.

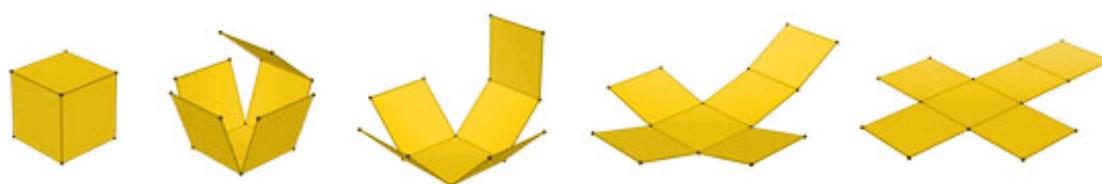


Figure 37. Exemple du dépliage d'un cube sous contraintes dans le logiciel Cabri 3D.

Parmi les applications de ces méthodes, on trouve les systèmes de contraintes géométriques intégrés à certains modeleurs comme SolidEdge et les logiciels de géométrie dynamique tels que Cabri Géomètre et Cabri 3D.

2.2.3.3. Historique de modélisation

Un historique de commandes, sur un logiciel, est la portion de l'arbre de décision limitée au chemin courant. Le plus souvent, cet historique est invisible à l'utilisateur, qui y a accès à

¹ AutoCAD 2007, 3DS Max, XSI, ...

travers les actions d'annulation et de rétablissement. Dans certains logiciels comme 3DSMax, il est possible de l'afficher pour faciliter la navigation.

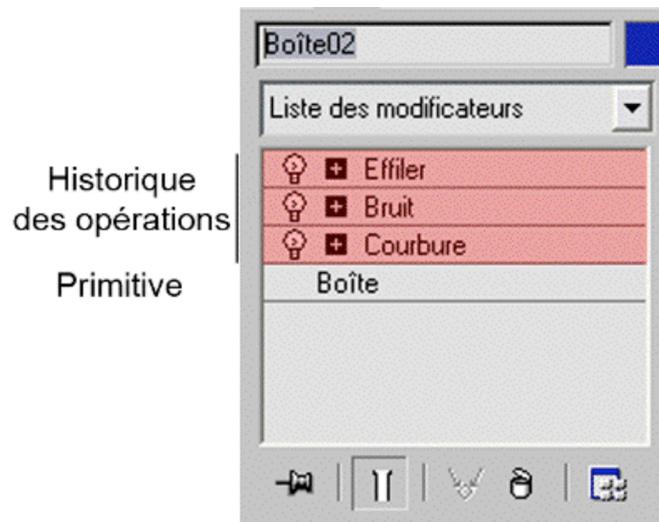


Figure 38. Pile de modificateurs du modelleur 3DSMax.

Cet historique devient un outil d'aide à la conception lorsqu'il est éditable. Dans ce cas, l'utilisateur peut modifier les paramètres d'une opération antérieure ou les attributs d'un objet existant et évaluer ses effets sur le résultat actuel. En fait, l'utilisateur édite les nœuds et les arcs d'un chemin de construction qui, lui, reste inchangé.

2.3. Evaluation des logiciels

A partir des fonctionnalités décrites ci-dessus, nous avons mené une approche comparative sur les fonctions présentes dans les logiciels de CAO et modelleurs les plus courants. Le résultat de cette approche est représenté dans le tableau suivant.

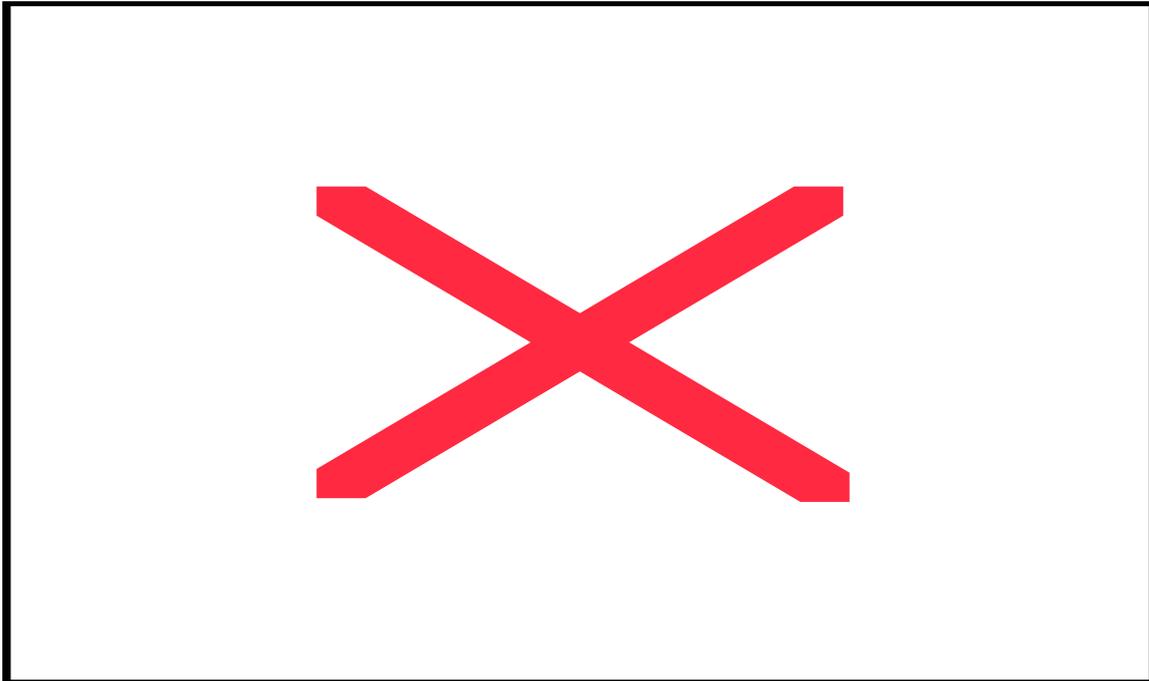


Figure 39. Tableau comparatif des fonctionnalités de logiciels de CAO.

En analysant ce tableau, nous constatons qu'il existe trois grandes familles de logiciels, les logiciels dédiés plans 2D pourvus d'un modelleur 3D basique, les logiciels orientés objets permettant de réaliser des plans en 2D ainsi qu'en 3D et les modelleurs 3D.

Nous allons réaliser une expérimentation avec des logiciels de ces trois catégories afin de faire ressortir la plus adaptée à une phase esquisse.

2.3.1. Protocole d'expérimentation

Nous proposons la réalisation d'une modélisation 3D d'un petit objet et d'un bâtiment à partir de logiciels issus des catégories que nous avons caractérisées. Nous proposons l'utilisation des logiciels suivant Autocad, Archicad, 3D Studio Max et SketchUp. Nous avons choisi deux modelleurs 3D Studio Max et SketchUp parce que nous considérons qu'au vu de leurs fonctionnalités, ces logiciels sont complémentaires. Cette modélisation 3D tiendra compte des caractéristiques de la conception en phase esquisse en intégrant les ajustements et variations du modèle 3D. Nous commencerons par une première modélisation puis des variantes de ces modèles seront produites. Le temps utilisé, par un étudiant en architecture peu expérimenté à l'utilisation de ces logiciels, pour réaliser l'objet et ses variations sera le principal paramètre d'évaluation.

2.3.2. Etude de la modélisation d'un objet

Pour notre expérimentation, nous proposons la modélisation d'une chaise longue « Chumby » de la marque Lebello (Figure 40). Nous allons la modéliser à partir des quatre logiciels retenus en essayant d'apporter des variations pour simuler la recherche de forme en phase esquisse au niveau des ondulations.

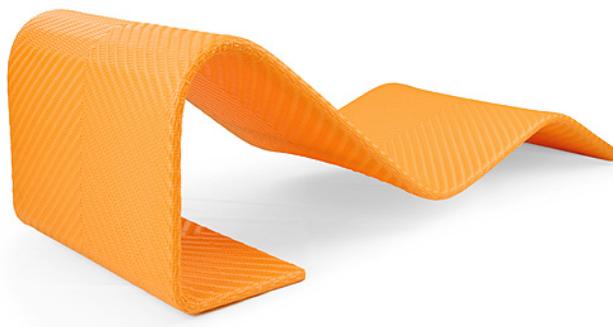


Figure 40. Chaise longue « Chumby ».

2.3.2.1. Autocad

Pour obtenir le modèle 3d de cette chaise sur Autocad, nous avons dessiné le profil de la chaise puis l'avons extrudé. Pour obtenir des modifications, nous avons modifié le profil initial directement sur la géométrie, cependant pour des modifications plus importantes une nouvelle modélisation de l'objet s'avère nécessaire.

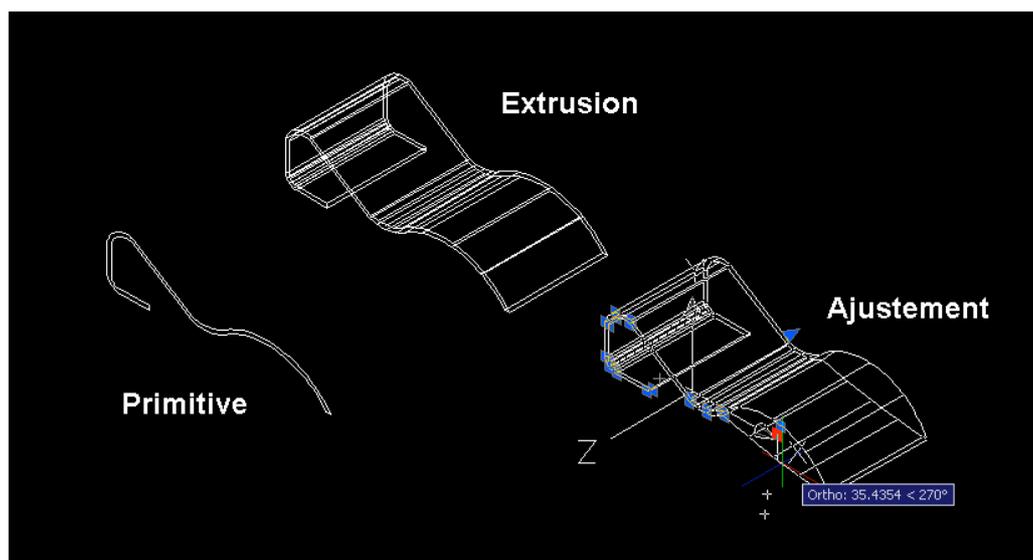


Figure 41. Modélisation 3D sous Autocad 2007 de la chaise « Chumby ».

2.3.2.2. Archicad

Archicad ne disposant pas de modeler, nous avons été obligé de détourner les objets architecturaux du logiciel pour réaliser l'objet en 3D. La chaise a ainsi été modélisée à partir de l'outil mur, et les variations de la forme de la chaise ont été obtenues en modifiant les rayons des parties ondulés.

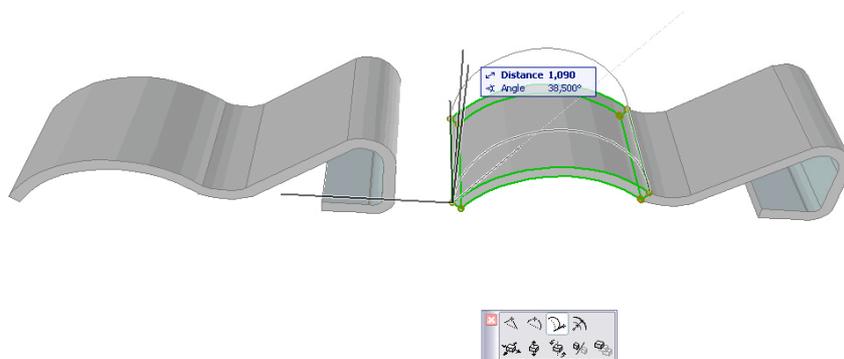


Figure 42. Modélisation 3D sous Archicad 12 de la chaise « Chumby ».

Mais une modification trop importante nécessite une nouvelle modélisation complète de l'objet.

2.3.2.3. 3D Studio Max

Pour la modélisation avec 3D Studio Max nous avons choisi d'utiliser les opérateurs morphologiques pour obtenir plus facilement des variations de la forme de l'objet modélisé. En partant d'une primitive standard « Boîte » sur laquelle nous avons appliqué quatre modificateurs « Courbure », nous avons obtenu un modèle 3D totalement paramétrique. En changeant les paramètres du modificateur « courbure », il nous a été possible d'obtenir assez rapidement une multitude de formes issues d'un même modèle.

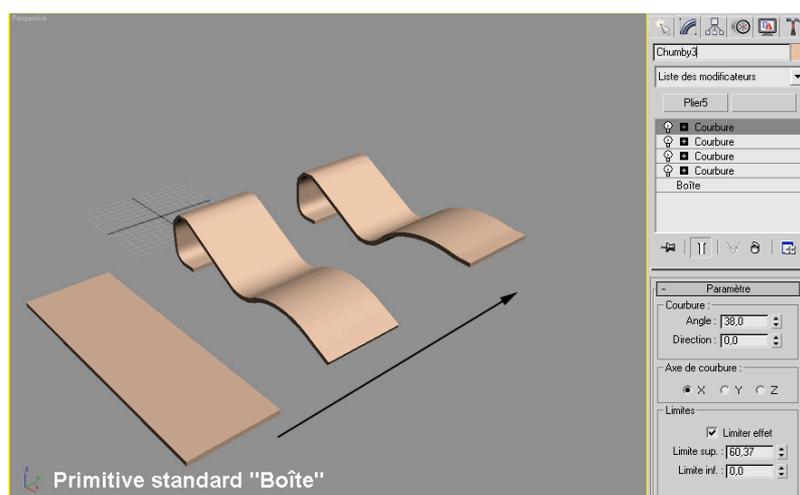


Figure 43. Modélisation 3D sous 3D Studio Max 9 de la chaise « Chumby ».

2.3.2.4. SketchUp

La modélisation de la chaise « Chumby » sous SketchUp utilise les mêmes principes que pour Autocad,. Nous avons commencé par dessiner le profil de la chaise puis nous l'avons extrudé. Mais une modification de l'objet modélisé s'avère difficile, une nouvelle modélisation de l'objet est nécessaire.

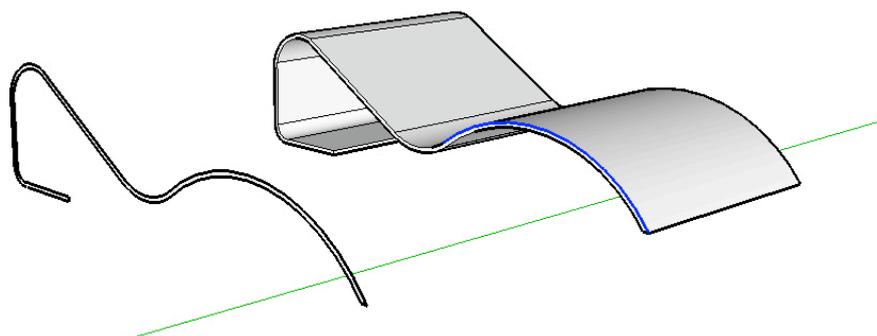


Figure 44. Modélisation 3D sous SketchUp 6 de la chaise « Chumby ».

2.3.2.5. Conclusion

La modélisation 3D de la chaise « Chumby » a demandé pratiquement le même temps dans SketchUp et Archicad, tandis qu'Autocad et 3D Studio Max ont demandé le double de temps pour obtenir le même résultat (Figure 45). Nous supposons que ceci est principalement dû à l'interface utilisateur de ces deux logiciels qui est particulièrement lourde et peu intuitive. Cependant lorsque l'on aborde la modification du modèle 3D afin de faire varier la forme de l'objet, seul 3D Studio Max s'en sort avec un temps de modification moyen de 10s. Nous pouvons alors supposer que ce logiciel dispose des outils nécessaires à l'obtention rapide de variations d'un même objet. Néanmoins, le frein à ce type de modélisation réside dans le nombre de modificateurs morphologiques mis à disposition du concepteur et de leur mise en œuvre dans une interface adaptée.

Logiciels	Temps pour la modélisation initiale	Temps pour réaliser une variation
Autocad	4min 20s	15s à 4m 20s suivant les modifications à apporter
Archicad	2m 30s	15s à 2m 30s suivant les modifications à apporter
3D Studio max	5min 30s	environ 10s
SketchUp	2m 45s	2m 45s

Figure 45. Tableau des résultats de l'expérimentation.

2.3.3. Etude de la modélisation d'une partie d'un bâtiment

Pour cette deuxième expérimentation portant sur un objet architectural, nous proposons la modélisation du volume de la salle de l'orgue de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg » (Figure 46).



Figure 46. Photographie de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg, conçu par l'architecte Henri Gaudin (Scoffier, 2007).

En nous appuyant sur les croquis d'étude de l'architecte Henri Gaudin, il apparaît que celui-ci a conçu ce volume à partir d'un cône incliné sur lequel il a opéré quatre coupes (Figure 47). Nous modéliserons en trois dimensions ce volume avec ses variantes en reprenant les concepts développés par l'architecte.

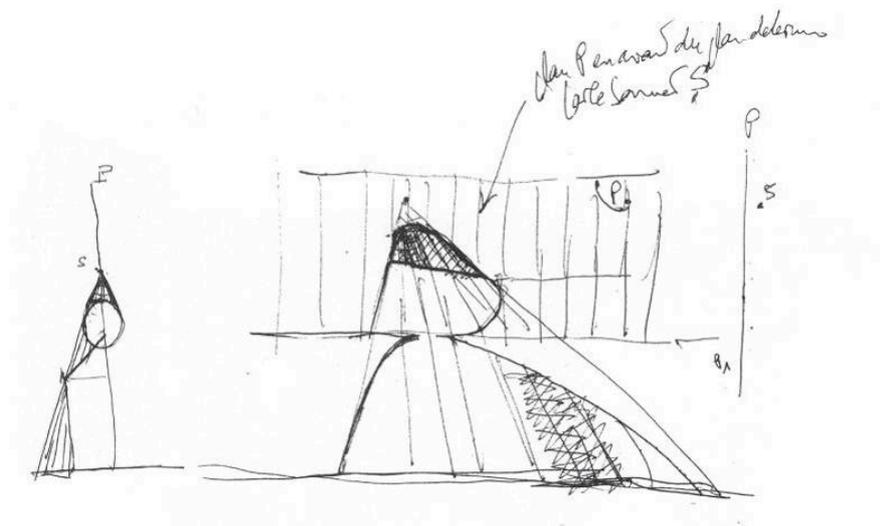


Figure 47. Croquis montrant le concept mis en place par l'architecte durant la conception du volume de la salle de l'orgue (Scoffier, 2007).

2.3.3.1. Autocad

La réalisation de cette partie de bâtiment en trois dimensions sous Autocad 2007 a été problématique car il a été difficile de réaliser de manière simple un cône incliné. Une fois obtenu, le reste de la modélisation a été effectuée avec des opérations de sections sur le volume. La modification d'une section ou de l'inclinaison du cône initial nécessite d'effectuer une nouvelle modélisation de l'objet.

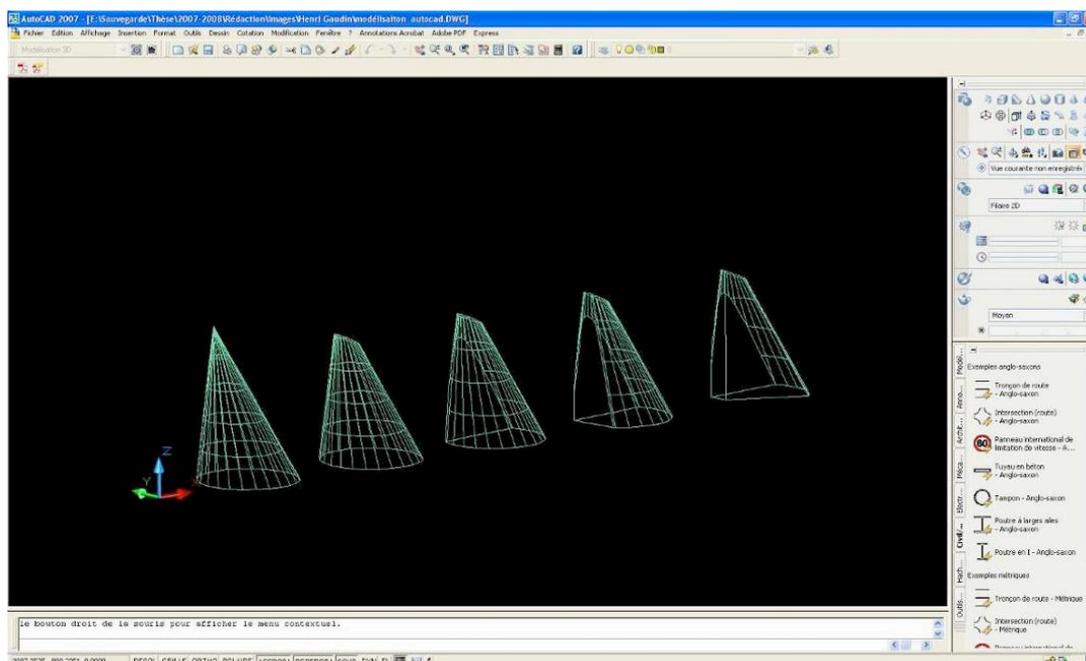


Figure 48. Modélisation 3D sous Autocad 2007 de la salle de l'orgue de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg.

2.3.3.2. Archicad

Le logiciel Archicad ne se révèle pas du tout adapté à la modélisation tridimensionnelle de ce type d'objet. Il lui est en effet incapable de réaliser un cône incliné à partir des outils standards. De plus, si pour faciliter la modélisation nous ne tenons plus compte de cette inclinaison, nous nous trouvons face à un autre problème, le logiciel n'est pas non plus capable de réaliser une jonction entre un mur courbe incliné vers l'intérieur et un mur vertical (Figure 49).

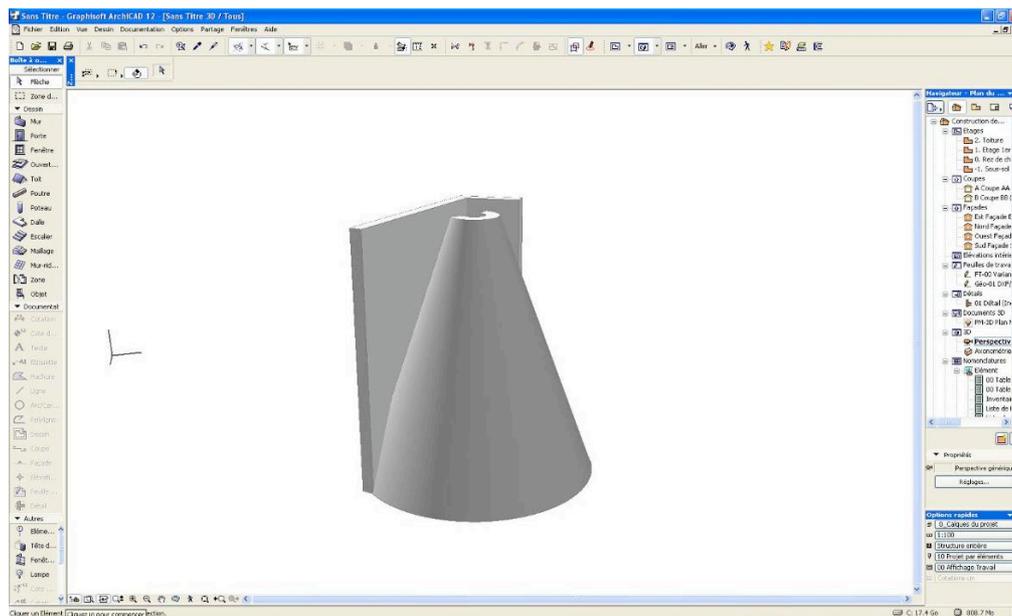


Figure 49. Essai de modélisation 3D sous Archicad 12 de la salle de l'orgue de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg.

2.3.3.3. 3D Studio Max

La modélisation sous 3D Studio Max 2009 a été réalisée en partant de la « primitive standard » « cône » sur laquelle nous avons effectué les opérations menées par l'architecte, à savoir une opération d'inclinaison et quatre opérations de sections (Figure 50). Ces opérations instrumentées dans ce logiciel par des modificateurs paramétriques nous ont permis d'obtenir un modèle 3D apte à accueillir tous les ajustements nécessaires à une phase esquisse.

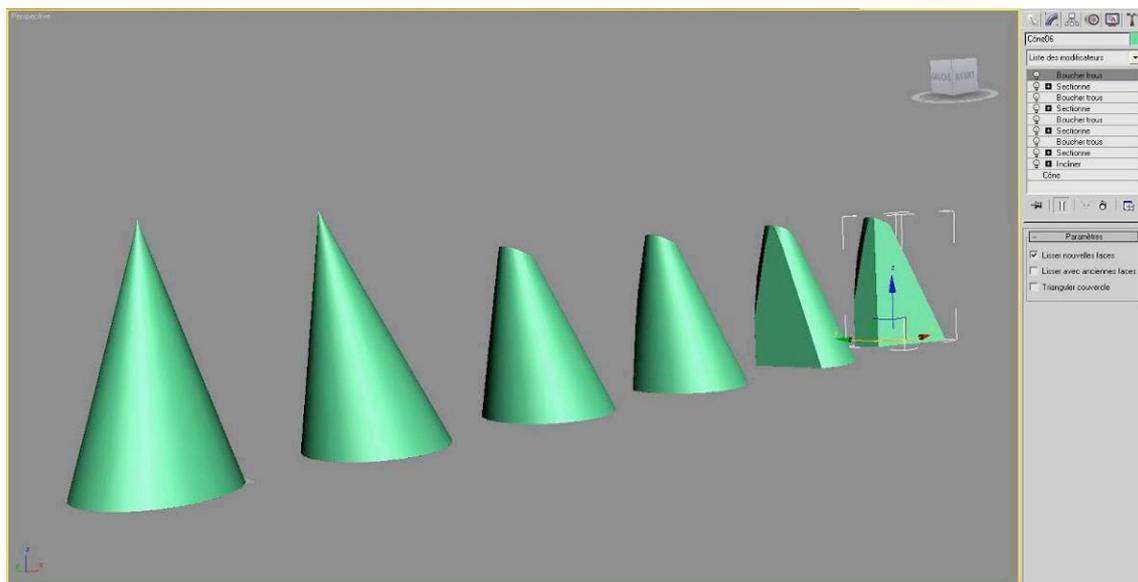


Figure 50. Modélisation 3D sous 3D Studio Max 2009 de la salle de l'orgue de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg.

2.3.3.4. SketchUp

La modélisation tridimensionnelle de ce volume sous SketchUp se rapproche en partie de la modélisation opérée sur Autocad, sauf pour le cône incliné qui a été obtenu d'une manière plus aisée.

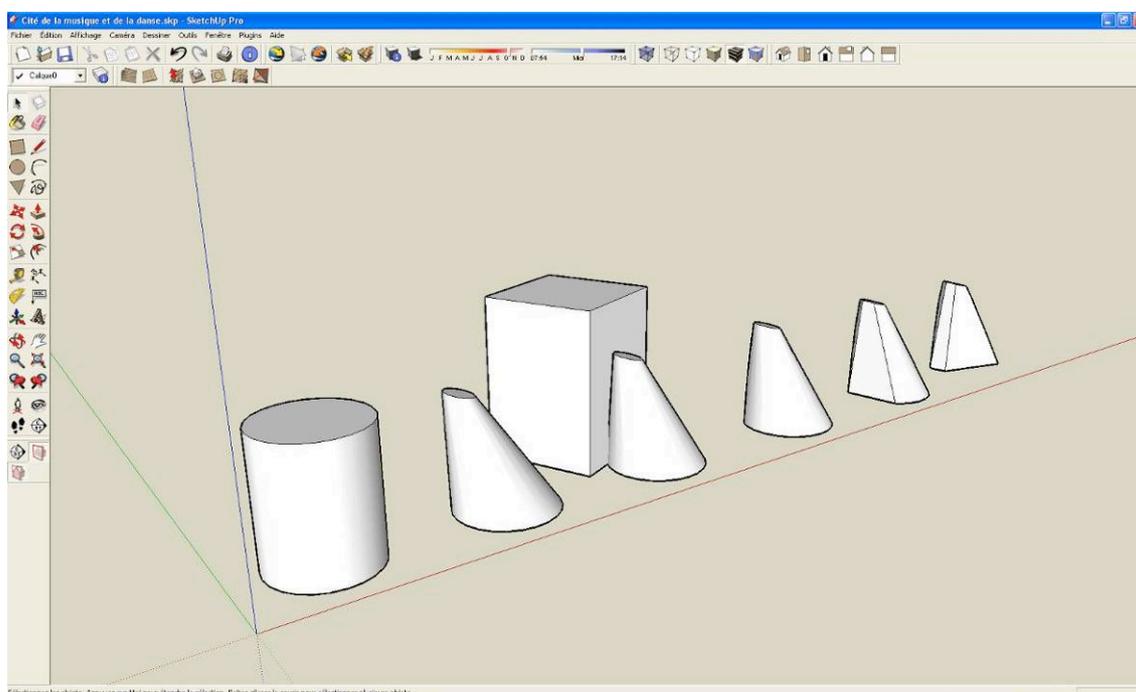


Figure 51. Modélisation 3D sous SketchUp 6 de la salle de l'orgue de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg.

2.3.3.5. Conclusion

La modélisation 3D du volume de la salle de l'orgue de la « Cité de la musique et de la danse » de Strasbourg » a confirmé les résultats de l'étude précédente (Figure 52). De plus cette étude a montré l'inefficacité des logiciels orientés objets pour ce type de modélisation.

Logiciels	Temps pour la modélisation initiale	Temps pour réaliser une variation
Autocad	10m 20s	10m 20s
Archicad	X	X
3D Studio max	11m	environ 10s
SketchUp	7m 30s	de 1m à 7m 30s

Figure 52. Tableau des résultats de l'expérimentation.

Nous pouvons alors conclure que les modeleurs 3D comme 3D Studio Max s'avèrent relativement adaptés pour obtenir des variations d'un modèle 3D dans une phase d'esquisse.

Nous allons à présent réaliser une étude des outils actuellement en phase de recherche.

2.4. Les outils en phase de recherche

La recherche en terme de DAO date de 1963 avec Sketchpad un logiciel qui a été développé par Ivan Sutherland au cours de sa thèse. Il a ouvert à son époque une nouvelle voie dans les Interfaces Hommes Machines (IHM) en introduisant une interface graphique complète associée à un crayon optique. Tout comme les logiciels modernes, il a recours à une table traçante pour obtenir une sortie papier de plans ou de schémas. Cet outil, qui est l'un des premiers logiciels de DAO de l'histoire de l'informatique, a permis de démontrer que l'usage des systèmes informatisés pouvait s'intégrer dans le champ de l'art et de la technique.

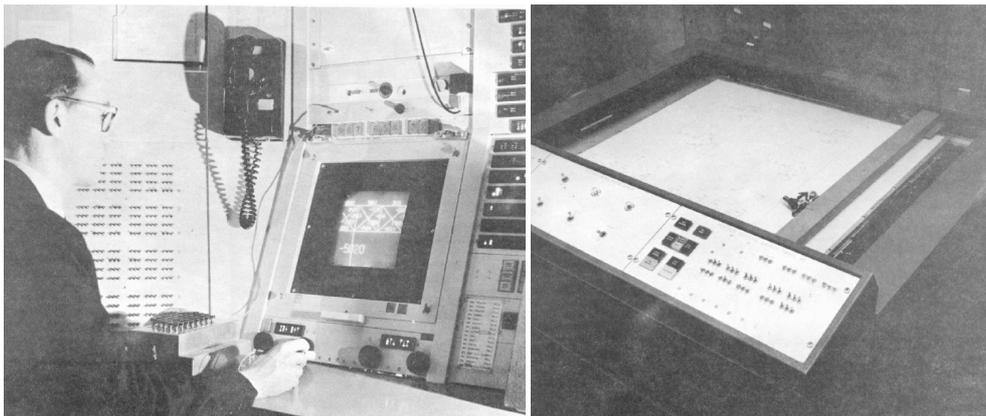


Figure 53. Sketchpad.

Sketchpad fonctionnait sur l'ordinateur Lincoln TX-2 du MIT. Alors que la plupart des ordinateurs de l'époque travaillaient par lots en utilisant des cartes perforées ou des bobines de bandes magnétiques, le TX-2 travaillait en mode interactif avec un écran à tube cathodique.

Les principaux thèmes actuels de recherche concernant l'activité de conception instrumentée par des outils de CAO peuvent être définis suivant trois aspects :

- le principe génératif,
- le principe de modélisation,
- l'interface.

Nous allons les détailler un à un à travers quelques exemples.

2.4.1. Outils génératifs

L'aspect génératif peut être abordé suivant deux modèles opposés, l'un est initié par des schémas et en propose une traduction tridimensionnelle, l'autre par un modèle 3D paramétrique sur lequel des paramètres peuvent varier.

Le premier exemple que nous allons développer est constitué par un modèle basé sur des schémas fonctionnels. Ceux-ci sont dessinés suivant une sémantique permettant une traduction par un algorithme du dessin 2D vers un modèle 3D. Cet outil permet d'aider les architectes à organiser les fonctions dans un bâtiment (Lee & Do, 2003) en générant des variations automatiques de l'organisation spatiale du projet. Son aptitude à identifier les concepts architecturaux employés dans les croquis lui permet de traduire un schéma en données utilisables par l'ordinateur et ainsi d'identifier des configurations architecturales du projet en cours de conception.

L'utilisation de la sémantique du dessin schématique à la main est intéressante car il permet à l'architecte la visualisation de son projet en cours de conception en trois dimensions. Il introduit ainsi une dimension supplémentaire au schéma et cela sans changer fondamentalement ses pratiques. Il devra tout de même intérioriser un certain code de représentation pour être correctement compris par le logiciel.

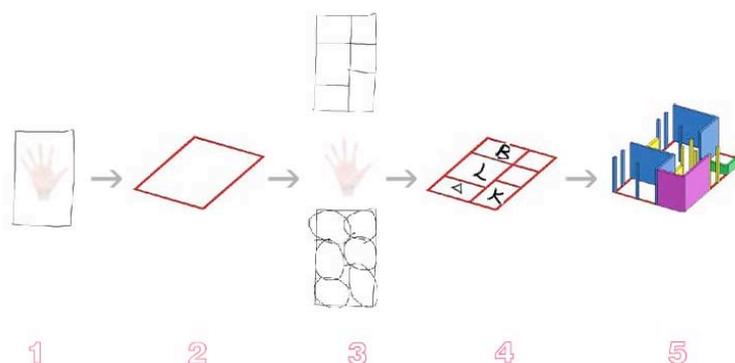


Figure 54. Spacemaker (Lee & Do, 2003).

Un deuxième modèle existe, il se caractérise par une modélisation paramétrique disposant de fonctions génératives et se destine principalement au design et à l'industrie. Nous pouvons citer l'exemple de Genofarm, un « plug-in » pour solidworks développé par l'éditeur de logiciels Genometri. Il permet, à partir d'une grammaire de forme, l'introduction de contraintes sur les formes. Ces dernières peuvent être l'expression des intentions du designer ou des spécificités de l'outil industriel.

Cette approche de la modélisation tridimensionnelle par contraintes « génétiques » vise à introduire des variations de paramètres pour obtenir une variété de formes issues d'une même idée (Figure 55). Le concepteur contrôle par une console les écarts de ces

paramètres et initie la modification de ces valeurs. Il dispose ainsi d'un outil lui donnant les moyens d'investigation nécessaires à une démarche de conception.



Figure 55. Genoform.

Ces principes de variations de formes seraient transposables au domaine de l'architecture mais ne seraient pleinement opérationnels que dans une démarche sculpturale de l'architecte (Ehret, 2008). Les outils utilisés actuellement par l'architecte ne sont pas capables de gérer une grammaire de forme, l'enjeu serait de détourner et de compléter les opérateurs paramétriques existants dans les modeleurs tridimensionnels actuels pour en faire un outil adapté à la conception architecturale. Cette approche pourrait être envisagée dans la suite de nos travaux.

2.4.2. Outils proposant un principe de modélisation

Outre la modélisation par opérateurs morphologiques, nous avons identifié trois approches possibles dans la pratique de modélisation en trois dimensions d'un bâtiment. Elles seront illustrées à travers trois outils.

La modélisation par un nouveau langage et l'immersion dans un espace 3D a été initié dans l'outil DDDoolz développé dans le cadre du programme de recherche du laboratoire de réalité virtuelle de l'Université de Technologie d'Eindhoven (Achten & Vries, 2001). Cet outil s'adresse à la création d'espaces et de formes durant l'étape préliminaire du processus de conception. DDDoolz s'insère dans le programme pédagogique de la faculté d'architecture d'Eindhoven, et a pour objectif d'obtenir la validation par la 3D du projet en cours de conception.

Cet outil plonge le concepteur dans un espace 3D qui lui permet la création directe d'objets. Les opérations réalisables dans cet espace sont élémentaires et limitées à quelques opérations, ceci dans un souci de limiter les interférences perturbant la phase de création.

En utilisant l'immersion dans un environnement 3D, un rendu en temps réel, une interaction directe avec les objets, et une interface utilisateur intuitive, DDDoolz reprend tous les principes des logiciels de réalité virtuelle. DDDoolz permet d'étudier et de valider l'intérêt d'une telle approche en phase de conception et a été particulièrement développé sur certains points :

- Interface intuitive et simple. Permettant un déplacement naturel et ne disposant aucunement de dispositif de type boutons dans l'espace.
- Création facile dans l'environnement virtuel. Il ne dispose pas de boîte de dialogue qui pourrait causer une interférence dans un acte de création.
- Manipulation facile. Les objets sont manipulés dans le modèle grâce à de petites actions simples.
- Navigation par immersion. Le concepteur se déplace en temps réel dans le modèle comme dans un jeu vidéo.

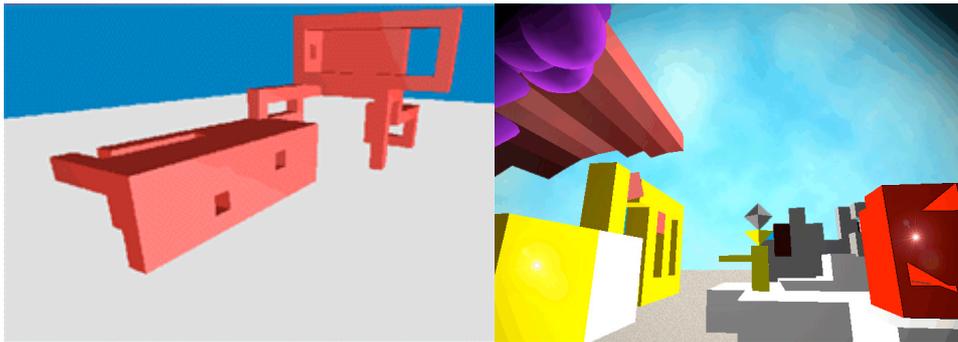


Figure 56. DDDoolz (Achten & Vries, 2001).

Les principes de base de modélisation de DDDoolz proviennent des recherches de K. Strehlke (Strehlke 1999) qui propose de peindre des blocs dans l'espace. La création d'un nouveau bloc est décrite dans le logiciel par une opération de copie translation d'un bloc existant. La direction de copie d'un bloc est déterminée par l'orientation de la face du bloc d'où il provient.

Cette méthode s'apparente ainsi à une modélisation polygonale simplifiée. L'approche de cet outil s'avère intéressante du point de vue de l'interface et de l'utilisation de l'immersion dans la réalité virtuelle. Cependant les outils de modélisation à base de cubes juxtaposés se limitent à la création de formes simples ne relevant pas du type d'architecture que nous proposons de modéliser en phase esquisse, à savoir l'architecture de type « non standard » .

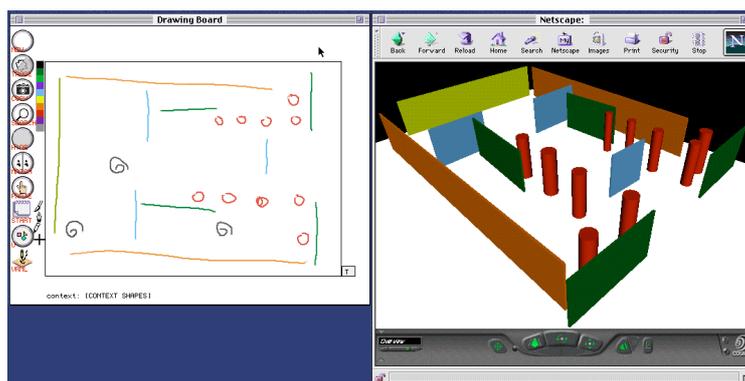


Figure 57. VR Sketchpad (Do, 2001).

Le deuxième type d'outil vise à interpréter un dessin d'architecte en modèle 3D. Le logiciel VR Sketchpad (Do, 2001) développé par le laboratoire de recherche Design Machine Group en est un bon exemple. Ce prototype est capable d'interpréter et de formaliser des concepts architecturaux à partir de plans schématiques émis par l'architecte en phase esquisse. Il introduit ainsi une visualisation tridimensionnelle des espaces en cours de conception en interprétant un dessin à main levée. Ceci permet une évaluation rapide des espaces en cours de conception. Les avantages de cet outil sont qu'il ne nécessite pratiquement aucun apprentissage et qu'il ne bouleverse aucunement les habitudes du concepteur en phase esquisse. Il permet une vision spatiale directe d'un projet en cours de conception et permet alors de valider ou non les hypothèses. Mais les formes obtenues pour l'instant ne sont que des extrusions de lignes en 2D1/2. Ces limitations correspondent aux faiblesses de la représentation en plan qui représente difficilement des bâtiments à formes complexes. L'adjonction de coupes pourrait améliorer le système, mais les limitations formelles seraient toujours identiques. Par conséquent, nous constatons que le croquis et le schéma interprété par l'ordinateur n'est pas un point d'entrée optimal pour modéliser une forme complexe.

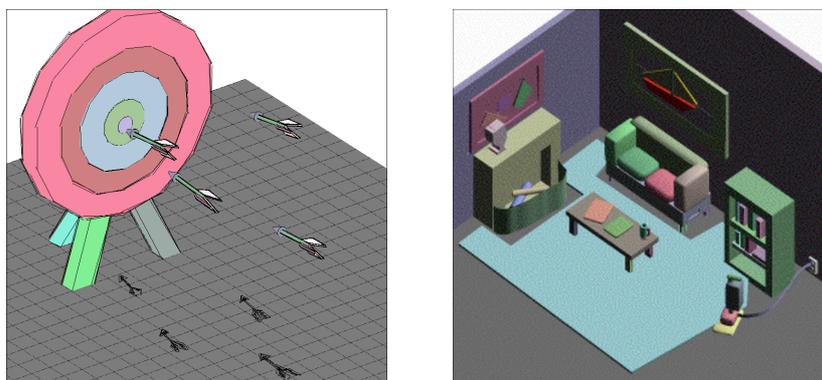


Figure 58. Sketch (Zelevnik, Herndon, & Hughes, 1996).

Le dernier principe de modélisation 3D que nous allons aborder est basé sur une modélisation polygonale entièrement repensée avec des opérations implicites. Sketch (Zelevnik, Herndon, & Hughes, 1996) l'ancêtre de Google Sketch'up vise à améliorer

l'exploration et la communication des idées en 3D. Son principe de modélisation est conçu pour établir le lien entre une certaine vision du croquis à la main et les modeleurs 3D informatiques. Il combine ainsi des principes de dessins à main levée et certains dispositifs des systèmes de DAO. L'interface est basée sur la gestuelle du croquis, les outils de modélisations sont volontairement limités par la puissance du modèle qui utilise énormément d'opérations implicites.

L'utilisateur modélise un objet tridimensionnel en utilisant des règles simples de construction et de modification des primitives géométriques. L'utilisateur va ainsi réaliser des formes complexes par concaténation de ces primitives. Cet outil propose une gestuelle spécifique pour créer chaque primitive géométrique. Pour être pleinement opérationnel, l'utilisateur va devoir s'approprier une sorte de sémantique de la forme pour modéliser son projet.

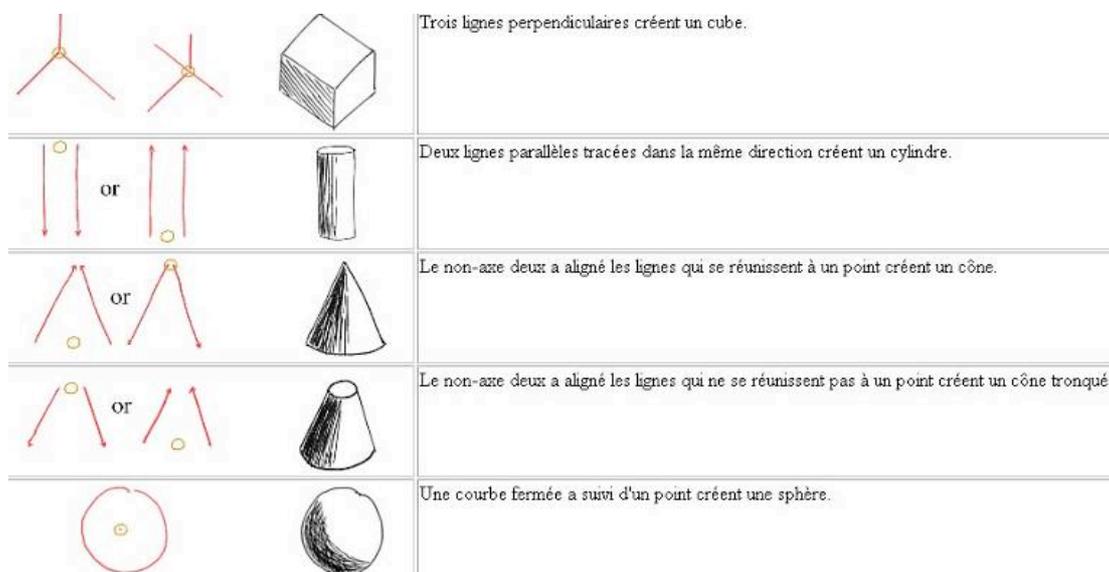


Figure 59. Sketch, sémantique de la forme (Zelevnik, Herndon, & Hughes, 1996).

Les objets ainsi créés s'empilent sans que l'utilisateur n'intervienne. L'implémentation de fonctions implicites paraît d'après les possibilités de ce logiciel être la clé d'un modeleur intuitif et simple d'utilisation. Néanmoins, il ne dispose pas d'outils de déformation de ces objets, ce qui limite à des formes planes ou sphériques les formes modélisables par cet outil et la modification des objets modélisés. L'adjonction de telles fonctions à ce modeleur lui permettrait de générer facilement des formes dites complexes.

Ce dernier exemple nous montre l'importance que prend l'interface dans un modeleur tridimensionnel. Nous devons prendre en compte cette dimension dans la mise en place de notre outil.

2.4.3. Outils proposant une interface spécifique

La question de l'interface est une question primordiale dans une approche de la modélisation 3D. Nous allons aborder ce thème suivant les aspects logiciel et matériel.

Le laboratoire de recherche Design Machine Group Digital a développé Sandbox (Do, 2002), un outil qui utilise le traitement d'images des gestes de la main pour réaliser les actions de modélisation de formes de reliefs. Ensuite ce relief est utilisé pour simuler l'accumulation de précipitations exceptionnelles au-dessus d'un terrain numérique ainsi modélisé. Le concepteur interagit directement avec le maillage grâce à un langage gestuel. Le geste est enregistré par une camera puis interprété par un ordinateur pour effectuer les modifications souhaitées dans le modèle. Les résultats obtenus sont encourageants et mériteraient d'être appliqués dans un modeleur plus développé.

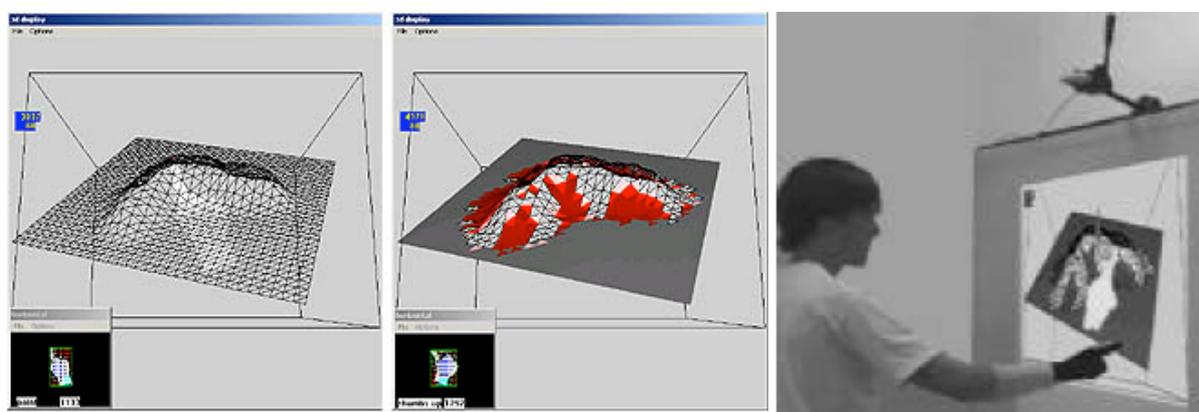


Figure 60. Digital Sandbox (Do, 2002).

L'introduction d'une Interface Homme Machine (IHM) à base d'une sémantique gestuelle pourrait être intéressante en phase de conception architecturale, car elle permettrait de rendre l'objet modélisé plus palpable pour le concepteur. Les formes que l'on pourrait obtenir à partir d'un tel procédé pourraient être à priori assez variées, et non cantonnées aux formes orthogonales.

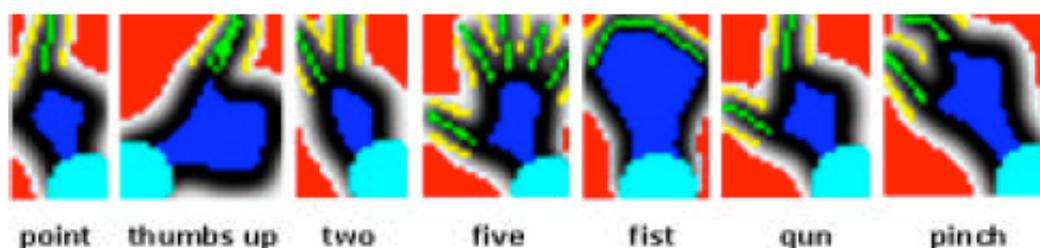


Figure 61. Digital Sandbox, Sémantique gestuelle (Do, 2002).

La Wii de Nintendo et l'iPhone d'Apple (Figure 62) sont deux produits qui innent du point de vue de l'interface. Ils apportent un gain ergonomique réel pour l'utilisateur, et pourraient constituer une piste de recherche pour une interface de modélisation.



Figure 62. La Wii de Nintendo, et l'iPhone d'Apple.

Dans le traitement sémantique par de nouveaux dispositifs de pointages nous pouvons citer l'exemple d'EsQUIsE (Juchmes & Leclercq, 2004) un logiciel de CAO destiné aux architectes. Le dispositif de saisie reprend la métaphore du bureau mais de façon virtuelle, ainsi le concepteur est immergé dans un outil qu'il a l'habitude d'utiliser. Le seul dispositif présent est un stylet, le même utilisé par les tablettes graphiques. EsQUIsE ne comporte pas d'interface complexe, il reconnaît de manière implicite les traits à main levée. Le résultat tridimensionnel obtenu n'est pas très éloigné d'un logiciel orienté objet comme par exemple Archicad.

Par ce dispositif, le concepteur peut visualiser instantanément les conséquences en 3D de ses modifications en plan. Afin de réaliser la reconnaissance des différentes catégories de traits, plusieurs agents analysent chaque geste de l'utilisateur. La probabilité d'appartenance du trait à une certaine catégorie est ensuite calculée (ligne droite, ligne pointillée, hachure, caractère). La probabilité la plus forte déterminera le type de trait, et l'agent concerné va marquer ce trait comme lui appartenant afin d'éviter les ambiguïtés. Le système identifie ainsi les murs, les fenêtres, des traits qui ne servent pas à annoter le dessin. Les inscriptions sont interprétées comme dans un traitement de texte à l'aide d'un thesaurus.

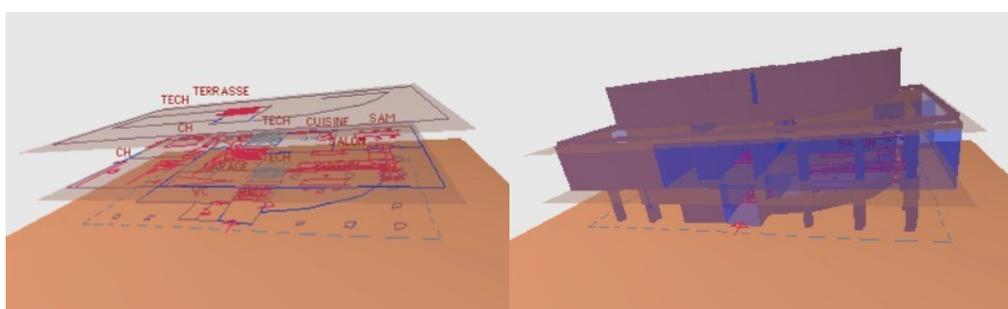


Figure 63. EsQUIsE (Juchmes & Leclercq, 2004).

Cet outil de modélisation utilisé en phase esquisse est intéressant du point de vue des fonctions implicites. Le fait qu'il ne perturbe pas le concepteur durant la phase de dessin constitue un atout important. L'utilisation de ce type d'interface permet d'obtenir un gain au niveau de l'ergonomie. Néanmoins, il est à noter que ces innovations matérielles doivent être

associées à des principes d'interfaces totalement différentes des logiciels que nous utilisons actuellement.

Le logiciel « The Kite » (Kool Integrated Transformation Editor) (Pranovich, Wijk, & Overveld, 2002) constitue un premier exemple d'une voie à développer du point de vue de l'interface logicielle. Cet outil permet la manipulation d'objets suivant deux dimensions. Il regroupe l'ensemble des modifications élémentaires dans un même lieu dans l'interface. Il se caractérise par un manipulateur qui se fixe à la géométrie à modifier. Ensuite l'utilisateur indique le type de transformation en cliquant sur la zone d'interaction correspondante (Figure 64). Ces manipulations élémentaires ne sont plus présentes dans l'interface utilisateur du logiciel mais directement sur la géométrie à modifier.

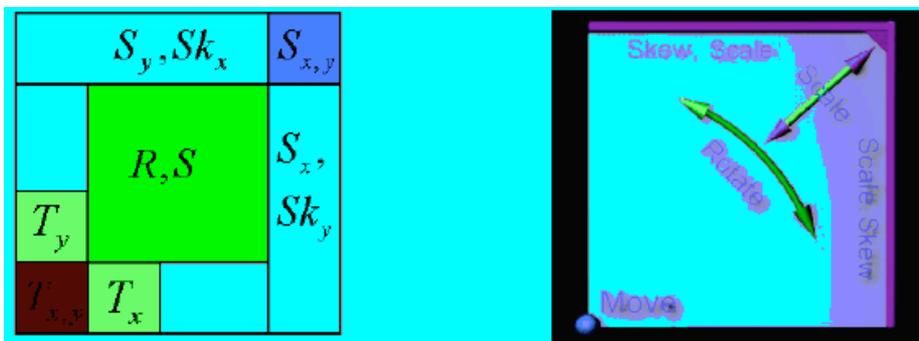


Figure 64. « The Kite » (Pranovich, Wijk, & Overveld, 2002).

Pour valider cet outil, une étude (Pranovich, Wijk, & Overveld, 2002) a été menée sur l'efficacité de « KITE » pour la manipulation 2D face au manipulateur de 3D Studio Max et à la boîte englobante de MacDraw. « KITE » ressort de l'étude avec le plus grand indice de satisfaction car il combine les points forts des manipulateurs étudiés.

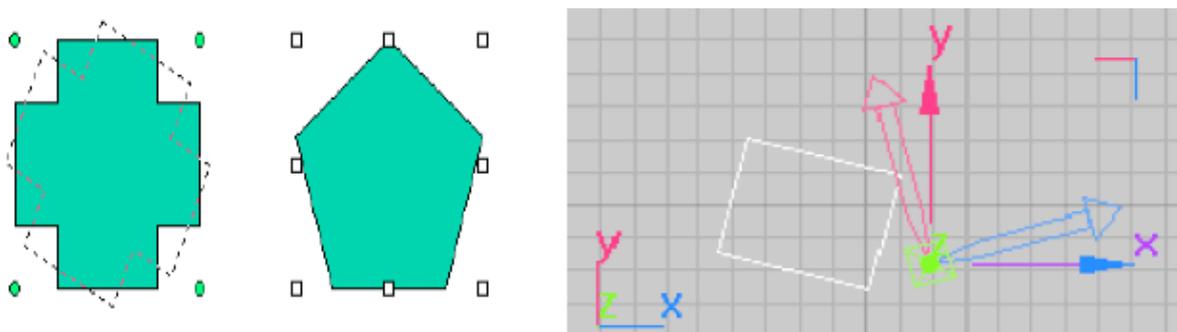


Figure 65. Boîte englobante MacDraw et manipulateur de 3D Studio Max (Pranovich, Wijk, & Overveld, 2002).

Cette approche met à disposition du concepteur les manipulations possibles directement sur l'objet à modifier. Il permet une prise en main rapide d'un outil de modélisation en ne proposant à l'utilisateur que les transformations possibles. Cependant cet outil manipule uniquement des transformations de l'ordre de la translation ou de la rotation. Il serait

intéressant d'étudier dans quelle mesure une transposition de tels principes serait possible avec des opérations morphologiques plus complexes.

2.5. Conclusion

La figuration graphique comme outil de formalisation et de représentation des solutions envisagées par le concepteur joue un rôle clé dans l'activité de conception. Elle permet la mise en situation heuristique et la sauvegarde des solutions envisagées. L'architecte crée ainsi les représentations des concepts qu'il invoque au cours de son activité et opère grâce à ces représentations de nombreux allers et retours entre toutes les dimensions présentes dans un projet d'architecture.

Nous devons cependant constater que les logiciels utilisés dans le monde de l'architecture restent actuellement peu adaptés à une démarche de conception. Ils sont principalement utilisés pour représenter un état fini d'un projet en vue de le communiquer aux clients ou aux entrepreneurs. Ils ne peuvent prendre en compte qu'une démarche de type linéaire et non pas une démarche itérative et heuristique. De plus, leur langage et leur type de représentation essentiellement en plan semblent plus adaptés à l'activité de construction qu'à celle de conception.

L'enjeu de notre travail résidant dans la création d'un outil permettant de mener une activité de conception en phase esquisse, il convient dès lors d'imaginer des approches différentes de la plupart des outils actuels.

Le concept d'opérateur morphologique peut être une piste de recherche intéressante d'autant plus qu'on peut lui greffer une dimension sémantique. L'adjonction de paramètres aux « modificateurs » existants ainsi que l'implémentation de nouveaux opérateurs pourraient être une réponse. L'utilisation d'une représentation adéquate pourrait également permettre de visualiser l'ensemble des opérations invoquées par l'architecte en cours de conception.

L'aspect concernant les principes de modélisation tridimensionnelle évoqués avec les opérateurs morphologiques n'est pas à dissocier d'autres principes que nous avons mis en évidence lors de notre analyse des logiciels en cours de recherche.

Tout d'abord l'aspect génératif de solutions guidé par le concepteur constitue une avancée dans l'industrie. Transposer ce type d'outil dans le monde de l'architecture dans le but de proposer au concepteur un ensemble de solutions prenant en compte un ensemble de contraintes pourrait être une avancée conséquente.

Conjointement à cette dimension, il apparaît nécessaire de noter l'importance d'aborder les interfaces des logiciels. Actuellement, elles sont très peu adaptées à une activité cognitive intense car elles créent de trop nombreuses interférences.

Un des enjeux de notre travail résidera dans la mise en place d'une interface « à faibles interférences cognitives » qui inclurait un ensemble d'opérations morphologiques paramétrables, en vue de les faire varier, soit de façon directe, soit par un algorithme génératif.

3. Elaboration d'un modèle applicable à la morphogénèse architecturale

L'informatique sert aujourd'hui d'interface pour la conception de formes, et met en œuvre le plus souvent des opérations de bas niveau qui sont essentiellement des transformations mathématiques de l'ordre de la translation ou de la rotation. Les « modeleurs géométriques » font appel à des opérateurs (tourner, translater...) qui restent insuffisants pour l'architecte dont les activités de conception reposent sur des opérations de transformation morphologique porteuses de sens architectural (étirer une paroi, onduler un couloir...) (Aoki & Inage, 2000).

Nous proposons dans ce chapitre un modèle permettant de représenter la conception de formes architecturales en phase esquisse. Les contraintes à respecter sont inhérentes à une démarche qui est par essence heuristique, itérative et dont les objectifs à atteindre sont souvent mal définis à priori.

3.1. Etablissement d'un modèle

Dans un chapitre précédent, nous avons constaté que l'architecte représente et transforme la morphologie de son projet par ajustements successifs jusqu'à obtenir une définition précise d'une ou plusieurs solutions acceptables.

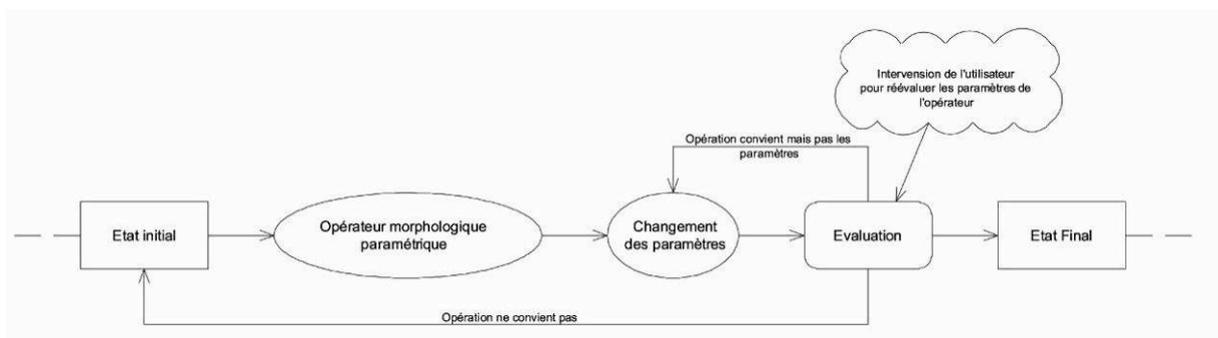


Figure 66. Modèle.

Nous proposons donc une modélisation du processus de morphogénèse en phase esquisse comme un ensemble de transformations élémentaires de formes (Figure 66), combinables par chaque concepteur lors de chaque projet (Vyzoviti, 2003). La succession de

ces transformations se fait par des opérateurs paramétrables agencables dans un système arborescent, pour permettre le retour en arrière et l'ajustement.

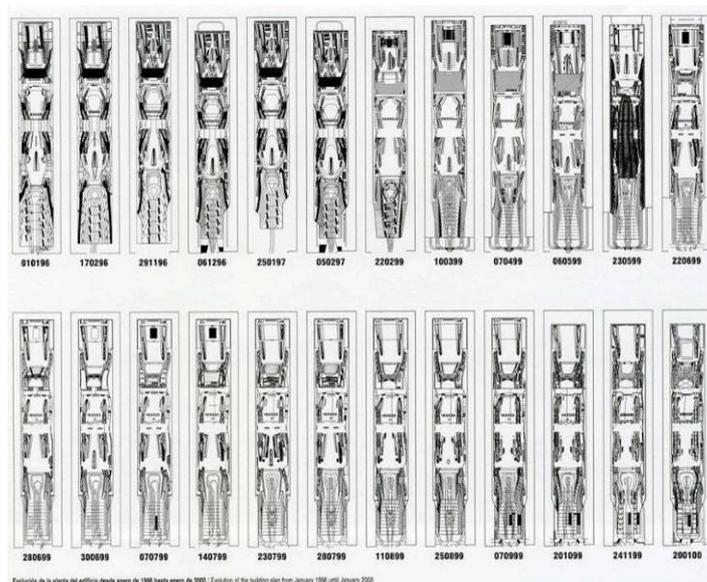


Figure 67. Exemple d'un espace de solutions formelles, Terminal de Yokohama, Foreign Office.

Il reste à qualifier quelles sont les opérations morphologiques à considérer, ainsi que les moyens de navigation utilisés par le concepteur pour parcourir l'espace des solutions (Figure 67). Nous développerons l'aspect navigation dans les prochains chapitres.

3.2. Les opérations applicables à une géométrie polygonale

Le processus de création de forme peut être décrit comme le résultat d'une succession d'opérations géométriques et morphologiques. Celles-ci sont utilisées dans le but d'atteindre la « forme finale », qui est elle-même l'expression de la volonté du concepteur. Dans cette partie de notre travail, nous distinguerons les opérations géométriques, les opérations morphologiques qui, à notre sens, intègrent l'objectif formel du concepteur et enfin, les opérateurs morphologiques qui en sont les instruments opérationnels.

3.2.1. Les opérations géométriques

Le processus de modélisation géométrique s'appuie sur un ensemble d'objets de base. De manière générale, on pourrait classer ces objets en trois familles : les courbes, les surfaces et les solides. Nous considérons qu'une face est délimitée par un ensemble fermé de courbes et qu'un solide englobe un volume formé par un ensemble de surfaces adjacentes. Lorsqu'une surface est formée par des courbes non coplanaires, ce qui est assez fréquent, elle est découpée en mailles ou « patch » (notamment pour des besoins d'affichage), on parle alors de maillage (Figure 68).

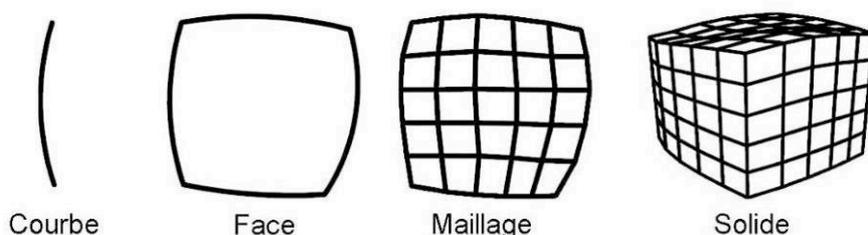


Figure 68. Objets géométriques.

Tout objet décrit par une géométrie polygonale peut être le support d'opérations qui permettent de le transformer ou de créer un ou plusieurs nouveaux objets. Une première catégorie d'opérations concerne les transformations géométriques de base (déplacement, rotation, symétrie, homothétie), qui peuvent s'appliquer à l'objet ou à une de ses parties : déplacement d'un sommet d'arête, rotation d'une arête de surface ou homothétie d'une face de solide.

Dans une seconde catégorie, nous pouvons classer les opérations de création d'objets d'un type nouveau. Ainsi, un ensemble d'arêtes coplanaires permet de créer une face (fermeture), une face et une courbe permettent de générer un solide (extrusion) ou, en sens inverse, un solide est décomposé en surfaces et celles-ci en courbes. D'autres opérations permettent de créer des objets de même type. La duplication d'objets en est l'exemple le plus simple, mais nous trouvons également les opérations booléennes (union, intersection, soustraction) et leurs dérivées telles que la section ou la scission.

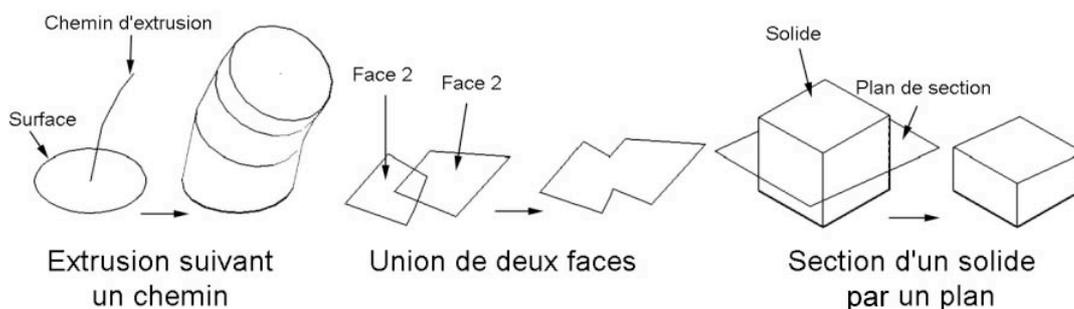


Figure 69. Opérations géométriques.

Ces opérations élémentaires n'ont aucun objectif sémantique. Pour cette raison, nous considérons ces opérations comme des opérations de bas niveau. Nous proposons la définition d'opérations de plus haut niveau appelées opérations morphologiques.

3.2.2. Les opérations morphologiques

Il existe plusieurs types d'approches de la forme (normatives, fonctionnelles, formelles...) (Porada, 1994). Dans les approches créatives de la forme de type « sculpturale ou plastique » telles qu'elles sont pratiquées dans les architectures dites non-standard, le

processus de transformation se fait largement par l'utilisation d'un savoir-faire gestuel (Funk, Theisel, & Seidel, 2006). Celui-ci est identifiable à travers des verbes d'action comme étirer, dilater, tordre, pousser, plier... qui donnent leur sens aux gestes. Ces verbes connotent des actions physiques attachées aux formes et renvoient souvent de manière métaphorique à des idées ou des références formelles que l'architecte cherche à atteindre ou évoquer. Par exemple, le verbe onduler dénote la notion de vague ou de tôle. Le langage devient ainsi un fil conducteur de création de la forme dans le processus de conception architecturale (Borillo & Goulette, 2002).

Nous nommons opérations morphologiques les actions sur la forme qui traduisent ce savoir-faire gestuel. Elles sont généralement les composées de plusieurs opérations géométriques et sont dotées d'un ensemble de paramètres géométriques (axe, angles, portée...) pouvant être pondérés afin de produire des résultats divers. Afin d'identifier ces opérations, nous devons modéliser les variations de formes entre deux étapes en phase esquisse, et les rendre reproductibles et paramétrables (Huang, 1999).

3.2.3. Les opérateurs morphologiques

Les opérateurs morphologiques sont des instruments d'action sur un maillage (Shi, Yu, Bell, & Feng, 2006). Ils disposent d'une valeur sémantique en accord avec la forme recherchée et d'une dimension paramétrique leur permettant d'ajuster au mieux la forme voulue par le concepteur.

Nous pouvons citer l'exemple de l'opérateur « tordre » qui a été utilisé par S. Calatrava durant la conception de la tour « Turning Torso » (Wetzel, Belblidia, & Bignon, 2006).



Figure 70. Exemple de l'opérateur « tordre ».

Durant toute la phase de morphogénèse, l'idée principale invoquée par le concepteur se rattache à un torse qui se tourne. L'architecte a caractérisé cette image mentale par un ensemble de transformations élémentaires qui se traduit, in fine, par une torsion.

A partir de cette définition, l'enjeu réside dans la définition d'un protocole d'analyse permettant d'identifier de tels opérateurs. Il conviendra ensuite de vérifier si de tels outils existent ou non dans les modeleurs existants.

3.2.3.1. Méthode d'identification des opérateurs morphologiques

La mise en évidence de ce type d'opérateurs au cours de la conception relève en grande partie d'une recherche empirique.

Dans un premier temps, nous proposons de faire ressortir, par une analyse méthodique des écarts morphologiques d'une suite de dessins ou de maquettes, un certain nombre de modifications pouvant résulter d'opérations morphologiques. La présence d'écrits de l'architecte, expliquant la manière dont la forme a été pensée, pourra venir appuyer cette analyse. Les documents utilisés doivent impérativement être classés par ordre chronologique, ceci pour identifier la suite d'opérations ainsi que les paramètres utilisés par l'architecte pour opérer les changements morphologiques de l'objet conçu.

Dans un deuxième temps, nous identifierons les opérateurs permettant de produire les opérations observées.

3.2.3.2. Analyse d'un corpus

Dans notre corpus nous intégrons des objets (bâtiments, meubles,...) qui font appel dans leur volumétrie générale à un nombre limité d'opérations. Si l'objet analysé dispose d'une forme complexe, il devra disposer d'une base documentaire (croquis, photos de maquettes,...) permettant de retracer les différents états de la forme au cours de sa conception.

3.2.3.2.1. Guardiola House

Peter Eisenman représente un exemple particulièrement intéressant pour notre analyse. Dans plusieurs projets « déconstructivistes » comme la « Guardiola House » (1989) ou « Memory of Mak », il a conçu un système formel dont l'expression est fondée sur l'enregistrement matérialisé des opérations conduites et la trace du processus de transformation lui-même. Il est alors aisé de repérer, étape par étape, les transformations morphologiques dans lesquelles un élément formel est substitué à un ou plusieurs autres éléments. Par exemple, un volume est divisé en faces, les faces parallèles deviennent une grille, la grille est tournée, et ainsi de suite. Dans des projets ultérieurs, comme « Max

Reinhart House » ou « Alteka Office Building », la notion de transformation a acquis un caractère plus explicite et nous permet d'identifier les opérateurs morphologiques.

Dans l'analyse de la « Guardiola House » l'opérateur « tordre » apparaît comme une opération morphologique de torsion tandis que les autres opérateurs identifiés « déplacer », « fusionner », « superposer » et « séparer » sont des opérateurs élémentaires de premier niveau.

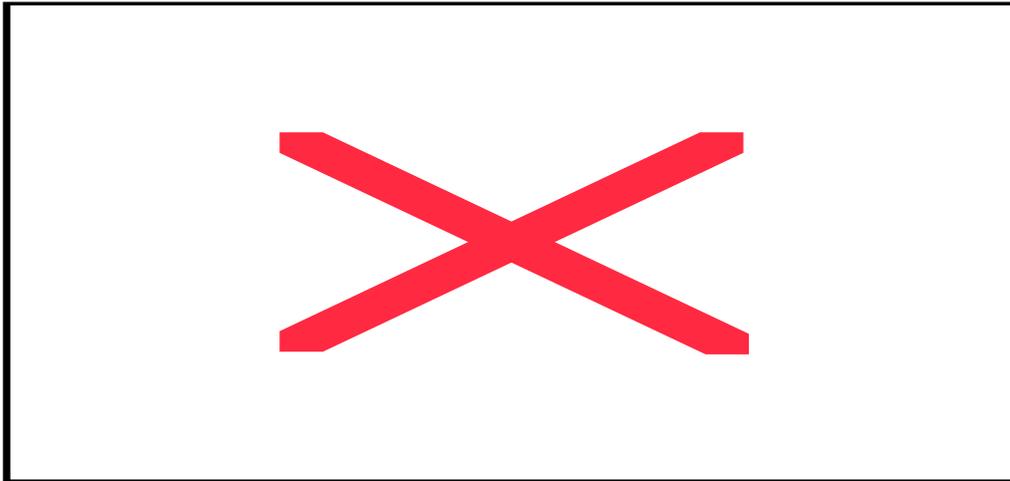


Figure 71. Exemple la «Guardiola House» de Peter Eisenman.

3.2.3.2.2. Dancing House

Les œuvres récentes de Frank O. Gehry (Walt Disney Concert Hall - Los Angeles, Musée Guggenheim - Bilbao, Experience Music Project - Seattle) témoignent, de la possibilité d'utiliser de nouvelles formes en architecture basées sur les surfaces courbes, jusque là plutôt réservées aux domaines du design, de l'automobile et de l'aéronautique.

Le processus de recherche formelle chez Frank O. Gehry relève d'une démarche itérative sur des supports divers (Van Bruggen, 1998). Après les premiers croquis de conception, la matérialisation de la forme est abordée sur des maquettes d'étude. Frank O. Gehry commence par dégager une géométrie avec des formes simples correspondant à un diagramme fonctionnel, qu'il va ensuite perturber par des opérations « sculpturales », en travaillant à même la maquette (Pollack, 2006). Une fois que la maquette a atteint un degré de composition considéré comme satisfaisant, elle est affinée à l'aide de l'outil informatique (Catia de Dassault Systèmes) avant de faire l'objet de maquettes de vérification à plus grande échelle. Le processus de formalisation est mené par Frank O. Gehry principalement sur la maquette. Il débute par une première spatialisation basée sur des primitives géométriques prenant en compte les contraintes fonctionnelles. Puis il opère des transformations de ces primitives en utilisant des opérations morphologiques comme plier ou serrer.

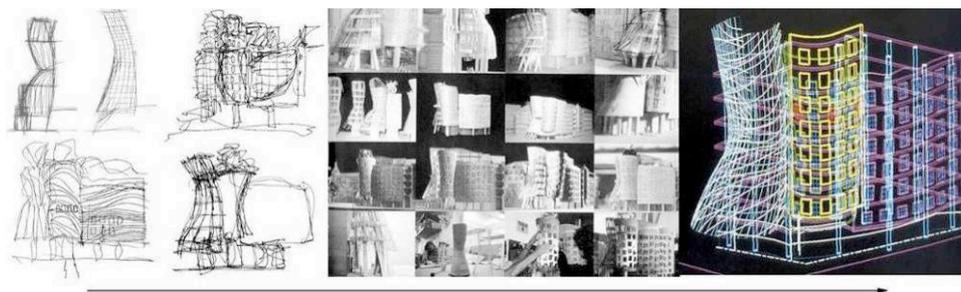


Figure 72. Suite d'opérations réalisées pendant la conception du bâtiment Dancing House à Prague, Frank O. Gehry.

A travers la forme du bâtiment « Dancing house » à Prague, Frank O. Gehry voulait figurer le couple Ginger Rogers et Fred Astaire qui exécute une figure de danse (Figure 73).

Il commence par la modélisation du bâtiment à l'aide de « boîtes » représentant les fonctions du programme. Puis il réalise une suite de maquettes et de transformations. L'analyse de cette série de maquettes nous a permis d'identifier les opérateurs morphologiques « fusionner », « serrer », « étirer » et « lisser » (Figure 74).



Figure 73. Ginger Rogers et Fred Astaire Dancing House à Prague, Frank O. Gehry.

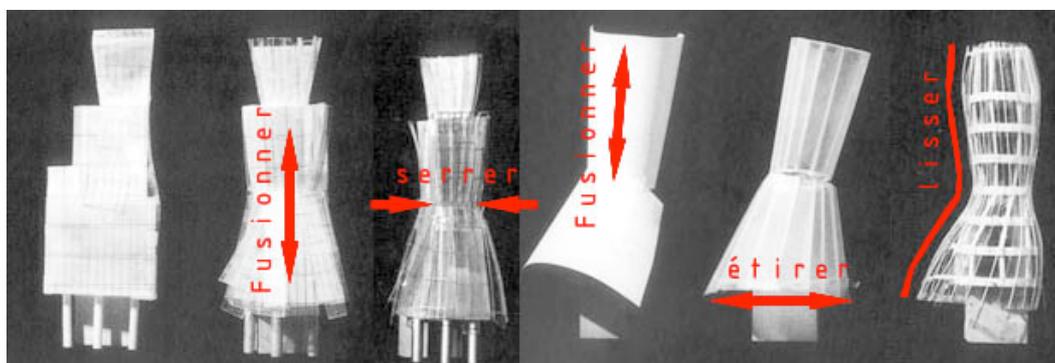


Figure 74. Suite de maquettes réalisées pendant la conception du bâtiment Dancing House à Prague, Frank O. Gehry.

3.2.3.2.3. La maison embryonnaire

Dans un registre différent, Greg Lynn a largement exploité les capacités des modelleurs 3D pour créer des formes innovantes aussi bien pour le design que pour l'architecture intérieure ou la conception d'édifices. A travers ses réalisations et de nombreux projets de concours, Greg Lynn fonde son activité de création sur l'utilisation des propriétés des surfaces et particulièrement les « événements » topologiques qu'elles peuvent générer. Ces motifs, baptisés plis, nœuds, boucles, fleurs, etc. deviennent des éléments d'un vocabulaire qui se traduit en termes architecturaux par des espaces, des limites, des ouvertures et autres dispositifs spatiaux. La seconde caractéristique du travail de Greg Lynn est son recours à l'ordinateur pour animer des formes et ainsi les faire varier. Les volumes se modifient par l'application de forces qui en transforment la géométrie. L'animation est utilisée ici comme moyen pour mieux révéler le volume et en suggérer des variantes qui n'étaient peut-être pas évidentes pour le concepteur.

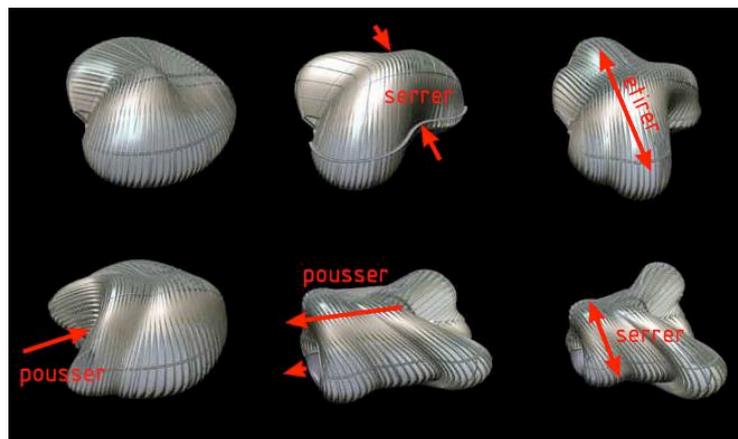


Figure 75. La maison embryonnaire de Greg Lynn.

L'exemple de la maison embryonnaire (Figure 75) montre les différentes étapes d'une morphogénèse et met en évidence l'utilisation d'opérateurs morphologiques comme « serrer », « étirer » ou « pousser » dans une démarche de conception.

3.2.3.2.4. Federation square, l'université de Cornell, Bell-Hoe winery



Figure 76. RCR, exemple du chai « Bell-Hoe winery » construit en Espagne utilisant à plusieurs reprises l'opération « plisser » pour la conception de la toiture.



Figure 77. Exemple d'une opération de froissage sur la façade du bâtiment « Federation Square » réalisé par Lab Architecture Studio à Melbourne (photos : Jean-Claude Bignon).

L'analyse de l'évolution de la forme de la toiture d'un chai construit en Espagne par RCR Architects et du bâtiment « Federation Square » de Lab Architecture Studio, nous permet d'identifier les opérateurs « Plisser » et « Froisser » comme les principales opérations utilisées par l'architecte dans ce projet, mais aussi l'opérateur « Plier » comme sous ensemble de ces deux derniers.



Figure 78. L'École d'Architecture de l'université de Cornell, Morphosis.

L'analyse des projets de l'université de Melbourne et de l'Ecole d'Architecture de Cornell (Figure 78)(Wetzel, Belblidia, & Bignon, 2008b), nous a permis la mise en évidence de l'opérateur « Plisser » sur l'ensemble ou une partie de volumétrie.

3.2.3.2.5. Gare ferroviaire, Shuhei Endo



Figure 79. Gare ferroviaire et abri à bicyclettes, Fukui, Japon, Shuhei Endo Architect Institute.

L'opérateur « Onduler » a été mise en évidence par Emeline Pernot (Pernot, 2008) dans son travail de recherche au laboratoire CRAI de Nancy. L'analyse du projet de la gare ferroviaire et abris à bicyclettes de l'architecte Japonais Shuhei Endo qui comporte un ensemble d'ondulation sur l'ensemble du bâtiment a permis la réalisation d'un modèle de l'opérateur.

3.2.3.2.6. "House with one wall"



Figure 80. Photos de la maison « House with one wall » (Casciani, 2008).

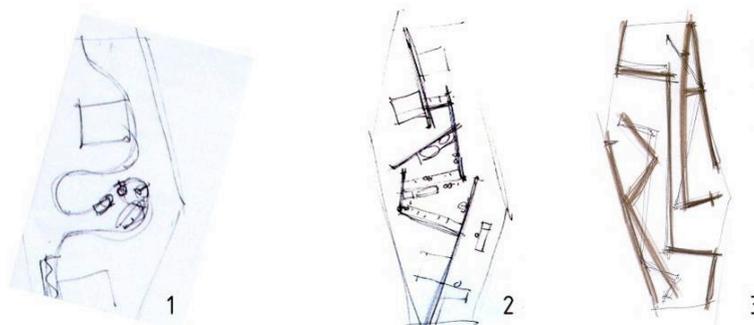


Figure 81. Recherche formelle en plan à partir de croquis (Casciani, 2008).

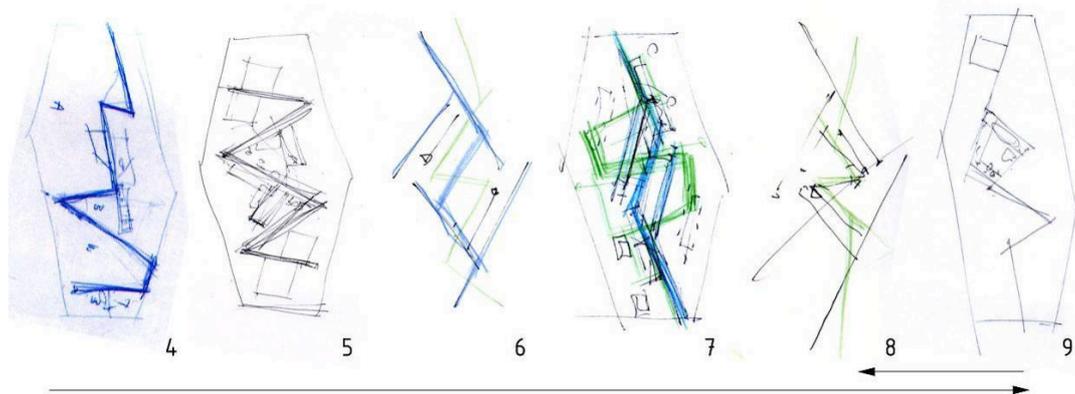


Figure 82. Recherche formelle de la forme du mur intérieur du R+2 à partir de plis (Casciani, 2008).

Le projet « House with one wall » de Christian Kerez fait appel à des opérations de pliage afin d'obtenir des variations du projet pour aboutir au projet final. Ces opérations instrumentées par l'opérateur « plier » sont visibles dans tous les croquis réalisés par le concepteur et ont ainsi permis de conférer une identité forte au bâtiment.

3.2.3.2.7. OIC Headquarters



Figure 83. Exemple de l'opération « Bomber » (Shadkhou, 2007) pour le siège de la conférence Islamique réalisé par OIC Headquarters à Jeddah.

L'opération « Bomber » a été mise en évidence par Shaghayegh Shadkhou durant un travail de recherche au laboratoire MAP CRAI (Shadkhou, 2007) par l'analyse du projet du siège de la conférence Islamique réalisé par OIC Headquarters à Jeddah (Figure 83).

Par l'analyse de ce corpus nous avons identifié les opérateurs morphologiques suivants :

- Etirer, déplacement de la géométrie suivant deux directions opposées dans un même plan.
- Froisser, implantation d'un ensemble de plis de façon aléatoire sur tout ou partie de la géométrie.

- Onduler, modification de la géométrie suivant un ensemble de courbes implantées sur un plan
- Plier, déplacement de la géométrie suivant une rotation par rapport à un axe de pliage situé sur un plan.
- Plisser, implantation d'un ensemble de plis sur un plan.
- Pousser/tirer, déplacement de la géométrie de façon adoucie suivant un point avec une zone d'influence et une direction.
- Serrer, déplacement de la géométrie suivant deux directions opposées se rapprochant sur un même plan.
- Tordre, rotation de la géométrie, suivant un axe de rotation, réalisé de façon adouci entre le centre de la géométrie et les extrémités.

Suite à notre analyse, nous avons mis en évidence 8 opérateurs. Il convient maintenant de les tester par rapport aux outils existants pour envisager une éventuelle implémentation en opérateurs.

3.2.3.3. Evaluation des opérations mises en évidence

A partir de la précédente analyse, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre d'opérateurs morphologiques. Nous allons les tester par rapport aux « modificateurs » déjà présents dans les modeleurs 3D, ce qui nous permettra de mettre en évidence les opérateurs nécessitant une implémentation.

3.2.3.3.1. Bomber, Pousser, Tirer

Shaghayegh Shadkhou a proposé un modèle de l'opérateur « Bomber » qui a été implémenté en langage *maxscript* dans 3D Studio Max 9.

Ainsi instrumenté sous la forme d'un modificateur, il permet au concepteur le contrôle du lieu d'implantation de la bosse par une ellipse placée sur la surface à déformer. Le maillage nécessaire à l'opération n'est plus le fait de l'utilisateur mais directement créé par l'opérateur. Ainsi l'activité cognitive de l'architecte ne sera plus entrecoupée d'opérations liées au modèle géométrique comme par exemple une subdivision de maillage, mais sera entièrement focalisée sur la forme à obtenir.

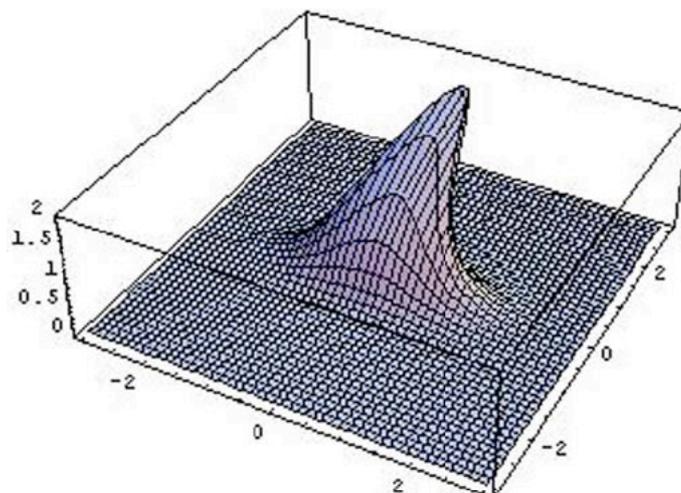


Figure 84. Application de l'opérateur « Bomber » sur une surface d'un volume, la zone d'influence est délimitée par une ellipse. (Shadkhou, 2007).

3.2.3.3.2. Etirer, Serrer

Les opérateurs « Etirer, serrer » ont un même principe d'action sur une géométrie. Ils ont pour finalité de permettre le déplacement d'un ensemble ou d'une partie de la géométrie d'un objet suivant une « zone d'influence adoucie » de la géométrie.

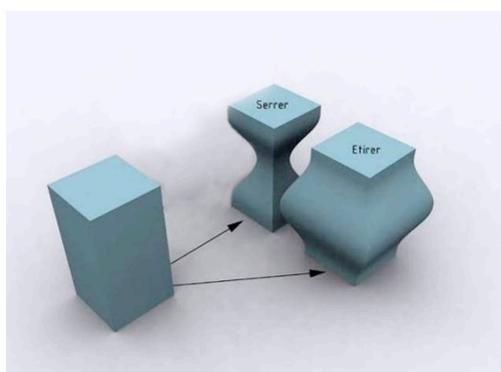


Figure 85. Application des opérateurs « Etirer et serrer » sur une primitive standard.

Actuellement, ces opérations ne sont pas présentes avec cette définition sous la forme d'opérateurs paramétriques dans des modeleurs 3D comme 3D Studio Max. Nous pouvons envisager une caractérisation puis une implémentation de ces opérateurs.

3.2.3.3.3. Onduler

L'opérateur onduler permet la modélisation d'ondulations sur une surface ou un volume. Plusieurs architectes dont Shuhei Endo l'ont mis en œuvre dans leurs projets (Figure 79).



Figure 86. Exemple du « modificateur onde » de 3D Studio Max.

Un opérateur similaire existe dans 3D Studio Max (Figure 86, Annexe 1.9), sous la forme du modificateur « onde ». Cependant, celui-ci ne permet pas l'introduction d'irrégularités telles que nous pouvons le voir sur la Figure 79. Une réécriture de ce modificateur permettrait l'implémentation d'un tel opérateur. Emeline Pernot dans son travail de recherche en a déjà proposé une spécification (Pernot, 2008). A titre d'exemple le logiciel Maya possède une telle fonction d'ondulation. L'obtention d'irrégularités se réalise par modification de la courbe génératrice représentant l'ondulation appliquée à la géométrie.

3.2.3.3.4. Tordre

L'opérateur morphologique « tordre » existe sous la forme de modificateurs dans les logiciels 3D Studio Max, Maya ou Blender (Annexe 1.12). Les paramètres utilisés dans ces logiciels sont l'axe de rotation, l'angle de torsion et la limite d'application. Etant déjà implémenté dans les modeleurs 3D, son implémentation devient alors inutile. Il devra cependant faire l'objet de quelques adaptations au niveau de l'interface, le but recherché étant d'uniformiser le principe d'utilisation de ce modificateur avec les autres opérateurs implémentés.

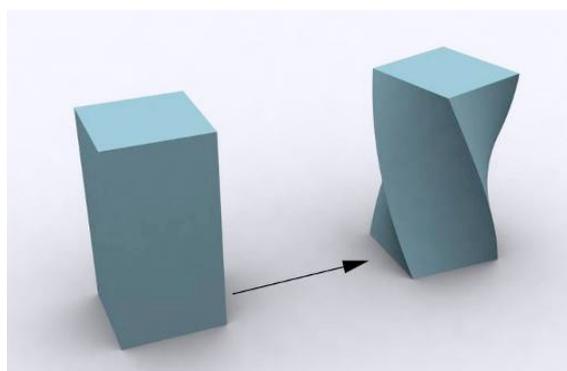


Figure 87. Exemple du « modificateur torsion » de 3D Studio Max.

3.2.3.3.5. Plier, Plisser, Froisser

Les formes créées à partir de plis plus ou moins réguliers sont de plus en plus répandues dans l'architecture (Vyzoviti, 2003; Weinand, 2004). Nous proposons l'implémentation d'opérateurs permettant de décrire et paramétrer ces formes géométriques.

Il n'existe pas de « modificateur » permettant de « Plier », « Plisser » ou « Froisser » un volume. Si un utilisateur essaie de réaliser ce type de transformation, il risque d'obtenir une géométrie altérée, avec un maillage du volume pouvant présenter des discontinuités.

3.3. Conclusion

L'analyse de notre corpus nous a permis d'identifier huit opérateurs morphologiques. En procédant à leur évaluation par rapport aux outils existant et à des travaux antérieurs, nous avons conclu que cinq de ces opérateurs (« étirer », « serrer », « plier », « plisser », « froisser ») restaient à être implémentés.

Dans la suite de notre travail, nous proposons d'étudier plus spécifiquement les trois opérateurs « plier », « plisser », « froisser » car ils sont l'objet d'un grand intérêt des architectes. Par ailleurs le principe définissant l'opérateur « plier » comme constituant un sous-ensemble commun aux opérateurs « plisser » et « froisser » nous paraît particulièrement intéressant à mettre en œuvre.

4. Validation du modèle de morphogenèse architecturale en phase esquisse

Nous proposons de tester nos hypothèses et notre modèle en reconstituant à l'aide d'opérateurs les opérations réalisées durant un processus de morphogenèse et en modélisant des bâtiments ou des objets de design à partir de ces opérateurs.

4.1. Reconstruction/modélisation paramétrique d'objets existants

Précisons tout de suite que notre approche n'appartient pas au champ de l'analyse des démarches de conception. Notre but n'est pas de modéliser le cheminement exact ou supposé suivi par le concepteur pour produire une forme. Notre approche appartient au champ de l'expérimentation d'outils de morphogenèse. Nous souhaitons valider la faisabilité de la génération d'une forme par le biais d'opérateurs, en partant d'une hypothèse de modélisation de la morphogenèse d'un objet, émise à partir d'une analyse de documents graphiques produits par le concepteur.

Les opérateurs nécessaires à cette étude n'existant pas dans le modèleur utilisé pour cette expérimentation, ils seront simulés par le déplacement des points de la volumétrie de l'objet à modifier. Nous pourrions ainsi par ce biais simuler la succession des opérateurs et la variation des paramètres de ceux-ci.

Nous entreprendrons ensuite à titre expérimental la modélisation d'un bâtiment à partir d'opérateurs morphologiques dans le but d'en tester l'efficacité mais aussi les éventuelles insuffisances.

4.1.1. « House with one wall » par Christian Kerez

Nous allons commencer notre test par la modélisation d'une maison bi-familiale présente dans notre corpus et construite à Zurich par l'architecte Christian Kerez. L'idée de départ de l'architecte était de séparer les deux logements par un seul mur qui aurait une forme non rectiligne.

4.1.1.1. Analyse du processus de formalisation

Les premiers croquis de l'architecte montrent une recherche qui se focalise sur la forme du mur central (Figure 81). Le concepteur s'oriente vers deux typologies différentes. La première, illustrée par le croquis numéro un, montre une recherche portant sur des formes courbes, tandis qu'une deuxième voie, illustrée par les croquis deux et trois, se dirige plutôt vers une forme à base de plis. Les autres croquis (Figure 82) montrent clairement que le concepteur favorise cette deuxième idée.

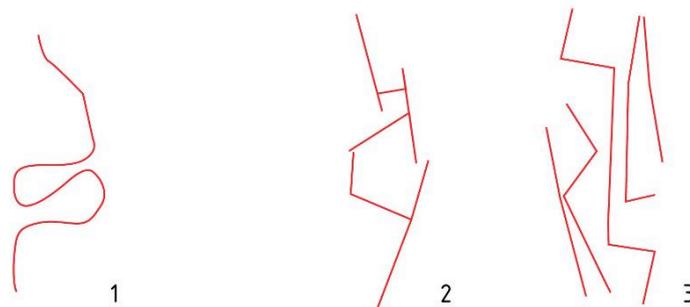


Figure 88. Analyse de la variation de la forme des murs.

L'architecte réalise ensuite une série de croquis qui présente des variations au niveau du nombre de plis sur le mur ainsi qu'au niveau de leur lieu d'implantation et de leur valeur angulaire. Suite à ce travail le concepteur dispose d'un ensemble de solutions qu'il va évaluer et encore modifier pour obtenir les plans finaux du projet (Figure 90).

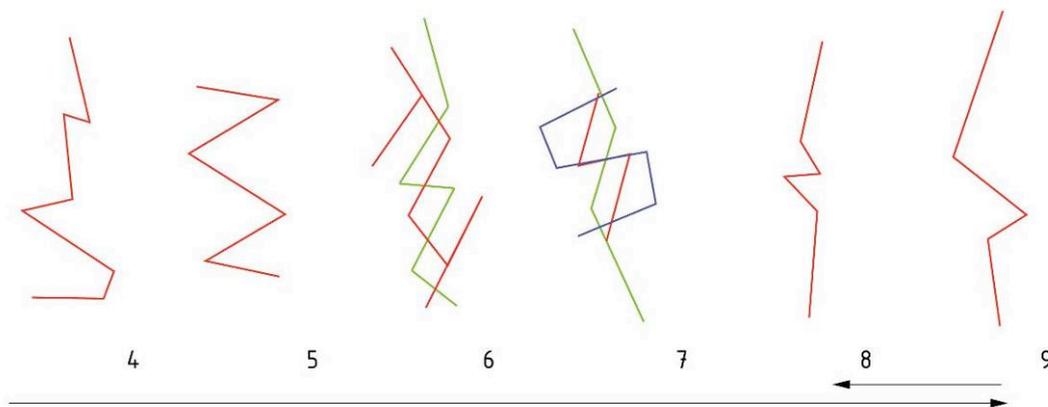


Figure 89. Analyse de la variation des plis implantés sur le mur intérieur du R+2.

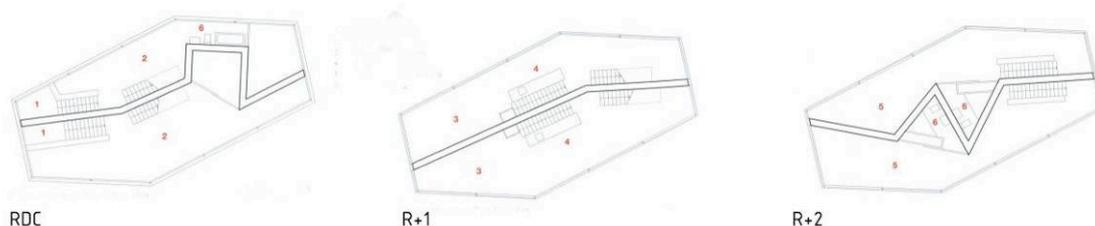


Figure 90. Plans du projet construit (Casciani, 2008).

4.1.1.2. Reconstruction par une modélisation

Nous avons reconstitué la phase de création de la forme allant de la variation 4 à la variation 9. Ces éléments présentent l'intérêt d'appartenir à une même famille de forme. En effet, les variations précédentes ne sont que des formes singulières qui ont été abandonnée par le concepteur.

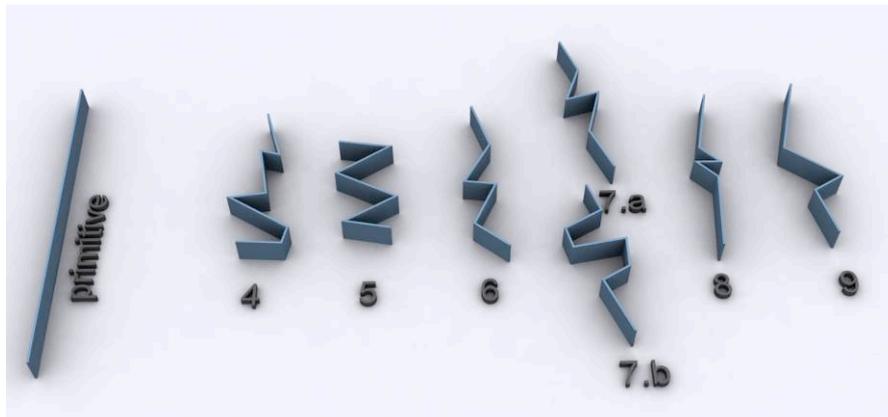


Figure 91. Modélisation des étapes de conception par application successive de l'opérateur morphologique « plier ».

Pour réaliser la modélisation et les variations que nous avons constatées, nous sommes partis d'une primitive standard qui est un parallélépipède rectangle et représente le mur central du bâtiment sans modification. Ensuite nous avons appliqué l'opérateur « plier ». En modifiant le nombre de plis, la distance entre plis et la valeur angulaire des plis, nous avons ainsi réussi à obtenir l'ensemble des solutions envisagées par l'architecte (Figure 91).

Nous continuons ci-après notre simulation de modélisation tridimensionnelle à partir d'opérateurs par des modélisations 3D d'objets architecturaux dont on ne connaît pas a priori l'ensemble du processus de concrétisation formelle réalisé par le concepteur. Nous nous attacherons pour celles-ci uniquement à réaliser les formes telles qu'elles ont été construites.

4.1.2. « The new Zollhof » par Frank O. Gehry

Le deuxième objet choisi est « The new Zollhof » à Dusseldorf construit par Frank O. Gehry (Figure 92). Ce choix a été motivé par les modes de fonctionnement en phase esquisse de cet architecte qui se caractérisent par une approche morphologique appuyée sur une pratique largement gestuelle.



Figure 92. « The new Zollhof » à Dusseldorf de Frank Gehry. ("Frank Gehry 1996-2003", 2003).

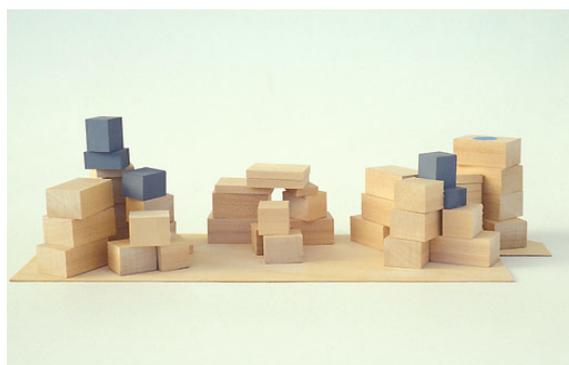


Figure 93. Une des premières maquettes produite durant la conception du « The new Zollhof » à Dusseldorf de Frank Gehry (Photo : Thomas Mayer).



Figure 94. Maquettes plus avancées produites durant la conception du « The new Zollhof » à Dusseldorf de Frank Gehry (Photo : Thomas Mayer).

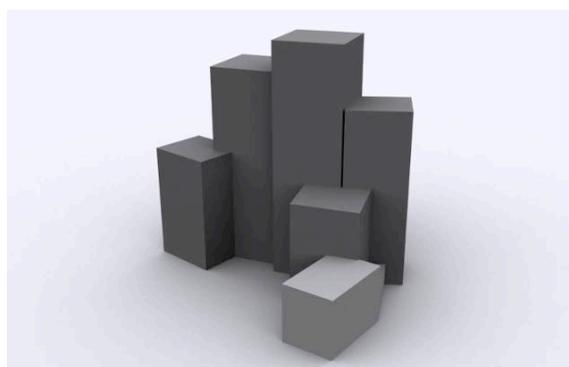


Figure 95. Reconstitution du diagramme fonctionnel tridimensionnel du bâtiment « The new Zollhof » à Dusseldorf de Frank O. Gehry.

Ne disposant que de peu de documents permettant de décrire le processus de recherche de la forme de l'architecte, nous nous sommes limités à réaliser les formes telles qu'elles ont été construites.

Nous procéderons à la modélisation 3D en deux temps : nous commençons par installer un diagramme fonctionnel à base de formes sources (primitives) à l'image des premières maquettes produites au début du processus de conception de ce projet (Figure 94). Ces formes sont matérialisées par six parallélépipèdes rectangles. Dans la suite de notre expérimentation, nous étudierons plus en détail l'évolution d'un seul volume (représenté en clair sur la Figure 95) sous l'effet successif de différents opérateurs morphologiques.

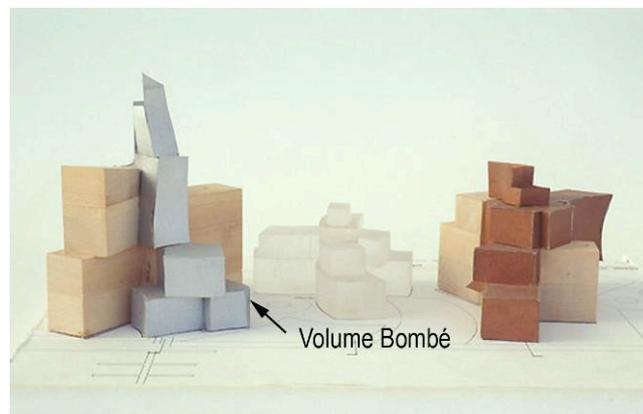


Figure 96. Maquettes produites durant la conception du « The new Zollhof » à Dusseldorf de Frank Gerhy (Photo : Thomas Mayer).

En correspondance avec la figure 96 nous commençons la modélisation 3D par application de l'opérateur « Bomber » sur une partie de la primitive.

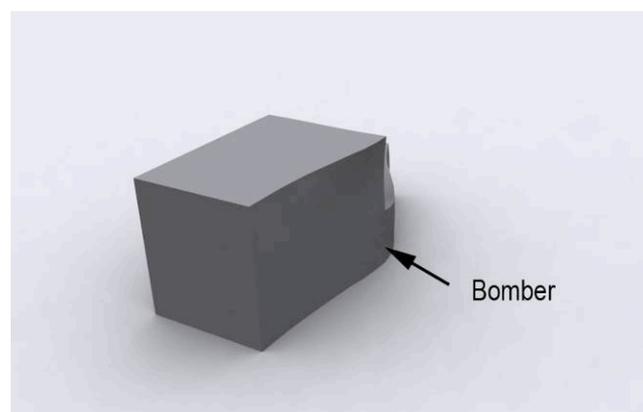


Figure 97. Application de l'opérateur « Bomber ».

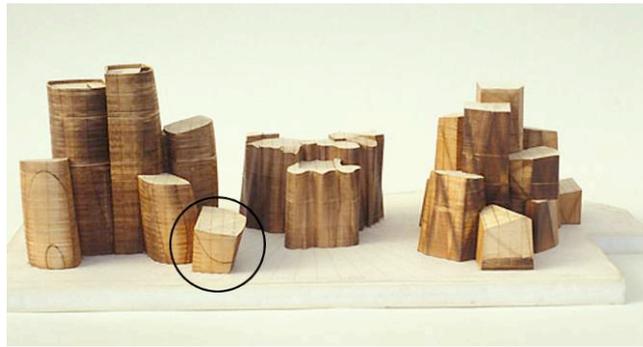


Figure 98. Maquettes produites vers la fin de la conception du « The new Zollhof » à Dusseldorf de Frank Gerhy (Photo : Thomas Mayer).

L'opérateur « Tordre » (Figure 99) est appliqué ensuite à la forme initiale afin de traduire le mouvement de la volumétrie. L'affaissement de la partie supérieure du volume est ensuite réalisé par l'opérateur « pousser » (Figure 100). La modélisation s'achève par une nouvelle application de l'opérateur « bomber » (Figure 101) de manière à se rapprocher de la forme cible conformément à la maquette (Figure 98).

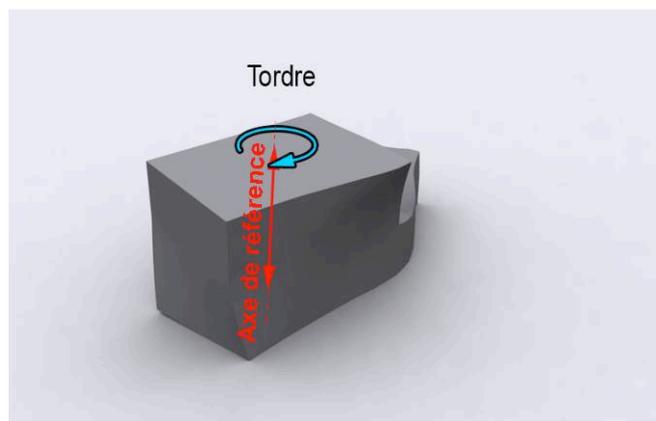


Figure 99. Application de l'opérateur « Tordre » sur la partie haute de la géométrie.

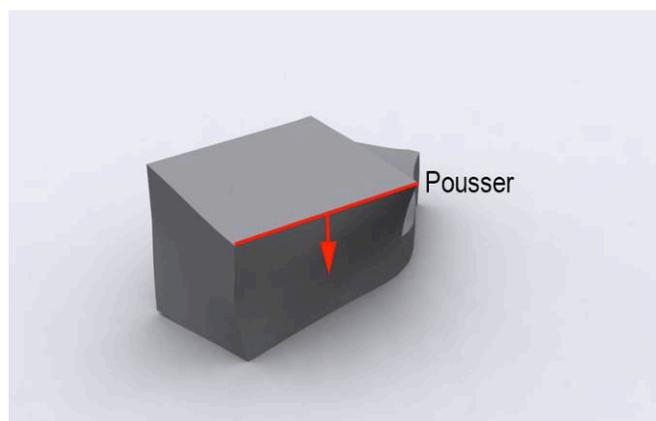


Figure 100. Application de l'opérateur « Pousser ».

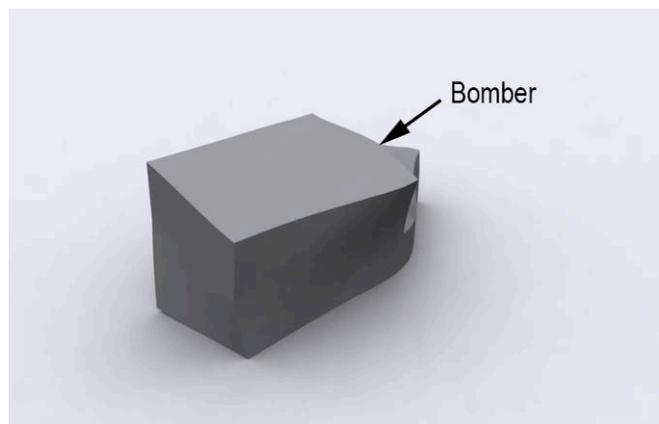


Figure 101. Application de l'opérateur « Bomber ».



Figure 102. « The Zollhof » modélisé.

Le résultat obtenu par la modélisation à partir d'opérateurs correspond morphologiquement au projet final. Nous avons ainsi pu retracer différents états possibles de la forme du bâtiment au cours de sa conception en appliquant successivement différents opérateurs et en jouant sur les variables qui les caractérisent pour arriver à sa forme finale.

4.1.3. « Turning Torso » par Santiago Calatrava

Santiago Calatrava durant la conception de la tour d'habitation « Turning Torso » à Malmö, s'est inspiré de l'image d'un buste en torsion (Figure 70).

Afin de conserver cette métaphore du corps, nous proposons de modéliser cette tour comme une colonne vertébrale (Figure 103). Nous réalisons une « vertèbre » que nous dupliquons sur l'axe vertical. Une fois cet empilement obtenu nous appliquons l'opérateur « tordre » sur l'ensemble des vertèbres pour obtenir l'effet de torsion du buste utilisé comme référence.

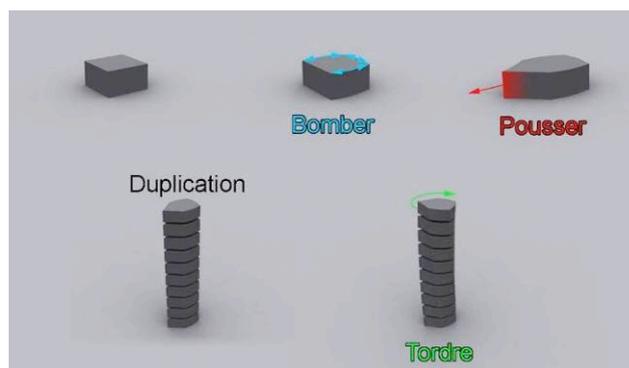


Figure 103. Succession d'opérateurs permettant la modélisation de l'enveloppe de la tour "Turning Torso" (S. Calatrava).

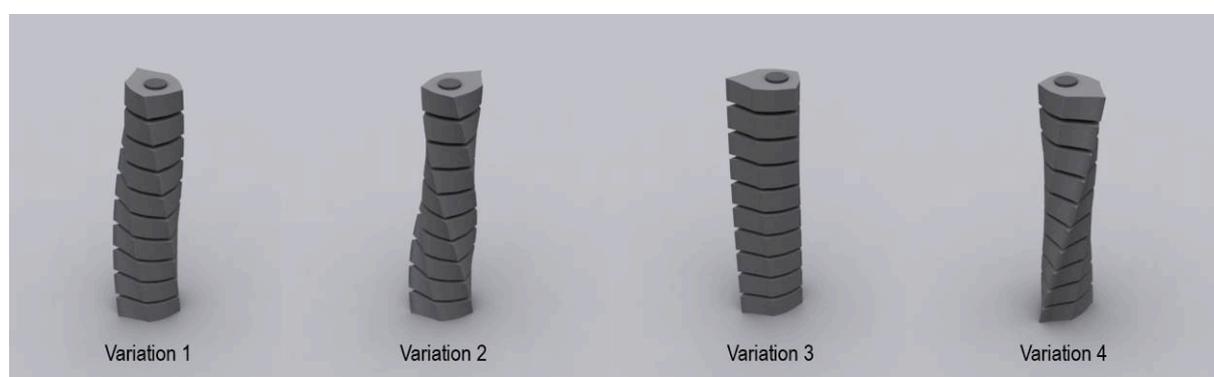


Figure 104. Variation de la torsion pour la modélisation de l'enveloppe de la tour "Turning Torso" (S. Calatrava).

La variation du paramètre angulaire de torsion permet d'ajuster (Figure 104) la forme du bâtiment. Dans ce cas, la démarche s'avère intéressante car elle permet au concepteur de tester toutes sortes de valeurs angulaires possibles. Dans une modélisation plus traditionnelle, le concepteur aurait été obligé de recommencer la modélisation de tout le modèle 3D pour chaque valeur à tester.

4.1.4. « AluFelt Chair » par Marc Newson

Après avoir modélisé ces quelques bâtiments, nous confrontons notre modèle à une démarche de recherche formelle dans le domaine du design.



Figure 105. « Alufelt Chair » par Marc Newson (Photo : Jean-Claude Bignon).

Nous commençons cette expérience par la modélisation de « l'Alufelt Chair » (Figure 105) créée par Marc Newson car sa forme courbe et son matériau, le métal, nous semblent bien adaptés à une modélisation à l'aide d'opérateurs morphologiques.

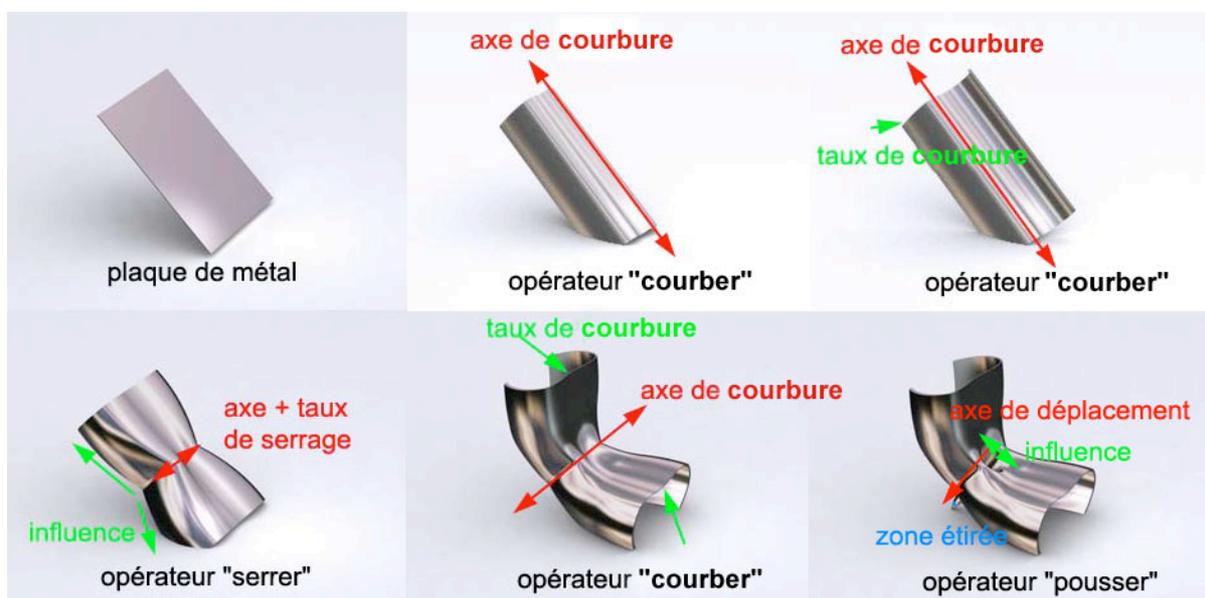


Figure 106. Processus de modélisation de la chaise de Marc Newson à partir d'opérateurs morphologiques.

La forme source (Figure 106) à la base de notre modélisation est constituée par un parallélépipède rectangle qui représente une plaque de métal telle qu'elle aurait pu être utilisée durant le façonnage de la chaise. Pour réaliser la forme générale de la chaise, nous

commençons par l'application successive de trois opérateurs « Courber » sur la géométrie. Dans un deuxième temps, nous appliquons l'opérateur « Serrer » pour réaliser le galbe de la chaise, puis de nouveau l'opérateur « Courber » pour obtenir l'assise et le dossier. Enfin le pied arrière est réalisé grâce à l'opérateur « Pousser ».



Figure 107. Variations des opérateurs morphologiques sur la chaise de Marc Newson.



Figure 108. Chaise « Wicker Lounge » (2000) de Marc Newson.

Nous avons ensuite opéré des ajustements de la géométrie de la chaise en faisant varier les opérateurs pour en vérifier la validité opératoire (Figure 107). Nous avons ainsi pu obtenir diverses formes qui pourraient potentiellement être des variantes de la chaise initiale, la variation numéro 4 se rapproche d'ailleurs d'une autre chaise réalisée par le même designer trois années plus tard (Figure 108).

4.1.5. « Zig-Zag Chair » par Gerrit Rietveld



Figure 109. « Zig-Zag Chair » par Gerrit Rietveld

Toujours dans le but de tester notre démarche, nous allons modéliser la « Zig-Zag Chair » de Gerrit Rietveld (Figure 109) à partir de 3 plis implantés sur un parallélépipède rectangle.

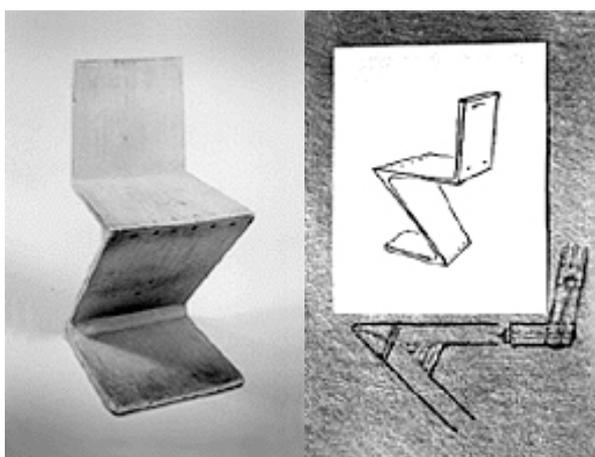


Figure 110. Photographie et croquis de la « Zig-Zag Chair ».

Nous avons choisi d'utiliser cette primitive standard comme objet initial, parce qu'elle permet de symboliser une plaque telle que le concepteur aurait pu l'imaginer.

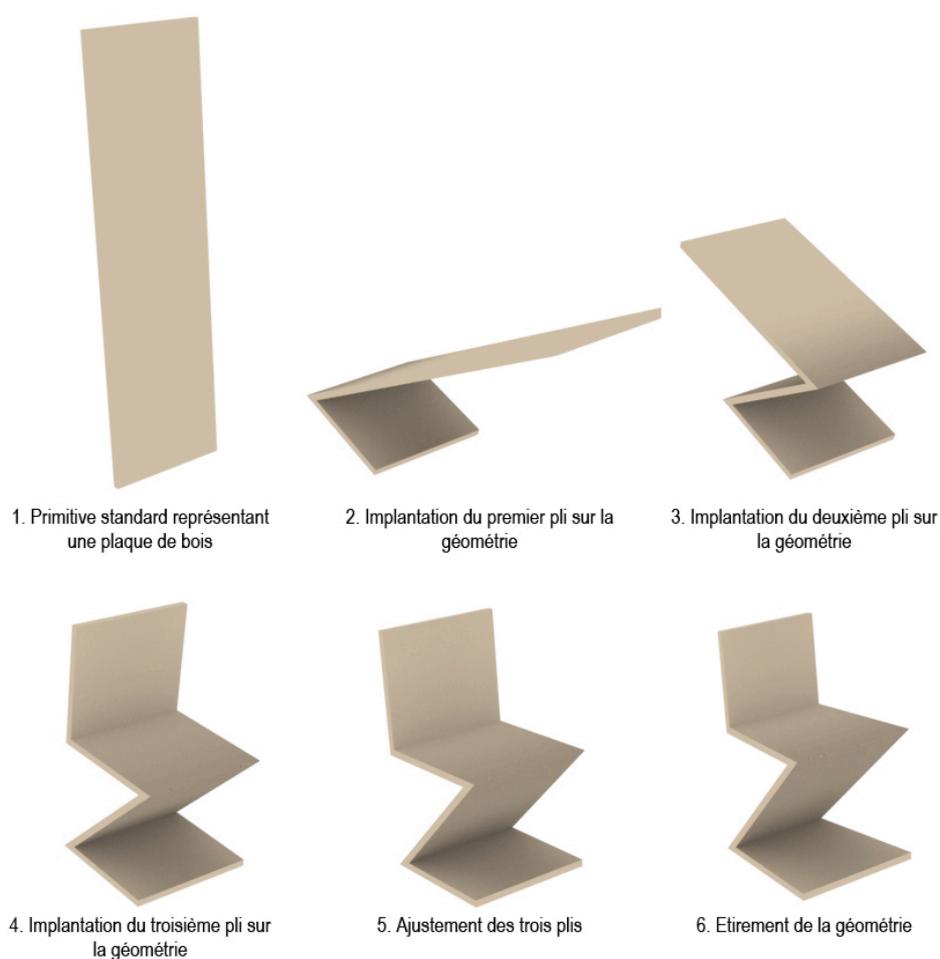


Figure 111. Suite des opérations réalisées pour la modélisation de la « Zig-Zag Chair ».

L'opérateur « plier » nous a permis de réaliser aisément la modélisation de cette chaise. De plus le caractère paramétrique de l'opérateur, a facilité l'ajustement en temps réel des plis et les retours en arrière. Nous avons ensuite entrepris de développer des variations de la chaise à partir du modèle initial (Figure 112), ces variations pourraient être potentiellement des états intermédiaires obtenus durant la conception de cette chaise ou lors de la recherche de variantes.

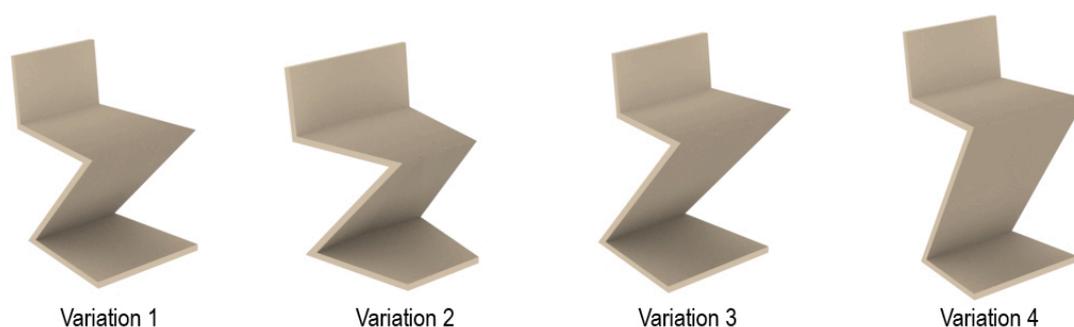


Figure 112. Variations des opérateurs morphologiques sur la « Zig-Zag Chair ».

La modélisation de ces deux chaises nous permet de conclure que notre modèle reste opératoire dans une démarche de conception d'objets, autres que ceux issus du domaine de l'architecture.

4.2. Conclusion

Les expérimentations précédentes ont montré que notre modèle de morphogenèse utilisant des opérateurs morphologiques peut servir à décrire et reconstituer un processus de recherche de forme d'un bâtiment ou d'un objet. Le caractère paramétrique des opérateurs permet l'ajustement progressif de la forme et la génération d'une famille de solutions dont le concepteur peut s'inspirer pour conduire son activité de conception.

Cette expérimentation montre aussi les limites de notre modèle qui s'applique plus particulièrement à un type d'architecture privilégiant une identité formelle forte du projet. Notre proposition s'inscrit plus aisément dans une démarche où le geste et le sens de la forme ont une grande importance.

Enfin ce travail a fait également apparaître deux questions singulières :

- Quelles sont les formes primaires que le concepteur peut utiliser pour appliquer ces opérateurs, sachant que le choix de ces formes de « base » doit être laissé à l'architecte. Nous pensons qu'elles peuvent être :

Des primitives standards,

Des formes quelconques (préexistantes),

Des formes issues d'un processus de mise en forme précédent,

Des formes aléatoires (résultat d'un processus),

- Quel rôle joue l'enchaînement des opérations durant le processus de conception. Cette deuxième question pose le problème de la manière dont le concepteur va naviguer dans un espace de solutions.

Dans le prochain chapitre, nous développerons plus particulièrement l'aspect opératoire des opérateurs car la mise en place de ces outils est le préliminaire à la gestion des historiques de modélisation.

5. Proposition d'un outil d'aide à la conception architecturale en phase esquisse : « De'ForMS »

Notre modèle étant validé, nous proposons dans ce chapitre de le traduire dans un outil disposant d'une interface dédiée à la conception architecturale.

5.1. Mise en application du modèle dans un outil

Nous proposons la réalisation d'un prototype appelé « De'ForMS ». Dans le but de simplifier son implémentation, nous allons le développer sous la forme d'un plug-in C++ pour 3D Studio Max 9 où les opérateurs morphologiques auront les mêmes caractéristiques opératoires que les modificateurs présents dans le modelleur. La différence résidera dans le type d'interface utilisateur employé qui renseignera de façon implicite les paramètres nécessaires à la transformation ainsi qu'une division automatique du maillage.

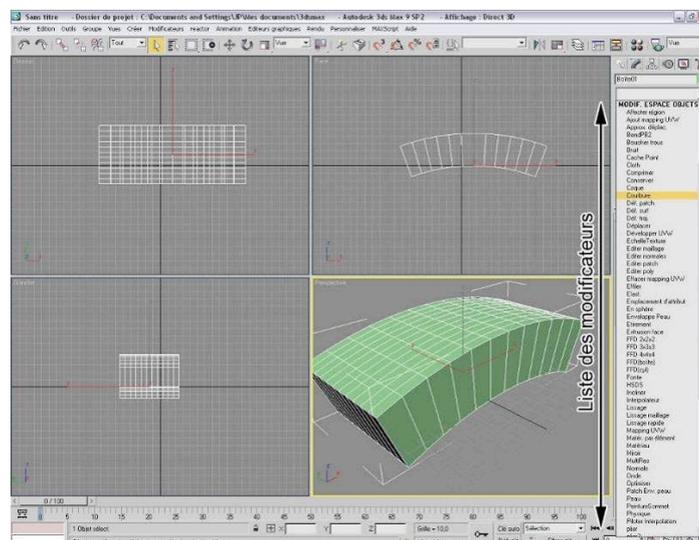


Figure 113. Interface 3D Studio Max et les modificateurs morphologiques.

Notre travail va maintenant consister à caractériser trois opérateurs morphologiques à la fois du point de vue fonctionnel et de l'interface. Ensuite nous procéderons à leurs implémentations.

5.2. Spécification des opérateurs morphologiques « plier, plisser, froisser » (Caractérisation et paramétrisation)

5.2.1. « Plier »

L'objectif de cet opérateur est de réaliser le pliage d'un maillage suivant un axe de pliage, un plan de pliage et un angle définis par l'utilisateur. La géométrie obtenue après application de cet opérateur devra comporter une rotation de part et d'autre du plan de pliage par rapport à un axe de pliage. La forme du maillage de part et d'autre du plan de pliage devra être conservée, et l'opérateur devra gérer les modifications de la géométrie le long ce plan de façon à ce que le volume intérieur reste continu (*Figure 114*).

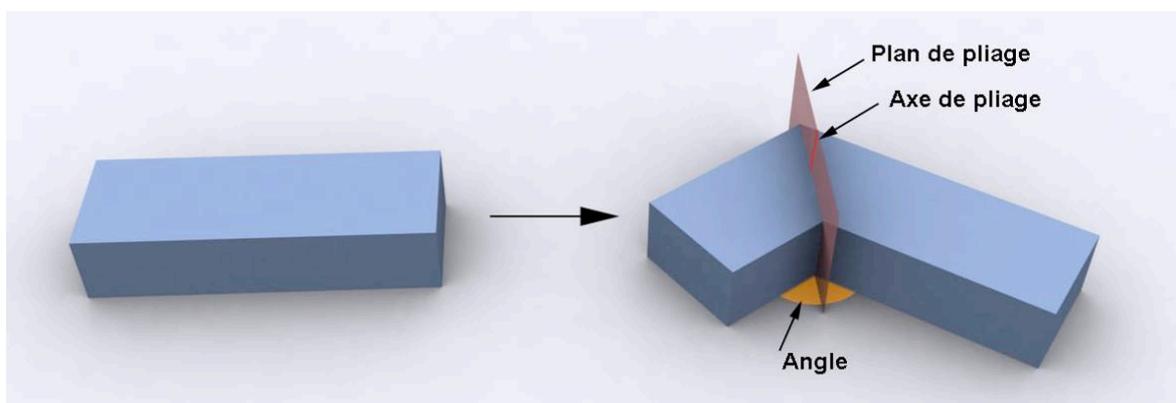


Figure 114. Application de l'opérateur « Plier » sur un maillage.

Nous avons constaté que les modeleurs tridimensionnels dont nous disposons (3DS Max, Maya) n'intègrent pas la notion de pliage d'un volume de façon directe et paramétrique. L'utilisateur doit réaliser de multiples opérations élémentaires de chaque point du maillage pour arriver à obtenir une forme pliée. Il est aussi possible d'utiliser de manière détournée le modificateur « Courbure » en contraignant son action sur une petite partie du maillage et ainsi obtenir un pli. Mais le résultat ne s'avère pas satisfaisant parce qu'il présente une distorsion du maillage sur la zone d'application du pliage, au lieu d'une fusion des deux maillages (*Figure 115*). Une spécification d'un nouvel opérateur devient alors nécessaire.

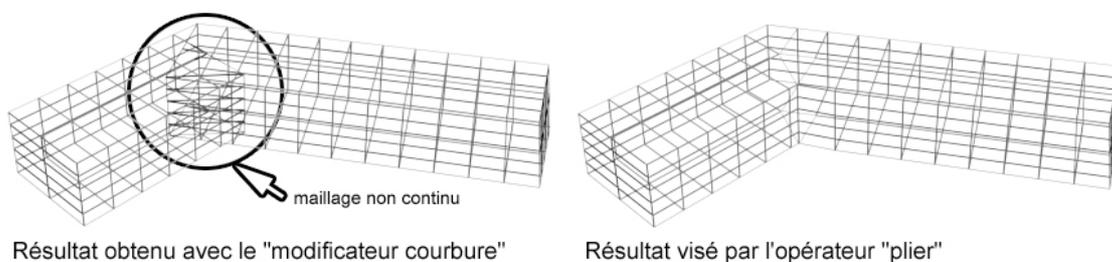


Figure 115. Apport d'un opérateur « Plier » sur la continuité du maillage.

5.2.1.1. Principes envisagés

Pour la spécification de l'opérateur « plier », nous avons envisagé plusieurs hypothèses de mise en œuvre. La première hypothèse avancée était de simplifier l'opérateur au maximum et de le définir par un simple déplacement de points le long d'un plan de pliage (Figure 106). Mais nous avons constaté que la géométrie obtenue ne représentait pas vraiment un pli car sémantiquement, il devrait induire la rotation de l'ensemble de la géométrie alors que, dans ce cas, les extrémités restent à leur emplacement initial.



Figure 116. Principe de pliage n°1.

Partant de cette constatation, nous avançons une deuxième hypothèse qui spécifie l'opérateur « plier » suivant 3 opérations :

- Découpe de la géométrie suivant le plan de pliage
- Rotation des deux géométries obtenues suivant un axe de rotation
- Recomposition des deux entités découpées

Suivant que l'axe de rotation se localise sur la géométrie externe, interne ou au centre nous allons obtenir trois principes différents qui ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Nous allons nommer ces principes numéros 2, 3 et 4.

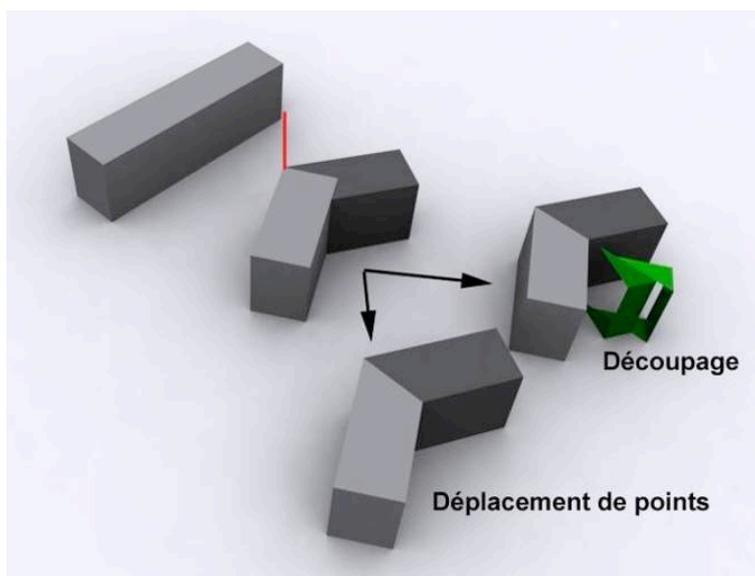


Figure 117. Principe de pliage n°2.

Le principe de pliage n°2 consiste à placer l'axe de rotation sur la face externe de la géométrie. Il en résulte une grande difficulté dans la reconstitution de la géométrie, surtout si la géométrie initiale comporte une certaine complexité (Figure 117).

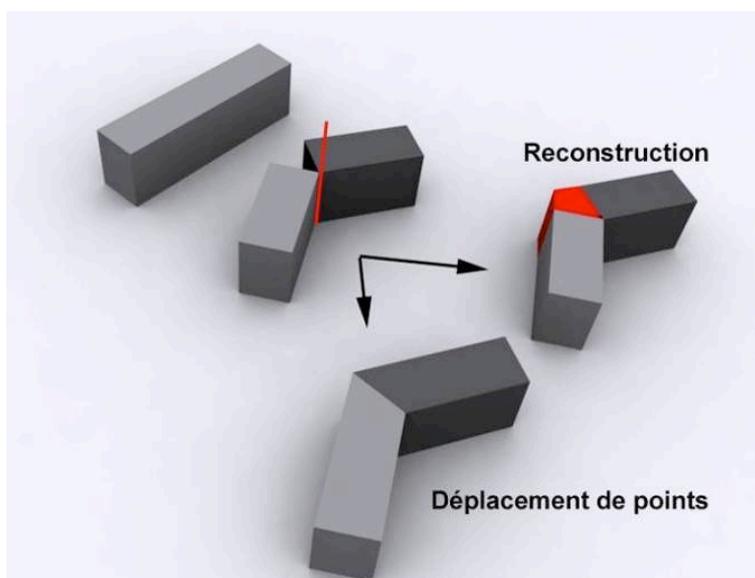


Figure 118. Principe de pliage n°3.

Le principe de pliage n°3 consiste à positionner l'axe de rotation sur la face interne de la géométrie (Figure 118). La reconstitution des deux géométries peut ensuite se faire soit par génération d'une nouvelle géométrie dans l'interstice, soit par déplacement de points. Cette dernière restitue plus fidèlement les géométries complexes.

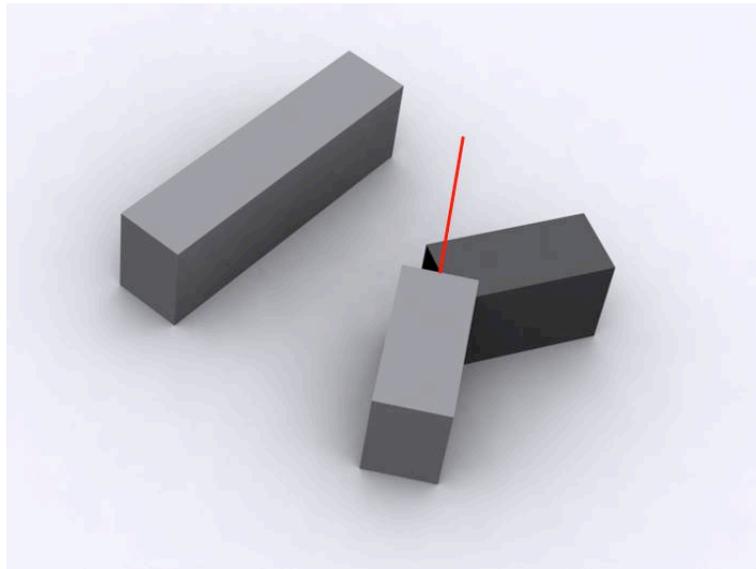


Figure 119. Principe de pliage n°4.

Le principe de pliage n°4 place l'axe de rotation au centre de la géométrie (Figure 119). Il cumule les désavantages des deux principes précédents car il amplifie les erreurs de recombinaison de la géométrie en créant deux situations opposées de part et d'autre de l'axe.

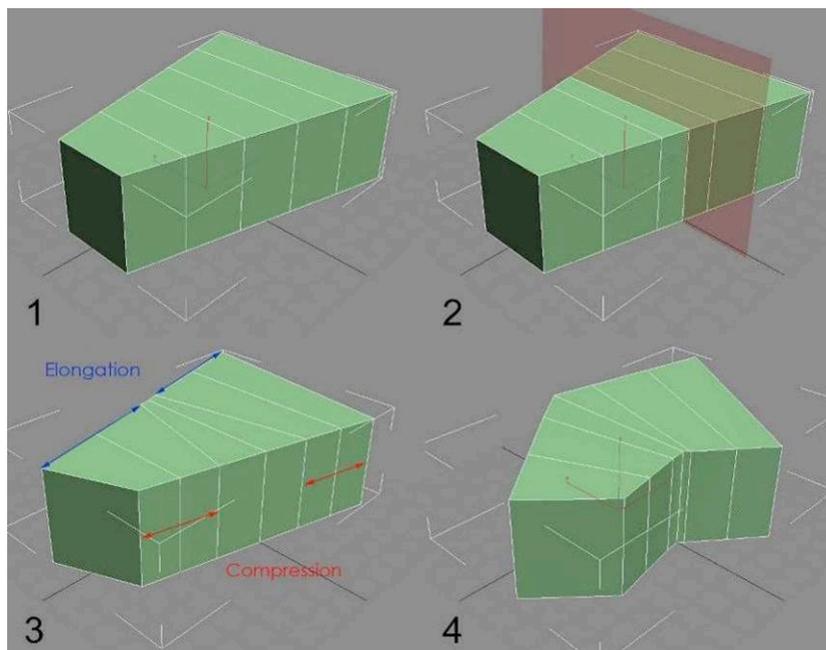


Figure 120. Principe de pliage n°5.

Dans l'hypothèse précédente, la plus grande difficulté est de recombinaison la géométrie après son découpage. Nous avançons alors une nouvelle hypothèse avec le principe de pliage n°5 en partant du principe qu'un pli est la résultante d'une élévation et compression de la géométrie (Figure 120).

Nous distinguons trois grandes étapes :

- Création de points le long du plan de pliage
- Elongation et/ou compression de la géométrie
- Rotation de la géométrie

Les géométries obtenues par les principes n°3 et n°5 paraissent satisfaisantes. Il s'agit maintenant de les évaluer en action sur diverses géométries.

5.2.1.2. Evaluation

Pour évaluer la pertinence de nos deux modèles, nous allons les appliquer à quatre géométries différentes (parallélépipède rectangle, maillage irrégulier, courbe, biseau) (*Figure 121*). L'analyse des résultats nous permettra de connaître les avantages et inconvénients de chacun.

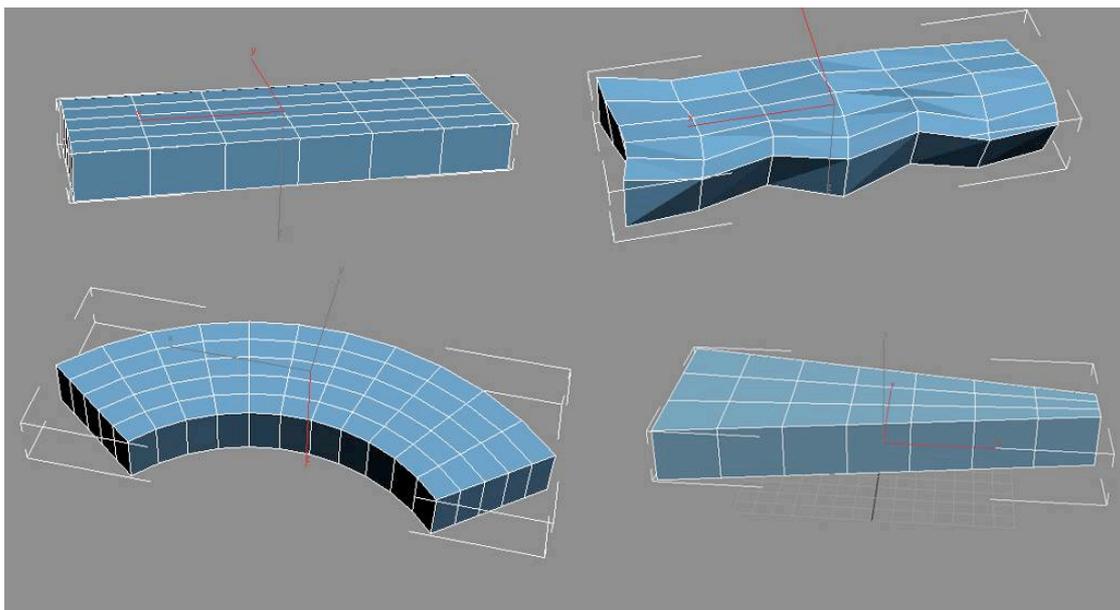


Figure 121. Géométries initiales.

Les géométries obtenues après application du principe de pliage n°3 sont globalement satisfaisantes pour les trois premières géométries (*Figure 122*). Il n'en est pas de même pour le biseau qui présente une déformation anormale le long du plan de pliage. Une amélioration du modèle s'avère nécessaire afin d'obtenir un résultat correct.

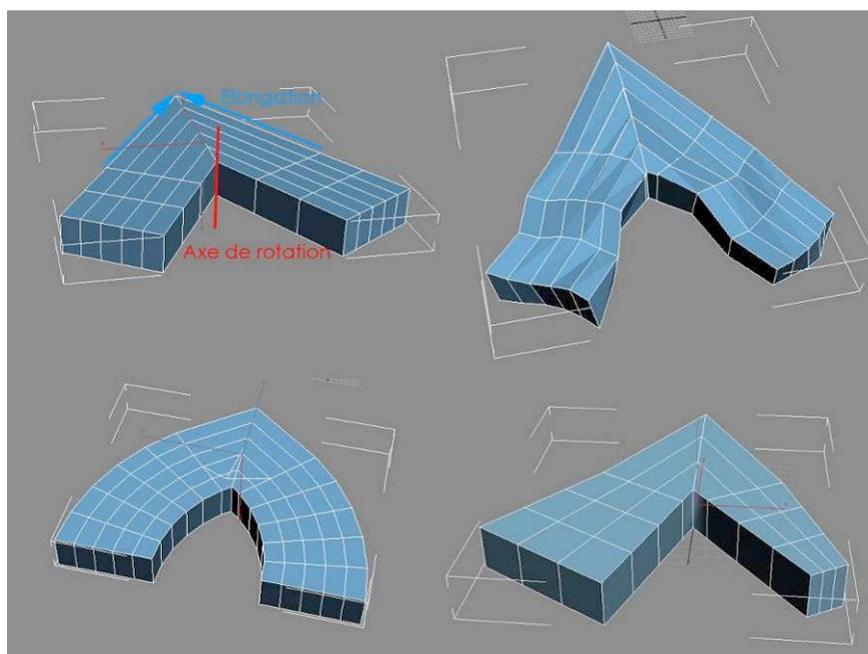


Figure 122. Géométries obtenues après application du principe de pliage n°3.

Concernant le principe de pliage n°5, les deux premières géométries présentent un résultat convenable (Figure 123). Mais les deux dernières dévoilent des distorsions qui s'amplifieraient après application d'un deuxième pli. Ce modèle est par conséquent irrecevable en l'état et une remise en cause de son principe est à prévoir.

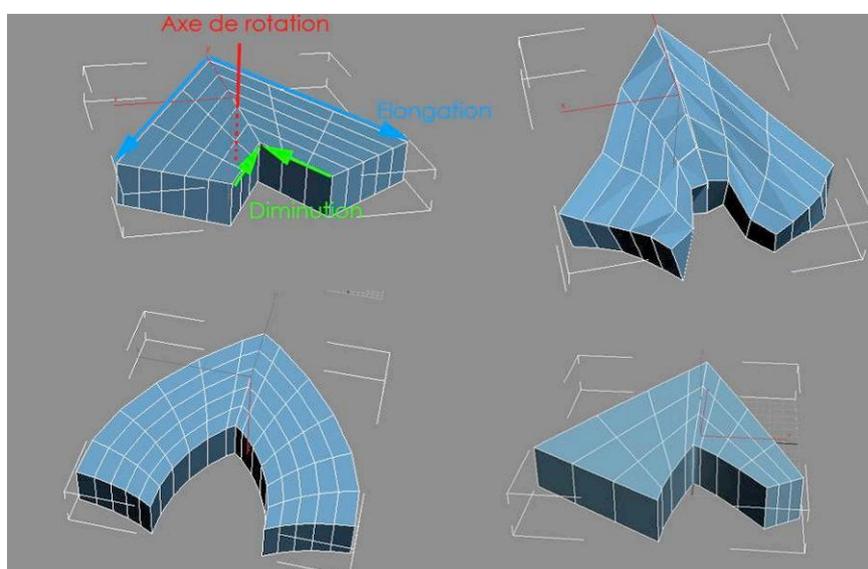


Figure 123. Géométries obtenues après application du principe de pliage n°5.

Après analyse des modèles numéros 3 et 5, nous constatons que le principe n°3 est le plus à même de répondre à nos exigences de conservation de la forme initiale de part et d'autre du plan de pliage. Nous allons le développer dans un prototype et compléter son modèle dans le but de gommer ses imperfections.

5.2.1.3. Principe retenu

Pour définir cet opérateur, nous partons du principe de pliage n°3 et nous complétons sa modélisation en nous inspirant du processus de pliage opéré par une presse plieuse de tôle (Figure 124). L'objet à plier est placé dans une presse comportant un « Vé » et un « Contre-Vé », qui tourne pour plier la tôle. Nous pouvons identifier à ce stade un axe de pliage (différent de l'axe de rotation vu précédemment) situé du côté extérieur de la tôle où l'angle obtenu après le pliage mesure moins de 180° . Sur la face opposée, nous constatons une élongation de la matière.

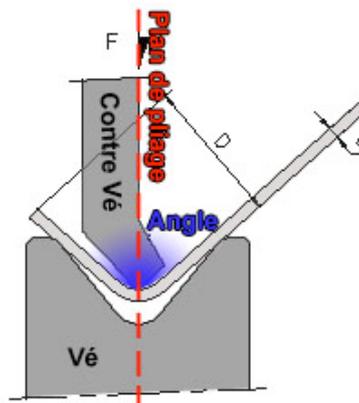


Figure 124. Exemple d'une plieuse de tôle.

Par ses proportions, la tôle est assimilable à un plan dans lequel nous trouvons un axe de pliage.

En partant de ce principe de pliage d'une tôle dans l'industrie, nous généralisons le processus de pliage à une volumétrie 3D en utilisant le principe de pliage n°3 et en nous inspirant du concept du « Vé ». Le « Vé » de la presse de la plieuse est utilisé comme un moule et permet d'obtenir la forme finale de la tôle. Sur un volume tridimensionnel, il permet une sorte de rotation du plan de pliage autour de la bissectrice de l'intersection des plans de deux géométries à reconstruire. Il permet l'intersection des plans de deux géométries et pallie les défauts constatés sur le principe de pliage n°3.

Les variables nécessaires à son déploiement sont les suivantes :

- la géométrie à plier f ,
- une valeur angulaire de chaque pli α ,
- un plan de pliage p .

Dans un premier temps, l'utilisateur définit un axe de pliage par un point d'inflexion (Deleuze, 1988) situé sur la surface de l'objet et un angle par rapport à la normale de la facette où est localisé ce point. (Figure 125).

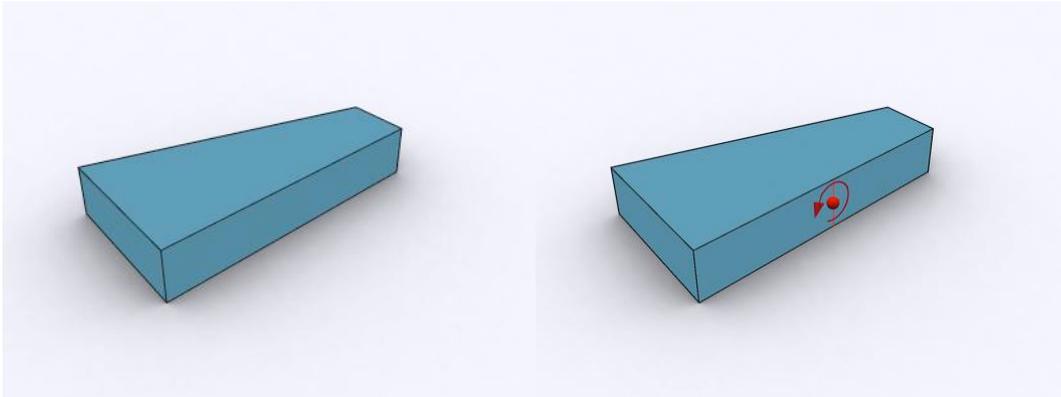


Figure 125. Mise en place du plan de pliage.

De l'axe de pliage placé, nous obtenons un plan de pliage normal à la facette du point d'insertion. Ensuite nous entreprenons une section de la géométrie par le plan de pliage (Figure 126).

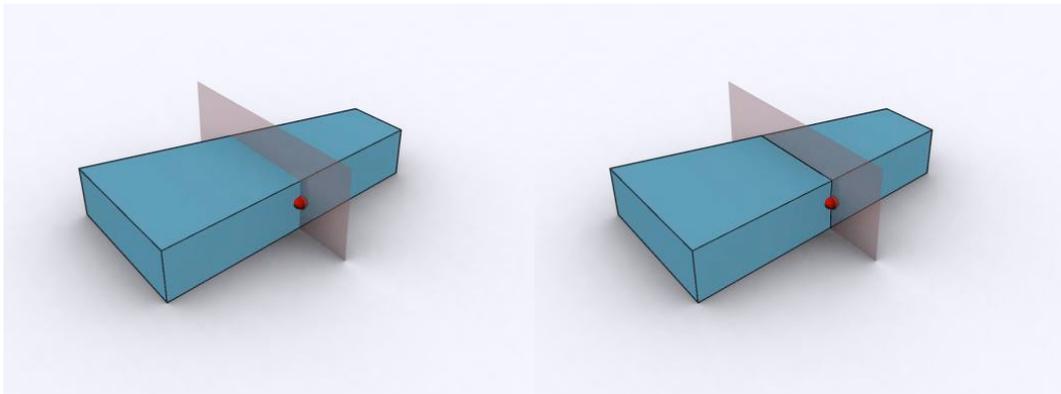


Figure 126. Section du volume et création d'arêtes d'intersection sur le plan de pliage.

L'algorithme de pliage réalise la rotation des deux géométries obtenues précédemment suivant deux valeurs autour de l'axe de pliage. La géométrie est ensuite reconstruite en raccordant les arêtes découpées (Figure 127).

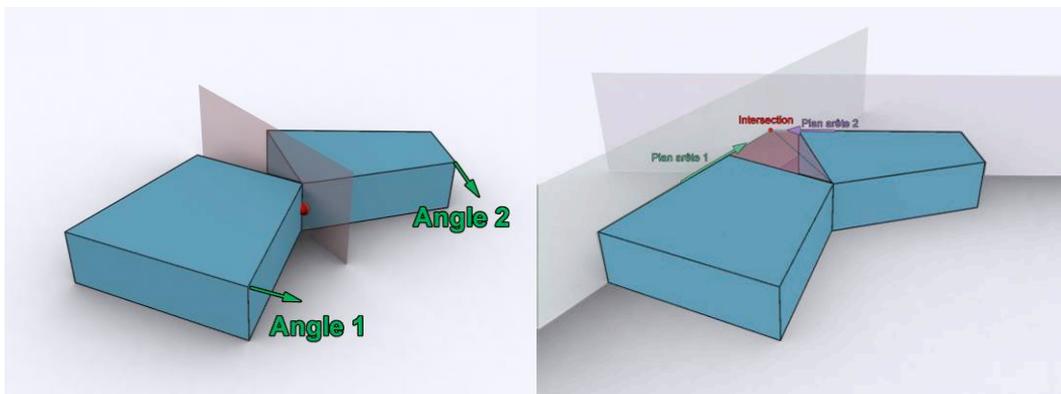


Figure 127. Déplacement des points le long de leurs arêtes vers le plan bissecteur.

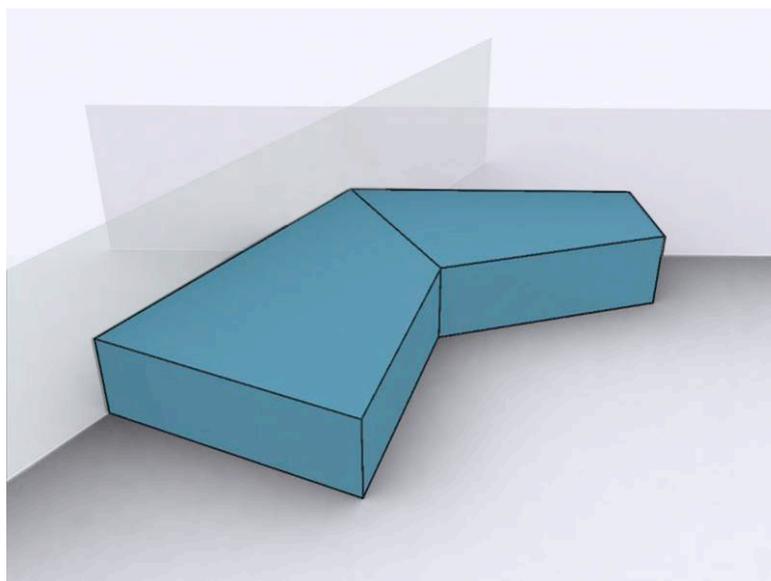


Figure 128. Géométrie obtenue.

Il résulte de ce processus une élongation globale de la géométrie à partir de l'axe et du plan de pliage. L'intégrité de la géométrie est globalement respectée, ce qui est important en phase de conception d'un projet d'architecture (Figure 128).

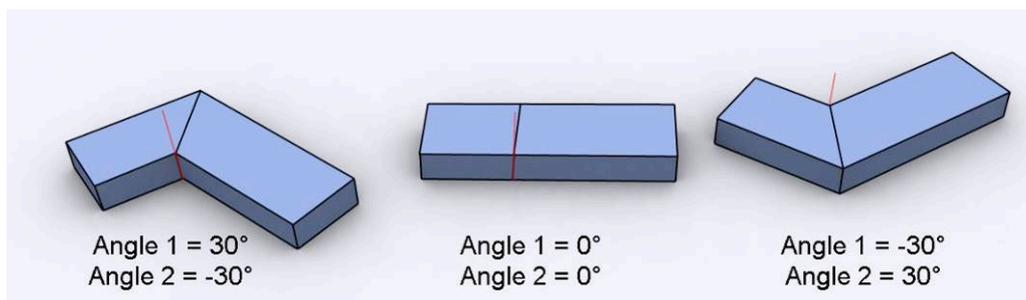


Figure 129. Déplacement de l'axe de pliage suivant la valeur angulaire du pli.

L'algorithme d'implantation du pli induit le placement du point générateur de l'axe de pliage toujours du côté où le pli est inférieur à 180° (Figure 129). Ceci pour maîtriser l'élongation et rester cohérent avec le modèle.

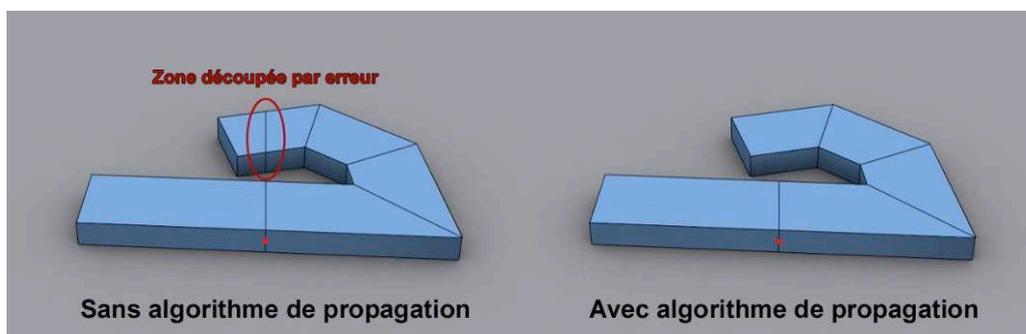


Figure 130. Apport d'un algorithme de propagation dans le processus de découpage du maillage.

De plus ce principe a permis au maillage de la géométrie de « s'auto-adapter » à la forme voulue en créant le maillage nécessaire à l'opération le long du plan de pliage (*Figure 126*). Le concepteur n'a alors pas besoin de rajouter le maillage nécessaire. Il peut ainsi entièrement se focaliser sur sa tâche de conception en faisant abstraction du modèle géométrique de l'objet. Mais le principe de découpage le long du plan de pliage peut s'avérer erroné. En effet dans le cas d'une géométrie qui se retournerait sur elle-même, le maillage serait découpé deux fois (*Figure 130*).

Pour pallier ce problème de découpage, nous proposons de mettre en place un algorithme de propagation qui se développe à partir de la face définie par l'axe de pliage pour ensuite découper toutes les faces contiguës.

Nous avons défini le processus de création d'un pli sur un volume tridimensionnel. Pour spécifier pleinement cet opérateur et augmenter son efficacité, nous devons aussi spécifier les principes régissant son implantation sur une géométrie.

5.2.1.4. Principe d'implantation

Pour appliquer l'opérateur « plier », l'utilisateur doit définir la localisation du pli sur la géométrie. Celle-ci est déterminée par un axe de pliage initiateur du pli (Vyzoviti, 2003). Le pli est concrètement localisé sur la géométrie par le numéro d'index d'une facette du maillage. Nous rappelons qu'une facette dans le modèle géométrique de 3D Studio Max est toujours déterminée par trois points. A partir de ce numéro d'index, nous déterminons un point grâce à un barycentre des trois points définissant la face. Ensuite l'axe puis le plan de pliage sont définis par des valeurs de rotation du plan suivant les trois axes (*Figure 131*).

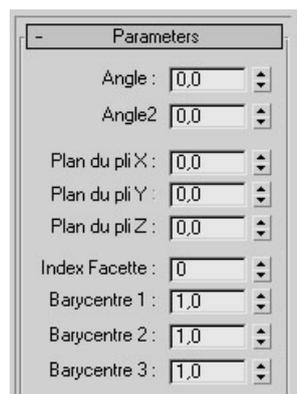


Figure 131. Paramètres de l'opérateur « plier ».

Comme le concepteur ne peut renseigner ces paramètres de manière directe, nous nous sommes inspirés de l'origami pour trouver des moyens de déduire ces paramètres.

Il existe deux principes de localisation d'un pli sur une surface, la définition directe et indirecte.

5.2.1.4.1. Définition directe

Dans une définition directe, le pli est introduit par l'utilisateur suivant deux points sur une arête externe de la géométrie, il peut définir directement l'axe de pliage. Le plan de pliage est déduit par rapport à la normale de la face désignée. L'algorithme permettant d'insérer les paramètres à partir de cette entrée fonctionne de la manière suivante. Il recherche la première facette coplanaire entre les points P1 et P2. Il remplit les champs concernant le barycentre de la boîte de dialogue désignant ainsi un point P commun à la facette et à l'axe P1, P2. Ensuite l'orientation de l'axe de pliage est donnée en fonction de l'orientation de ces deux points. Le plan est enfin défini par la normale de la facette précédemment désignée.

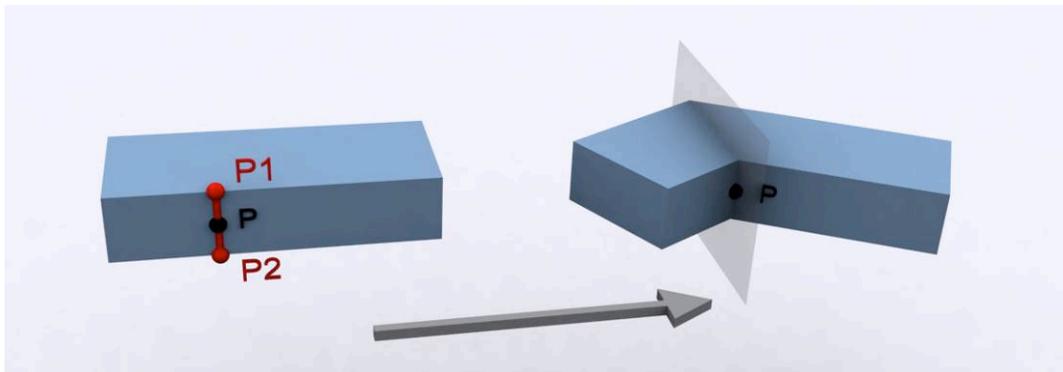


Figure 132. Définition de l'axe de contrôle par deux points.

5.2.1.4.2. Définition indirecte

Dans une définition indirecte, l'utilisateur déduit l'implantation du pli suivant la géométrie de l'objet à modéliser.

Elle peut être implantée :

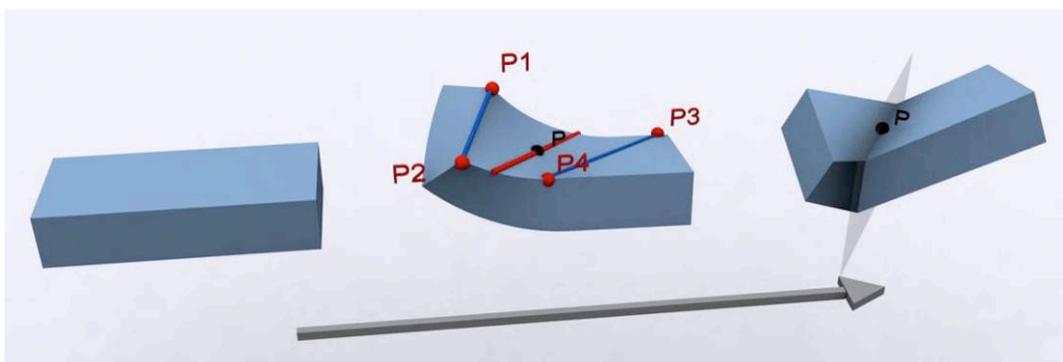


Figure 133. Définition de l'axe de contrôle par deux axes.

- Soit par deux axes définis suivant quatre points P1, P2, P3 et P4. Les points P5 et P6 sont situés respectivement à mi-distance sur le maillage des axes P1, P3 et P2, P4. Une fois les points P5 et P6 retrouvés, l'algorithme réutilise le même principe que pour une définition directe.

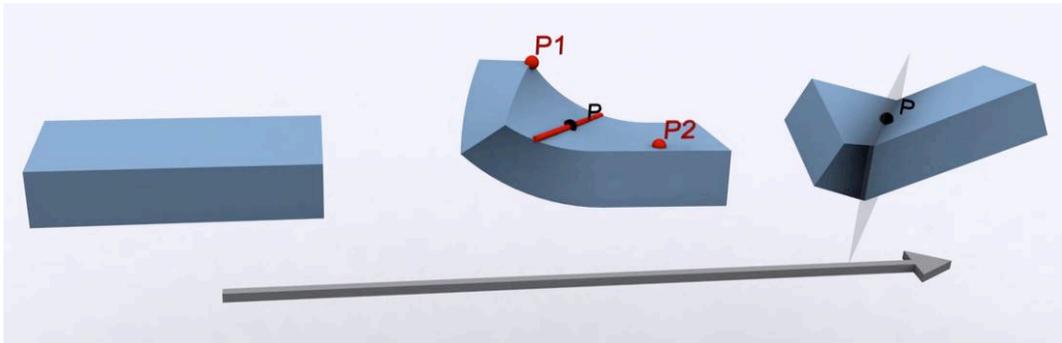


Figure 134. Définition de l'axe de contrôle par deux points d'impact.

- Soit par deux points d'impact sur la géométrie. Le point P est situé à mi-distance de maillage de l'axe P1, P2. L'algorithme recherche alors à quelle facette il appartient et le localise dans la boîte de dialogue grâce à son barycentre. L'orientation de l'axe de pliage est définie perpendiculairement à l'axe P1, P2. Puis le plan de pliage sera obtenu grâce à la normale de la facette précédemment identifiée.

Lorsque le pli est localisé sur la géométrie, l'utilisateur peut varier les paramètres que nous avons énoncés plus haut. Les caractéristiques de l'interface utilisateur de cet opérateur seront présentées dans la partie dédiée à l'interface.

5.2.2. « Plisser »

Nous définissons l'opérateur « Plisser » comme une fonction permettant d'organiser un ensemble de plis sur un maillage par rapport à un plan. L'objectif étant de disposer d'un outil permettant de contrôler l'implantation de plis de manière régulière ou aléatoire sur une géométrie (Figure 135).

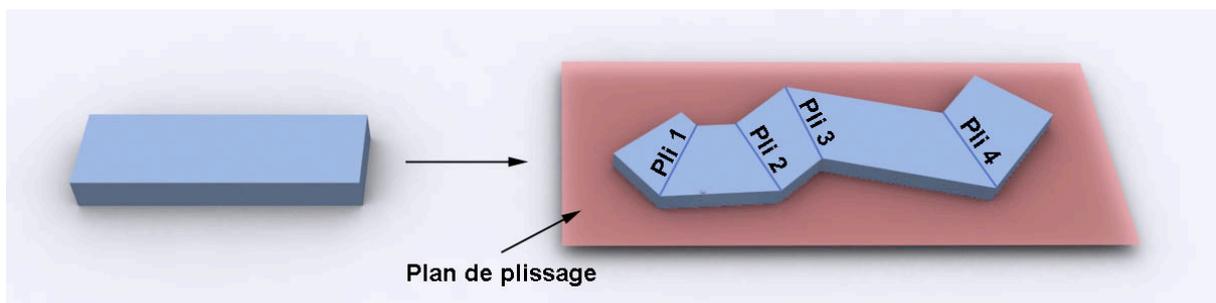


Figure 135. Exemple de l'application de l'opérateur « plisser » sur un maillage avec 4 plis.

Pour mener la spécification de l'opérateur « Plisser », nous commencerons par faire état des fonctions permettant de décrire cette action dans les modeleurs existants. Ensuite nous mènerons un travail d'analyse mettant en évidence une morphologie à base d'actions de plissage dans certains projets d'architecture faisant partie du corpus de l'architecture non-standard, nous nous appuierons principalement sur trois bâtiments : le Musée Juif de Berlin

par Daniel Libeskind et l'École d'Architecture de Cornell par Morphosis. Cette étude permettra d'améliorer notre connaissance de cet opérateur et nous permettra de le spécifier en vue d'une meilleure adaptation au domaine de l'architecture.

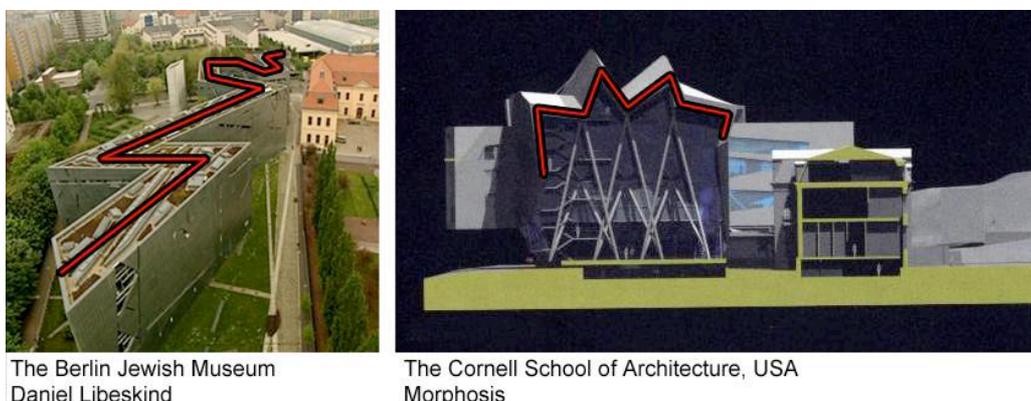


Figure 136. Exemples.

5.2.2.1. Spécification existante

Dans les logiciels classiques orientés géométrie (3DS max, Maya...), la fonction de plissage est approchée par une sinusoïde. Les paramètres définissant cette fonction sont les suivants : la période, le nombre de périodes, les amplitudes des plissages. Ces paramètres ne permettent que la production d'une succession de plis réguliers insatisfaisante pour atteindre les modèles visés.

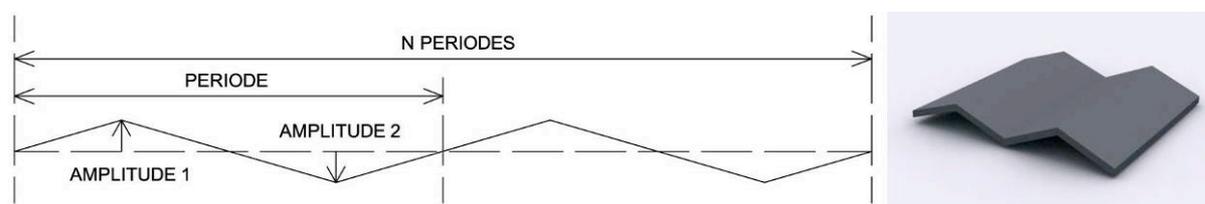


Figure 137. Paramètres d'une fonction de plissage dans un logiciel traditionnel.

5.2.2.2. Etude de cas

Notre analyse passe par un examen approfondi mettant en évidence le lien entre les paramètres qui pourraient être invoqués par les architectes et la formalisation obtenue.

Dans l'extension du musée Juif de Berlin (Figure 138), Daniel Libeskind a voulu formaliser un éclair. Il décline alors le champ sémantique du « zigzag » autant sur le travail en plan qu'en façade. Dans notre analyse, nous nous arrêterons plus particulièrement sur la manière dont a été orchestrée l'opération de plissage dans la représentation en plan.

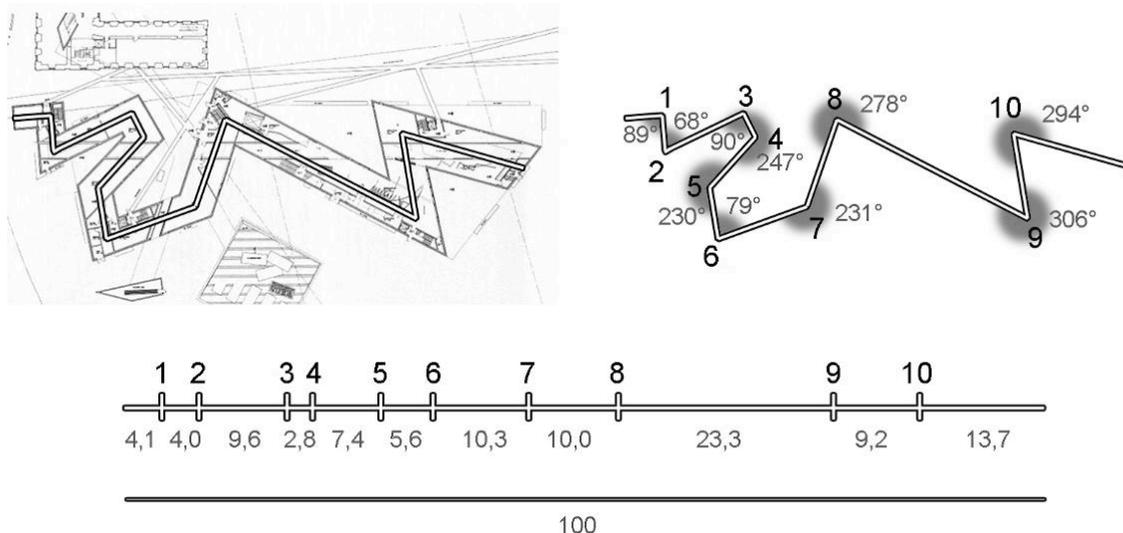


Figure 138. Le musée Juif de Berlin, Daniel Libeskind.

On remarque d'abord que la volumétrie générale du bâtiment n'est pas la résultante d'une opération de plissage régulière. Les plis sont implantés de manière très irrégulière sur toute la géométrie et leurs valeurs angulaires sont très disparates. Le pli numéro 4 qui comporte une valeur de 247° engendre une sorte de « cassure » dans le plissage. Nous constatons aussi que le début et la fin de la géométrie sont pratiquement à la même hauteur, ce qui est induit par des exigences liées au site. Ces contraintes pourraient être exprimées également par des paramètres plus globaux d'encombrement maximal de la géométrie.

Nous terminerons notre analyse avec l'Ecole d'Architecture de l'université de Cornell réalisée par Morphosis. Cet édifice comporte une toiture à redents localisés sur le corps central du bâtiment.

Les plis induisant cette déformation sont pratiquement tous implantés de manière régulière. Le pli numéro 6 est implanté plus proche que les autres de la déformation précédente. Le pli numéro 1 est implanté à une distance plus grande que les autres du bord de la géométrie. Ce cas récurrent dans tous les exemples abordés, sous-entend l'existence de paramètres d'implantation de la déformation sur la géométrie. La valeur des plis est moins régulière et permet à la toiture de former une sorte « d'arc ». Cette formalisation provient du fait que tous les plis antagonistes sont supérieurs aux plis les précédant. Ceci implique l'existence de schémas de distorsions distincts qui engendrent des familles de formes.

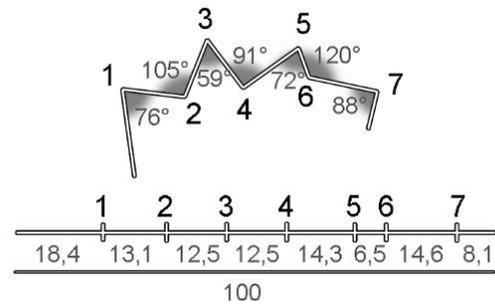
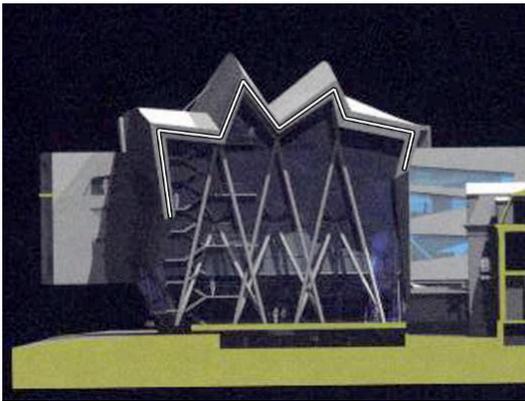


Figure 139. L'Ecole d'Architecture de l'université de Cornell, Morphosis.

5.2.2.3. Principes envisagés

Afin de caractériser l'opérateur « plisser », nous proposons la modélisation de cette action par une succession d'opérations de pliages antagonistes utilisant l'opérateur « plier » spécifié dans la partie précédente. L'opérateur « plisser » $P()$ est composé par un ordonnancement réalisé à l'aide de l'opérateur « plier » $O()$.

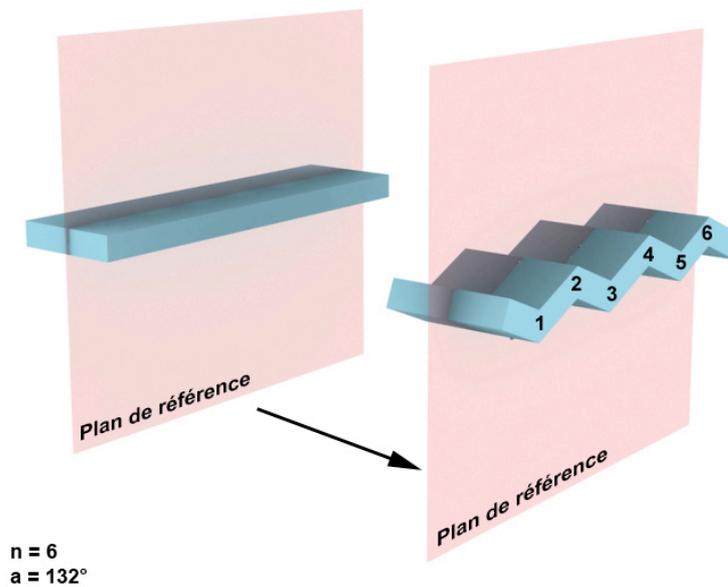


Figure 140. Exemple d'une opération de « plissage » régulière.

Les variables nécessaires à son déploiement sont les suivantes :

- la géométrie à plisser f ,
- le nombre de plis n ,
- les valeurs angulaires de chaque pli a_n ,

- les distances entre chaque pli d_n ,
- un plan p de référence.

On peut exprimer la fonction de plissage comme une composée de plusieurs fonctions de pliage :

$$P(f,p,a,d) = O(O(O(f,p,a_1,d_1),p,a_2,d_2),p,a_3,d_3) \dots$$

L'opérateur « plisser » peut être utilisé pour générer un plissage régulier, dans ce cas l'utilisateur ne spécifie que le nombre de plis (n) et leurs valeurs angulaires (a). Les plis seront distribués de manière régulière le long d'un plan de référence propre à la géométrie de l'objet à plisser.

5.2.2.4. Généralisation et introduction d'irrégularités

Dans l'étude de cas précédente, nous avons constaté qu'il pouvait exister des irrégularités dans l'opération de « plissage ». Nous avons pointé deux types de distorsions à introduire : la première agit sur les valeurs angulaires du pliage et la deuxième agit sur l'implantation des opérations de pliage sur la géométrie. Ces décalages peuvent être liés ou non entre eux afin d'obtenir des variations diverses.

Nous proposons de modéliser suivant trois principes les irrégularités de plissage en utilisant un système génératif, une courbe « Nurbs » ou une « polyligne ».

5.2.2.4.1. Système aléatoire

Ces irrégularités peuvent être contrôlées par les changements de paramètre opérés par l'utilisateur directement sur la géométrie ou par un processus génératif aléatoire, guidé par l'utilisateur en utilisant un écart admissible, ceci permettant la convergence vers une solution acceptable.

L'adjonction d'irrégularités dans une opération de plissage implique la variation de paramètres de chaque pli. Ainsi les fonctions permettant d'obtenir des distorsions de manière aléatoire pourront être implémentées. L'utilisateur invoquera dans un premier temps une opération régulière afin de placer les plis sur la géométrie puis ajustera les variables afin de les ajuster une à une directement sur le modèle. L'utilisation d'un écran tactile peut être une solution ergonomique car ce dispositif permettrait à l'utilisateur d'être directement en interaction avec le modèle 3D.

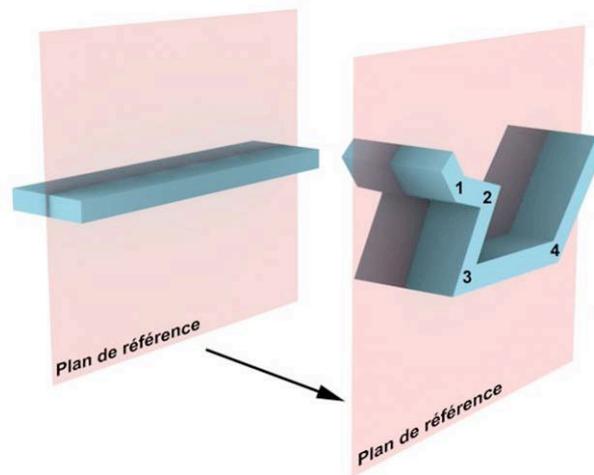


Figure 141. Exemple de la génération aléatoire d'une opération de plissage composée de 4 plis.

Parallèlement à ce principe, nous proposons la mise en place d'un algorithme génératif disposant de deux variables permettant de qualifier le niveau harmonique du plissage. La première variable h , comprise entre 0 et 100, quantifie le niveau harmonique du rythme d'implantation des plis où 100 correspond à un plissage régulier et 0 à un plissage où les plis sont implantés de manière totalement aléatoire. La deuxième variable am , comprise entre 0 et 100, représente la variation de la valeur angulaire des plis. La valeur 0 correspond à un plissage plat où la valeur angulaire des plis est égale à 180° . La valeur 100 donne la valeur maximale au pli en fonction de son implantation et de la taille de l'objet.

Ra et Rd représentent des valeurs aléatoires correspondant aux variables a et d .

$$P(f,p,a,d,am,h) = O(\dots O(O(p,am \cdot Ra_1, h \cdot Rd_1), p, am \cdot Ra_2, h \cdot Rd_1 + h \cdot Rd_2), \dots, p, am \cdot Ra_n, h \cdot Rd_1 + h \cdot Rd_2 + \dots + h \cdot Rd_n)$$

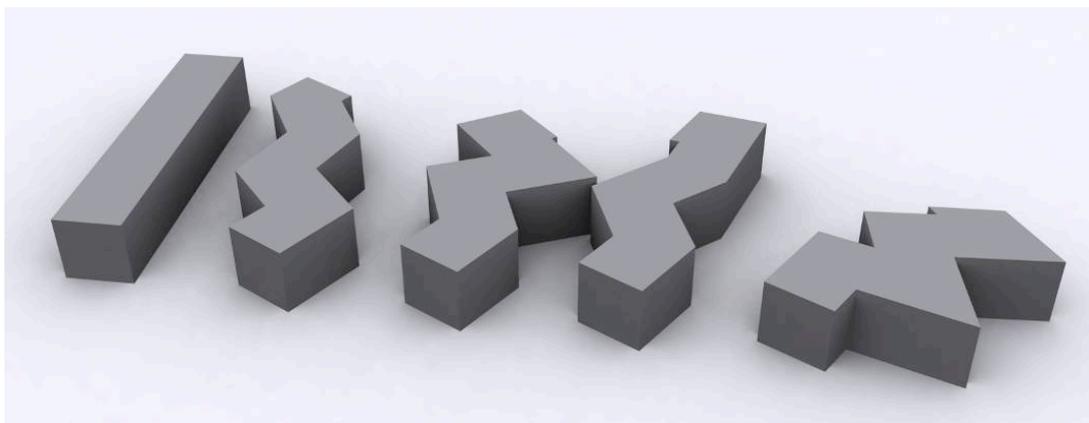


Figure 142. Exemple de variations aléatoires de l'opérateur « plisser ».



Figure 143. Alternatives supplémentaires obtenues par la variation des paramètres de l'opérateur « Plisser ».

En utilisant les spécificités aléatoires de l'opérateur « Plisser », nous avons obtenu des alternatives supplémentaires qui auraient pu être envisagées par l'architecte Christian Kerez pour le « House with one wall » (Figure 80). Nous voulons ainsi montrer que l'utilisation d'une telle démarche permet l'obtention d'une variété de formes toutes issues d'une même idée de départ et par conséquent faisant partie d'une même famille. Il est cependant évident que certaines géométries ne sont pas viables du point de vue fonctionnel.

Le concepteur peut aussi utiliser un système génératif pour appliquer des irrégularités sur la géométrie. Il utilise deux paramètres représentant l'écart maximal toléré pour les deux types de distorsions identifiées (angulaire et d'implantation).

5.2.2.4.2. Maîtrise des irrégularités par une courbe « Nurbs »

Parallèlement à ce système stochastique, nous proposons une amélioration de notre modèle en modifiant la définition du plan de référence. L'architecte dans la recherche de la forme a besoin d'un système permettant la génération de solutions à partir d'un dessin imprécis. Par exemple pour la génération du toit de l'Ecole d'Architecture de Cornell (Figure 139), l'architecte a utilisé une forme plissée suivant une courbe pour couvrir le bâtiment. Pour répondre à ce constat, nous proposons de définir le plan de référence comme une courbe « Nurbs » 2D1/2. Les plis s'implanteraient le long de ce « plan ».

La courbe serait générée par l'utilisateur directement sur la géométrie. Elle permettrait la modélisation d'une forme plissée qui représenterait une forme globale particulière comme un arc. L'utilisateur aura à définir la courbe ainsi que le nombre n de pli à implanter sur la géométrie, le niveau harmonique h du rythme d'implantation des plis ainsi que l'échelle e de la courbe par rapport à la géométrie. Les paramètres e et h sont compris entre 0 et 100. Si e est égal à 0 la courbe sera ramenée à une longueur nulle par rapport à la géométrie, par contre, si e est égal à 100 la longueur de la courbe sera égale à la longueur de la géométrie le long du plan de plissage. La variable h a la même signification que pour le système aléatoire vu plus haut.

Ensuite un algorithme met en place les plis sur la géométrie. L'exemple le plus caractéristique d'application de ce principe est la modélisation du toit de l'Ecole d'Architecture de Cornell, qui définit globalement un arc (Figure 146).

Cet algorithme fonctionne de la manière suivante, il commence par placer les plis sur la géométrie, puis déduit la valeur des plis (Figure 144) en faisant passer la courbe « Nurbs » par le centre du pli précédent ou du début de la géométrie s'il s'agit du premier et le centre du pli suivant ou de la fin de la géométrie s'il s'agit du dernier pli. Il répète l'opération jusqu'à arriver au dernière pli implanté.

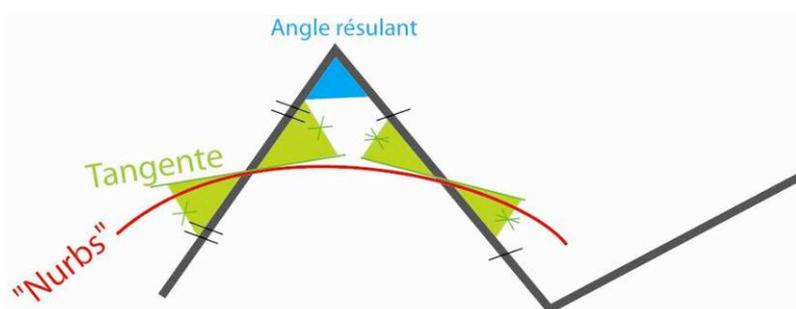


Figure 144. Principe de valuation d'un pli sur une géométrie par rapport à une courbe « Nurbs ».

Les figures suivantes illustrent l'utilisation de ce système pour la modélisation des deux exemples cités plus haut.

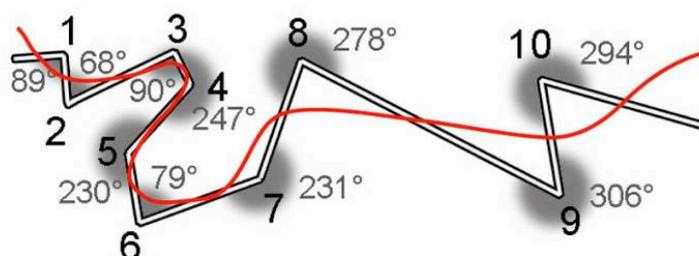


Figure 145. Exemple de courbe génératrice le musée Juif de Berlin, Daniel Libeskind.

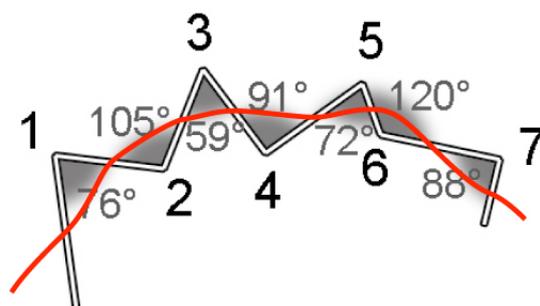


Figure 146. Exemple de courbe génératrice l'Ecole d'Architecture de l'université de Cornell, Morphosis.

5.2.2.4.3. Maîtrise des irrégularités par une « polyligne »

Nous avons aussi constaté qu'une définition directe du plissage par le concepteur manquait à notre modèle. Nous proposons le principe suivant, l'utilisateur commence par définir un plan de plissage, puis dessine une « polyligne » décrivant l'ensemble des plis du plissage (Figure 147).

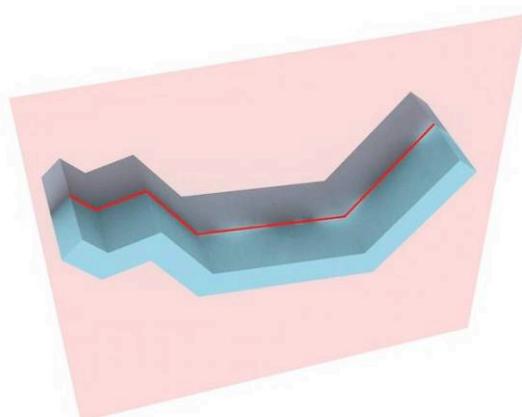


Figure 147. Exemple d'une modélisation par « polyligne ».

Il pourrait par ce biais décrire l'ensemble d'une opération de plissage et en même temps maîtriser la position de la géométrie dans un lieu donné.

Dans une opération de modélisation d'un objet, le concepteur pourrait, à sa convenance, passer d'un modèle à l'autre pour maîtriser tous les aspects et contraintes.

5.2.3. « Froisser »

Le « froissage » d'un objet peut être défini comme un ensemble de plis répartis de manière aléatoire. Nous envisageons deux spécifications de cet opérateur : une qui définit l'opération « froissage » comme un ensemble d'opérations de « plissage » et une autre qui la définit comme un ensemble d'opérations de « pliages » placés de manière aléatoire.

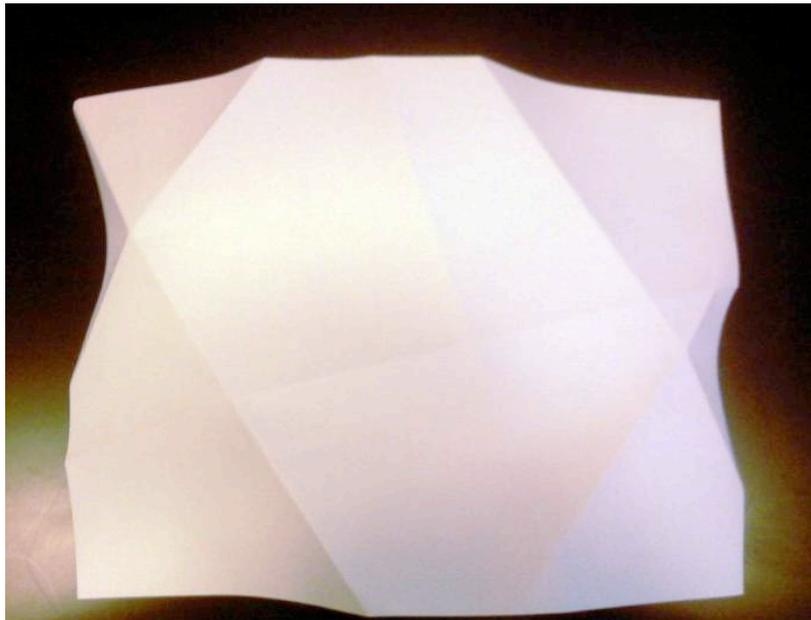


Figure 148. Exemple d'application du type de froissement à modéliser.

Dans notre proposition, nous avons choisi de modéliser l'opérateur « froisser » sous une forme simple, ce qui limite quelque peu l'éventail des formes que nous pourrions générer (Figure 148).

Le premier modèle que nous proposons pour cet opérateur considère cette fonction comme l'application simultanée d'au moins deux opérateurs de « plisser ».

5.2.3.1. Principe numéro 1

L'opérateur « froisser » $F()$ se compose par un ordonnancement réalisé à l'aide de l'opérateur « plisser » $P()$.

Les variables nécessaires à son déploiement sont les suivantes :

- la géométrie à froisser (f),
- le nombre de plissages n ,
- le plan du plissage par rapport au centre de la géométrie p_n ,

$$F(f,p,a,d) = P(\dots P(P(p,a_1,d_1), p,a_2,d_2), \dots, p,a_n,d_n)$$

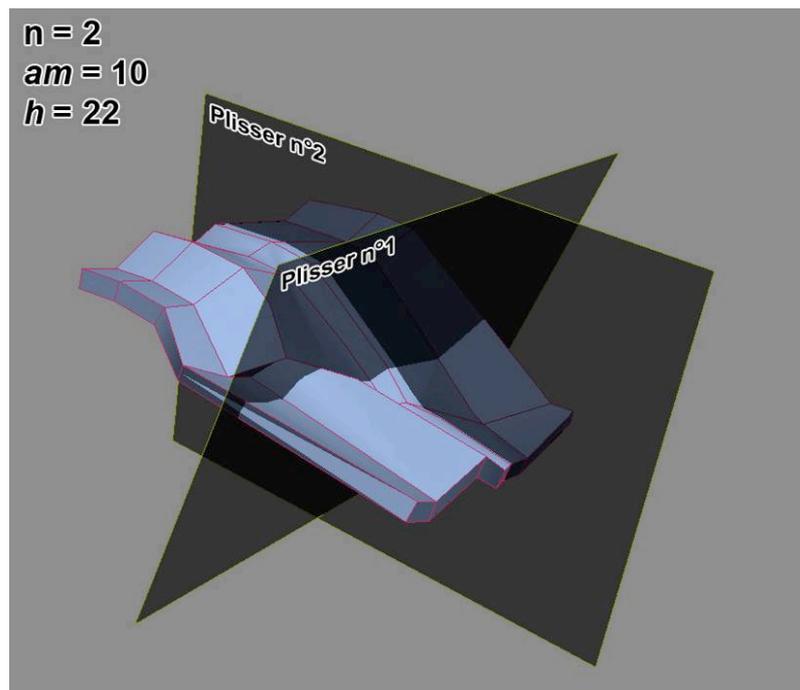


Figure 149. Exemple d'application de l'opérateur « froisser » sur une géométrie avec un système utilisant l'opérateur « plisser ».

L'introduction d'un plissage implique de la part de l'utilisateur soit la déclaration des variables de chaque opérateur « plisser » utilisé, soit l'utilisation d'un algorithme génératif contrôlé.

5.2.3.2. Principe numéro 2

Dans le champ sémantique du pli, nous présentons une deuxième spécification de l'opérateur « froisser ». Cette fois, l'opérateur « froisser » résulte de l'application aléatoire de plusieurs opérateurs « plier ».

L'opérateur « froisser » $F()$ se compose par un ordonnancement réalisé à l'aide de l'opérateur « plier » $O()$.

Les variables nécessaires à son déploiement sont les suivantes :

- la géométrie à froisser (f),
- le nombre de plis n ,
- le plan du froissage correspondant à un plan médian par rapport au centre de la géométrie p_n ,

$$F(f,p,a,d) = O(\dots O(O(p,a_1,d_1), p,a_2,d_2, \dots, p,a_n,d_n)$$

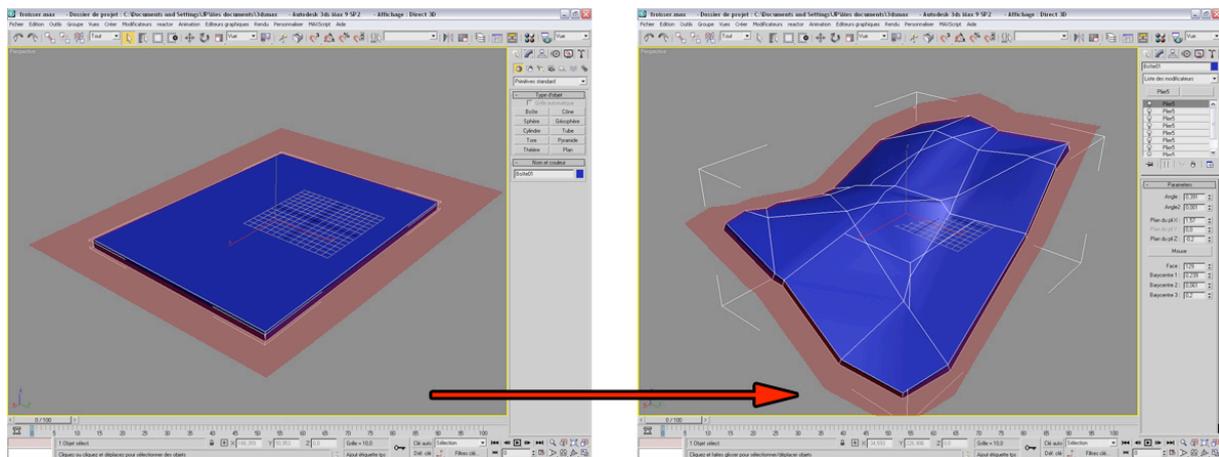


Figure 150. Exemple d'application de l'opérateur « froisser » sur une géométrie avec un système utilisant l'opérateur « plier ».

5.2.3.3. Evaluation

La modélisation d'un « froissage » à partir de l'opérateur « plisser » constitue une approche intéressante, car elle permet d'instaurer une certaine hiérarchie en sous-ensembles de la classe d'opérateurs apparentés au pli.

Comme l'opérateur « plisser » sous-entend l'existence d'une certaine régularité par rapport à un plan de plissage et que celle-ci ne se retrouve pas dans une géométrie froissée, il devient plus pertinent d'utiliser un modèle basé sur l'implantation de plis de manière aléatoire sur une géométrie. Pour ces raisons nous implémenterons le deuxième modèle envisagé.

5.2.3.4. Système génératif aléatoire contrôlé

L'utilisateur va spécifier le nombre de plis à introduire sur la géométrie ainsi que le plan sur lequel le « froissage » s'opère. Il lui faudra ensuite définir une valeur « harmonique » et « d'amplitude ».

La valeur harmonique correspond à la régularité d'implantation des plis sur la géométrie. La valeur d'amplitude correspond à la valeur moyenne des plis implantés. Plus cette valeur est grande plus le « froissage » est accentué, plus cette valeur est petite plus le « froissage » tend vers un plan.

Les particularités morphologiques induites par l'opérateur « froisser » se prêtent particulièrement à ce système génératif.

Du point de vue de la modélisation du principe génératif, nous proposons d'utiliser le même principe que pour l'opérateur « plisser ». Les deux variables permettant de contrôler le système génératif sont h qui qualifie le niveau harmonique des opérations de pliage, et a_m qui représente l'amplitude des plis.

$$F(f,p,a,d,a_m,h) = O(\dots O(O(p,a_1,d_1,a_m,h) ,p,a_2,d_2,a_m,h) , \dots ,p,a_n,d_n,a_m,h)$$

Ce système basé sur un principe aléatoire permet la génération d'une grande quantité de solutions pour un cas donné.

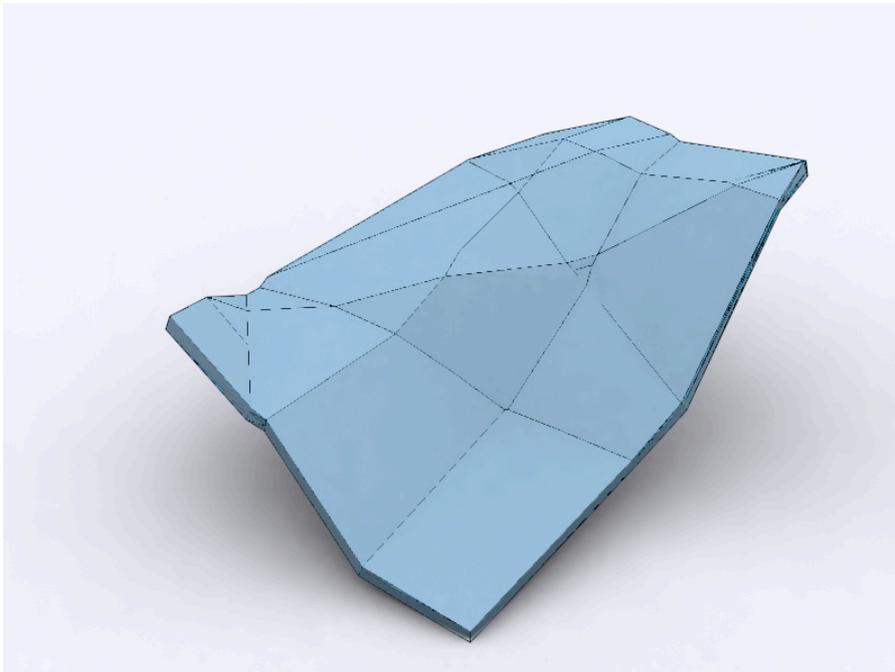


Figure 151. Exemple d'une géométrie froissée par l'opérateur « froisser ».

Après avoir utilisé ce système générateur, l'utilisateur aura la possibilité d'intervenir sur chaque pli, afin de les ajuster au mieux par rapport à la forme voulue.

5.3. L'interface utilisateur

L'architecte en cours de conception effectue des gestes qui ne sont pas toujours définis d'une manière précise. Par exemple, lorsqu'il exécute une opération de pliage, il ne connaît pas forcément les valeurs exactes à donner à l'opérateur, il va plutôt les trouver par tâtonnement. Nous pensons que cette approche est présente, dans une certaine mesure, dans le logiciel SketchUp, ce qui explique l'engouement des architectes pour ce logiciel qui présente un principe simple de modélisation 3D.

Fort de ces constatations, nous jugeons essentiel d'aborder l'aspect de l'interface entre l'utilisateur et l'opérateur implémenté. La mise en place d'une interface laissant une grande place à la métaphore par le geste donnerait à l'architecte un outil par lequel il pourrait s'exprimer. Ce principe permettrait aussi la réduction des interférences de l'activité cognitive du concepteur par le logiciel. (Juchmes & Leclercq, 2004)

En utilisant ce type d'interface, l'utilisateur devrait être capable d'interagir directement sur l'objet considéré en renseignant un minimum de boîtes de dialogue. En effet actuellement les

logiciels comme 3D Studio Max demandent la saisie d'un grand nombre de valeurs qui ne sont pas toujours disponibles en cours de conception (Figure 152).

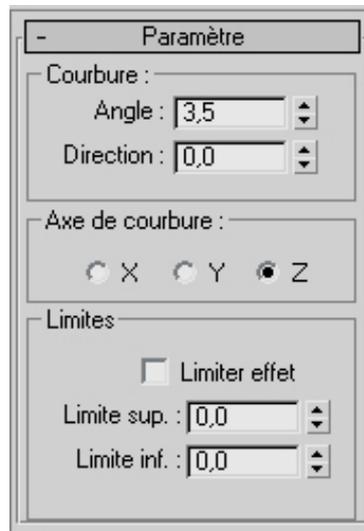


Figure 152. Interface 3dsmax regroupant les paramètres du « modificateur » courbure.

Pour pallier ce problème, nous proposons de placer les paramètres directement sur la géométrie à modifier (Pranovich, Achten, Vries, & Wijk, 2005) et non plus dans une boîte de dialogue disposée à côté de celle-ci. Les valeurs ne seraient pas explicites mais présentes implicitement sur la géométrie et modifiables par des gestes.



Figure 153. Ecran tactile multipoint «Surface » de Microsoft

Nous pourrions améliorer l'ergonomie en utilisant des écrans tactiles multipoints (Do, 2002; Hirschberg, Frühwirth, & Zedlacher, 2007) qui rajouterait une sémantique gestuelle à l'introduction d'opérateurs dans la modélisation d'un projet. Nous mettrions en place un langage simple que l'utilisateur devra intégrer avant de commencer à utiliser ce type d'outils (Figure 154).

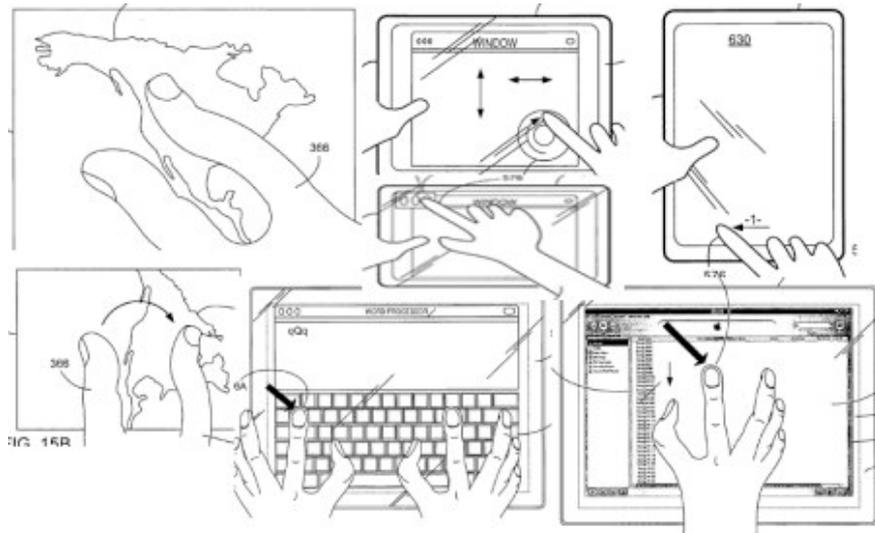


Figure 154. Brevet relatif au système multipoint mis en œuvre dans l'iPhone d'Apple.

Nous allons spécifier les gestes permettant la navigation dans un outil de modélisation 3D, ainsi que les gestes permettant de piloter les opérateurs précédemment définis.

5.3.1. Algorithme de conversion d'un point 2D dans un environnement 3D

Les dispositifs de pointage, écran tactile ou souris, renvoient un point 2D qu'il faut interpréter pour retrouver un point en 3D présent sur la géométrie (Figure 155).

Le kit de développement de 3d Studio Max ne permet pas directement de connaître les coordonnées 3D d'un point cliqué sur une facette d'un objet. Il n'est pas non plus possible de savoir immédiatement si un point appartient à une facette de l'objet. Par conséquent, nous devons mettre en place un interpréteur basé sur un algorithme de conversion entre un point 2D cliqué et un point 3D dans l'espace de l'objet.

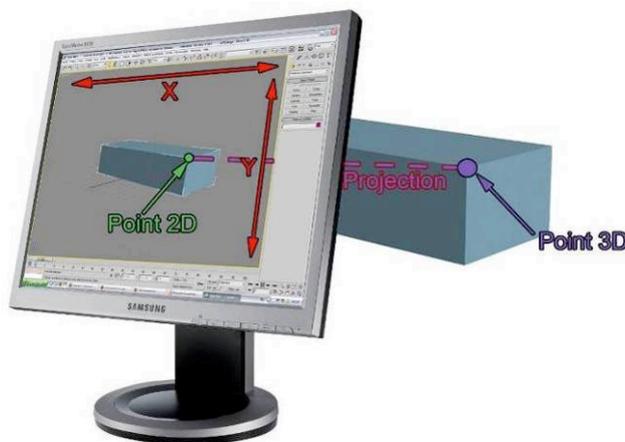


Figure 155. Le dispositif de pointage renvoie un point 2D, d'un point 3D.

Pour connaître le point et la facette cliqués, il faut, pour l'objet sélectionné, calculer le point présent sur le plan de chaque facette composant l'objet. Pour y arriver, le kit de développement permet de retrouver pour chaque point cliqué les trois paramètres :

- le plan de la facette considérée,
- les coordonnées du point de vue,
- les coordonnées sur le plan 0 du point cliqué.

A partir de ces trois paramètres nous pouvons déduire par une commande spécifique les coordonnées sur le plan de la facette du point cliqué par l'utilisateur. A partir de là, deux cas sont à considérer (Figure 156):

- soit le point appartient à la facette et la coordonnée est juste,
- soit le point n'appartient pas à la facette et la coordonnée est fausse.

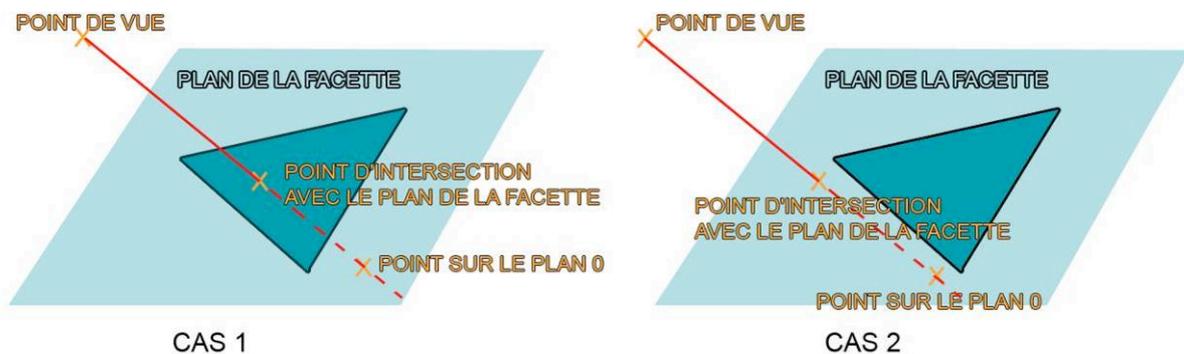


Figure 156. Représentation graphique des paramètres utilisés dans l'algorithme.

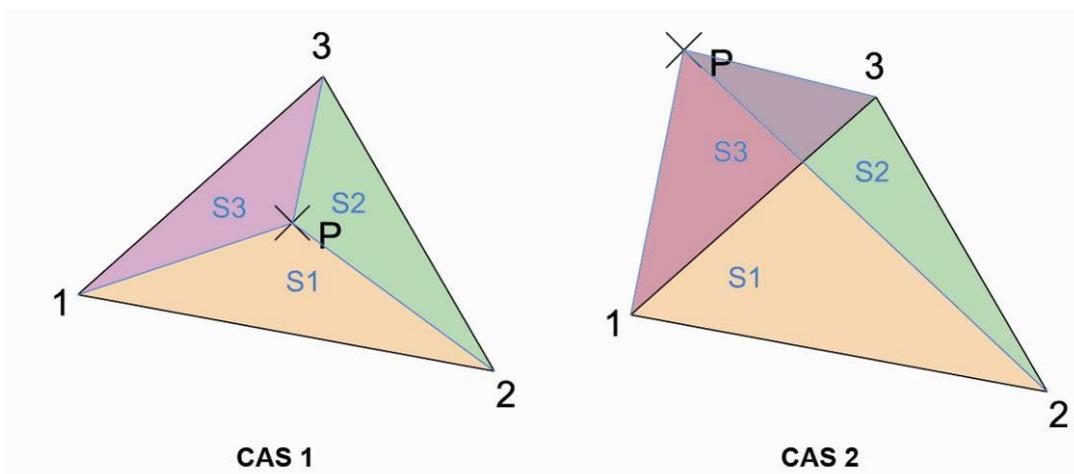


Figure 157. Démonstration graphique de l'algorithme.

L'algorithme que nous avons mis au point pour vérifier si un point appartient effectivement à une facette fonctionne suivant un principe simple. Nous considérons les paramètres suivants :

- les trois points 1,2 et 3 de la facette,
- le Point P cliqué sur le plan de la facette.

Le point P appartient à la facette si et seulement si la somme des surfaces des trois triangles S1, S2 et S3 formés par les trois points de la facette et le point P est égale à la surface de la facette.

Après application de cet algorithme, il est possible sur une géométrie complexe de trouver plusieurs points valides, notamment dans le cas de faces cachées (Figure 158). Dans ce cas, le point cliqué par l'utilisateur correspond au point le plus proche du point de vue.

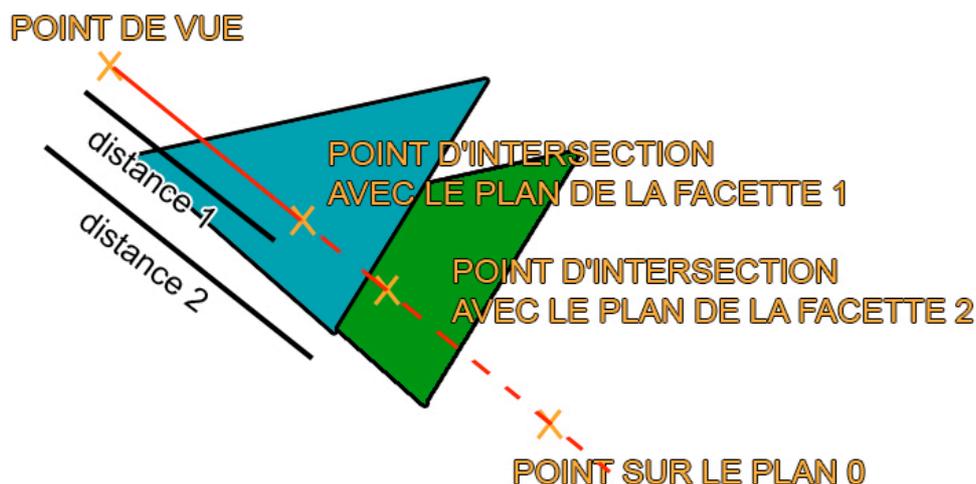


Figure 158. Le point le plus proche du point de vue correspond au point cliqué par l'utilisateur.

Les principes de récupération de points étant mis en place, il nous reste maintenant à définir la gestuelle nécessaire à l'utilisation d'opérateurs morphologiques.

5.3.2. L'interface et sa gestuelle

Les opérations d'interaction avec un objet dans un environnement 3D comportent deux composantes. La première est relative à la navigation autour de l'objet conçu tandis que la deuxième applique des transformations élémentaires à l'objet.

5.3.2.1. La navigation

Nous avons caractérisé trois opérations nécessaires à la navigation :

- Déplacement

- Zoom
- Orbite

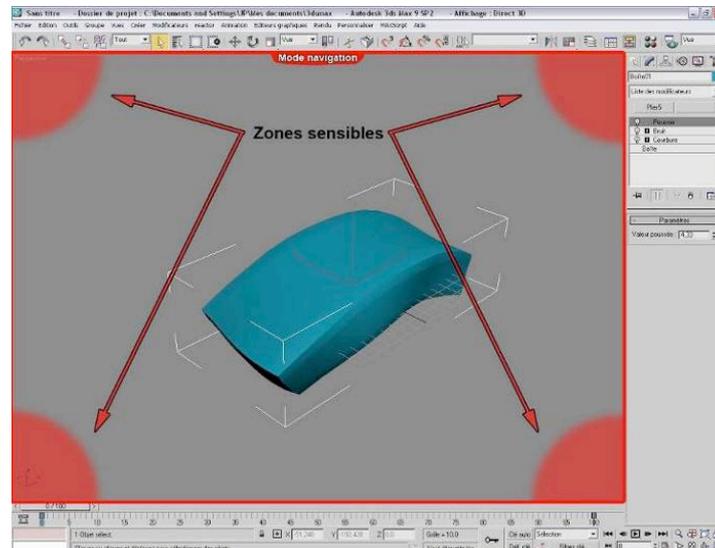


Figure 159. Localisation des zones sensibles permettant de basculer du mode d'édition au mode navigation.

Pour différencier les opérations de navigation des opérations de transformation nous proposons de créer des zones sensibles permettant de basculer entre les deux modes (Figure 159). Ces zones se situeront aux quatre coins de l'écran et lorsque l'une d'elles est activée par l'utilisateur, l'interface passera en mode navigation.

Le passage en mode navigation sera accompagné d'une représentation graphique. Elle prendra la forme d'un liseré rouge localisé autour de la fenêtre de navigation accompagné d'une indication écrite.

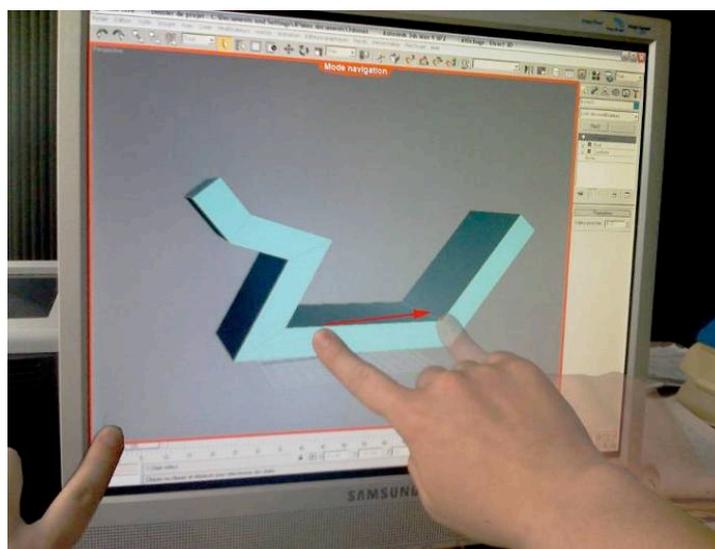


Figure 160. Opération de déplacement du point de vue via une interface tactile.

Le déplacement du point de vue peut se formaliser de façon assez simple avec une interface tactile. Nous proposons de l'implémenter dans notre prototype avec un simple déplacement de points. Ainsi l'utilisateur déplacera son doigt sur l'écran pour déplacer son point de vue (*Figure 160*).

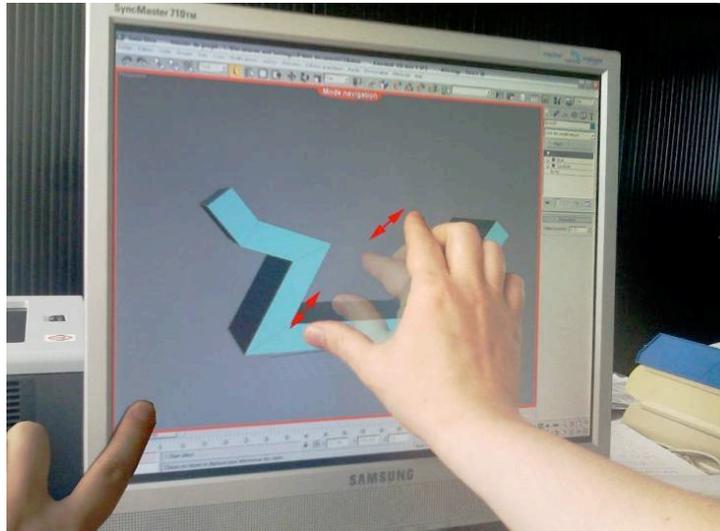


Figure 161. Geste permettant de zoomer.

Concernant la fonction permettant de zoomer, nous proposons de reprendre le geste déjà présent dans l'iPhone d'Apple et dans de nombreux autres produits comme « surface » de Microsoft (*Figure 161*). Ce geste se compose du déplacement de deux doigts donnant l'échelle du zoom à opérer.

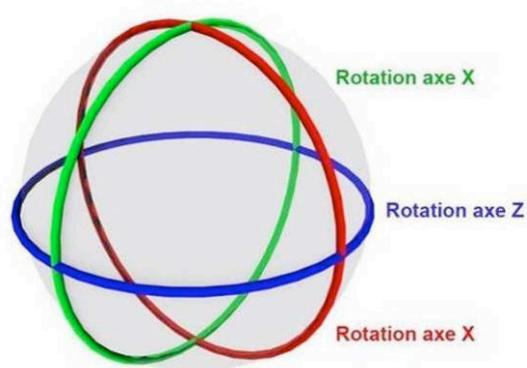


Figure 162. Principe de déplacement suivant une orbite 3D.

L'orbite correspond à une fonction permettant à l'utilisateur de réaliser des rotations du point de vue autour d'un modèle 3D (*Figure 162*). Ces rotations s'opèrent suivant trois axes X, Y, Z.

La transposition de cette fonction en geste strictement 2D pourrait être réalisée par deux points proches qui en se déplaçant opéreraient la rotation du point de vue. Ces deux points

seraient activés par deux doigts d'une main, comme si l'utilisateur saisissait le point de vue pour tourner autour (Figure 163).

5.3.2.2. Les transformations

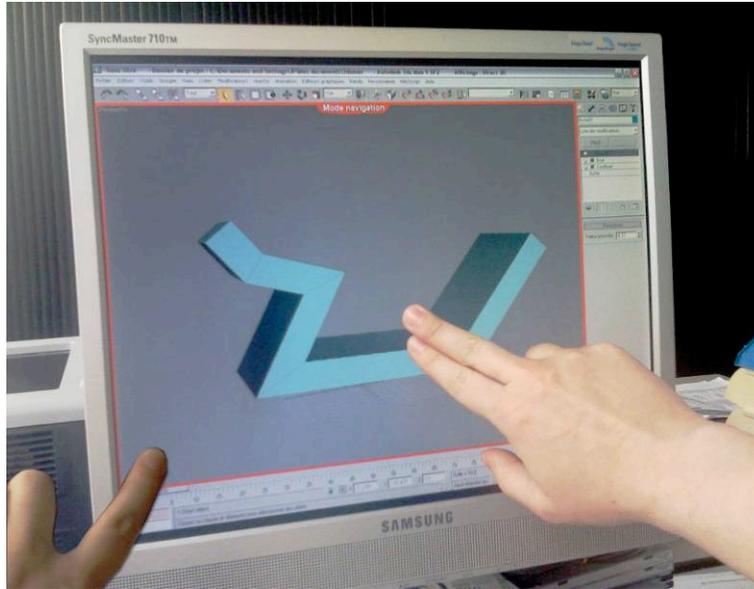


Figure 163. Geste permettant une rotation du point de vue.

Les opérations de transformations élémentaires applicables à l'objet sont au nombre de trois :

- Rotation
- Echelle
- Déplacement implicite

Dans un souci de simplification des gestes, nous proposons d'utiliser des principes identiques pour des notions proches. Par exemple pour les fonctions de rotation et d'échelle, le geste sera semblable à ceux utilisés pour l'orbite et le zoom.

Le déplacement d'un objet dans un espace 3D à partir d'un périphérique de pointage strictement 2D implique l'utilisation d'algorithmes spécifiques. La gestuelle utilisée serait la même que pour le déplacement du point de vue, mais il serait augmenté d'un algorithme permettant la sélection implicite de l'axe selon lequel l'utilisateur souhaite déplacer l'objet. Nous proposons de reprendre des algorithmes faisant références dans ce secteur à ceux de Google SketchUp ou de Sketch (Zelevnik, Herndon, & Hughes, 1996).

5.3.3. Gestuelle spécifique à l'opérateur « Plier »

Nous présentons ici les principes d'introduction des paramètres de l'opérateur « plier » dans un environnement utilisant une interface tactile.

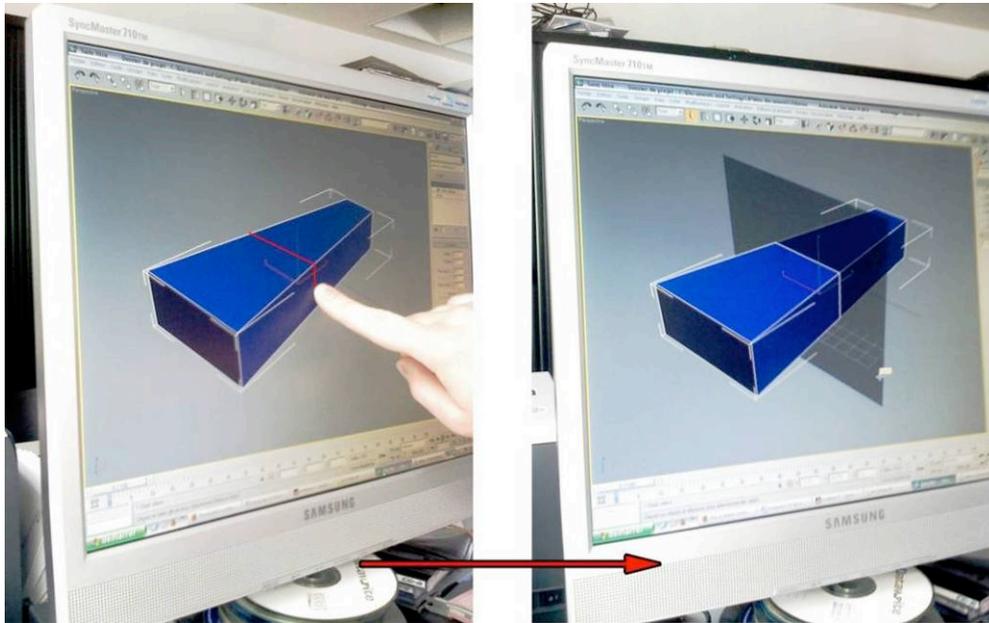


Figure 164. Définition directe du plan de pliage.

Lorsque l'opérateur « plier » est appliqué sur une géométrie par l'utilisateur, un pli disposant d'une valeur angulaire de 180° est implanté par une gestuelle permettant d'invoquer l'un des trois principes d'implantation définie. Il lui appartiendra ensuite de choisir son emplacement exact sur la géométrie.

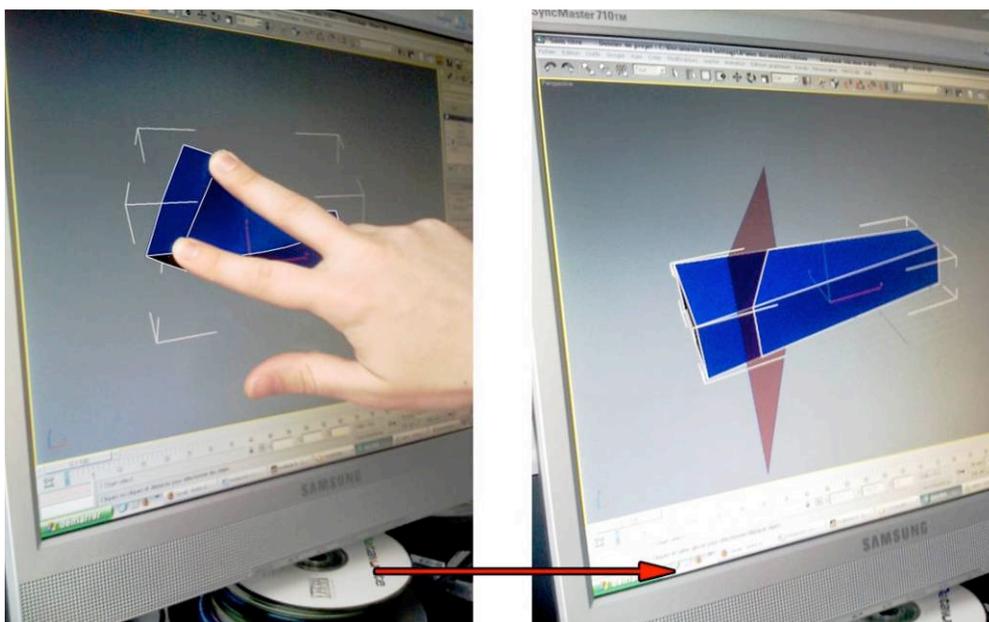


Figure 165. Définition d'un pli avec axes de contrôle.

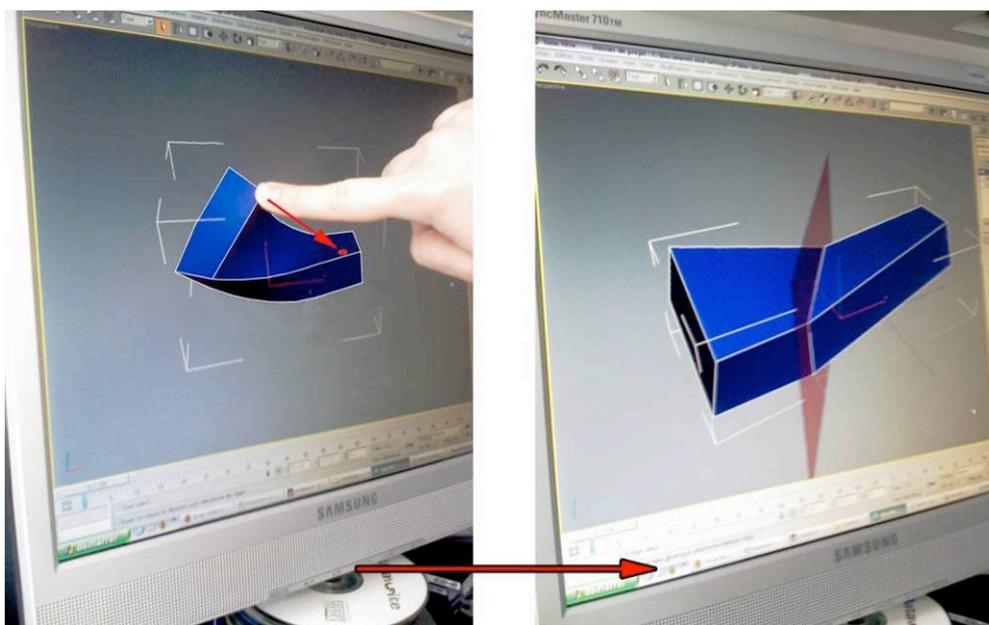


Figure 166. Définition d'un pli avec points d'impact.

Durant la manipulation de l'opérateur « plier », l'architecte va intervenir sur la variation de deux types de paramètres. Il va être appelé à déplacer la localisation du plan de pliage et à quantifier la valeur angulaire du pli à droite et à gauche de ce plan.

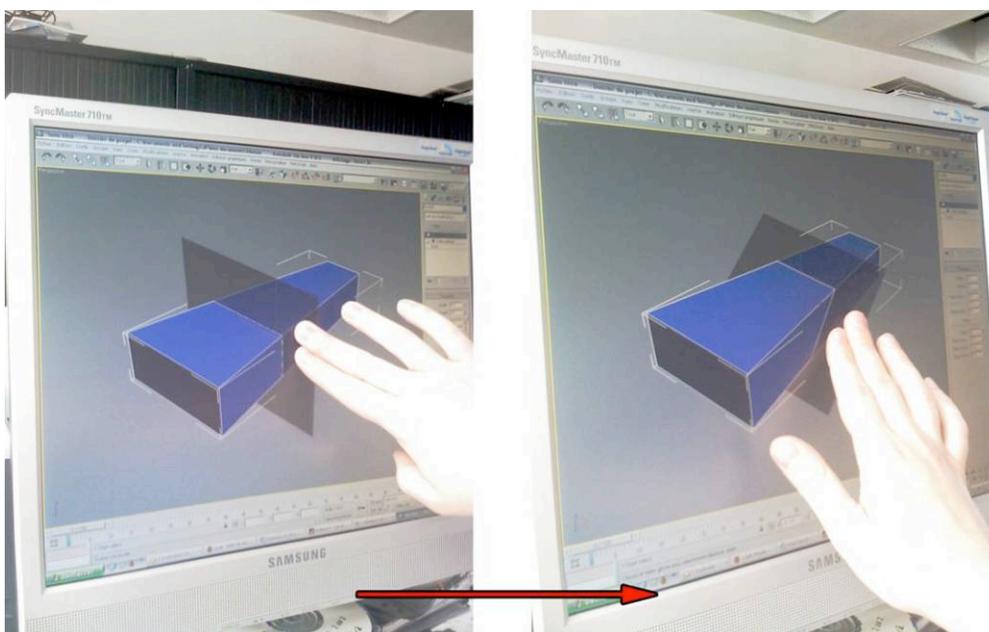


Figure 167. Rotation du plan de pliage par deux points.

Comme spécifié plus haut, le pli est localisé sur la géométrie à plier par un plan de pliage. Nous proposons que l'intervention de l'utilisateur sur ce plan se fasse par des opérations de déplacement et rotation standards (Figure 167). L'utilisateur sélectionne le plan de pliage en le touchant et en utilisant la gestuelle définie pour les opérations de transformations élémentaires.

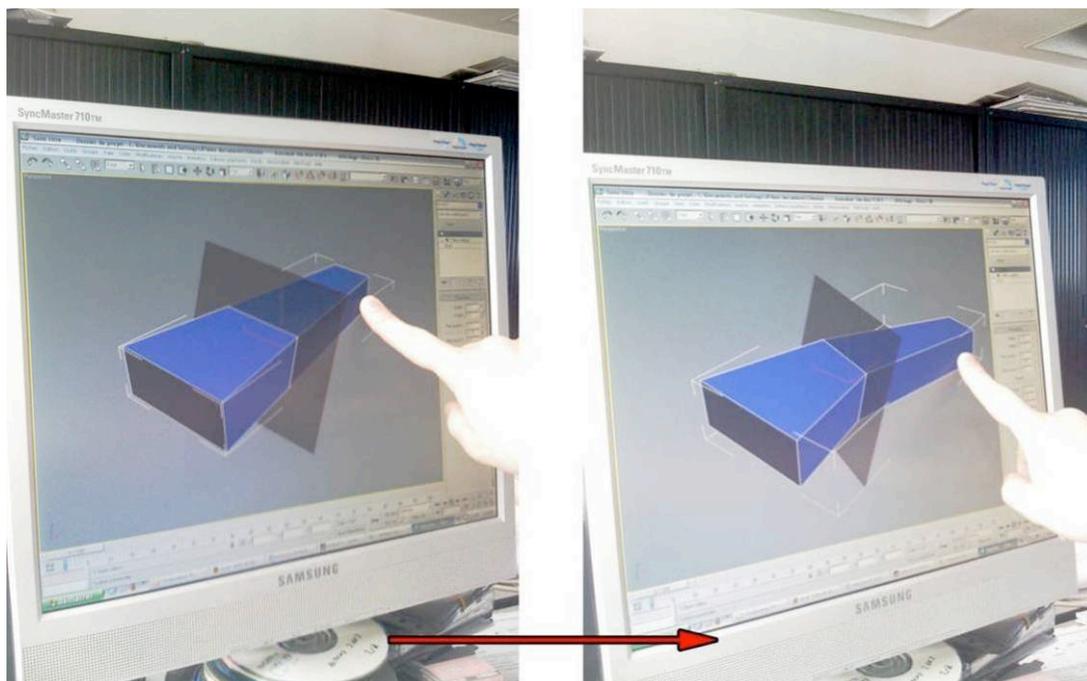


Figure 168. Détermination de la valeur angulaire à droite du plan de pliage du pli.

En touchant la géométrie de l'objet, l'utilisateur va ensuite intervenir sur l'angle du pli, et ainsi pouvoir le faire varier à volonté pour obtenir la forme optimale (Figure 168).

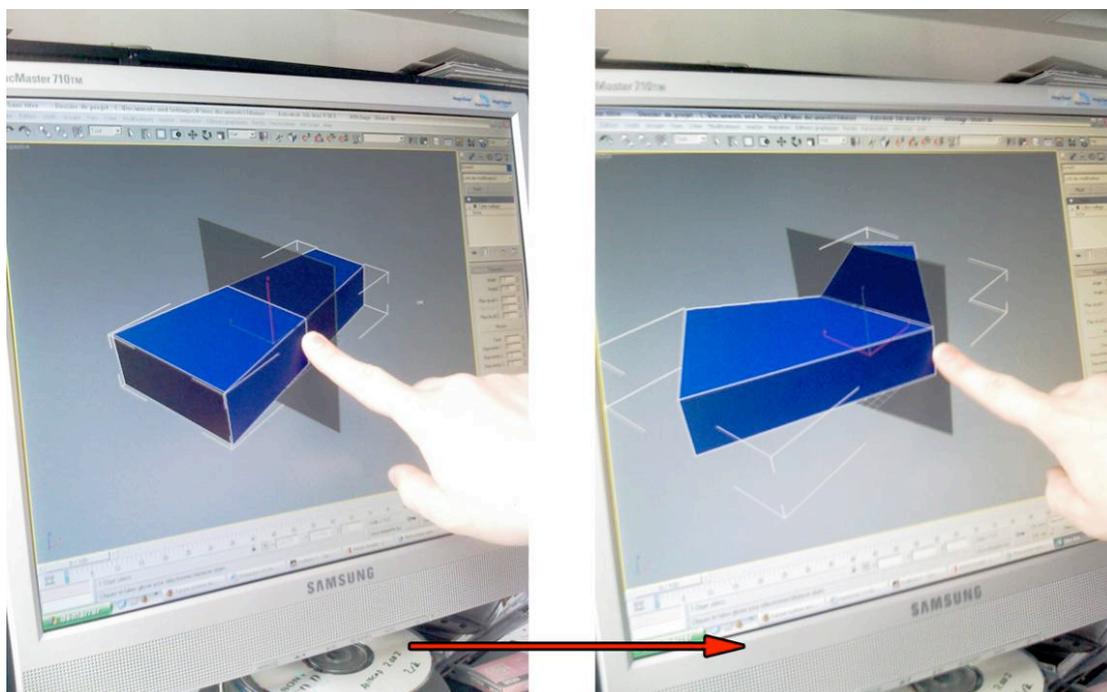


Figure 169. Détermination de la valeur angulaire de pli avec intervention le long du plan de pliage.

Il existe deux valeurs angulaires sur lesquelles il est possible d'opérer. En effet après analyse, il serait gestuellement plus juste d'envisager l'intervention de l'utilisateur, soit de façon distincte sur les valeurs angulaires du pli localisées à gauche et droite de plan de

pliage, soit sur les deux valeurs en même temps. Le but de cette distinction est de pouvoir, le cas échéant, garder une partie de la géométrie fixe et une autre partie mobile.

Pour différencier gestuellement ces deux possibilités, la zone touchée déterminera si une ou les deux valeurs angulaires sont changées. Si la géométrie est touchée à gauche ou à droite du plan de pliage, ce sont ces angles qui seront actifs. Si l'utilisateur intervient directement sur le plan de pliage (Figure 169) les deux valeurs seront affectées.

5.3.4. Gestuelle spécifique à l'opérateur « Plisser »

L'opérateur « plisser » présente plusieurs paramètres distincts. En premier lieu il convient de spécifier le plan de plissage, le procédé sera identique à l'opérateur « plier ». Ensuite l'utilisateur pourra spécifier le nombre de plis dont il a besoin à l'aide de deux boutons disposés sur le plan de plissage (Figure 170).

Dans le cas d'un plissage régulier, un cadenas présent en dessous du paramètre du nombre de plis permettra de lier les valeurs angulaires de plis entre elles.

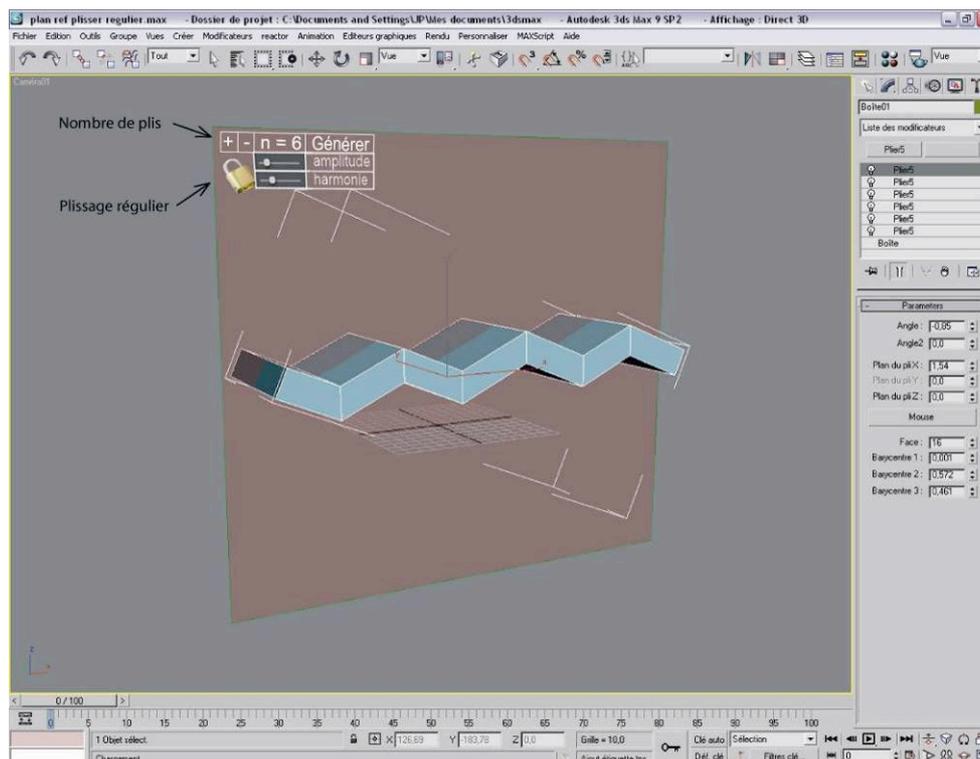


Figure 170. Interface de l'opérateur « plisser ».

L'opérateur « plisser » étant composé par l'application successive d'opérations de pliage, il est possible de faire varier chaque pli indépendamment les uns des autres.

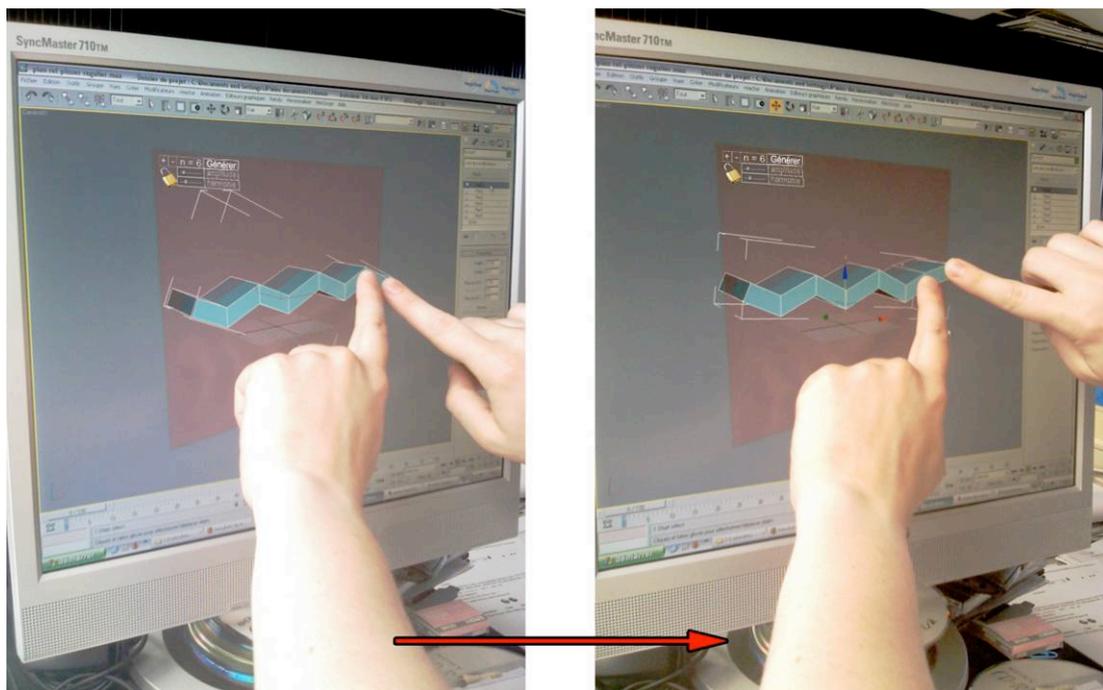


Figure 171. Exemple de variation des plis de l'opérateur « plisser » par l'utilisateur.

La gestuelle reste la même que pour l'opérateur « plier » sauf que l'utilisateur doit désigner par un deuxième point le pli sur lequel il compte travailler (Figure 171).

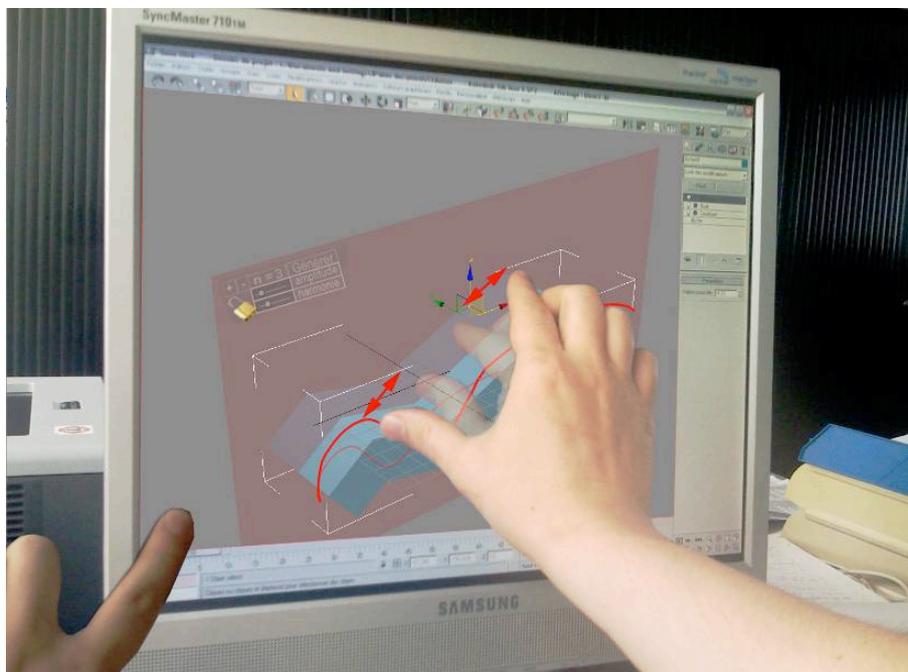


Figure 172. Mise à l'échelle d'une courbe « Nurbs » grâce au geste « zoomer ».

Il est aussi possible d'utiliser le système génératif avec le bouton « Générer », soit d'une manière aléatoire, en insérant les valeurs des paramètres d'amplitude et d'harmonie à l'aide des réglettes qui se situent à côté du cadenas, soit d'une manière contrôlée avec une courbe « Nurbs » dessinée par l'utilisateur. Dans ce cas, l'utilisateur peut définir l'échelle de la

courbe par rapport à la géométrie grâce au geste « zoomer » réalisé sur le plan de pliage (Figure 172).

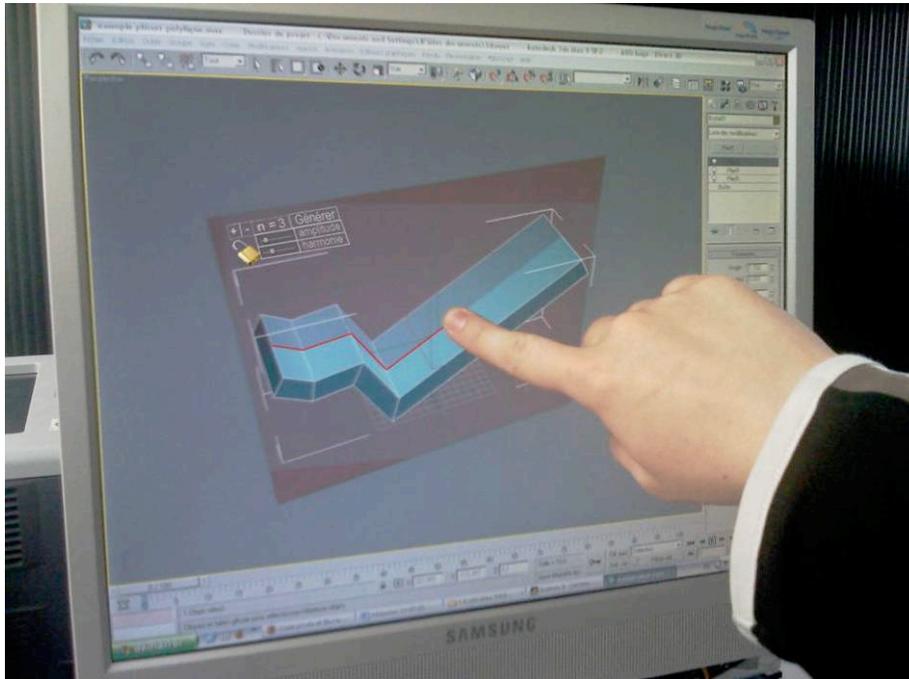


Figure 173. Exemple d'une modélisation par « polyligne ».

Lors de la spécification de l'opérateur, nous avons précisé qu'il était possible de paramétrer le plissage graphiquement à l'aide d'une « polyligne ». L'utilisateur dessine directement (Hirschberg, Frühwirth, & Zedlacher, 2007) sur le plan de plissage les arcs correspondant aux plis de l'opération (Figure 173). Il pourra par la suite opérer des modifications comme sur la Figure 171.

5.3.5. Gestuelle spécifique à l'opérateur « Froisser »

L'opérateur « froisser » fonctionne suivant l'application successive de l'opérateur « plier ». Nous proposons le contrôle de ses variables par la mise en place d'une palette les regroupant. Elle sera placée au plus près de la géométrie modifiée et pourra être déplacée par l'utilisateur.

Elle permet le contrôle du nombre de plis ainsi que le système génératif spécifié plus haut.

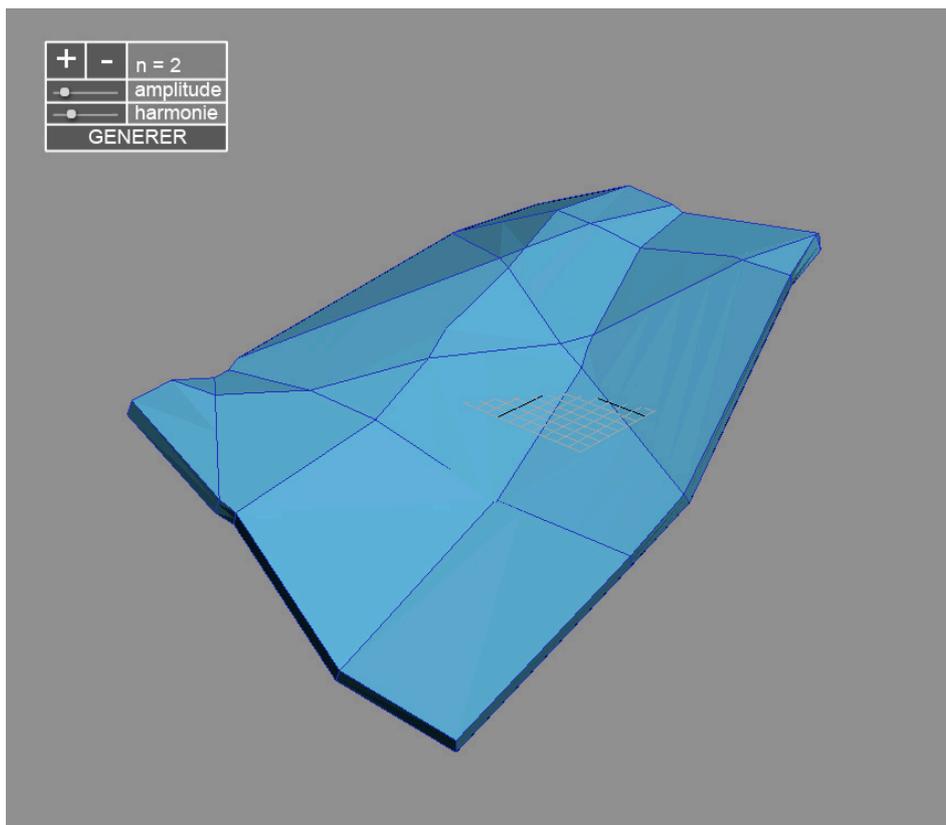


Figure 174. Interface de l'opérateur « froisser ».

Une fois l'opérateur appliqué, l'utilisateur sera dans la possibilité d'ajuster une à une toutes les opérations de pliage. Il en sélectionne une en « double cliquant dessus » puis change ses valeurs puis « tapote » à côté de la géométrie pour quitter les paramètres du pli.

5.4. Application de ces opérateurs à la modélisation géométrique d'un objet architectural

Dans cette partie, nous cherchons à valider la pertinence de notre proposition de modélisation des opérateurs morphologiques « plier », « plisser » et « froisser » dans une démarche de conception architecturale. Nous détaillons ici les phases préliminaires de trois projets différents où les prototypes de ces opérateurs ont été utilisés.

La diversité des réponses formelles et l'ergonomie des opérateurs morphologiques face à une modélisation tridimensionnelle classique sont les critères retenus pour valider la pertinence de notre démarche.

5.4.1. Conception d'un Musée à Louvain-la-Neuve à partir de l'opérateur morphologique « plier », PFE de Gilles Pignon

Le PFE de Gilles Pignon avait comme sujet d'étude la conception d'un musée à Louvain-la-Neuve en Belgique. L'idée directrice suivie par l'étudiant tout au long du projet était de connecter le musée à la ville par la superposition de deux branches pliées (Figure 177).

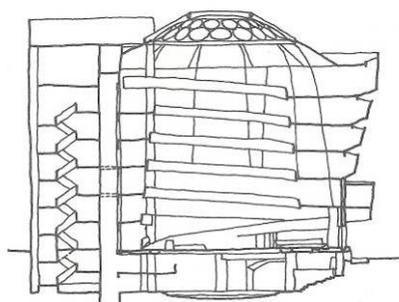


Figure 175. Coupe montrant le système de circulation du Musée Guggenheim de New-York (Raynaud, 1998).

Ces branches se situent dans le prolongement des rues existantes et leur croisement constitue un prétexte pour réaliser la circulation verticale du musée (Figure 176). Cette circulation reprend le principe circulatoire hélicoïdal du musée de Guggenheim de Frank Lloyd Wright (Figure 175).

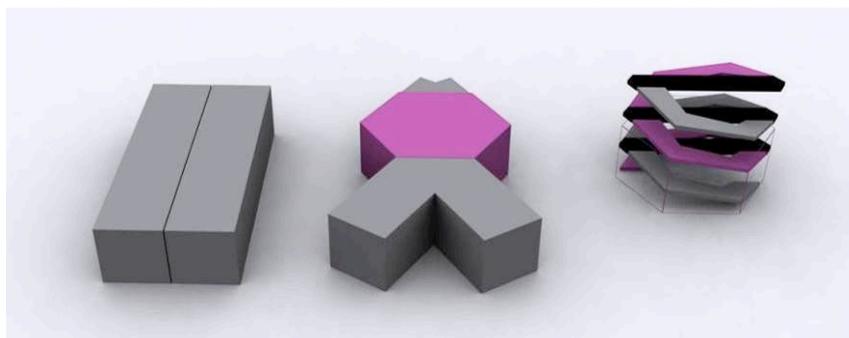


Figure 176. Intentions du projet.

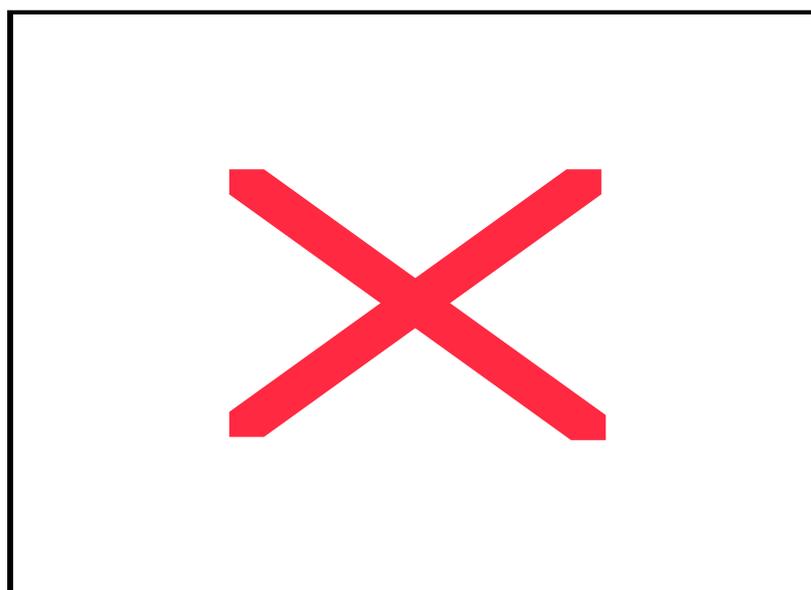


Figure 177. Plan masse montrant l'impact du musée sur la ville.

Les plis nécessaires à l'élaboration formelle du projet ont été réalisés par l'opérateur morphologique « plier » implémenté. L'utilisation de cet outil a permis au concepteur l'obtention d'une variété de solutions grâce à la variation des paramètres de l'opérateur (Figure 178).

L'étudiant a pu par ce principe affiner sa réponse en tenant compte principalement de trois contraintes :

- Structurelles,
- Fonctionnelles,
- Esthétiques.

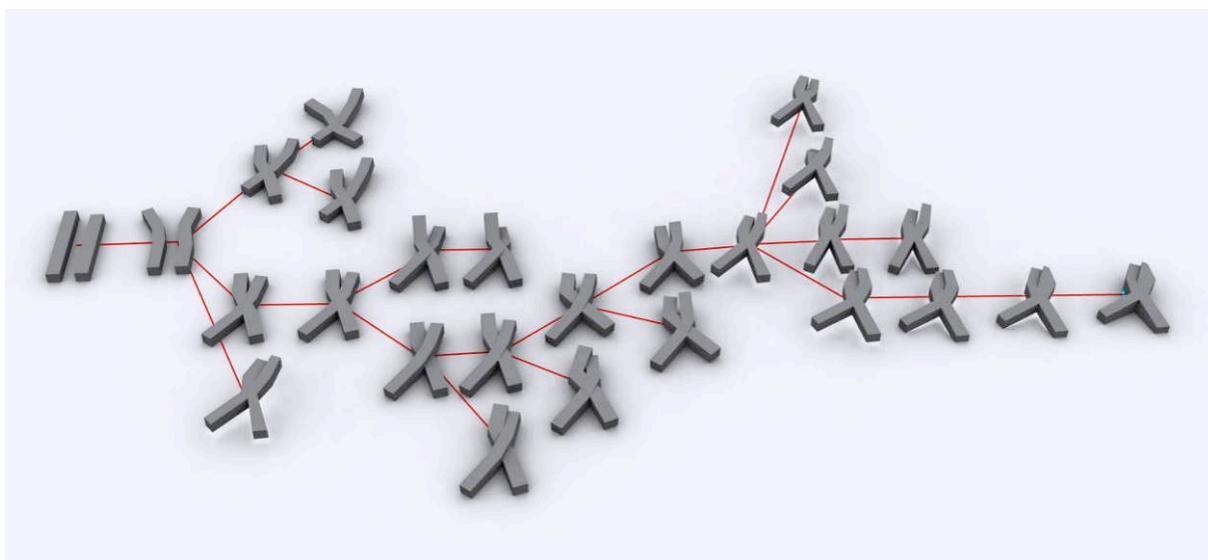


Figure 178. Ensemble des alternatives envisagées par le concepteur.

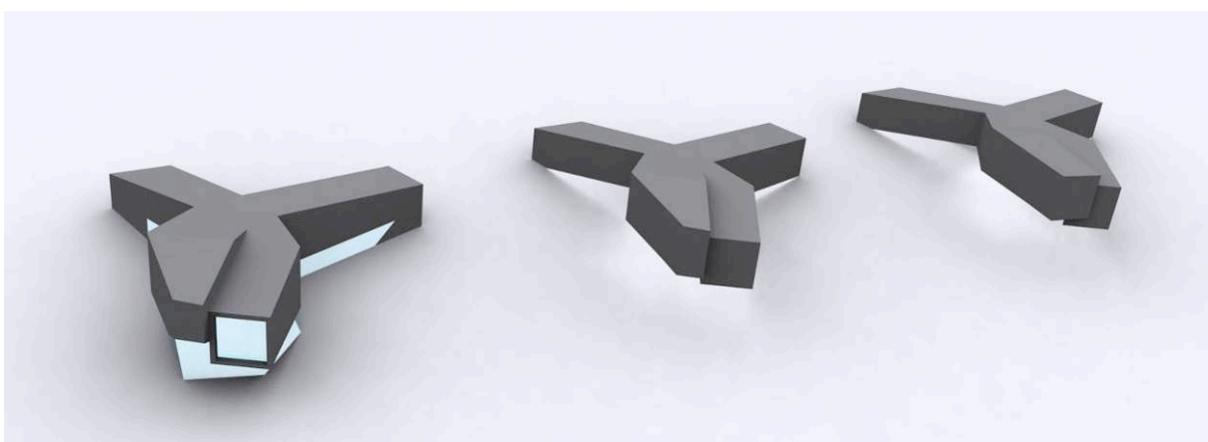


Figure 179. Dernières variations du projet.

Nous pouvons constater dans la Figure 178 le nombre élevé de solutions envisagées. Grâce à cet outil, le champ d'investigation couvert par le concepteur a pu être plus grand et

varié qu'avec une recherche classique à base de croquis ou de modélisation tridimensionnelle non paramétrique.

Suite à la génération de l'enveloppe externe du projet, l'étudiant a continué la formalisation du projet en changeant d'échelle. Il a mis en place les ouvertures, les fonctions du bâtiment... (Figure 180) De ce point de vue, les opérateurs trouvent leurs limites parce qu'ils agissent uniquement sur l'enveloppe générale. C'est pourquoi, ils sont destinés uniquement à une phase de recherche formelle au début de l'activité de conception.



Figure 180. Vue en perspective du projet.

5.4.2. Conception d'une maison d'habitation à Altkirch à partir de l'opérateur morphologique « plisser » (BAAM Architecture)

Les contraintes données à l'agence BAAM Architecture pour la conception de la résidence principale de M et Mme Doll sont principalement liées à l'emplacement du projet sur un terrain en forte pente sur les hauteurs d'Altkirch (Haut-Rhin). Les clients ont formulé le souhait de disposer d'un bâtiment ayant une identité formelle forte.

L'architecte Johann Froeliger a basé son étude de la forme du projet sur une recherche permettant de mettre à profit la morphologie du terrain. Son premier croquis (figure 181), devenu par la suite l'idée directrice du projet, fait état de deux plis implantés sur une « boîte ». La manière dont ces deux plis sont localisés sur la forme initiale, ainsi que l'horizontalité des extrémités, nécessaire à l'habitabilité d'un espace, ont décidé l'architecte à utiliser l'opérateur « plisser » sous sa forme régulière.



Figure 181. Croquis initial énonçant les principes formels de la Maison Doll.

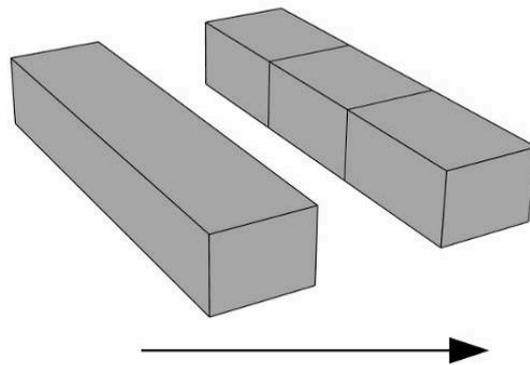


Figure 182. Implantation de l'opérateur « plisser » sur une « boîte ».

La morphogénèse du projet a commencé par la mise en place d'une « boîte » sur laquelle l'architecte a appliqué l'opérateur « plisser » disposant de deux plis (Figure 182).

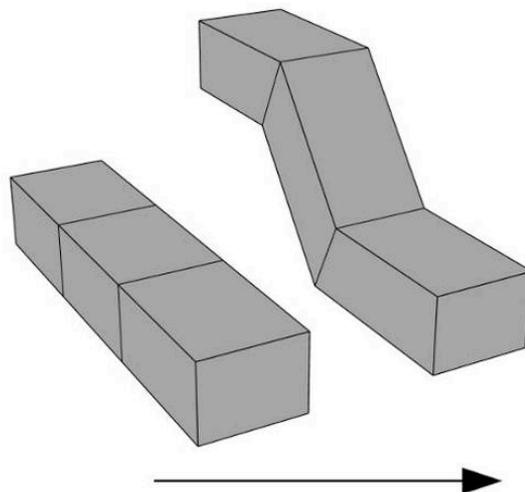


Figure 183. Variation de l'angle du plissage.

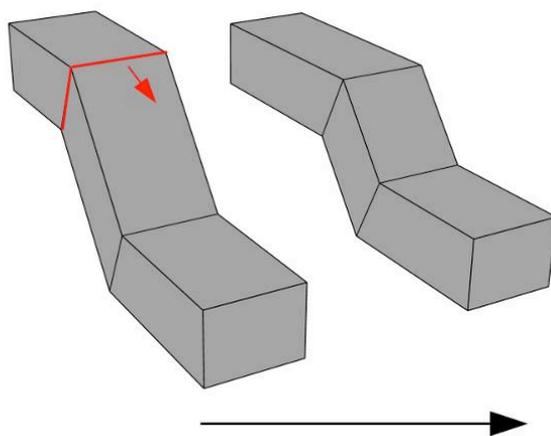


Figure 184. Déplacement d'un pli du plissage.

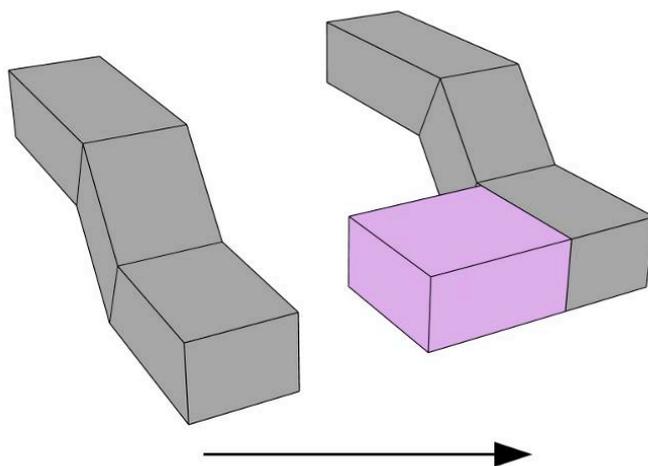


Figure 185. Ajustement de la géométrie général par ajout d'une « boîte ».

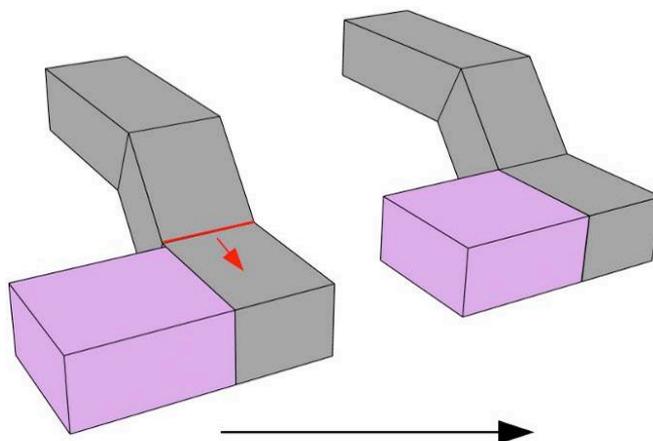


Figure 186. Alignement d'un pli du plissage sur la « boîte » ajoutée.

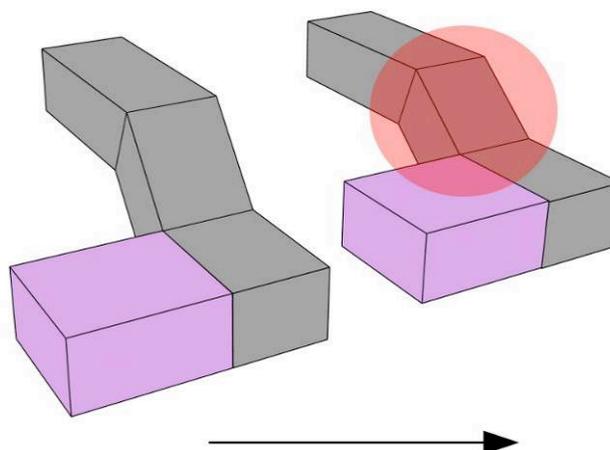


Figure 187. Variation de l'angle du plissage en fonction de la pente du terrain.

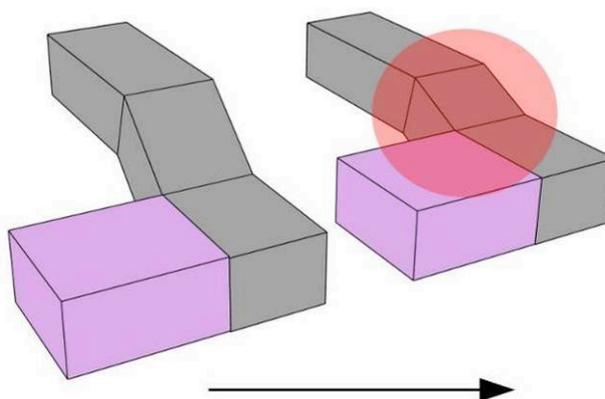


Figure 188. Variation de l'angle du plissage en fonction de la pente de l'escalier de la maison.

Le concepteur a ensuite réalisé de multiples opérations en faisant varier la valeur de l'angle (Figure 183, Figure 187, Figure 188) du plissage, les emplacements des plis sur la géométrie (Figure 184, Figure 186) et a modifié la géométrie initiale (Figure 185).

Les motivations à l'origine de ces variations sont essentiellement d'ordre technique. Elles sont liées à la déclivité du terrain et à la pente de l'escalier mis en place pour la liaison de deux volumes résultant du plissage. Des contraintes programmatiques rentrent aussi en jeu et ont poussé le concepteur à augmenter la taille du bâtiment en y ajoutant une autre « boîte » (Figure 185).

L'utilisation de l'opérateur morphologique « plisser » a été d'une grande aide pour l'architecte durant la période de morphogénèse. Il lui a permis d'ajuster au plus juste la forme du projet à l'idée initiale et aux contraintes énoncées par le client et par la topologie du terrain.

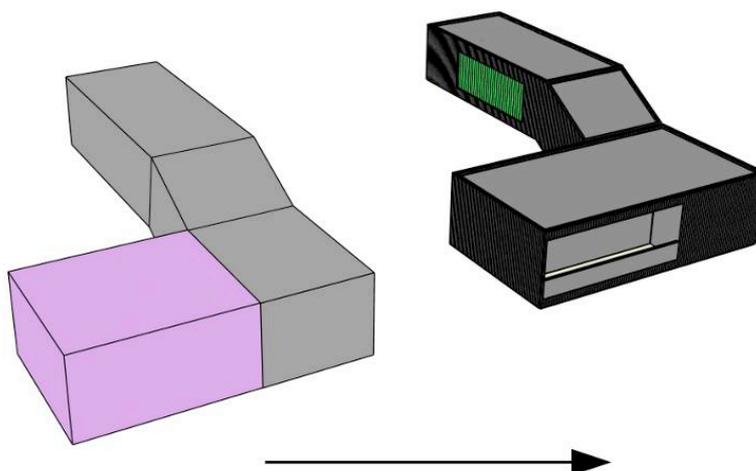


Figure 189. Augmentation du niveau de détails en vue de construire la maison.

Suite au processus de définition de la forme générale du projet, l'architecte a changé d'échelle et a augmenté le niveau de détail en incorporant les ouvertures et la distribution intérieure (Figure 189, voir Annexe page 162).

Le système constructif mis en œuvre a été choisi au regard des contraintes d'accès au site. Le terrain ne permettant pas l'accès direct aux camions, l'architecte a choisi de mettre en œuvre une structure en métal (Figure 190). Les pièces ont ainsi été réalisées en usine puis acheminées et assemblées sur place à l'aide d'une grue. Ce système constructif a permis la réalisation de la forme envisagée par l'architecte tout en limitant les coûts.



Figure 190. Maison Doll en cours de réalisation.

L'utilisation de l'opérateur « plisser » a aidé l'architecte à une formalisation rapide et paramétrique de l'idée principale du projet. Elle a permis l'évaluation et la formalisation de plusieurs alternatives du projet.

5.4.3. Conception de la toiture pour le concours du musée de Louvain-la-Neuve à partir de l'opérateur « froisser » (BAAM Architecture)

L'agence d'architecture BAAM a participé fin 2007 au concours d'architecture pour la réalisation d'un nouveau musée à Louvain-la-Neuve en Belgique. Au vu du programme et de la place disponible sur le terrain, les architectes ont pris la décision de réaliser un bâtiment compact présent sur l'ensemble de la surface constructible de la parcelle du concours.

Ce principe a permis une première formalisation du projet sous forme d'une surface extrudée (Figure 191) pouvant contenir l'ensemble du programme.

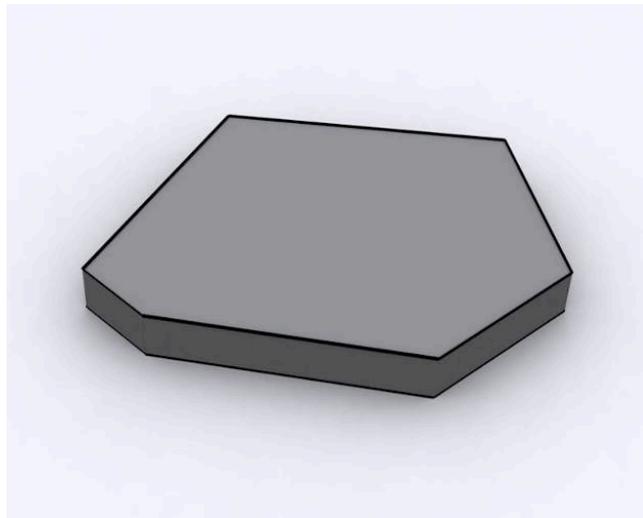


Figure 191. *Forme initiale représentant le volume maximal pouvant être occupé par le projet.*

Les architectes se sont ensuite focalisés sur la toiture. Leur volonté était de rendre la 5^{ème} façade accessible et de la végétaliser. Au niveau conceptuel ils voulaient donner à cette toiture une forme de montagne.

Les architectes ont imaginé utiliser le système génératif de l'opérateur « froisser » pour obtenir différentes alternatives morphologiques du projet. Ils ont ensuite appliqué l'opérateur sur la surface supérieure de la géométrie en déclarant les variables suivantes :

- Nombre de plis 3,
- Amplitude 2m,
- Harmonie 50%.

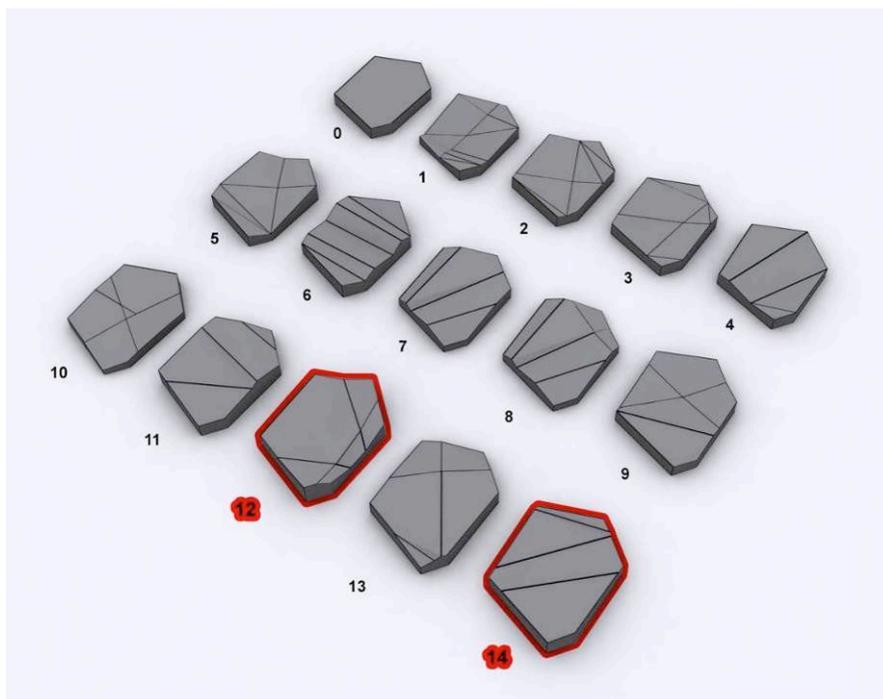


Figure 192. Variations de la forme de la toiture par l'opérateur « Froisser » (vue de gauche).

Le système génératif a permis la création d'une multitude de formes plus ou moins réalisables. Les concepteurs ont décidé d'en retenir quatorze illustrés ci-dessous. Pour la suite du travail de recherche sur la forme, les architectes ont continué leur étude sur deux formes qui leur paraissaient les plus adaptées : la douze et la quatorze. Les critères choisis par les architectes sont d'ordre esthétique et fonctionnel.

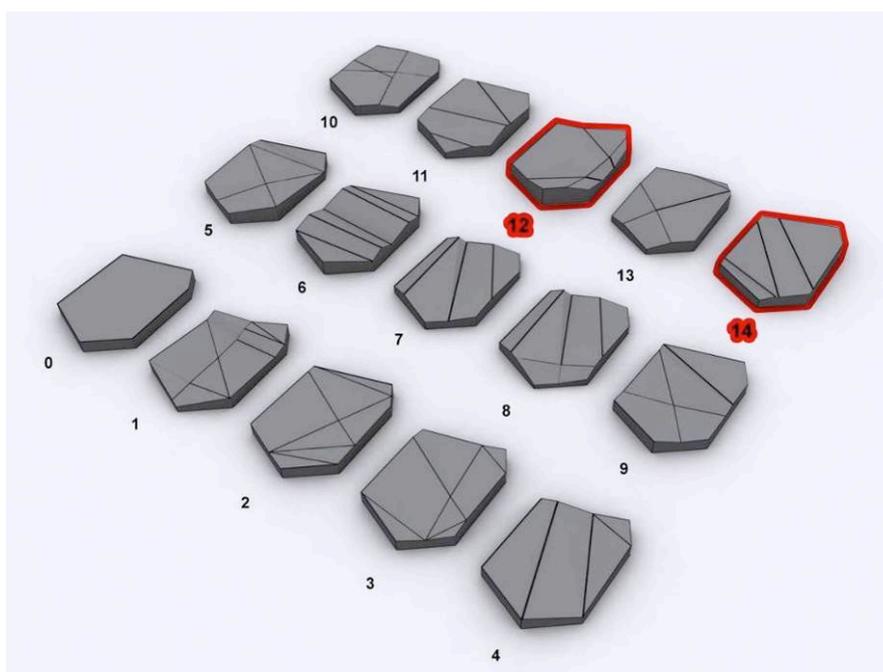


Figure 193. Variations de la forme de la toiture par l'opérateur « Froisser » (vue de droite).

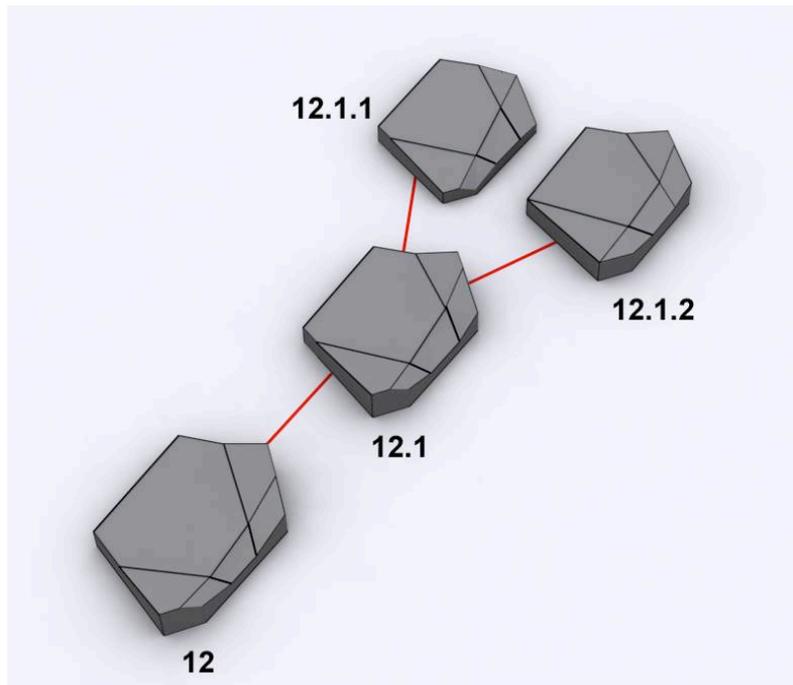


Figure 194. Ajustement du résultat 12 des plis implantés par l'opérateur « froisser » par les architectes.

Les architectes ont ensuite ajusté les formes douze et quatorze en déplaçant et ajustant les plis qui constituent l'opération de « froissage » de la surface de toiture (Figure 194, Figure 195, Figure 196).

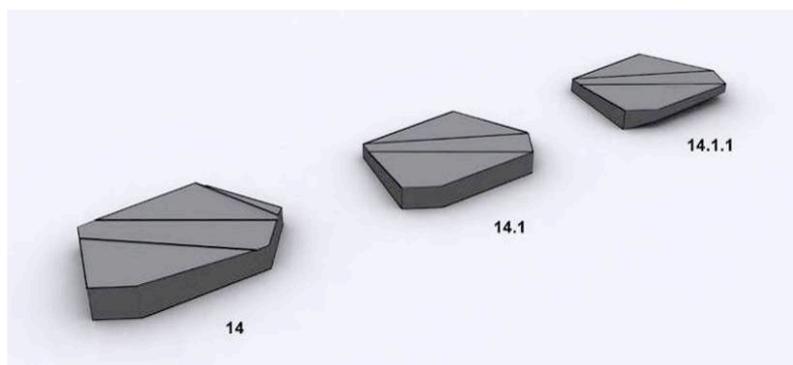


Figure 195. Ajustement du résultat 14 des plis implantés par l'opérateur « froisser » par les architectes (vue de gauche).

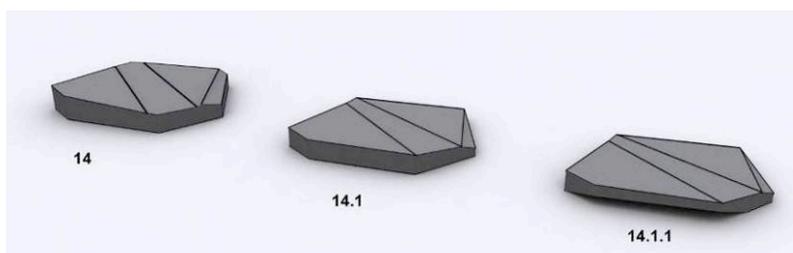


Figure 196. Ajustement du résultat 14 des plis implantés par l'opérateur « froisser » par l'architecte (vue de droite).

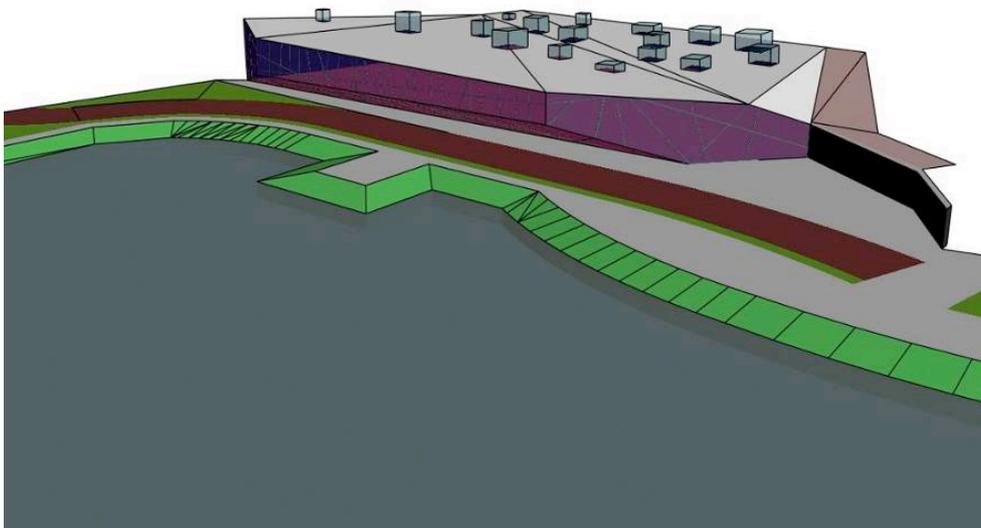


Figure 197. Vue perspective du projet à la fin du processus de conception.

La forme quatorze a été retenue par les concepteurs car elle permettait une meilleure déambulation des visiteurs sur le toit du bâtiment que la forme douze. Pour achever le travail de formalisation du projet, les architectes ont ensuite travaillé en façade et en plan (Figure 197, voir Annexe page 166).



Figure 198. Perspective extérieure du projet du musée.

A partir de quelques paramètres reflétant l'idée du projet, il est possible d'obtenir un nombre considérable d'alternatives. En effet, l'utilisation par les architectes de l'opérateur « froisser » associé à un système génératif a permis la visualisation et l'évaluation d'un large éventail de solutions formelles.

5.5. Conclusion

La mise en application dans un projet d'architecture des opérateurs morphologiques implémentés dans 3D Studio Max s'avère concluante. Le concepteur dispose d'un outil lui permettant d'affiner la forme du projet tout au long du processus de morphogénèse. Il lui est permis de générer une variété de solutions, soit de manière aléatoire soit de manière contrôlée, ce qui signifie que cet outil n'est en aucun cas un système de conception entièrement automatique. Le choix de la forme finale du projet reste le fait du concepteur et est guidé non seulement par des critères esthétiques, mais aussi et surtout par la réponse des formes obtenues aux contraintes du projet.

Toutefois, cet outil ne peut être utilisé que pour un type d'architecture bien précis où le concepteur souhaite intégrer dans le projet une forme dérivée des opérateurs implémentés. En effet, les limitations de cet outil résident dans le nombre d'opérateurs implémentés. Actuellement, le concepteur est limité aux opérateurs « plier », « plisser », « froisser », ainsi qu'aux douze modificateurs déjà présents dans le modelleur (annexe A.1).

Une deuxième limitation à notre outil provient du fait que nous n'avons pas encore spécifié précisément la manière dont le concepteur va naviguer dans un espace de solutions. Actuellement, nous avons modélisé des projets disposant d'un nombre d'ajustements et de solutions relativement moyens. Mais si un système génératif est mis en place ou si le projet se complexifie, le problème sera la visualisation de manière intuitive et compréhensible de l'ensemble des variations du projet.

6. Conclusion

Dans ce mémoire, nous sommes partis du constat que les outils numériques utilisés actuellement par les architectes n'étaient pas ou que peu utilisés dans les phases esquisses de conception. Deux raisons peuvent être évoquées. La première correspond tout simplement au modèle de fonctionnement de ce type d'outils qui n'acceptent que partiellement le retour en arrière sur la forme et nécessitent, pour tout ajustement, un lourd processus de « re-modélisation ». La deuxième raison se rapporte aux interfaces utilisateurs, qui perturbent le processus de conception par la multiplicité des paramètres à renseigner durant une modélisation.

Nous avons tenté de montrer la pertinence du concept d'opérations morphologiques pour rendre compte des opérations de transformation de forme lors d'une phase de conception architecturale. Un tel concept nous paraît bien adapté pour décrire les opérations de conception morphologiques effectuées par les architectes et devrait permettre d'améliorer et d'adapter les outils numériques actuels. Les modélisations expérimentales de projets architecturaux que nous avons conduites en instrumentant ces opérations par des opérateurs, ont révélées que cette méthode de modélisation ne nécessite pas au préalable une connaissance détaillée de la géométrie à représenter, ce qui correspond à une démarche de conception qui par essence est itérative et doit autoriser les retours en arrière et les ajustements.

Le processus de morphogénèse par utilisation d'opérateurs morphologiques paramétriques apparaît dès lors beaucoup plus adapté aux pratiques des architectes que la modélisation polygonale classique. Dans une telle approche, les opérateurs sont facilement identifiables dans le processus de modélisation, et le caractère paramétrable des opérateurs peut permettre de développer aisément des solutions spatiales différentes.

Le but de cette démarche est de permettre au concepteur de sauvegarder sous la forme d'un arbre les étapes de transformations morphologiques, afin de permettre un retour en arrière, pour une recherche formelle plus fine.

Pour répondre aux problèmes d'interaction entre le concepteur et notre outil, nous avons aussi mis en place un type d'interface fondé sur des opérations implicites et gestuelles qui a

pour but de diminuer les perturbations de l'utilisateur par l'outil. Ces principes associés aux opérateurs morphologiques mettent entre les mains du concepteur un outil lui permettant plus de liberté dans la modélisation des formes. De plus la mise en place d'algorithmes génératifs au sein même des opérateurs rend la recherche de formes, qui est par ailleurs toujours initiée et contrôlé par l'utilisateur, plus efficace.

Les limites actuelles de notre travail sont liées au petit nombre d'opérateurs étudiés et implémentés qui ne peuvent modéliser qu'une typologie de projets à base de plis. Une deuxième limitation que nous avons relevée concerne l'interface de navigation dans un espace de solutions arborescent. Il est en effet difficile de visualiser l'ensemble des nœuds et des arcs du système sur un écran d'ordinateur limité en taille. Nous avons à cet effet esquissé dans des travaux précédents une piste de recherche basée sur une représentation hyperbolique (Wetzel, Belblidia, & Bignon, 2008a). Nous sommes conscients que cette solution comporte ses limites et qu'il faut encore approfondir cet aspect de notre travail.

En perspective, nous proposons deux directions, l'une se situant dans le prolongement de notre travail portant sur l'analyse et l'identification d'autres opérateurs morphologiques, l'autre portant sur la recherche d'un principe de navigation dans un système arborescent.

L'objectif final reste pour nous, la mise au point d'un environnement de modélisation 3D dédié à la conception architecturale, en réutilisant et en créant des fonctions de transformation morphologique, permettant l'exploration de nouvelles expressions formelles.

Annexes

A.1. Les modificateurs paramétriques de 3D Studio Max

1.1. Bruit :



Le modificateur « Bruit » permet de moduler le positionnement des sommets d'une géométrie suivant les trois axes. Il entraîne une transformation « aléatoire » grâce à une valeur de départ.

Figure 199. Modificateur "Bruit"

Variables :



Valeur de départ : génère un point de départ aléatoire à partir du nombre défini par l'utilisateur. Ce paramètre est particulièrement utile pour créer un terrain, car chaque paramètre permet de produire une configuration différente.

Echelle : fixe la taille de l'effet de bruit (et non la portée). Des valeurs élevées produisent un bruit plus doux, tandis que de faibles valeurs augmentent le crénelage du bruit. Valeur par défaut = 100.

X, Y, Z : définit la force de l'effet de bruit sur chacun des trois axes. Pour obtenir un effet de bruit, il faut entrer une valeur pour au moins l'un des trois axes. Valeur par défaut = 0,0 ; 0,0 ; 0,0.

1.2. Comprimer :

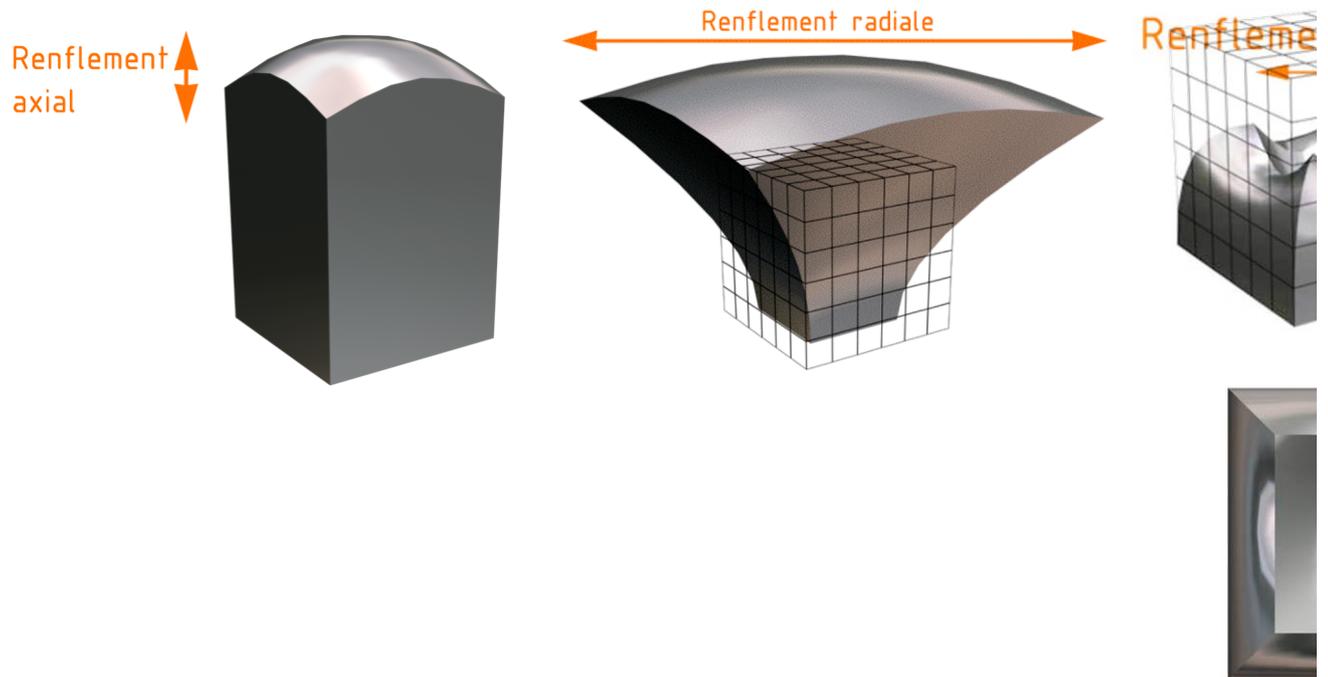
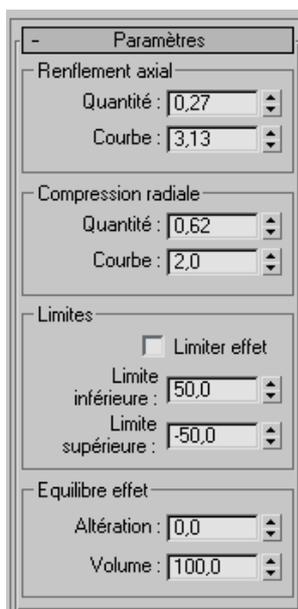


Figure 200. Modificateur "Comprimer"

Ce modificateur permet d'obtenir un effet de compression de l'objet suivant l'axe Z du gizmo. On peut aussi obtenir un renflement sur l'axe vertical pour accentuer l'effet de pression.

**Variables :****Zone Renflement axial :**

Ces commandes permettent d'appliquer un effet de renflement le long de l'axe Z local du gizmo Compresser.

Quantité : détermine l'ampleur de l'effet de renflement. Les valeurs plus élevées allongent l'objet et entraînent l'incurvation des extrémités vers l'extérieur.

Courbe : définit le degré de courbure sur les extrémités renflées. Vous pouvez utiliser cette option pour déterminer si le renflement est doux ou pointu.

Zone Compression radiale :

Ces commandes permettent d'appliquer un effet de compression autour de l'axe Z local du gizmo, aligné.

Quantité : détermine l'ampleur de l'effet de compression. Les valeurs supérieures à zéro tendent à comprimer la « taille » de l'objet, tandis que les valeurs négatives tendent à enfler la taille vers l'extérieur, comme si on avait marché sur l'objet.

Courbe : définit le degré de courbure de la compression. Les valeurs faibles entraînent un effet de compression important, alors que les valeurs plus élevées créent une compression progressive, moins prononcée.

1.3. Coque :

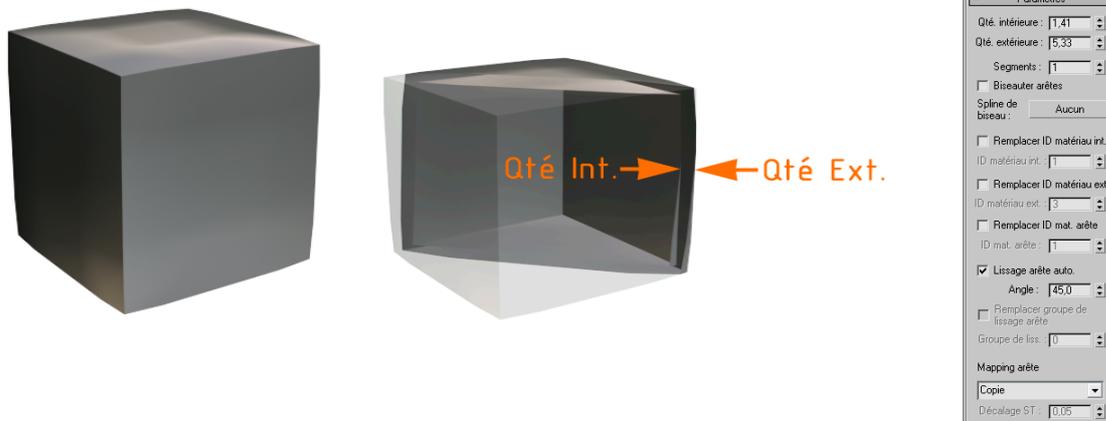


Figure 201. Modificateur "Coque"

Le modificateur « Coque » donne une épaisseur aux objets. Il crée un ensemble de faces supplémentaires à une distance donnée de la géométrie initiale afin de donner l'effet de matière.

Variables :

Qté. intérieure/extérieure : distance en unités 3ds max génériques dont la surface interne est déplacée vers l'intérieur et la surface externe vers l'extérieur à partir de leur position initiale. Valeur par défaut = 0,0 ; 1,0. La somme des deux paramètres de quantité détermine l'épaisseur de la coque de l'objet, ainsi que la largeur des arêtes par défaut. Si vous définissez les deux paramètres sur 0, la coque résultante n'a aucune épaisseur et ressemble à un objet défini pour s'afficher comme un objet à deux faces.

1.4. Courbure :

Figure 202. Modificateur "Courbure"

Le modificateur morphologique « Courbure » permet d'obtenir un effet de courbure, à partir de toute géométrie.

Variables :

Angle : définit l'inclinaison de l'angle par rapport au plan vertical. Les valeurs vont de -999 999,0 à 999 999,0.

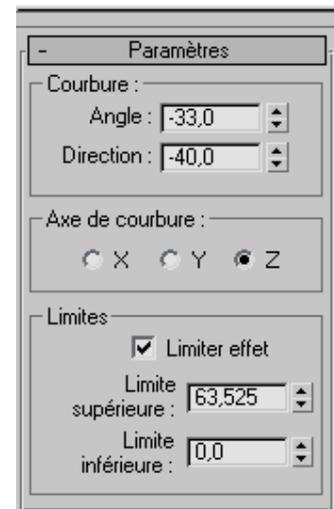
Direction : définit la direction de la courbure par rapport au plan horizontal. Les valeurs vont de -999 999,0 à 999 999,0.

X/Y/Z : spécifie l'axe à courber. A noter que cet axe est local au gizmo Courbure, non pas lié à l'entité sélectionnée. Valeur par défaut = Z.

Limiter effet : applique des contraintes de limitation à l'effet de courbure. Cette option est désactivée par défaut.

Limite supérieure : définit, en unités universelles et à partir du point central de la courbure, la borne supérieure au-delà de laquelle la courbure n'affecte plus la géométrie. Valeur par défaut = 0 ; intervalle = 0 à 999 999,0.

Limite inférieure : définit, en unités universelles et à partir du point central de la courbure, la borne inférieure au-delà de laquelle la courbure n'affecte plus les formes géométriques. Par défaut = 0 ; Intervalle = -999 999,0 à 0.



1.5. Effiler:

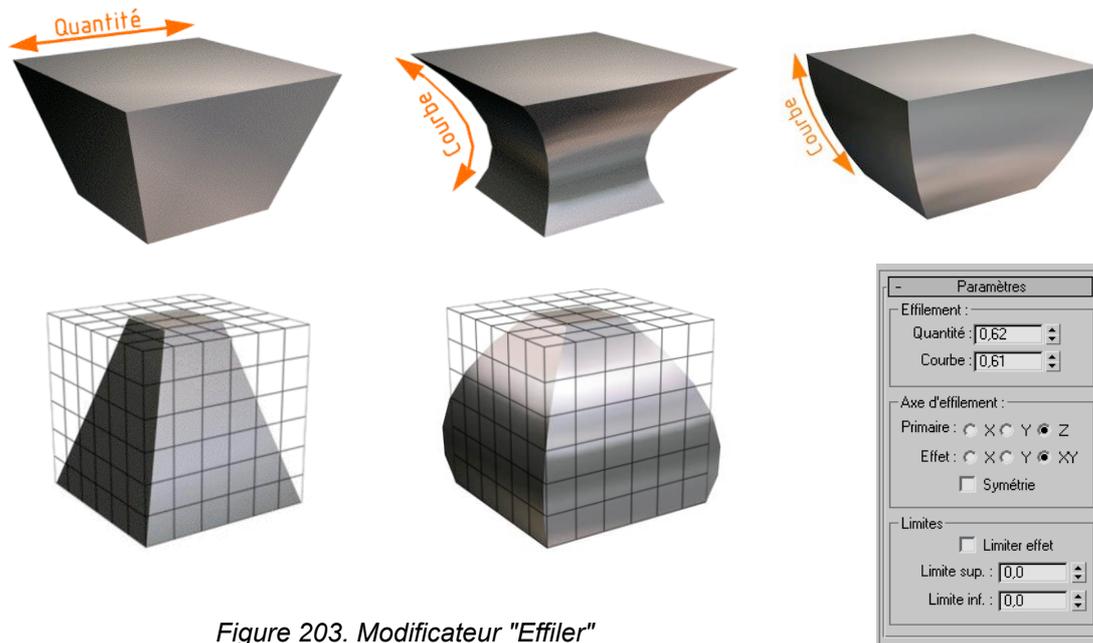


Figure 203. Modificateur "Effiler"

Le modificateur « Effiler » permet de produire un contour effilé en mettant à l'échelle les deux extrémités de la géométrie d'un objet, l'une étant agrandie et l'autre réduite. Il est aussi possible de contrôler le volume et la courbe de l'effilement sur deux jeux d'axes.

Variables :

Quantité : étendue de la mise à l'échelle des extrémités, cette valeur est relative et inférieure ou égale à 10.

Courbe : applique une courbure aux côtés du gizmo Effiler, ce qui affecte la forme de l'objet effilé. Les valeurs positives produisent un évasement des côtés de l'objet (courbe concave), les valeurs négatives, un resserrement (courbe convexe). Avec la valeur 0, les côtés restent inchangés. Valeur par défaut = 0.

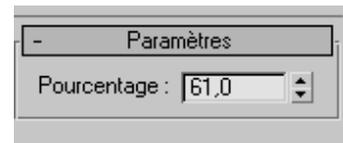
1.6. En sphère :

Figure 204. Modificateur "En sphère"

Le modificateur « En sphère » déforme un objet de façon à lui donner une forme sphérique.

Variable :

Pourcentage : définit le pourcentage de déformation sphérique à appliquer à un objet.



1.7. Etirement :

Figure 205. Modificateur "Etirement"

Le modificateur « Etirement » simule l'effet d'étirement et d'écrasement. L'étirement applique une mise à l'échelle le long d'un axe d'étirement sélectionné et une mise à l'échelle contraire le long des deux autres axes secondaires.

Variables :

Etirement : définit le facteur d'échelle de base des trois axes. Le facteur d'échelle, dérivé de la valeur d'étirement, varie selon le signe de cette valeur.

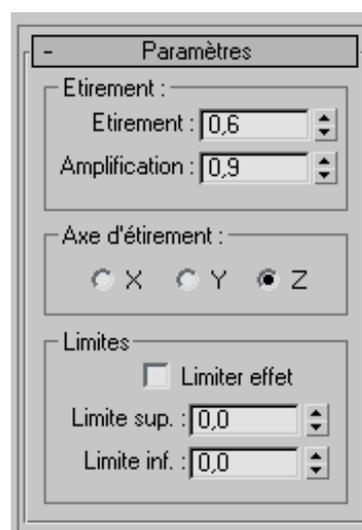
Les valeurs d'étirement positives définissent un facteur d'échelle égal à l'étirement + 1. Par exemple, une valeur d'étirement de 1,5 produit un facteur d'échelle de $1,5 + 1 = 2,5$ ou 250 %.

Si la valeur d'étirement est négative, le facteur d'échelle est égal à $-1 / (\text{Etirement} - 1)$. Par exemple, une valeur d'étirement de -1,5 produit un facteur d'échelle de $-1 / (-1,5 - 1) = 0,4$ (soit 40 %).

Le facteur d'échelle calculé est appliqué à l'axe d'étirement sélectionné, tandis qu'un facteur d'échelle inverse est appliqué aux axes secondaires.

Amplification : modifie le facteur d'échelle appliqué aux axes secondaires. Ce paramètre génère un multiplicateur à l'aide de la même technique que celle utilisée pour l'étirement. Ce multiplicateur est ensuite appliqué à la valeur d'étirement avant que le facteur d'échelle des axes secondaires ne soit calculé.

Les valeurs d'amplification affectent le changement d'échelle sur les axes secondaires de la manière suivante :



- La valeur 0 n'a aucun effet. Elle utilise le facteur d'échelle par défaut calculé à partir de la valeur Etirement.
- Les valeurs positives accentuent l'effet.
- Les valeurs négatives diminuent l'effet.

1.8. Incliner :

Figure 206. Modificateur "Incliner"

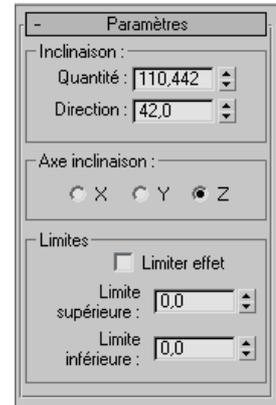
Le modificateur « Incliner » permet de produire un décalage uniforme dans la géométrie d'un objet. Il contrôle la quantité et la direction de l'inclinaison sur chacun des trois axes.

Variables :

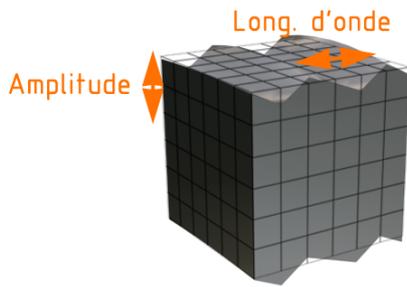
Quantité : définit l'angle d'inclinaison par rapport au plan vertical.

Direction : définit la direction de l'inclinaison par rapport au plan horizontal.

X/Y/Z : spécifie l'axe qui sera incliné. A noter que cet axe est relatif au gizmo Incliner et non pas lié à l'entité sélectionnée. Valeur par défaut = Z.



1.9. Onde :



Le modificateur « Onde » permet de générer un effet d'onde dans la géométrie d'un objet. Il peut être généré à partir de l'une des deux ondes ou les associer entre elles. Le modificateur « Onde » utilise un gizmo et un centre standard auxquels il est possible d'appliquer des transformations pour renforcer l'effet d'onde.

Figure 207. Modificateur "Onde"

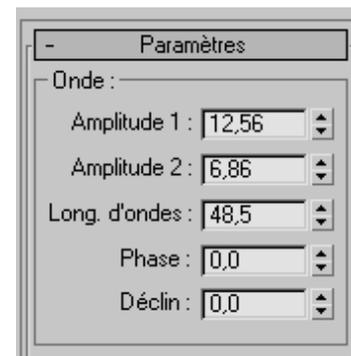
Variables :

Amplitude 1/Amplitude 2 : Amplitude 1 produit une onde sinusoïdale le long de l'axe Y du gizmo, tandis que Amplitude 2 crée une onde le long de l'axe X (mais dans les deux cas, pics et creux apparaissent dans la même direction). Si vous remplacez une valeur positive par une valeur négative, la position des pics et des creux sera inversée.

Longueur d'ondes : indique la distance en unités courantes entre les crêtes des deux ondes.

Phase : déplace le modèle d'onde sur l'objet. Une valeur positive déplace l'effet dans une direction, tandis qu'une valeur négative le déplace dans l'autre. L'effet est particulièrement visible lors d'une animation.

Déclin : limite l'effet de l'onde générée à partir de son origine. Une valeur d'atténuation positive diminue l'amplitude à une distance croissante du centre. Lorsque cette valeur augmente, l'onde est concentrée au centre, puis aplatie avant de disparaître (atténuation totale).



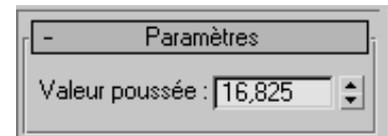
1.10. Pousser :

Figure 208. Modificateur "Pousser"

Le modificateur « Pousser » permet de « pousser » les sommets d'un objet vers l'extérieur ou vers l'intérieur le long des normales de sommet moyennes. Il se produit alors un effet de gonflement impossible à obtenir autrement.

Variables :

Valeur poussée : définit la distance (en unités universelles) selon laquelle les sommets sont déplacés par rapport au centre de l'objet. Utilisez une valeur positive pour déplacer les sommets vers l'extérieur et une valeur négative pour les déplacer vers l'intérieur.



1.11. Ride :

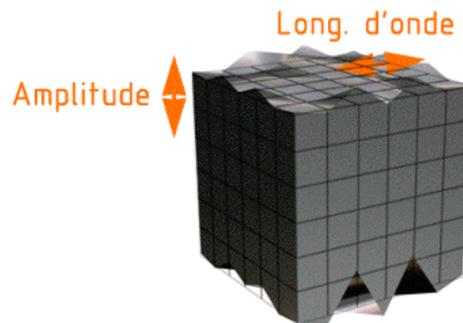
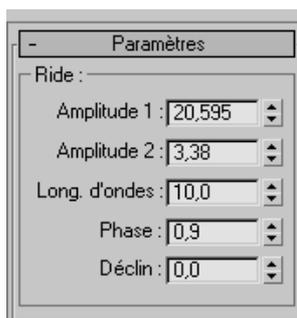


Figure 209. Modificateur "Ride"

Ce modificateur permet de produire un effet de ride concentrique dans la géométrie d'un objet. Il est possible de définir l'un des deux types de rides ou une combinaison des deux.

Variables :



Amplitude 1/Amplitude 2 : avec Amplitude 1, une ride traverse l'objet dans une direction, tandis qu'avec Amplitude 2, une ride similaire se place perpendiculairement à la première (autrement dit, elle subit une rotation de 90 degrés autour de l'axe vertical).

Long. d'ondes : indique la distance entre les pics de l'onde. Plus la longueur d'ondes est élevée, plus la ride est lisse et peu profonde. Valeur par défaut = 50.

Phase : déplace le modèle de ride sur l'objet. Les nombres positifs déplacent le modèle vers l'intérieur, tandis que les nombres négatifs le déplacent vers l'extérieur. L'effet est particulièrement visible lors d'une animation.

Déclin : limite l'effet de l'onde générée à partir de son centre.

La valeur par défaut 0,0 signifie que l'onde va se générer continuellement à partir de son centre. L'augmentation de la valeur Déclin réduit l'amplitude des ondes par rapport au centre, limitant ainsi la distance sur laquelle les ondes sont générées.

1.12. Torsion :

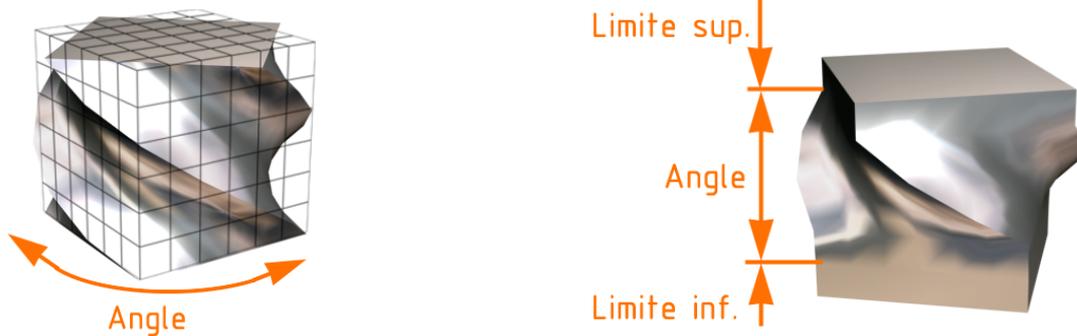


Figure 210. Modificateur "Torsion"

Le modificateur « Torsion » applique une torsion aux formes géométriques d'un objet.

Variables :

Angle : détermine le niveau de torsion autour de l'axe vertical. Valeur par défaut = 0,0.

Altération : provoque la concentration de la torsion à l'une des deux extrémités de l'objet. Lorsque la valeur est négative, l'objet subit la torsion plus près du centre du gizmo. Si elle est positive, la torsion de l'objet s'effectue plus loin du centre du gizmo. Si la valeur du paramètre est 0, la torsion est uniforme. Valeurs possibles = 100 à -100. Valeur par défaut = 0.

X/Y/Z : spécifie l'axe le long duquel la torsion se produira. Il s'agit de l'axe local du gizmo Torsion. Valeur par défaut = Z.

Limiter effet : applique des contraintes de limites au modificateur Torsion.

Limite supérieure : définit la limite supérieure de l'effet de torsion. Valeur par défaut = 0.

Limite inférieure : définit la limite inférieure de l'effet de torsion. Valeur par défaut = 0.

A.2. Complément du corpus d'exemples architecturaux mis en correspondance avec des opérations morphologiques

2.1. Opération « Froisser »



Figure 211. « House T » de l'architecte Japonais Akihisa Hirata ("Roof Dynamics", 2008).



Figure 212. « Nora House » des ateliers d'architecture T.I.T. Tsukamoto lab et BOW-WOW ("Roof Dynamics", 2008).



Figure 213. Sous face « froissée » du «Préau» du Musée du quai Branly conçu par Jean Nouvel.

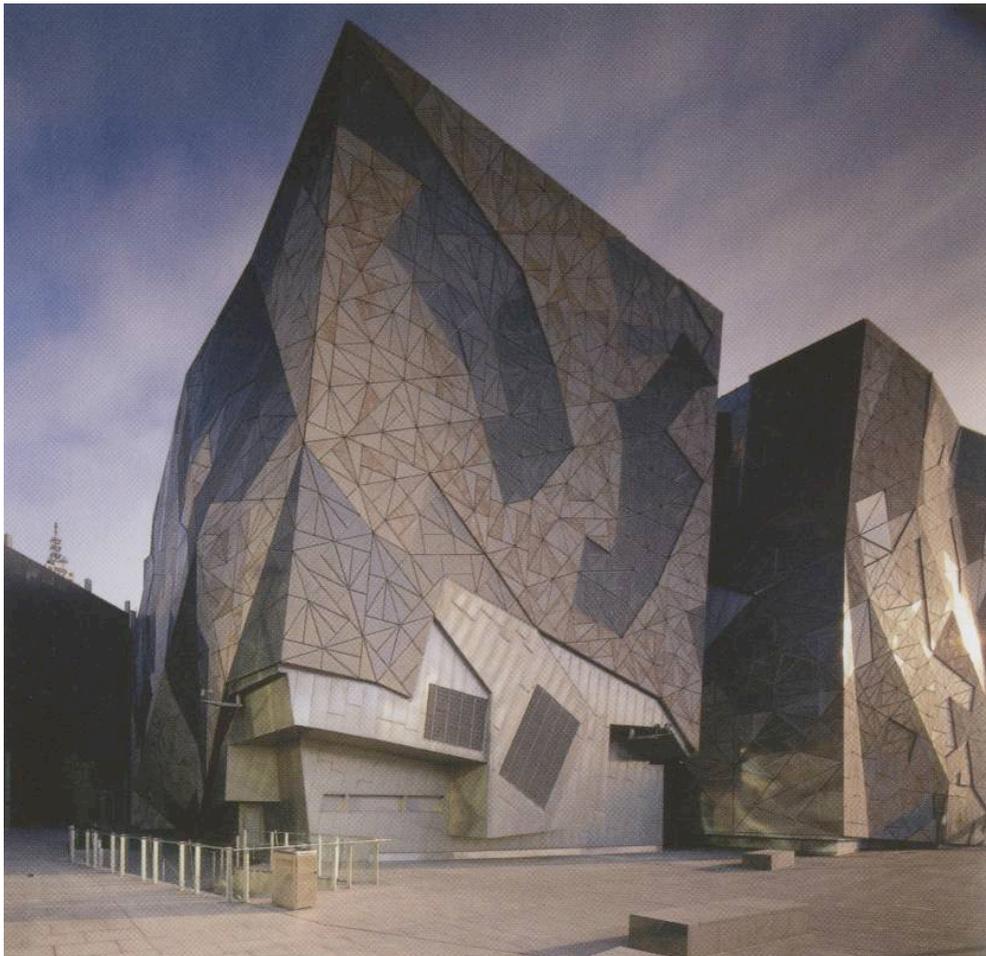


Figure 214. Federation Square à Melbourne conçu par LAB Architecture Studio.

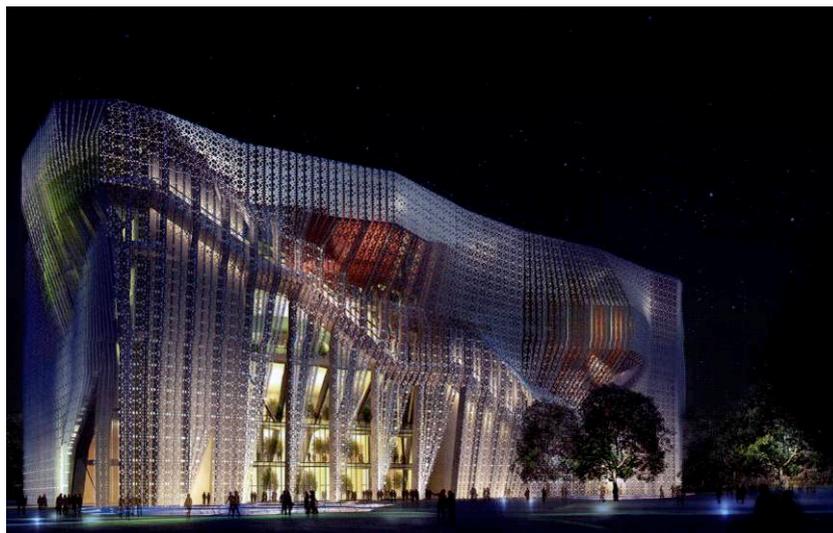


Figure 215. « House T » de l'architecte Japonais Akihisa Hirata ("Identité Europe", 2007).

2.2. Opération « Onduler »

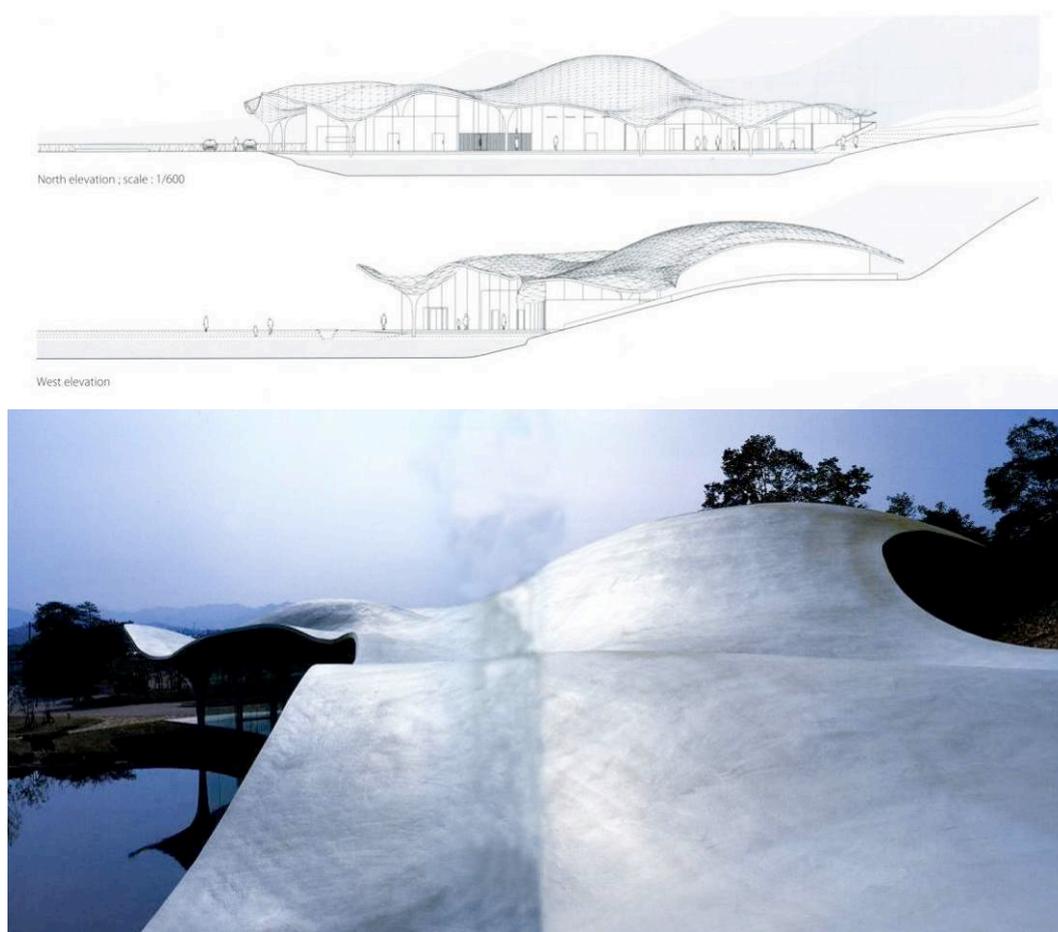


Figure 216. « Funeral Hall » de l'architecte Japonais Toyo Ito ("Roof Dynamics", 2008).



Figure 217. « Center for Art » de l'architecte Japonais Arata Isozaki ("YearBook 2003", 2004).



Figure 218. Centre de loisirs des architectes B. Ingels et J. de Smedt ("Identité Europe", 2007).

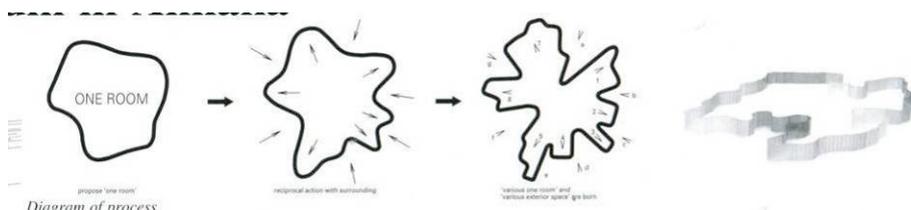


Figure 219. Projet intitulé « Environnement Art Forum in Annaka » de l'architecte Japonais Sosuke Fujimoto ("YearBook 2003", 2004).

2.3. Opération « Plier »

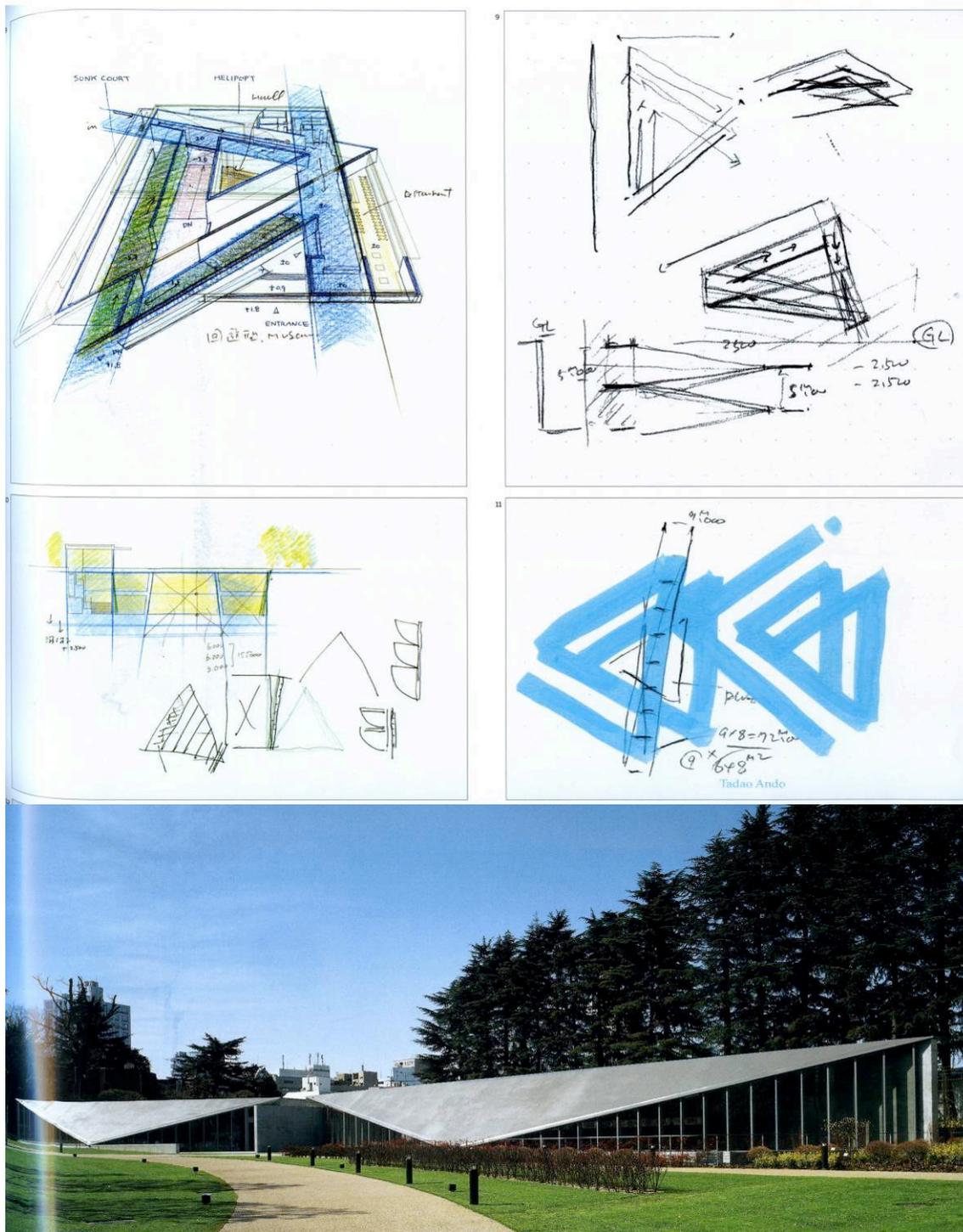


Figure 220. « Galerie 21-21 Design Sight » de l'architecte Tadao Ando (Martin, 2007).

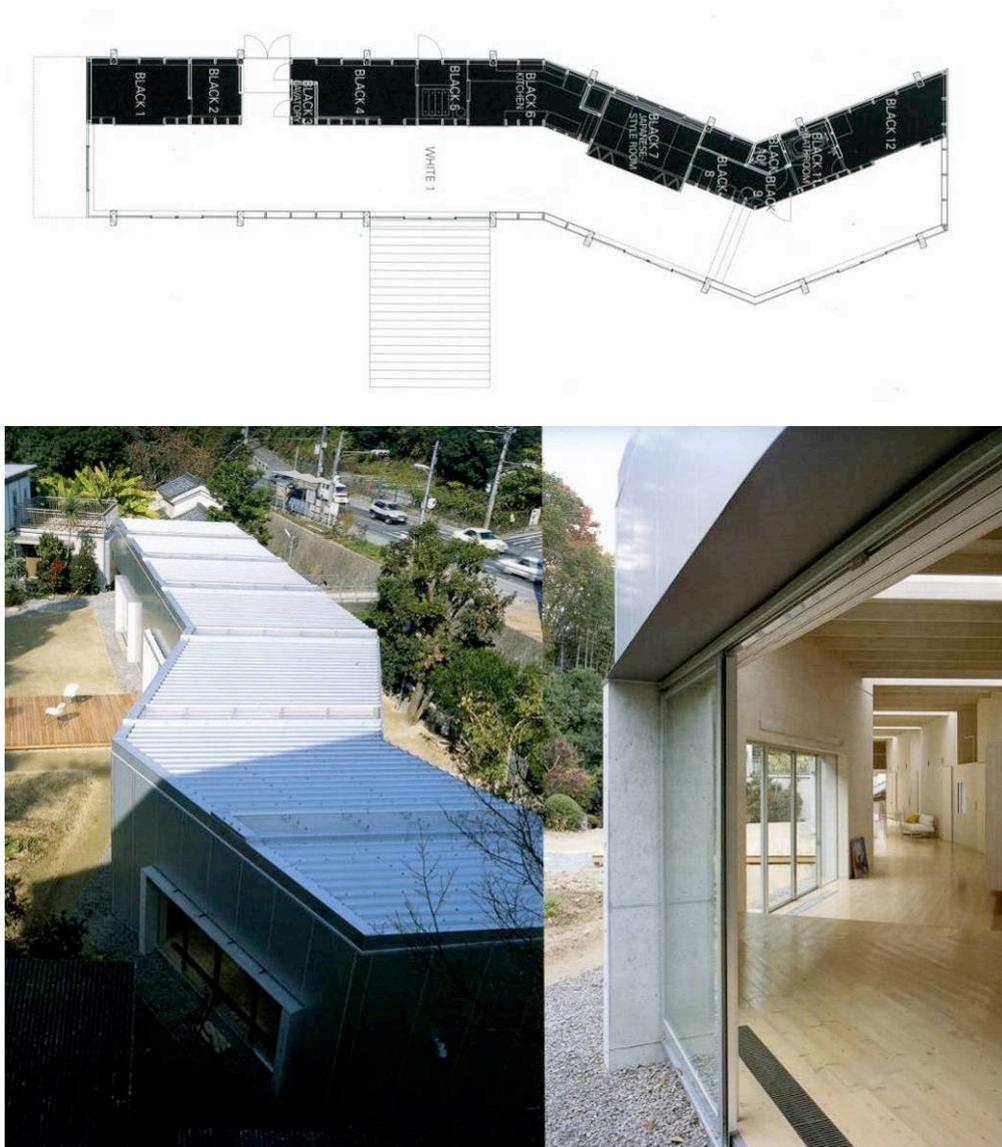


Figure 221. «Himuro House» de l'architecte Kazuhiro Kojama ("YearBook 2003", 2004).

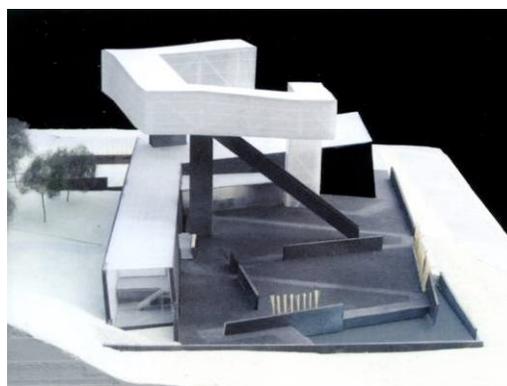


Figure 222. «Nanjing Museum of Art & Architecture» de l'architecte Steven Holl ("Performing Museums", 2008).



Figure 223. « Besucherzentrum » de l'architecte Holzer Kobler ("Swiss performance 08", 2008).



Figure 224. « Fausses Jumelles » de l'architecte Alejandro Aravena ("Déformations", 2007).

2.4. Opération « Plisser »

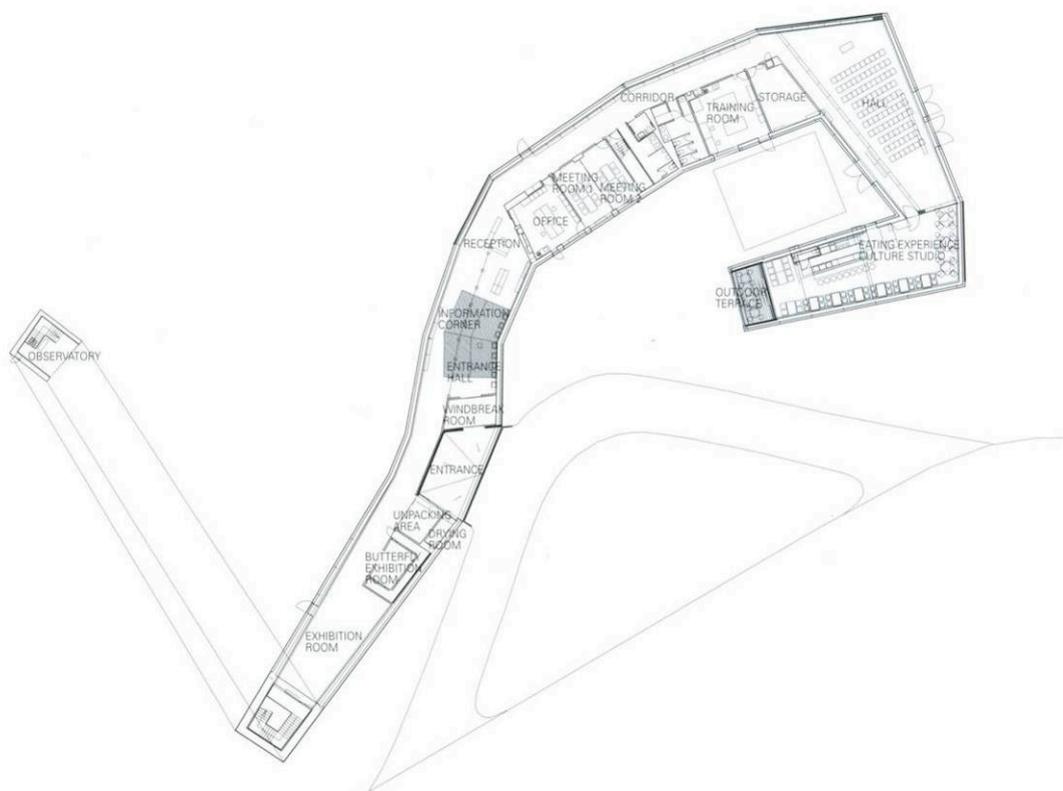
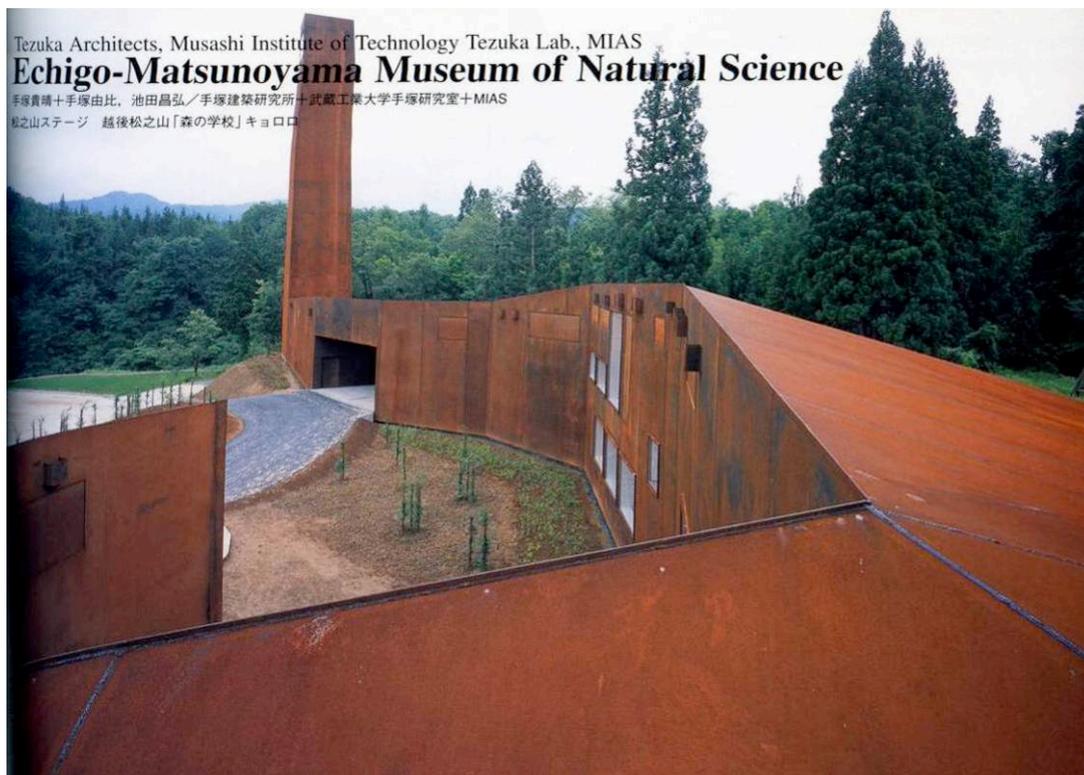


Figure 225. Musée des Sciences Naturelles de Echigo-Matsunoyama par l'agence d'architecture Tezuka Architects ("YearBook 2003", 2004).

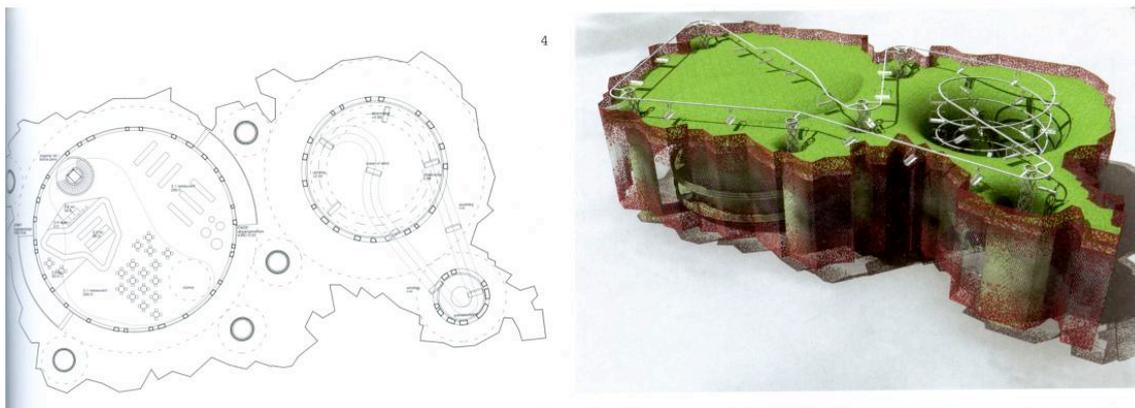


Figure 226. Pavillon Suisse pour l'Exposition Universelle de Shanghai de 2010 conçu par l'architecte Buchner Bründler ("Swiss performance 08", 2008).



Figure 227. «Maison Go» construite à Thionville par l'agence d'architecture Périphériques ("Déformations", 2007).

2.5. Opération « Pousser »



Figure 228. «the Wave» immeuble de logement construit à Almere (Pays-Bas) par l'architecte René Van Zuuk.

2.6. Opération « Serrer »



Figure 229. «deYoung Museum» de l'agence d'architecture Herzog et de Meuron ("Performing Museums", 2008).

2.7. Opération « Tordre »



Figure 230. «Xitzhimen Skyscraper Project» de l'agence d'architecture Kijo Rokkaku Architect & Associates ("sketch book", 2004).



Figure 231. «deYoung Museum» de l'agence d'architecture Herzog et de Meuron ("Performing Museums", 2008).

A.3. Documents produits par Gilles Pignon durant la conception du Musée de Louvain-la-Neuve.

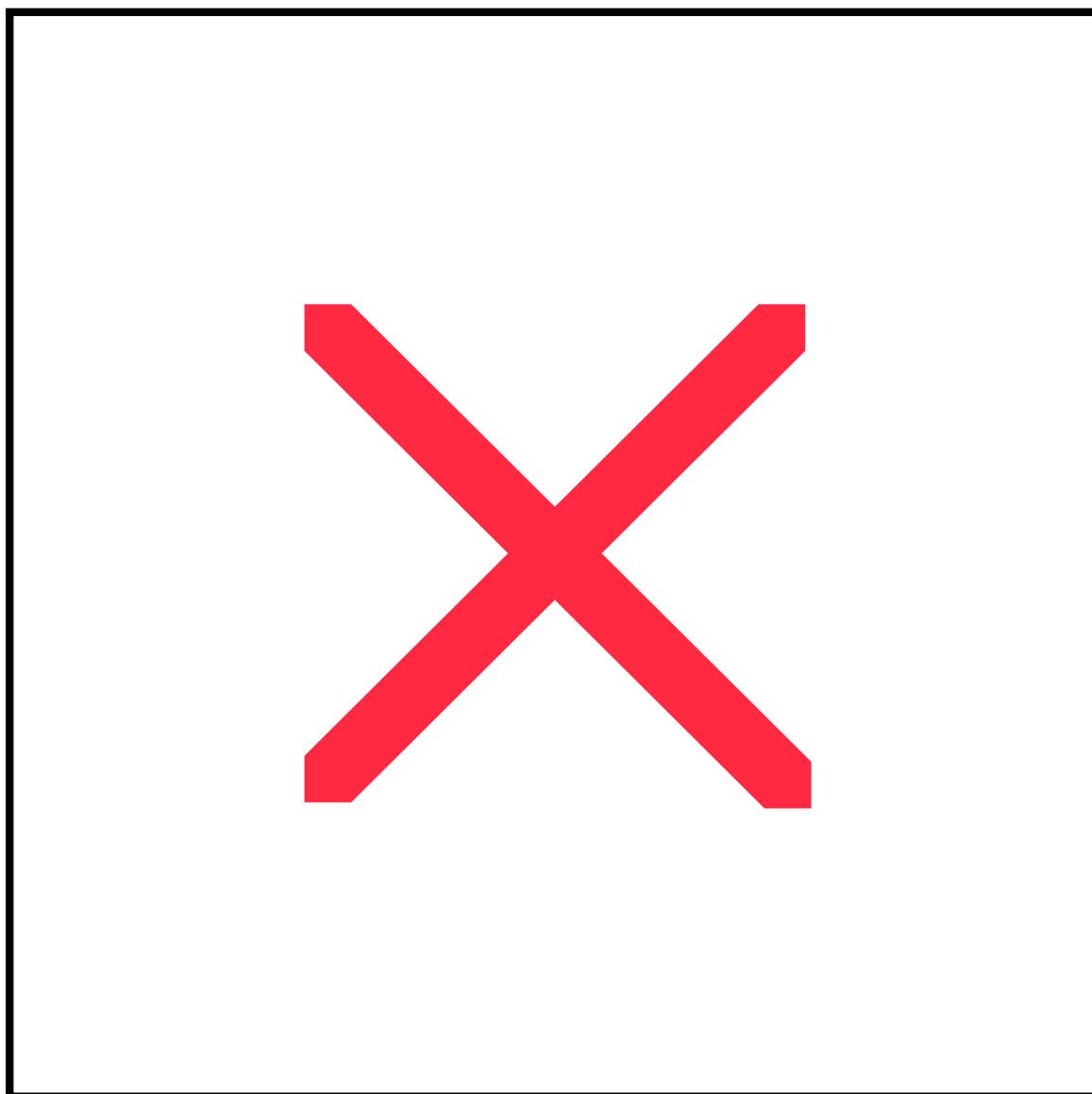


Figure 232. Organigramme du musée.

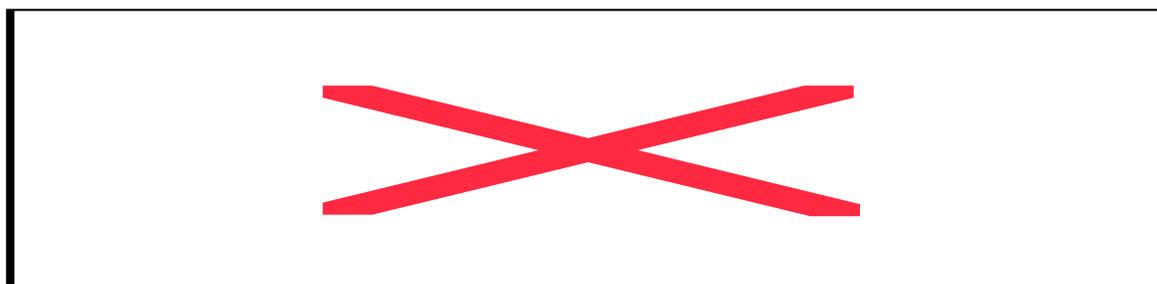


Figure 233. Coupe longitudinale.

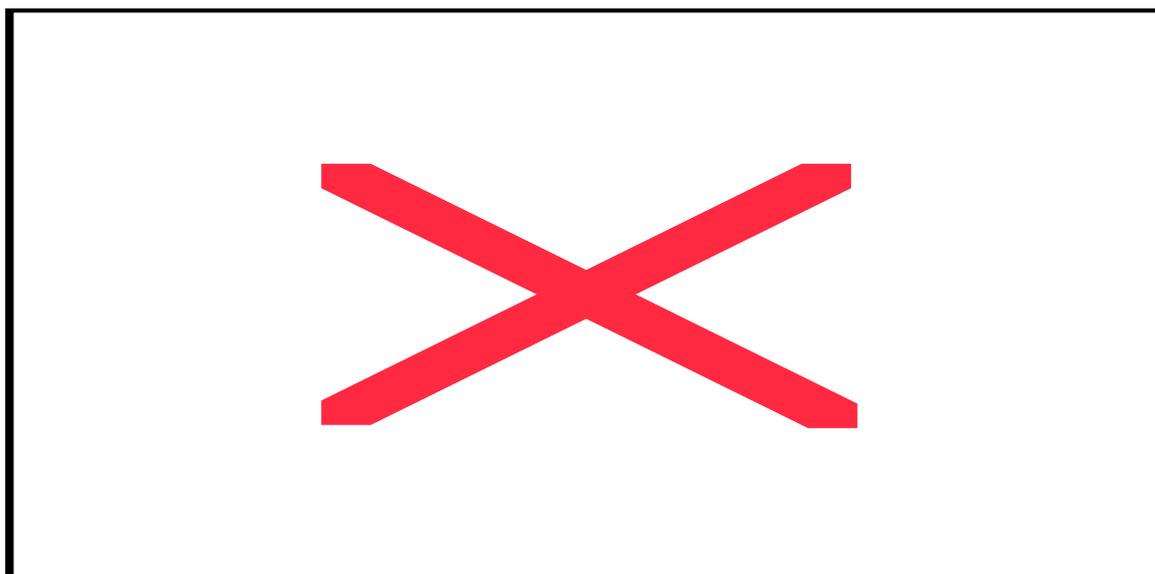


Figure 234. Plans du rez-de-chaussée (gauche) et de l'étage (droite).

A.4. Documents produits par Baam Architecture durant la conception de la maison Doll à Altkirch.

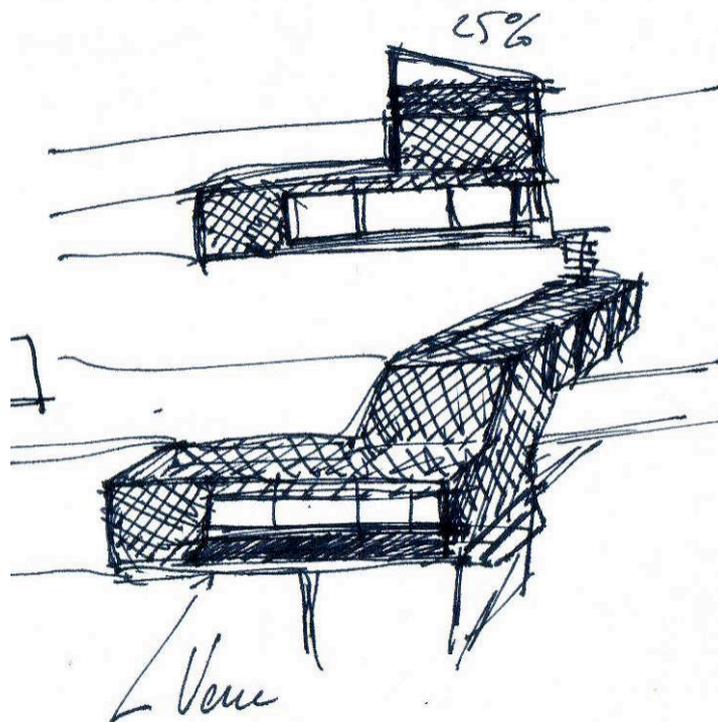


Figure 235. Croquis visant à clarifier les ouvertures et l'implantation de la maison sur la parcelle.

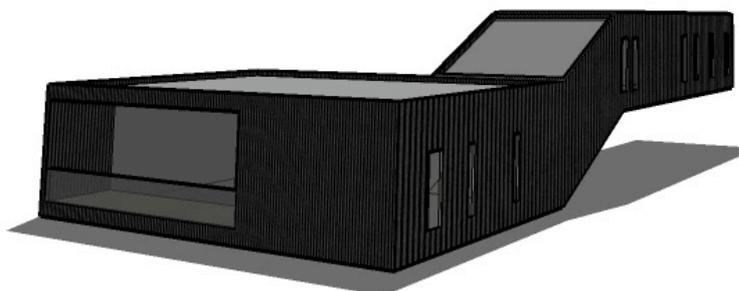


Figure 236. Image montrant la partie avant du bâtiment.

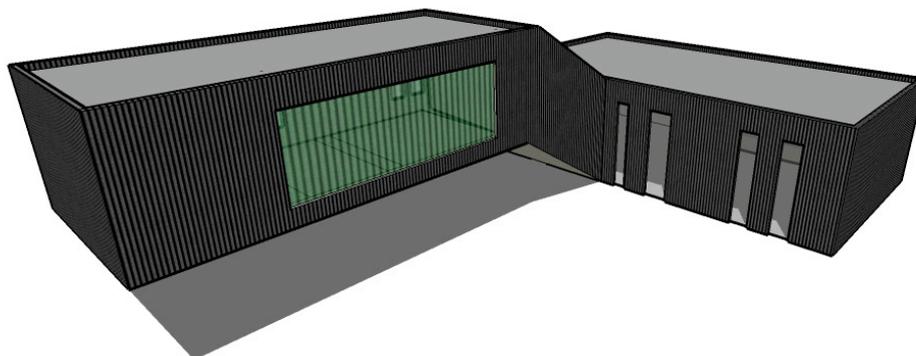


Figure 237. Image montrant la partie latérale du bâtiment.

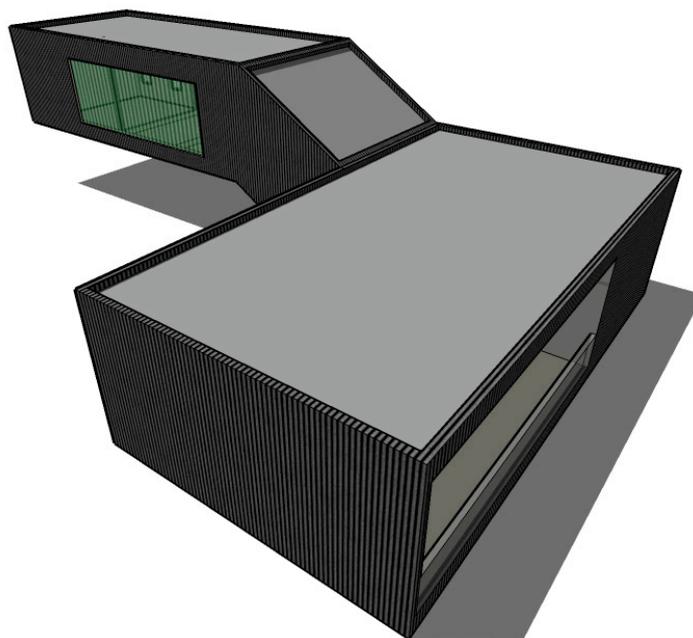


Figure 238. Image montrant la toiture.

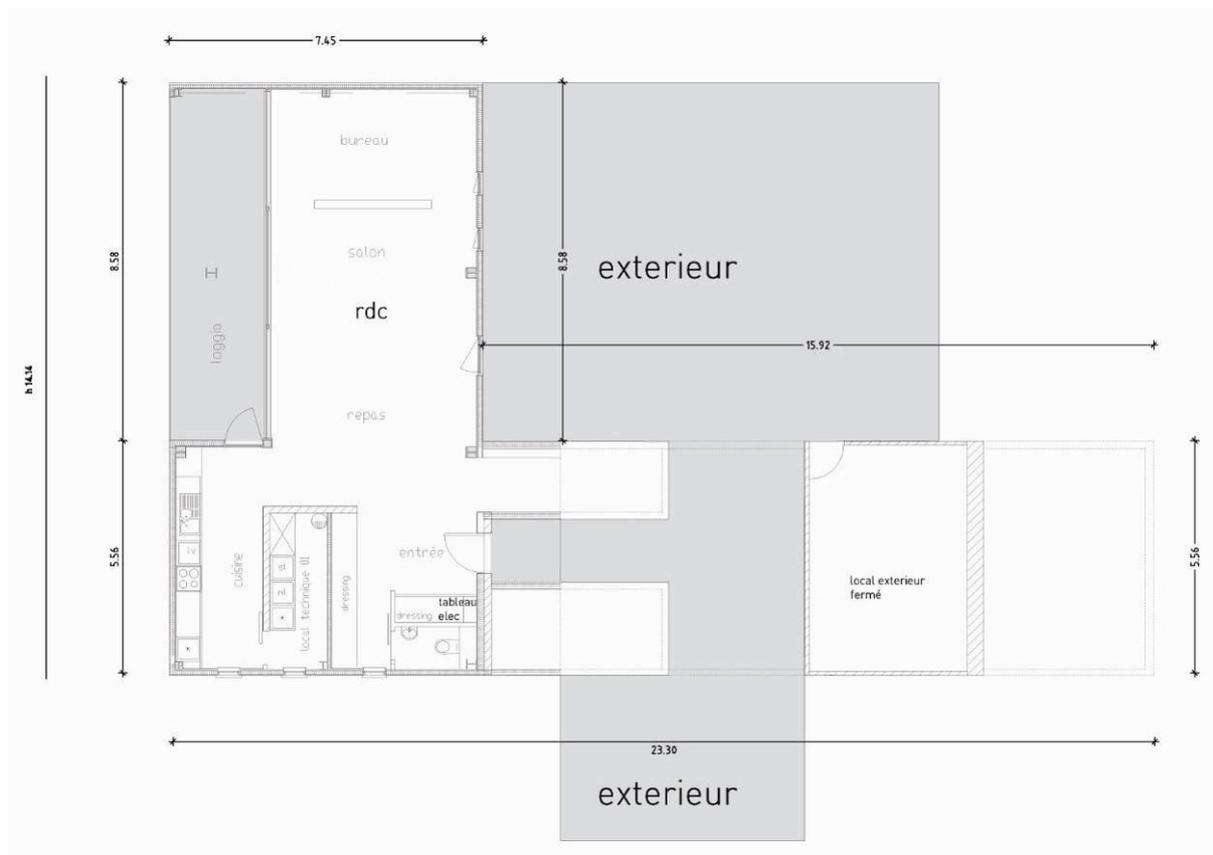


Figure 239. Plans du rez-de-chaussée.

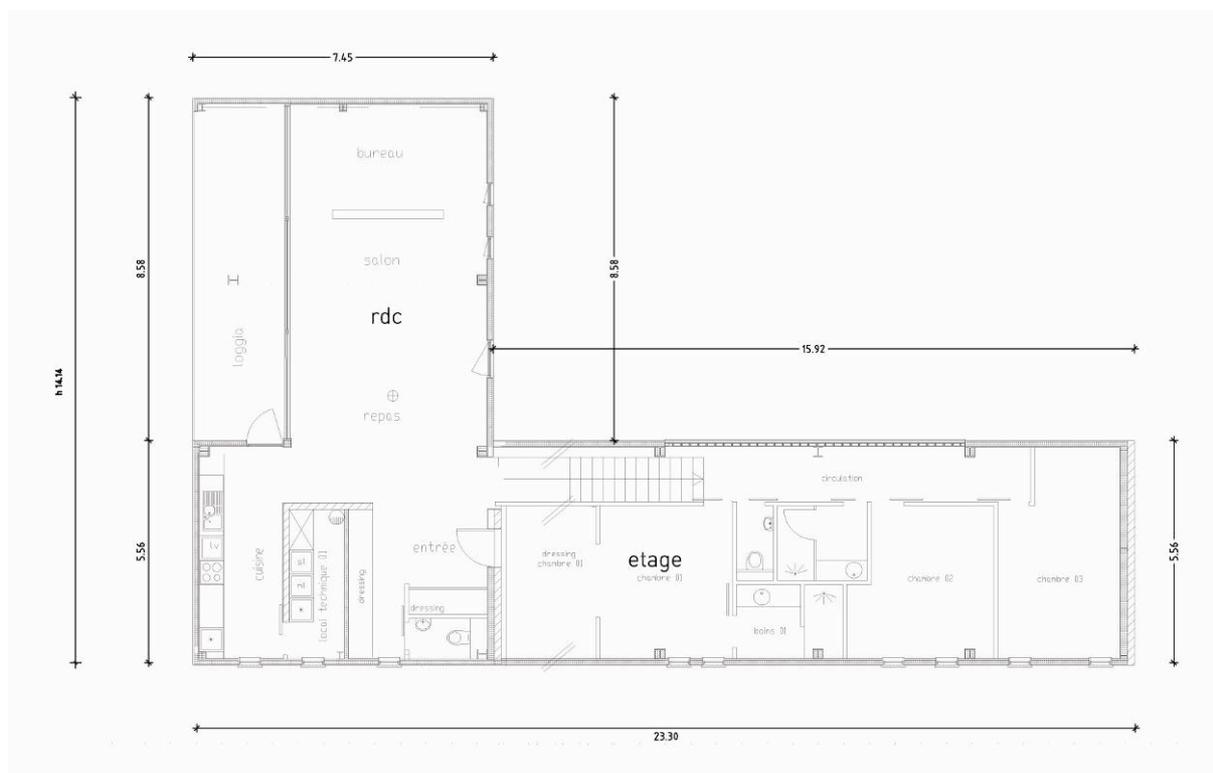
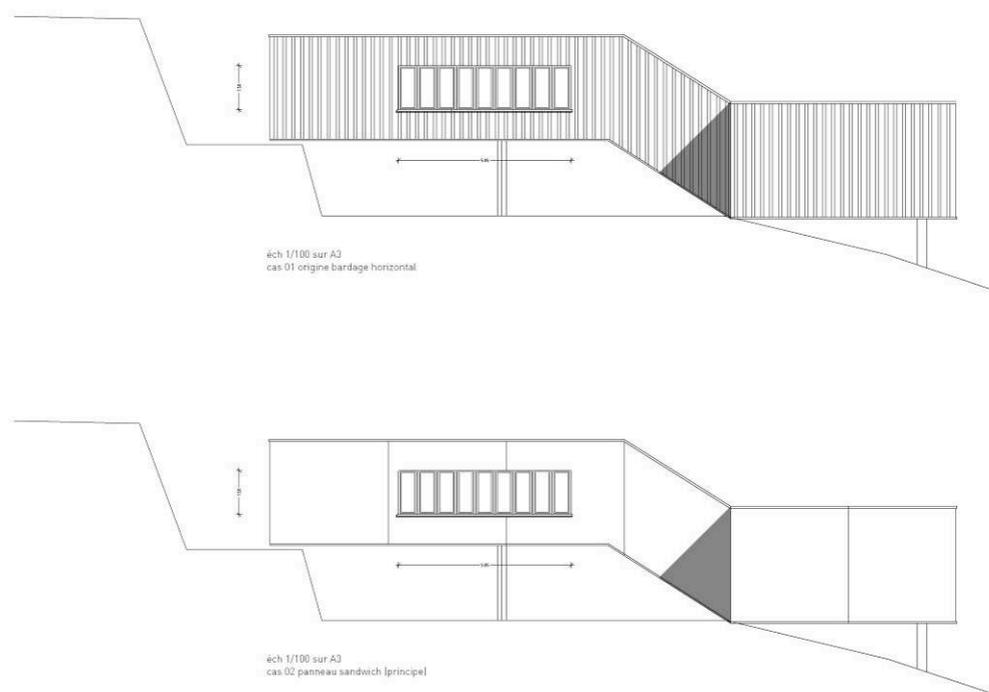


Figure 240. Plans de l'étage.



MAISON DE M. ET MME DOLL
RUE DU CHAR ST QUENTIN 68130 ALTKIRCH
juillet 2007
principe de façade

Figure 241. Façades.

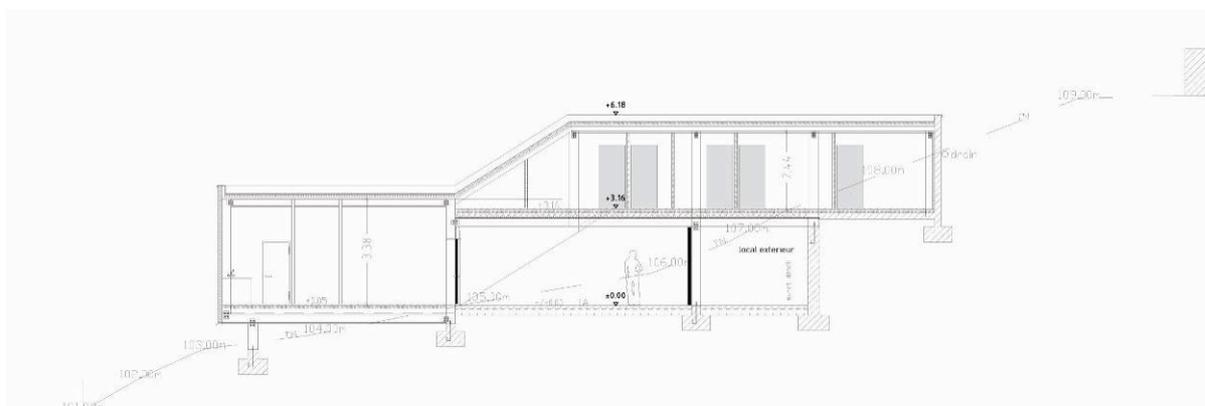


Figure 242. Coupes.

A.5. Documents produits par Baam Architecture durant le concours du Musée de Louvain-La-Neuve.



Figure 243. Plan masse.

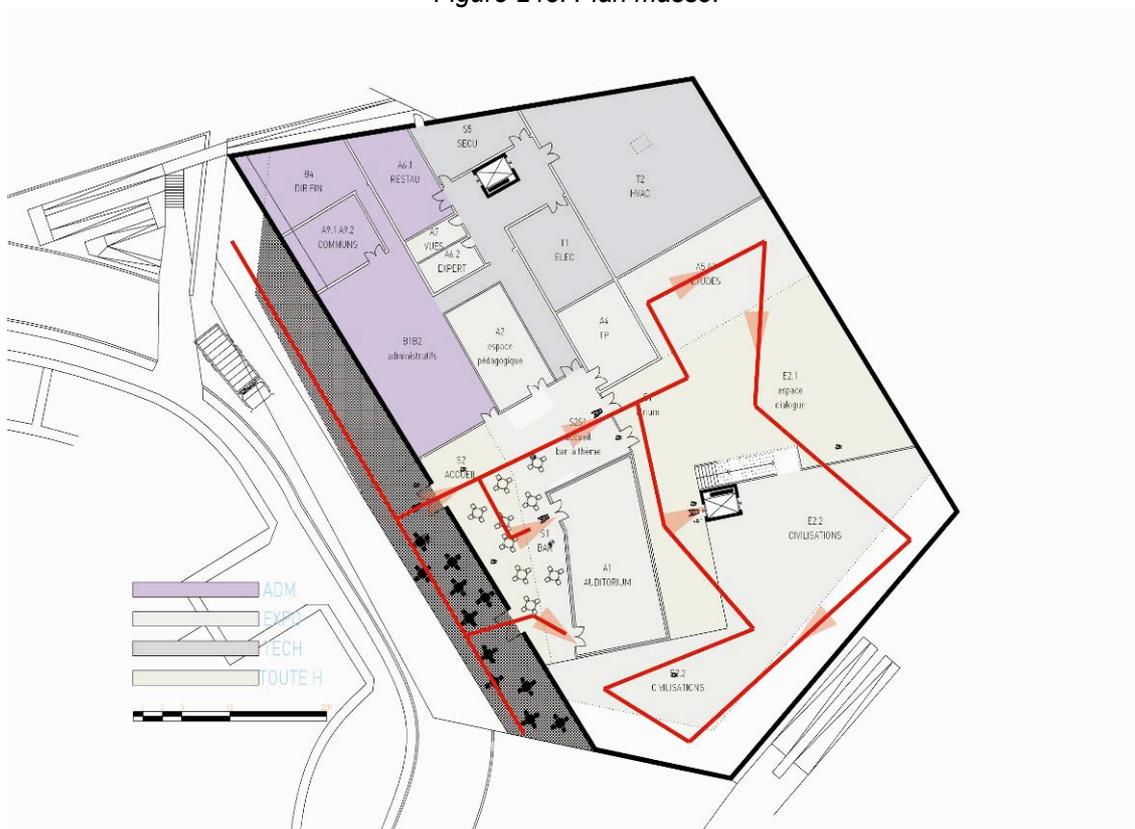


Figure 244. Plan du rez-de-chaussée

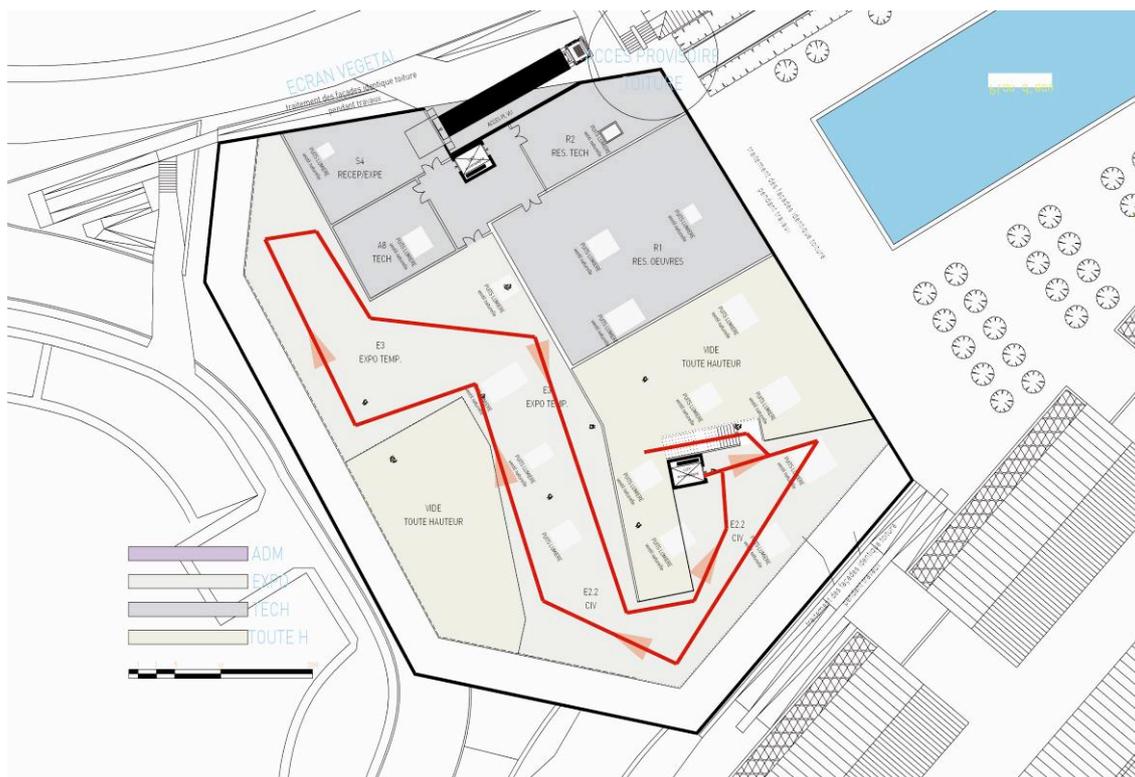


Figure 245. Plan du premier étage.

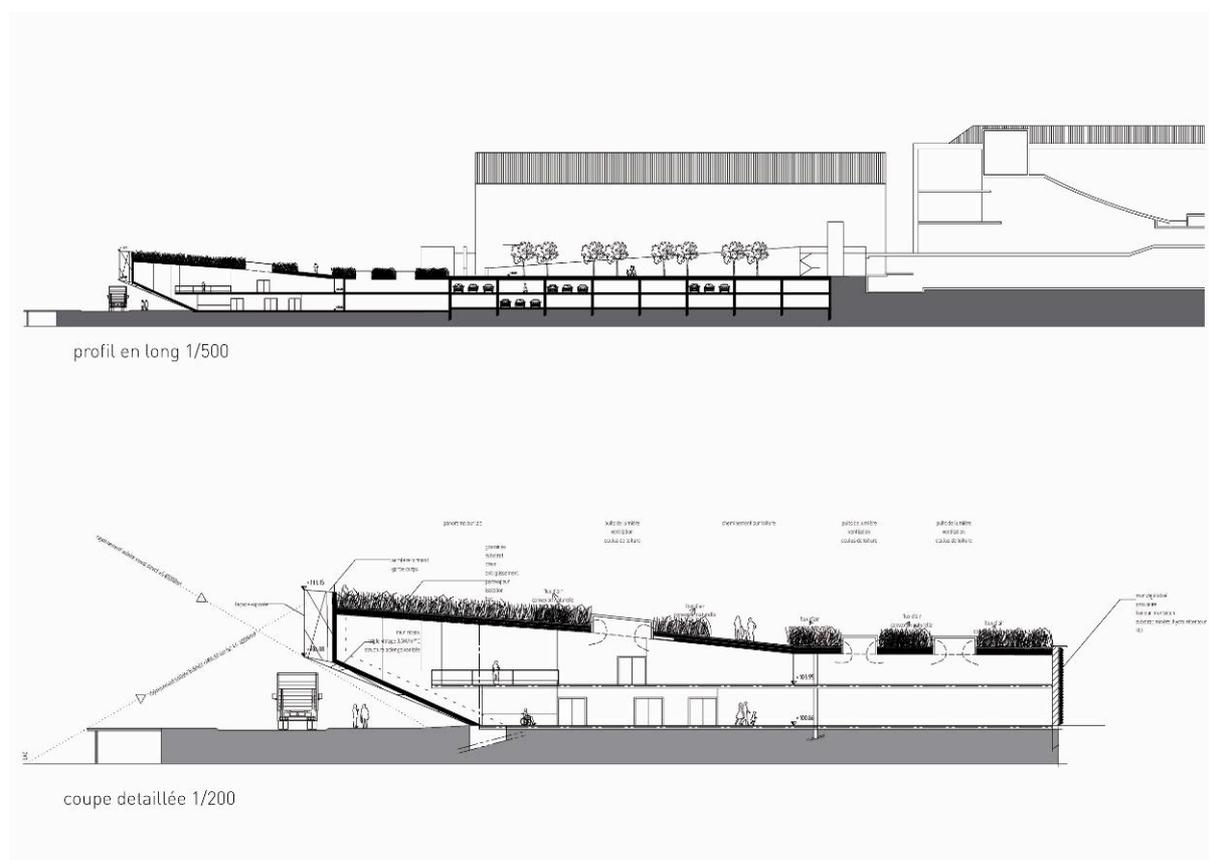


Figure 246. Coupes de principes.

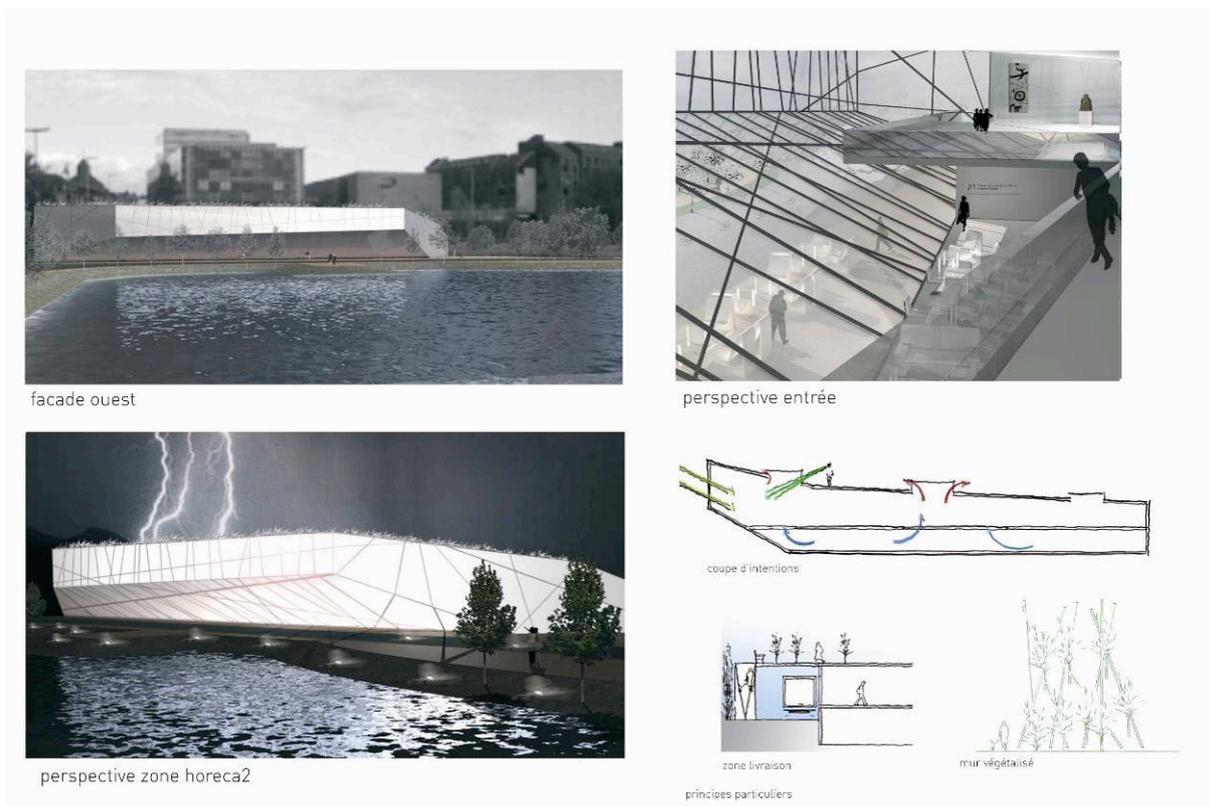


Figure 247. Ensemble de croquis et de perspectives.

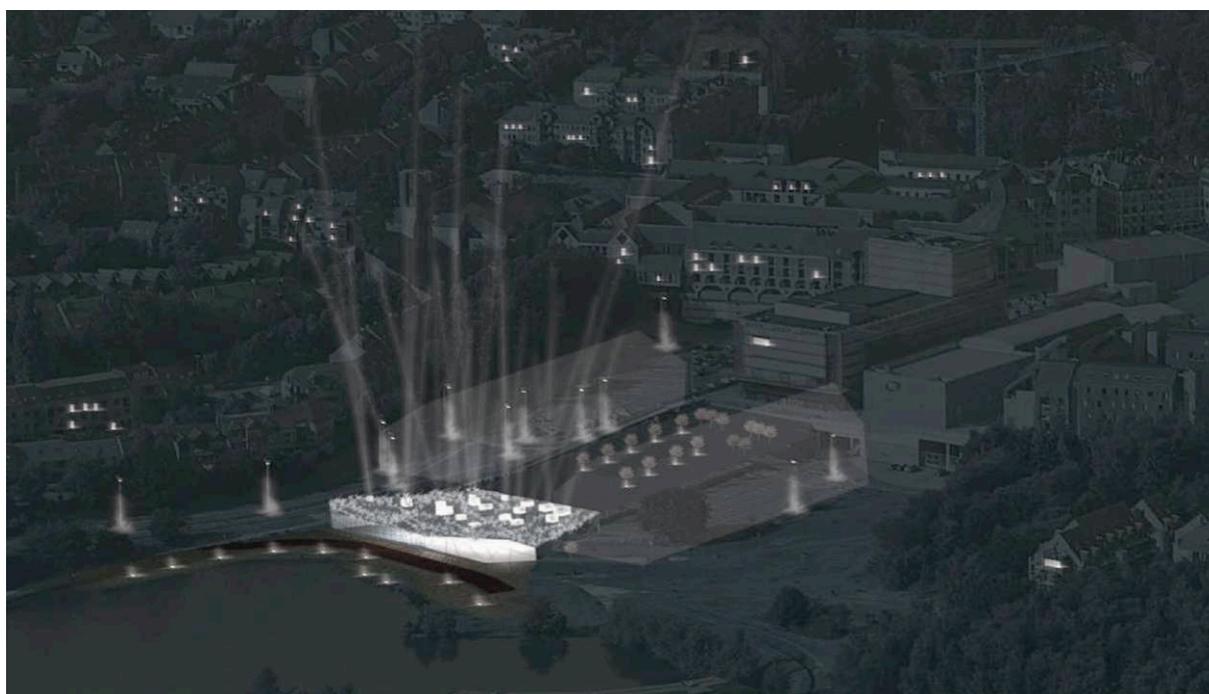


Figure 248. Vue perspective de nuit.

Glossaire

De'ForMS : (prononcer déforme)

Dispositif d'Elaboration de Formes par Opération de Recherche Morphologique. Outils d'aide à la conception architecturale utilisant des opérations morphologiques.

Concepteur :

Personne chargée de la conception (de projets, de productions, d'idées, etc.) dans une entreprise, une agence de publicité.(Robert, 1989)

Conception :

Processus créatif menant à la formalisation d'un projet.

Explicite :

Qui est réellement exprimé, formulé. (Robert, 1989)

Forme :

Ensemble des contours d'un objet, d'un être, résultant de la structure de ses parties.(Robert, 1989)

Implicite :

Qui est virtuellement contenu dans une proposition, un fait, sans être formellement exprimé, et peut être tiré par déduction ou induction.(Robert, 1989)

Maquette numérique :

Représentation géométrique numérique d'un projet en trois dimensions dans le but de l'analyser ou de le simuler.

Maxscript :

Langage de programmation propriétaire de type script pour Autodesk 3D Studio Max.

Morphologie :

Forme générale de l'objet géométrique étudié.

Nurbs :

Acronyme de Non-Uniform Rational B-Splines. Il s'agit d'une famille de courbes et de surfaces très souples permettant de modéliser des formes gauches comme des carrosseries de voitures par exemple. (Couwenbergh, 1998)

Opération géométrique :

Opération permettant de transformer ou de créer un ou plusieurs nouveaux objets à partir d'un objet géométrique. Une première catégorie d'opérations concerne les transformations géométriques de base (déplacement, rotation, symétrie, homothétie), qui peuvent s'appliquer à l'objet ou à une de ses parties : déplacement d'un sommet d'arête, rotation d'une arête de surface ou homothétie d'une face de solide. Dans une seconde famille, nous pouvons classer les opérations de création d'objets d'un type nouveau (implicite). Par exemple un ensemble d'arêtes coplanaires permettent de créer une face (fermeture) de façon automatique.

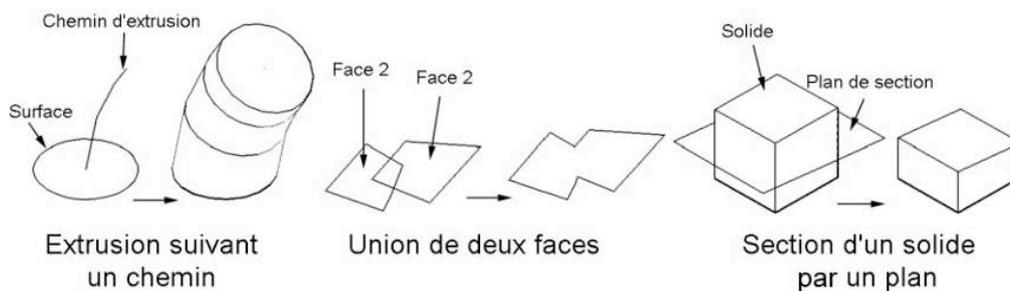


Figure 249. Opérations géométriques

Objets géométriques :

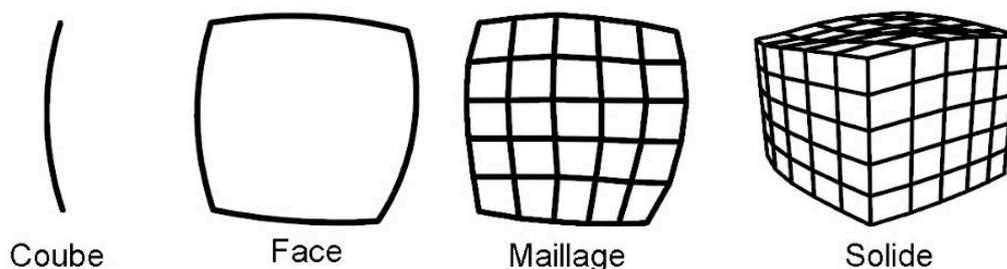


Figure 250. Objets géométriques

Objets servant de base à un processus de modélisation géométrique. De manière générale, on pourrait classer ces objets en trois familles: les courbes, les surfaces et les solides. Une surface est délimitée par un ensemble fermé de courbes et qu'un solide englobe un volume formé par un ensemble de surfaces adjacentes. Lorsqu'une surface est formée par des courbes non coplanaires, ce qui est assez fréquent, elle est découpée en mailles (notamment pour des besoins d'affichage) et on parle alors de maillage.

Tout objet géométrique peut être le support d'opérations qui permettent de le transformer ou de créer un ou plusieurs nouveaux objets.

Opérateur morphologique :

Une opération de transformation morphologique utilise un savoir-faire gestuel. Celui-ci est identifiable à travers des verbes d'action comme bomber, courber, plier, plisser, pousser, tordre... Elles sont généralement les composées de plusieurs opérations géométriques et sont dotées d'un ensemble de paramètres géométriques (axe, angles, portée...) pouvant être valués afin de produire des résultats différents.

Opération morphologique :

Processus de transformation morphologique traduisant formellement une idée ou un concept à partir d'opérateurs morphologiques.



Figure 251. Opération morphologique

Paramètre géométrique :

Un paramètre géométrique est un élément d'information permettant de valuer et de décrire un opérateur morphologique.

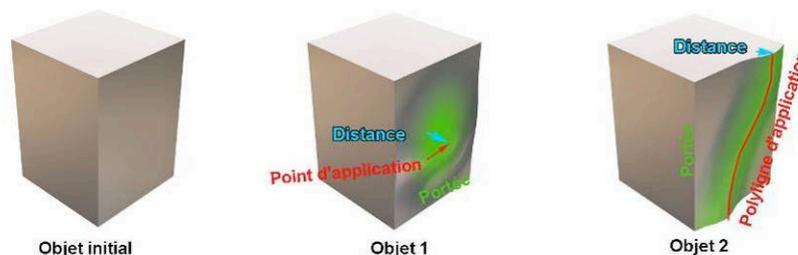


Figure 252. Exemple des paramètres de l'opérateur « Bomber ».

Plug-in :

En [informatique](#), un plugin est un [programme](#) qui interagit avec un [logiciel](#) principal, appelé programme hôte, pour lui apporter de nouvelles fonctionnalités.

Processus :

Ensemble de phénomènes, conçu comme actif et organisé dans le temps. (Robert, 1989)

Schème : (prononcer skim' en anglais)

Verbe d'action permettant de décrire un changement d'état du modèle morphologique au cours du processus de conception. (Définition Dominique Raynaud)

Chez Kant, représentation qui est l'intermédiaire entre les phénomènes perçus par les sens et les catégories de l'entendement. (Robert, 1989)

Sémantique :

Etude du langage considéré du point de vue du sens ; théorie visant à rendre compte des phénomènes signifiants dans le langage. (Robert, 1989)

Liste des figures

FIGURE 1. LE CONCEPTEUR MAGICIEN (BOÎTE NOIRE).....	4
FIGURE 2. LE CONCEPTEUR ORDINATEUR (BOÎTE DE VERRE).....	4
FIGURE 3. CYCLE DE CONCEPTION (CONAN, 1990).....	5
FIGURE 4. CYCLE DE CONCEPTION (ASIMOW, 1962).....	5
FIGURE 5. ARBRE DÉCISIONNEL (ROWE, 1987).	8
FIGURE 6. UTILISATION HEURISTIQUE DE L'IMAGE COMME BASE EMPIRIQUE À LA PRISE DE DÉCISION (ZEISEL, 1984).....	10
FIGURE 7. EXEMPLES DE MAQUETTES RÉALISÉES POUR LE BÂTIMENT DANCING HOUSE À PRAGUE, FRANK O. GEHRY.....	11
FIGURE 8. LISTE DE VERBES DE RICHARD SERRA 1967-68.(SERRA, 1990)....	13
FIGURE 9. LISTES DES SCHÈMES CARACTÉRISÉS PAR DOMINIQUE RAYNAUD (RAYNAUD, 1998).	14
FIGURE 10. EXEMPLE DE L'UTILISATION DU SCHÈME « ONDULER » PAR ALVAR AALTO DANS LA BIBLIOTHÈQUE VIIPURI (FRAMPTON, KORVENMAA, PALLASMAA, REED, & TREIB, 1998).....	15
FIGURE 11. COUPE DE LA BIBLIOTHÈQUE VIIPURI (LAHTI & HOLMA, 1996)....	15
FIGURE 12. CROQUIS ET PLANS MONTRANT LE GLISSEMENT DES ESCALIERS DE L'INTÉRIEUR VERS L'EXTÉRIEUR DU BÂTIMENT CONÇU PAR NORMAN FOSTER.(RAYNAUD, 1999).....	15
FIGURE 13. HIGH MUSEUM PAR RICHARD MEIER, ATLANTA (MEISS, 1986).. ..	16
FIGURE 14. PAVILLON PHILIPS, LE CORBUSIER, XENAKIS, EXPOSITION UNIVERSELLE DE BRUXELLES, 1958.	17
FIGURE 15. PHOTO DE LA MAQUETTE DU PAVILLON PHILIPS PRÉSENTÉE DURANT L'EXPOSITION TEMPORAIRE SUR LE CORBUSIER AU MUSÉE D'ART MODERNE ET CONTEMPORAIN DE LISBONNE (PHOTO : JEAN-CLAUDE BIGNON).....	18
FIGURE 16. TERMINUS DU TRAMWAY DE HOENHEIM PAR ZAHA HADID, STRASBOURG.....	18
FIGURE 17. DÉCOUPAGE PAR JET PLASMA-ARC D'ÉLÉMENTS EN ACIER POUR LE PAVILLON CONÇU PAR OOSTERHUIS.NL POUR L'EXPOSITION INTERNATIONALE D'HORTICULTURE LES FLORIADES 2002 À HAARLEMMERMEER AU PAYS-BAS (BOER & OOSTERHUIS, 2004).	19
FIGURE 18. REPRÉSENTATION DANS UN LOGICIEL 3D DU PAVILLON CONÇU PAR OOSTERHUIS.NL POUR L'EXPOSITION INTERNATIONALE D'HORTICULTURE LES FLORIADES 2002 À HAARLEMMERMEER AU PAYS-BAS (BOER & OOSTERHUIS, 2004).	19

FIGURE 19. BÂTIMENT CONÇU PAR OOSTERHUIS.NL POUR L'EXPOSITION INTERNATIONALE D'HORTICULTURE LES FLORIADES 2002 À HAARLEMMERMEER AU PAYS-BAS ("ARCHITECTURE NON STANDARD", 2003)	20
FIGURE 20. UN LOGICIEL DE CAO 2D/3D (AUTOCAD).	23
FIGURE 21. UN LOGICIEL ORIENTÉ OBJET (ARCHICAD).	24
FIGURE 22. DESSIN DU PROFIL DE LA CHAISE AVEC UNE « SPLINE »	25
FIGURE 23. DUPLICATION DES « SPLINES » SUIVANT UN RÉSEAU	25
FIGURE 24. RÉALISATION D'UNE SYMÉTRIE DU RÉSEAU DE « SPLINES »	25
FIGURE 25. MISE EN PLACE D'UNE « SECTION CROISÉE » EN VUE D'OBTENIR UN OBJET UNIFORME.	25
FIGURE 26. CRÉATION D'UNE SURFACE AVEC LES « SPLINES ».	26
FIGURE 27. APPLICATION DU MODIFICATEUR « COQUE » POUR DONNER UNE ÉPAISSEUR À LA SURFACE.	26
FIGURE 28. RÉALISATION DU PIED À L'AIDE D'UNE ÉDITION DU MAILLAGE EN UN POINT ET APPLICATION DU MODIFICATEUR « LISSAGE MAILLAGE ».	26
FIGURE 29. RÉALISATION D'UN CUBE ET SÉLECTION D'UNE FACE.	28
FIGURE 30. EXTRUSION D'UNE FACE DU CUBE DE DÉPART	28
FIGURE 31. EXTRUSION DANS L'AUTRE SENS D'UNE FACE	28
FIGURE 32. OPÉRATION D'UNE SYMÉTRIE SUR L'OBJET OBTENU	28
FIGURE 33. « LISSAGE DU MAILLAGE ».	28
FIGURE 34. EXEMPLE DE L'APPLICATION DU « MODIFICATEUR » « COURBURE » SUR UNE SURFACE.	29
FIGURE 35. EXEMPLE DE MODÉLISATION CSG.	30
FIGURE 36. EXEMPLE DE MODIFICATION D'UN OPÉRANDE D'UNE OPÉRATION BOOLÉENNE	31
FIGURE 37. EXEMPLE DU DÉPLIAGE D'UN CUBE SOUS CONTRAINTES DANS LE LOGICIEL CABRI 3D	31
FIGURE 38. PILE DE MODIFICATEURS DU MODELEUR 3DSMAX.	32
FIGURE 39. TABLEAU COMPARATIF DES FONCTIONNALITÉS DE LOGICIELS DE CAO.	33
FIGURE 40. CHAISE LONGUE « CHUMBY »	34
FIGURE 41. MODÉLISATION 3D SOUS AUTOCAD 2007 DE LA CHAISE « CHUMBY ».	34
FIGURE 42. MODÉLISATION 3D SOUS ARCHICAD 12 DE LA CHAISE « CHUMBY ».	35
FIGURE 43. MODÉLISATION 3D SOUS 3D STUDIO MAX 9 DE LA CHAISE « CHUMBY ».	35

FIGURE 44. MODÉLISATION 3D SOUS SKETCHUP 6 DE LA CHAISE « CHUMBY ».	36
FIGURE 45. TABLEAU DES RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION.	36
FIGURE 46. PHOTOGRAPHIE DE LA « CITÉ DE LA MUSIQUE ET DE LA DANSE » DE STRASBOURG, CONÇU PAR L'ARCHITECTE HENRI GAUDIN (SCOFFIER, 2007).	37
FIGURE 47. CROQUIS MONTRANT LE CONCEPT MIS EN PLACE PAR L'ARCHITECTE DURANT LA CONCEPTION DU VOLUME DE LA SALLE DE L'ORGUE (SCOFFIER, 2007).	37
FIGURE 48. MODÉLISATION 3D SOUS AUTOCAD 2007 DE LA SALLE DE L'ORGUE DE LA « CITÉ DE LA MUSIQUE ET DE LA DANSE » DE STRASBOURG.	38
FIGURE 49. ESSAI DE MODÉLISATION 3D SOUS ARCHICAD 12 DE LA SALLE DE L'ORGUE DE LA « CITÉ DE LA MUSIQUE ET DE LA DANSE » DE STRASBOURG.	39
FIGURE 50. MODÉLISATION 3D SOUS 3D STUDIO MAX 2009 DE LA SALLE DE L'ORGUE DE LA « CITÉ DE LA MUSIQUE ET DE LA DANSE » DE STRASBOURG.	39
FIGURE 51. MODÉLISATION 3D SOUS SKETCHUP 6 DE LA SALLE DE L'ORGUE DE LA « CITÉ DE LA MUSIQUE ET DE LA DANSE » DE STRASBOURG.	40
FIGURE 52. TABLEAU DES RÉSULTATS DE L'EXPÉRIMENTATION.	40
FIGURE 53. SKETCHPAD.	41
FIGURE 54. SPACEMAKER (LEE & DO, 2003).	42
FIGURE 55. GENOFORM.	43
FIGURE 56. DDDOOLZ (ACHTEN & VRIES, 2001).	44
FIGURE 57. VR SKETCHPAD (DO, 2001).	45
FIGURE 58. SKETCH (ZELEZNIK, HERNDON, & HUGHES, 1996).	45
FIGURE 59. SKETCH, SÉMANTIQUE DE LA FORME (ZELEZNIK, HERNDON, & HUGHES, 1996).	46
FIGURE 60. DIGITAL SANDBOX (DO, 2002).	47
FIGURE 61. DIGITAL SANDBOX, SÉMANTIQUE GESTUELLE (DO, 2002).	47
FIGURE 62. LA WII DE NINTENDO, ET L'IPHONE D'APPLE.	48
FIGURE 63. ESQUISE (JUCHMES & LECLERCQ, 2004).	48
FIGURE 64. « THE KITE » (PRANOVICH, WIJK, & OVERVELD, 2002).	49
FIGURE 65. BOÎTE ENGLOBANTE MACDRAW ET MANIPULATEUR DE 3D STUDIO MAX (PRANOVICH, WIJK, & OVERVELD, 2002).	49
FIGURE 66. MODÈLE.	53
FIGURE 67. EXEMPLE D'UN ESPACE DE SOLUTIONS FORMELLES, TERMINAL DE YOKOHAMA, FOREIGN OFFICE.	54
FIGURE 68. OBJETS GÉOMÉTRIQUES.	55

FIGURE 69. OPÉRATIONS GÉOMÉTRIQUES.....	55
FIGURE 70. EXEMPLE DE L'OPÉRATEUR « TORDRE ».....	56
FIGURE 71. EXEMPLE LA «GUARDIOLA HOUSE» DE PETER EISENMAN.	58
FIGURE 72. SUITE D'OPÉRATIONS RÉALISÉES PENDANT LA CONCEPTION DU BÂTIMENT DANCING HOUSE À PRAGUE, FRANK O. GEHRY.....	59
FIGURE 73. GINGER ROGERS ET FRED ASTAIRE DANCING HOUSE À PRAGUE, FRANK O. GEHRY.	59
FIGURE 74. SUITE DE MAQUETTES RÉALISÉES PENDANT LA CONCEPTION DU BÂTIMENT DANCING HOUSE À PRAGUE, FRANK O. GEHRY.	59
FIGURE 75. LA MAISON EMBRYONNAIRE DE GREG LYNN.....	60
FIGURE 76. RCR, EXEMPLE DU CHAI « BELL-HOE WINERY » CONSTRUIT EN ESPAGNE UTILISANT À PLUSIEURS REPRIS L'OPÉRATION « PLISSER » POUR LA CONCEPTION DE LA TOITURE.	61
FIGURE 77. EXEMPLE D'UNE OPÉRATION DE FROISSAGE SUR LA FAÇADE DU BÂTIMENT « FEDERATION SQUARE » RÉALISÉ PAR LAB ARCHITECTURE STUDIO À MELBOURNE (PHOTOS : JEAN-CLAUDE BIGNON).....	61
FIGURE 78. L'ECOLE D'ARCHITECTURE DE L'UNIVERSITÉ DE CORNELL, MORPHOSIS.....	61
FIGURE 79. GARE FERROVIAIRE ET ABRI À BICYCLETTES, FUKUI, JAPON, SHUHEI ENDO ARCHITECT INSTITUTE.	62
FIGURE 80. PHOTOS DE LA MAISON « HOUSE WITH ONE WALL » (CASCIANI, 2008).....	62
FIGURE 81. RECHERCHE FORMELLE EN PLAN À PARTIR DE CROQUIS (CASCIANI, 2008).....	62
FIGURE 82. RECHERCHE FORMELLE DE LA FORME DU MUR INTÉRIEUR DU R+2 À PARTIR DE PLIS (CASCIANI, 2008).....	63
FIGURE 83. EXEMPLE DE L'OPÉRATION « BOMBER » (SHADKHOU, 2007) POUR LE SIÈGE DE LA CONFÉRENCE ISLAMIQUE RÉALISÉ PAR OIC HEADQUARTERS À JEDDAH.	63
FIGURE 84. APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « BOMBER » SUR UNE SURFACE D'UN VOLUME, LA ZONE D'INFLUENCE EST DÉLIMITÉE PAR UNE ELLIPSE. (SHADKHOU, 2007).	65
FIGURE 85. APPLICATION DES OPÉRATEURS « ETIRER ET SERRER » SUR UNE PRIMITIVE STANDARD.....	65
FIGURE 86. EXEMPLE DU « MODIFICATEUR ONDE » DE 3D STUDIO MAX.	66
FIGURE 87. EXEMPLE DU « MODIFICATEUR TORSION » DE 3D STUDIO MAX.....	66
FIGURE 88. ANALYSE DE LA VARIATION DE LA FORME DES MURS.	69
FIGURE 89. ANALYSE DE LA VARIATION DES PLIS IMPLANTÉS SUR LE MUR INTÉRIEUR DU R+2.....	69
FIGURE 90. PLANS DU PROJET CONSTRUIT (CASCIANI, 2008).	69

FIGURE 91. MODÉLISATION DES ÉTAPES DE CONCEPTION PAR APPLICATION SUCCESSIVE DE L'OPÉRATEUR MORPHOLOGIQUE « PLIER ».	70
FIGURE 92. « THE NEW ZOLLHOF » À DUSSELDORF DE FRANK GERHY. ("FRANK GEHRY 1996-2003", 2003).	71
FIGURE 93. UNE DES PREMIÈRES MAQUETTES PRODUITE DURANT LA CONCEPTION DU « THE NEW ZOLLHOF » À DUSSELDORF DE FRANK GERHY (PHOTO : THOMAS MAYER).	71
FIGURE 94. MAQUETTES PLUS AVANCÉES PRODUITES DURANT LA CONCEPTION DU « THE NEW ZOLLHOF » À DUSSELDORF DE FRANK GERHY (PHOTO : THOMAS MAYER).	71
FIGURE 95. RECONSTITUTION DU DIAGRAMME FONCTIONNEL TRIDIMENSIONNEL DU BÂTIMENT « THE NEW ZOLLHOF » À DUSSELDORF DE FRANK O. GEHRY.	72
FIGURE 96. MAQUETTES PRODUITES DURANT LA CONCEPTION DU « THE NEW ZOLLHOF » À DUSSELDORF DE FRANK GERHY (PHOTO : THOMAS MAYER).	72
FIGURE 97. APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « BOMBER ».	72
FIGURE 98. MAQUETTES PRODUITES VERS LA FIN DE LA CONCEPTION DU « THE NEW ZOLLHOF » À DUSSELDORF DE FRANK GERHY (PHOTO : THOMAS MAYER).	73
FIGURE 99. APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « TORDRE » SUR LA PARTIE HAUTE DE LA GÉOMÉTRIE.	73
FIGURE 100. APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « POUSSER ».	73
FIGURE 101. APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « BOMBER ».	74
FIGURE 102. « THE ZOLLHOF » MODÉLISÉ.	74
FIGURE 103. SUCCESSION D'OPÉRATEURS PERMETTANT LA MODÉLISATION DE L'ENVELOPPE DE LA TOUR "TURNING TORSO" (S. CALATRAVA).	75
FIGURE 104. VARIATION DE LA TORSION POUR LA MODÉLISATION DE L'ENVELOPPE DE LA TOUR "TURNING TORSO" (S. CALATRAVA).	75
FIGURE 105. « ALUFELT CHAIR » PAR MARC NEWSON (PHOTO : JEAN-CLAUDE BIGNON).	76
FIGURE 106. PROCESSUS DE MODÉLISATION DE LA CHAISE DE MARC NEWSON À PARTIR D'OPÉRATEURS MORPHOLOGIQUES.	76
FIGURE 107. VARIATIONS DES OPÉRATEURS MORPHOLOGIQUES SUR LA CHAISE DE MARC NEWSON.	77
FIGURE 108. CHAISE « WICKER LOUNGE » (2000) DE MARC NEWSON.	77
FIGURE 109. « ZIG-ZAG CHAIR » PAR GERRIT RIETVELD.	78
FIGURE 110. PHOTOGRAPHIE ET CROQUIS DE LA « ZIG-ZAG CHAIR ».	78
FIGURE 111. SUITE DES OPÉRATIONS RÉALISÉES POUR LA MODÉLISATION DE LA « ZIG-ZAG CHAIR ».	79

FIGURE 112. VARIATIONS DES OPÉRATEURS MORPHOLOGIQUES SUR LA « ZIG-ZAG CHAIR ».	79
FIGURE 113. INTERFACE 3D STUDIO MAX ET LES MODIFICATEURS MORPHOLOGIQUES.	81
FIGURE 114. APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « PLIER » SUR UN MAILLAGE.	82
FIGURE 115. APPORT D'UN OPÉRATEUR « PLIER » SUR LA CONTINUITÉ DU MAILLAGE.	82
FIGURE 116. PRINCIPE DE PLIAGE N°1.	83
FIGURE 117. PRINCIPE DE PLIAGE N°2.	84
FIGURE 118. PRINCIPE DE PLIAGE N°3.	84
FIGURE 119. PRINCIPE DE PLIAGE N°4.	85
FIGURE 120. PRINCIPE DE PLIAGE N°5.	85
FIGURE 121. GÉOMÉTRIES INITIALES.	86
FIGURE 122. GÉOMÉTRIES OBTENUES APRÈS APPLICATION DU PRINCIPE DE PLIAGE N°3.	87
FIGURE 123. GÉOMÉTRIES OBTENUES APRÈS APPLICATION DU PRINCIPE DE PLIAGE N°5.	87
FIGURE 124. EXEMPLE D'UNE PLIEUSE DE TÔLE.	88
FIGURE 125. MISE EN PLACE DU PLAN DE PLIAGE.	89
FIGURE 126. SECTION DU VOLUME ET CRÉATION D'ARÊTES D'INTERSECTION SUR LE PLAN DE PLIAGE.	89
FIGURE 127. DÉPLACEMENT DES POINTS LE LONG DE LEURS ARÊTES VERS LE PLAN BISSECTEUR.	89
FIGURE 128. GÉOMÉTRIE OBTENUE.	90
FIGURE 129. DÉPLACEMENT DE L'AXE DE PLIAGE SUIVANT LA VALEUR ANGULAIRE DU PLI.	90
FIGURE 130. APPORT D'UN ALGORITHME DE PROPAGATION DANS LE PROCESSUS DE DÉCOUPAGE DU MAILLAGE.	90
FIGURE 131. PARAMÈTRES DE L'OPÉRATEUR « PLIER ».	91
FIGURE 132. DÉFINITION DE L'AXE DE CONTRÔLE PAR DEUX POINTS.	92
FIGURE 133. DÉFINITION DE L'AXE DE CONTRÔLE PAR DEUX AXES.	92
FIGURE 134. DÉFINITION DE L'AXE DE CONTRÔLE PAR DEUX POINTS D'IMPACT.	93
FIGURE 135. EXEMPLE DE L'APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « PLISSER » SUR UN MAILLAGE AVEC 4 PLIS.	93
FIGURE 136. EXEMPLES.	94
FIGURE 137. PARAMÈTRES D'UNE FONCTION DE PLISSAGE DANS UN MODELEUR TRADITIONNEL.	94

FIGURE 138. LE MUSÉE JUIF DE BERLIN, DANIEL LIBESKIND.	95
FIGURE 139. L'ECOLE D'ARCHITECTURE DE L'UNIVERSITÉ DE CORNELL, MORPHOSIS.....	96
FIGURE 140. EXEMPLE D'UNE OPÉRATION DE « PLISSAGE » RÉGULIÈRE. ...	96
FIGURE 141. EXEMPLE DE LA GÉNÉRATION ALÉATOIRE D'UNE OPÉRATION DE PLISSAGE COMPOSÉE DE 4 PLIS.....	98
FIGURE 142. EXEMPLE DE VARIATIONS ALÉATOIRES DE L'OPÉRATEUR « PLISSER ».....	98
FIGURE 143. ALTERNATIVES SUPPLÉMENTAIRES OBTENUES PAR LA VARIATION DES PARAMÈTRES DE L'OPÉRATEUR « PLISSER ».....	99
FIGURE 144. PRINCIPE DE VALUATION D'UN PLI SUR UNE GÉOMÉTRIE PAR RAPPORT À UNE COURBE « NURBS ».....	100
FIGURE 145. EXEMPLE DE COURBE GÉNÉRATRICE LE MUSÉE JUIF DE BERLIN, DANIEL LIBESKIND.	100
FIGURE 146. EXEMPLE DE COURBE GÉNÉRATRICE L'ECOLE D'ARCHITECTURE DE L'UNIVERSITÉ DE CORNELL, MORPHOSIS.....	101
FIGURE 147. EXEMPLE D'UNE MODÉLISATION PAR « POLYLIGNE ».....	101
FIGURE 148. EXEMPLE D'APPLICATION DU TYPE DE FROISSEMENT À MODÉLISER.....	102
FIGURE 149. EXEMPLE D'APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « FROISSER » SUR UNE GÉOMÉTRIE AVEC UN SYSTÈME UTILISANT L'OPÉRATEUR « PLISSER ».....	103
FIGURE 150. EXEMPLE D'APPLICATION DE L'OPÉRATEUR « FROISSER » SUR UNE GÉOMÉTRIE AVEC UN SYSTÈME UTILISANT L'OPÉRATEUR « PLIER ».....	104
FIGURE 151. EXEMPLE D'UNE GÉOMÉTRIE FROISSÉE PAR L'OPÉRATEUR « FROISSER ».....	105
FIGURE 152. INTERFACE 3DSMAX REGROUPANT LES PARAMÈTRES DU « MODIFICATEUR » COURBURE.....	106
FIGURE 153. ECRAN TACTILE MULTIPOINT «SURFACE » DE MICROSOFT ...	106
FIGURE 154. BREVET RELATIF AU SYSTÈME MULTIPOINT MIS EN ŒUVRE DANS L'IPHONE D'APPLE.....	107
FIGURE 155. LE DISPOSITIF DE POINTAGE RENVOIE UN POINT 2D, D'UN POINT 3D.	107
FIGURE 156. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES PARAMÈTRES UTILISÉS DANS L'ALGORITHME.....	108
FIGURE 157. DÉMONSTRATION GRAPHIQUE DE L'ALGORITHME.	108
FIGURE 158. LE POINT LE PLUS PROCHE DU POINT DE VUE CORRESPOND AU POINT CLIQUÉ PAR L'UTILISATEUR.	109
FIGURE 159. LOCALISATION DES ZONES SENSIBLES PERMETTANT DE BASCULER DU MODE D'ÉDITION AU MODE NAVIGATION.	110

FIGURE 160. OPÉRATION DE DÉPLACEMENT DU POINT DE VUE VIA UNE INTERFACE TACTILE.....	110
FIGURE 161. GESTE PERMETTANT DE ZOOMER.	111
FIGURE 162. PRINCIPE DE DÉPLACEMENT SUIVANT UNE ORBITE 3D.....	111
FIGURE 163. GESTE PERMETTANT UNE ROTATION DU POINT DE VUE.....	112
FIGURE 164. DÉFINITION DIRECTE DU PLAN DE PLIAGE.	113
FIGURE 165. DÉFINITION D'UN PLI AVEC AXES DE CONTRÔLE.	113
FIGURE 166. DÉFINITION D'UN PLI AVEC POINTS D'IMPACT.	114
FIGURE 167. ROTATION DU PLAN DE PLIAGE PAR DEUX POINTS.	114
FIGURE 168. DÉTERMINATION DE LA VALEUR ANGULAIRE À DROITE DU PLAN DE PLIAGE DU PLI.	115
FIGURE 169. DÉTERMINATION DE LA VALEUR ANGULAIRE DE PLI AVEC INTERVENTION LE LONG DU PLAN DE PLIAGE.	115
FIGURE 170. INTERFACE DE L'OPÉRATEUR « PLISSER ».	116
FIGURE 171. EXEMPLE DE VARIATION DES PLS DE L'OPÉRATEUR « PLISSER » PAR L'UTILISATEUR.	117
FIGURE 172. MISE À L'ÉCHELLE D'UNE COURBE «NURBS » GRÂCE AU GESTE « ZOOMER ».	117
FIGURE 173. EXEMPLE D'UNE MODÉLISATION PAR « POLYLIGNE ».	118
FIGURE 174. INTERFACE DE L'OPÉRATEUR « FROISSER ».	119
FIGURE 175. COUPE MONTRANT LE SYSTÈME DE CIRCULATION DU MUSÉE GUGGENHEIM DE NEW-YORK (RAYNAUD, 1998).....	120
FIGURE 176. INTENTIONS DU PROJET.....	121
FIGURE 177. PLAN MASSE MONTRANT L'IMPACT DU MUSÉE SUR LA VILLE.	121
FIGURE 178. ENSEMBLE DES ALTERNATIVES ENVISAGÉES PAR LE CONCEPTEUR.....	122
FIGURE 179. DERNIÈRES VARIATIONS DU PROJET.....	122
FIGURE 180. VUE EN PERSPECTIVE DU PROJET.....	123
FIGURE 181. CROQUIS INITIAL ÉNONÇANT LES PRINCIPES FORMELS DE LA MAISON DOLL.	124
FIGURE 182. IMPLANTATION DE L'OPÉRATEUR « PLISSER » SUR UNE « BOÎTE ».	124
FIGURE 183. VARIATION DE L'ANGLE DU PLISSAGE.....	124
FIGURE 184. DÉPLACEMENT D'UN PLI DU PLISSAGE.....	125
FIGURE 185. AJUSTEMENT DE LA GÉOMÉTRIE GÉNÉRAL PAR AJOUT D'UNE « BOÎTE ».	125
FIGURE 186. ALIGNEMENT D'UN PLI DU PLISSAGE SUR LA « BOÎTE » AJOUTÉE.	125

FIGURE 187. VARIATION DE L'ANGLE DU PLISSAGE EN FONCTION DE LA PENTE DU TERRAIN.	126
FIGURE 188. VARIATION DE L'ANGLE DU PLISSAGE EN FONCTION DE LA PENTE DE L'ESCALIER DE LA MAISON.	126
FIGURE 189. AUGMENTATION DU NIVEAU DE DÉTAILS EN VUE DE CONSTRUIRE LA MAISON.	127
FIGURE 190. MAISON DOLL EN COURS DE RÉALISATION.	127
FIGURE 191. FORME INITIALE REPRÉSENTANT LE VOLUME MAXIMAL POUVANT ÊTRE OCCUPÉ PAR LE PROJET.	128
FIGURE 192. VARIATIONS DE LA FORME DE LA TOITURE PAR L'OPÉRATEUR « FROISSER » (VUE DE GAUCHE).	129
FIGURE 193. VARIATIONS DE LA FORME DE LA TOITURE PAR L'OPÉRATEUR « FROISSER » (VUE DE DROITE).	129
FIGURE 194. AJUSTEMENT DU RÉSULTAT 12 DES PLIS IMPLANTÉS PAR L'OPÉRATEUR « FROISSER » PAR LES ARCHITECTES.	130
FIGURE 195. AJUSTEMENT DU RÉSULTAT 14 DES PLIS IMPLANTÉS PAR L'OPÉRATEUR « FROISSER » PAR LES ARCHITECTES (VUE DE GAUCHE). .	130
FIGURE 196. AJUSTEMENT DU RÉSULTAT 14 DES PLIS IMPLANTÉS PAR L'OPÉRATEUR « FROISSER » PAR L'ARCHITECTE (VUE DE DROITE).	130
FIGURE 197. VUE PERSPECTIVE DU PROJET À LA FIN DU PROCESSUS DE CONCEPTION.	131
FIGURE 198. PERSPECTIVE EXTÉRIEURE DU PROJET DU MUSÉE.	131
FIGURE 199. MODIFICATEUR "BRUIT"	135
FIGURE 200. MODIFICATEUR "COMPRIMER"	136
FIGURE 201. MODIFICATEUR "COQUE"	138
FIGURE 202. MODIFICATEUR "COURBURE"	139
FIGURE 203. MODIFICATEUR "EFFILER"	140
FIGURE 204. MODIFICATEUR "EN SPHÈRE"	141
FIGURE 205. MODIFICATEUR "ETIREMENT"	142
FIGURE 206. MODIFICATEUR "INCLINER"	144
FIGURE 207. MODIFICATEUR "ONDE"	145
FIGURE 208. MODIFICATEUR "POUSSER"	146
FIGURE 209. MODIFICATEUR "RIDE"	147
FIGURE 210. MODIFICATEUR "TORSION"	148
FIGURE 211. « HOUSE T » DE L'ARCHITECTE JAPONAIS AKIHISA HIRATA ("ROOF DYNAMICS", 2008).	149
FIGURE 212. « NORA HOUSE » DES ATELIERS D'ARCHITECTURE T.I.T. TSUKAMOTO LAB ET BOW-WOW ("ROOF DYNAMICS", 2008).	149

FIGURE 213. SOUS FACE « FROISSÉE » DU «PRÉAU » DU MUSÉE DU QUAI BRANLY CONÇU PAR JEAN NOUVEL.	150
FIGURE 214. FEDERATION SQUARE À MELBOURNE CONÇU PAR LAB ARCHITECTURE STUDIO.	150
FIGURE 215. « HOUSE T » DE L'ARCHITECTE JAPONAIS AKIHISA HIRATA ("IDENTITÉ EUROPE", 2007).	151
FIGURE 216. « FUNERAL HALL » DE L'ARCHITECTE JAPONAIS TOYO ITO ("ROOF DYNAMICS", 2008).	151
FIGURE 217. « CENTER FOR ART » DE L'ARCHITECTE JAPONAIS ARATA ISOZAKI ("YEARBOOK 2003", 2004).	152
FIGURE 218. CENTRE DE LOISIRS DES ARCHITECTES B. INGELS ET J. DE SMEDT ("IDENTITÉ EUROPE", 2007).	152
FIGURE 219. PROJET INTULÉ « ENVIRONNEMENT ART FORUM IN ANNAKA » DE L'ARCHITECTE JAPONAIS SOSUKE FUJIMOTO ("YEARBOOK 2003", 2004).	152
FIGURE 220. « GALERIE 21-21 DESIGN SIGHT » DE L'ARCHITECTE TADAO ANDO (MARTIN, 2007).	153
FIGURE 221. «HIMURO HOUSE» DE L'ARCHITECTE KAZUHIRO KOJAMA ("YEARBOOK 2003", 2004).	154
FIGURE 222. «NANJING MUSEUM OF ART & ARCHITECTURE» DE L'ARCHITECTE STEVEN HOLL ("PERFORMING MUSEUMS", 2008).	154
FIGURE 223. « BESUCHERZENTRUM » DE L'ARCHITECTE HOLZER KOBLER ("SWISS PERFORMANCE 08", 2008).	155
FIGURE 224. «FAUSSES JUMELLES» DE L'ARCHITECTE ALEJANDRO ARAVENA ("DÉFORMATIONS", 2007).	155
FIGURE 225. MUSÉE DES SCIENCES NATURELLES DE ECHIGO- MATSUNOYAMA PAR L'AGENCE D'ARCHITECTURE TEZUKA ARCHITECTS ("YEARBOOK 2003", 2004).	156
FIGURE 226. PAVILLON SUISSE POUR L'EXPOSITION UNIVERSELLE DE SHANGHAI DE 2010 CONÇU PAR L'ARCHITECTE BUCHNER BRÜNDLER ("SWISS PERFORMANCE 08", 2008).	157
FIGURE 227. «MAISON GO» CONSTRUITE À THIONVILLE PAR L'AGENCE D'ARCHITECTURE PÉRIPHÉRIQUES ("DÉFORMATIONS", 2007).	157
FIGURE 228. «THE WAVE» IMMEUBLE DE LOGEMENT CONSTRUIT À ALMERE (PAYS-BAS) PAR L'ARCHITECTE RENÉ VAN ZUUK.	158
FIGURE 229. «DEYOUNG MUSEUM» DE L'AGENCE D'ARCHITECTURE HERZOG ET DE MEURON ("PERFORMING MUSEUMS", 2008).	158
FIGURE 230. «XITZHIMEN SKYSCRAPPER PROJECT» DE L'AGENCE D'ARCHITECTURE KIJO ROKKAKU ARCHITECT & ASSOCIATES ("SKETCH BOOK", 2004).	159
FIGURE 231. «DEYOUNG MUSEUM» DE L'AGENCE D'ARCHITECTURE HERZOG ET DE MEURON ("PERFORMING MUSEUMS", 2008).	160

FIGURE 232. ORGANIGRAMME DU MUSÉE.	161
FIGURE 233. COUPE LONGITUDINALE.	161
FIGURE 234. PLANS DU REZ-DE-CHAUSSÉE (GAUCHE) ET DE L'ÉTAGE (DROITE).	162
FIGURE 235. CROQUIS VISANT À CLARIFIER LES OUVERTURES ET L'IMPLANTATION DE LA MAISON SUR LA PARCELLE.	163
FIGURE 236. IMAGE MONTRANT LA PARTIE AVANT DU BÂTIMENT.	163
FIGURE 237. IMAGE MONTRANT LA PARTIE LATÉRALE DU BÂTIMENT.	164
FIGURE 238. IMAGE MONTRANT LA TOITURE.	164
FIGURE 239. PLANS DU REZ-DE-CHAUSSÉE.	165
FIGURE 240. PLANS DE L'ÉTAGE.	165
FIGURE 241. FAÇADES.	166
FIGURE 242. COUPES.	166
FIGURE 243. PLAN MASSE.	167
FIGURE 244. PLAN DU REZ-DE-CHAUSSÉE.	167
FIGURE 245. PLAN DU PREMIER ÉTAGE.	168
FIGURE 246. COUPES DE PRINCIPES.	168
FIGURE 247. ENSEMBLE DE CROQUIS ET DE PERSPECTIVES.	169
FIGURE 248. VUE PERSPECTIVE DE NUIT.	169
FIGURE 249. OPÉRATIONS GÉOMÉTRIQUES.	171
FIGURE 250. OBJETS GÉOMÉTRIQUES.	171
FIGURE 251. OPÉRATION MORPHOLOGIQUE.	172
FIGURE 252. EXEMPLE DES PARAMÈTRES DE L'OPÉRATEUR « BOMBER».	172

Bibliographie

Achten, H., & Vries, B. d. (2001, 18-19 May). *Multiple Sketch Users in DDDoolz*. Article présenté à la conférence ACCOLADE, Delft.

Alexander, C. (1977). *A Pattern Language*. USA: Oxford University Press.

Aoki, Y., & Inage, M. (2000). *Linguistic Operation System for Design of Architectural Form*. Article présenté à la conférence Fifth Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, Nijkerk, The Netherlands.

Architecture non standard. (2003). Paris: Centre Pompidou.

Asimow, M. (1962). *Introduction to Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Boer, S., & Oosterhuis, K. (2004, 8–10 September 2004). *Architectural Parametric Design and Mass Customization*. Article présenté à la conférence eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, ECPPM 2004, Istanbul, Turkey.

Borillo, M., & Goulette, J.-P. (2002). *Cognition et création, Explorations cognitives des processus de conception*. Sprimont: Mardaga.

Boudon, P. (1994). *Existe-t-il des opérations de conception architecturale ?* Paris: L'Harmattan.

Casciani, S. (2008, March). The Zürich Wall. *Domus*, 912, p54-59.

Conan, M. (1990). *Concevoir un projet d'architecture*. Paris: L'Harmattan.

Couwenbergh, J.-P. (1998). *La synthèse d'images*. Allieur: Marabout.

De Biasi, P. M. (2000). Manuscrits, Recherche, Invention,. *Genesis*, 14.

Déformations. (2007). *Technique et architecture*, 490.

Deleuze, G. (1988). *Le Pli - Leibniz et le Baroque*. Paris: Les Editions de Minuit.

Do, E. Y.-L. (2001, 8-11 July). *VR Sketchpad. Create Instant 3D Worlds by Sketching on a Transparent Window*. Article présenté à la conférence CAAD Futures, Eindhoven.

Do, E. Y.-L. (2002, 15-17 July). *Digital Sandbox, integrating landform making and analysis for landscape design*. Article présenté à la conférence Artificial Intelligence in Design, Cambridge.

Edmonds, E. A., & Candy, L. (2002). Creativity, Art Practice, and Knowledge. *Communications of the ACM*, 45(10), 91-95.

Ehret, P. (2006, Mai-Juin). Conception-représentation réalisation. *Archistorm*, n°19.

Ehret, P. (2007, Mai-Juin). Vers une nouvelle pratique architecturale. *Archistorm*, n°25.

Ehret, P. (2008, Juillet-Août). A propos d'aléatoire dirigé. *Archistrom*, n°32.

Epron, J.-P. (1981). *L'Architecture et la règle*. Bruxelles: Pierre Mardaga

Estevez, D. (2001). *Dessin d'architecture et infographie. L'évolution contemporaine des pratiques graphiques*. . Paris: CNRS Editions.

Frampton, K., Korvenmaa, P., Pallasmaa, J., Reed, P., & Treib, M. (1998). *Alvar Aalto, Between Humanism and Materialism*. New-York: Peter Reed.

Frank Gehry 1996-2003. (2003, 11/2003). *El Croquis*, 117, 307.

Funck, W. v., Theisel, H., & Seidel, H.-P. (2006). *Vector Field Based Shape Deformations*. Article présenté à la conférence SIGGRAPH 2006, Boston, Massachusetts, USA.

Gordon, W. J. J. (1961). *Synectics, the development of creative capacity*. New York: Harper.

Graves, M. (1977). The Necessity of Drawing: Tangible Speculation. *Architectural Design*, 47, 384-394.

Hamburger, B., & Thiebaut, A. (1995). *Ornement, Architecture et Industrie*. Bruxelles: Mardaga.

Hirschberg, U., Frühwirth, M., & Zedlacher, S. (2007). *Puppeteering architecture, Experimenting with 3D gestural design interfaces*. Article présenté à la conférence CAADFutures'07, Sydney, Australia.

Hoc, J.-M. (1987). *Psychologie cognitive de la planification*. Grenoble: Universitaires de Grenoble.

Huang, Y.-H. (1999, 5-7 May 1999). *A Cognitive Study of Shapes and Functions in Design Sketches: Simulating an Industrial Design Case by Neural Networks*. Article présenté à la conférence CAADRIA '99, Shanghai.

Identité Europe. (2007). *Technique et architecture*, 488.

Jones, J. C. (1970). *Design Methods*. New York: John Wiley and Sons.

Juchmes, R., & Leclercq, P. (2004). *A multi-agent system for architectural sketches interpretation*. Article présenté à la conférence Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces.

Lahti, M., & Holma, M. (1996). *Alvar Aalto*. Helsinki: Rakennusteitu Oy.

Lawson, B. (1994). *Design In Mind*. Oxford: Ed. Butterworth-Heinemann.

Lebahar, J.-C. (1983). *Le dessin d'architecte - simulation graphique et réduction d'incertitude*. (1ère édition ed.). Marseille: Editions Parenthèses.

Lee, M.-C., & Do, E. Y.-L. (2003, 24-27 October). *SpaceMaker - Creating Space by Sketching It*. Article présenté à la conférence ACADIA, Indianapolis.

Martin, J.-M. (2007). Il sarto e l'architetto. *Casabela*, 758.

- Meiss, P. v. (1986). *De la Forme au lieu*. Lausanne: Presses polytechniques romanes.
- Mitchell, W. J. (1990). *The Logic of Architecture : Design, Computation, and Cognition*. Cambridge: The MIT Press.
- Monedero, J. (2000). Parametric design: a review and some experiences. *Automation in Construction* 9, 369-377.
- Oosterhuis, K. (2006). The Octogon Interview: Octogon.
- Osborn, A. F. (1963). *Applied imagination; principles and procedures of creative problem-solving*. New-york: Scribner.
- Performing Museums. (2008). *Lotus International*, 134.
- Pernot, E. (2008). *Proposition d'un opérateur morpho-sémantique : "onduler"*. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, Nancy.
- Piaget, J. (1936). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Paris: Delachaux et Niestlé.
- Pollack, S. (Writer) (2006). Esquisses de Frank Gehry. In T. W. Mirage Entreprises, New York's American Masters et LM Media GmbH. (Producer). United States.
- Porada, S. (1994). *"Au carrefour des arts et des sciences, création spatiale en image de synthèse"*. Article présenté à la conférence L'image de synthèse : Valeur scientifiques, valeur esthétique., Paris.
- Pranovich, S., Achten, H. H., Vries, B., & Wijk, J. J. v. (2005). Structural Sketcher - Representing and Applying Well-Structured Graphic Representations in Early Design,. *International Journal of Architectural Computing.*, 3(1), 75-91.
- Pranovich, S., Wijk, J. J. v., & Overveld, K. v. (2002, April 20 - 25). *The KITE geometry manipulator*. Article présenté à la conférence Conference on Human Factors in Computing Systems, Minneapolis.

Prost, R. (1992). *Conception architecturale, une investigation méthodologique*. Paris: L'Harmattan.

Raynaud, D. (1998). *Architectures comparées : Essai sur la dynamique des formes*. Marseille: Editions Parenthèses.

Raynaud, D. (1999). Le schème : opérateur de la conception architecturale. *Intellectica*, 35-69.

Robert. (1989). *Le nouveau petit Robert 1990. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française* Paris: Dictionnaires Le Robert.

Roof Dynamics. (2008). *JA, Japan Architect*, 69.

Rowe, P. G. (1987). *Design Thinking*. Cambridge: The MIT Press.

Schatz, F. (1997). Labilité des objets de conception. In *Les Objets en Conception*. Paris: Utopia.

Scoffier, R. (2007, Octobre 2007). "eXistenZ" Cité de la musique et de la danse, Strasbourg. *D'ARCHITECTURES*, 82-87.

Serra, R. (1990). *RICHARD SERRA : Ecrits et entretiens 1970-1989* (G. Courtois, Trans.). Paris: Galerie Lelong.

Shadkhou, S. (2007). *Morphogenèse architecturale, proposition d'un opérateur morphosémantique « Bomber »*. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, Nancy.

Shi, L., Yu, Y., Bell, N., & Feng, W.-W. (2006). *A Fast Multigrid Algorithm for Mesh Deformation*. Article présenté à la conférence SIGGRAPH 2006, Boston, Massachusetts, USA.

Simon, H. A. (1957). *Models of Man*. New York: John Wiley.

Simon, H. A. (1969). *La science des systèmes: science de l'artificiel*. Paris: Èpi.

sketch book. (2004). *JA, Japan Architect*, 53.

Swiss performance 08. (2008). *Archithese*.

Van Bruggen, C. (1998). *Frank O. Gehry Guggenheim Museum Bilbao*: Harry N. Abrams.

Vyzoviti, S. (2003). *Folding Architecture - Spatial, Structural and Organizational Diagrams*. Amsterdam: BIS Publishers.

Weinand, Y. (2004). *New modeling : projeter ensemble*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Wetzel, J.-P., Belblidia, S., & Bignon, J.-C. (2006). *A Study for Parametric Morpho-Semantic Operators to Assist Architectural Conception at the Drafting Stage*. Article présenté à la conférence CGIV06 / International Conference / 3rd Computer Graphics, Imaging and Visualisation Sydney, Australia.

Wetzel, J.-P., Belblidia, S., & Bignon, J.-C. (2008a, Sept 17th-20th). *Proposition of a model using parametric operations as an aid to the creation of architectural forms*. Article présenté à la conférence eCAADe 2008 - architecture 'in computro', Antwerp, Belgium.

Wetzel, J.-P., Belblidia, S., & Bignon, J.-C. (2008b, 7-10 July 2008). *Specification and implementation of a parametric operator : Folding*. Article présenté à la conférence 9th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, The Netherlands.

Xenakis, I. (1971). *Musique Architecture*. Paris: Casterman.

YearBook 2003. (2004). *JA, Japan Architect*, 52.

Zeisel, J. (1984). *Inquiry by Design: Tools for Environment-Behaviour Research*. Cambridge: Cambridge University Press.

Zelevnik, R. C., Herndon, K. P., & Hughes, J. F. (1996, 4-9 August). *SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes*. Article présenté à la conférence SIGGRAPH '96, New Orleans.