

Conception architecturale et modélisation paramétrique

Yasmine Ben Abdallah

▶ **To cite this version:**

Yasmine Ben Abdallah. Conception architecturale et modélisation paramétrique. Architecture, aménagement de l'espace. 2017. dumas-01807920

HAL Id: dumas-01807920

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01807920

Submitted on 5 Jun 2018

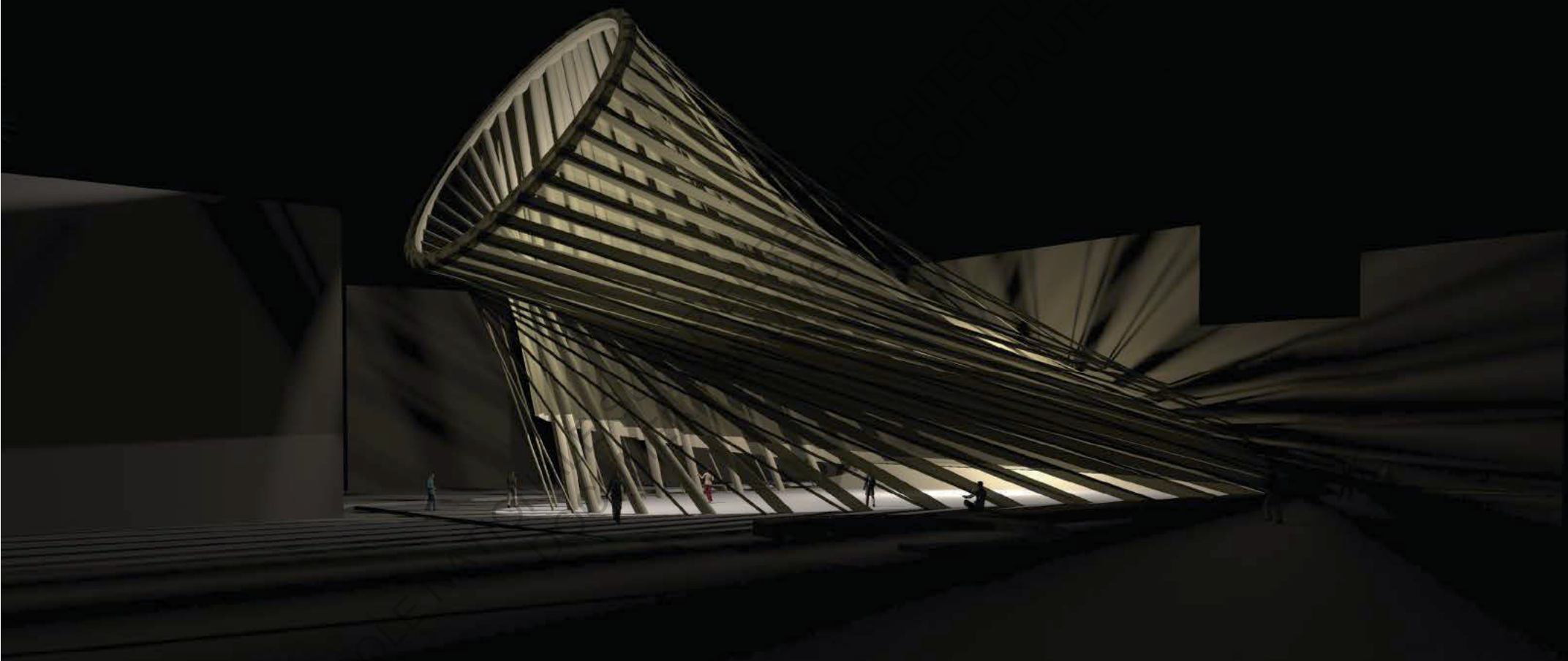
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

Copyright

CONCEPTION ARCHITECTURALE & MODÉLISATION PARAMÉTRIQUE

Ben Abdallah Yasmine



Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse
Université Fédérale de Toulouse Midi-Pyrénées

Mémoire de Master - Séminaire «Architectures Numériques» - 2017
Enseignants : Jean-Pierre Goulette - Bernard Fernies - Sandra Marques

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes directeurs de mémoire Monsieur Jean-Pierre Goulette, Madame Sandra Marques et Monsieur Bernard Ferriès. Je les remercie de m'avoir encadrée, orientée, encouragée, conseillée et aidée, surtout dans les moments difficiles.

Je voudrais également remercier Monsieur Bernard Ferriès et Monsieur Jean-Pierre Goulette de m'avoir initiée à la modélisation paramétrique et au BIM, qui ont révolutionné ma façon de voir et penser l'architecture.

Enfin, je voudrais remercier aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Table des matières

Introduction 4

I - L'outil paramétrique 8

1 - Les modeleurs paramétriques 10
2 - La modélisation paramétrique 16

II - Exploitation du paramétrique comme outil de conception pour l'architecture 24

1 - Origine et évolution de l'usage du paramétrique en conception architecturale 26
2 - Concevoir un « projet paramétré » 28
3 - Impacts de l'utilisation du paramétrique sur la conception de l'architecte 34
4 - Des difficultés et limites à connaître 42

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

III - Retour d'expérience : conception paramétrique du projet « Imposante légèreté » 52

1 - Orientation et émergence de l'idée première 54
2 - Première tentative de modélisation sur SketchUp 56
3 - Modélisation paramétrique de la structure sur Grasshopper 58
4 - Adaptation aux exigences du site et recherche de forme 60
5 - Évolution de la forme jusqu'à l'aboutissement à la proposition finale 62
6 - Ouverture à de nouvelles sensibilités et pratiques architecturales 66

Conclusion 68

Bibliographie 69

Table des illustrations 71

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

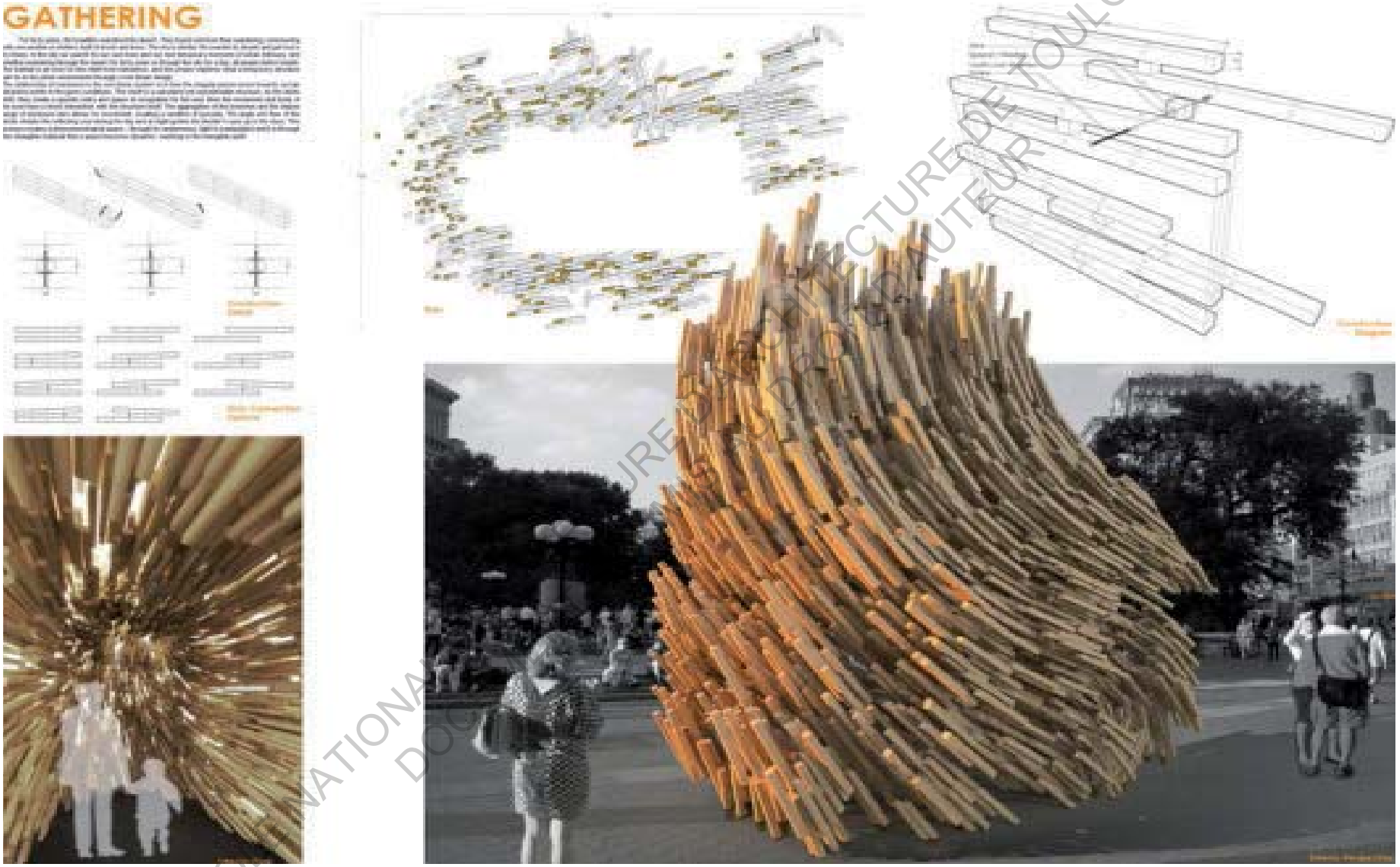


Figure 1 : Exemple de conception paramétrique : projet «Gathering» conçu par Dale Suttle, So Sugita, et Ginna Nguyen (New York).

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT PROTÉGÉ PAR LE DROIT D'AUTEUR

INTRODUCTION

Depuis plus d'un demi siècle, l'architecture s'inscrit dans un contexte de numérisation globale des outils et des pratiques. En effet, le développement remarquable des techniques numériques a eu un impact direct sur la conception et la construction de l'architecture et de la ville. Plus précisément, l'arrivée de la Conception Assistée par Ordinateur (communément appelée CAO) a ouvert le monde du bâtiment à de nouvelles sensibilités. Cette dernière, regroupant les logiciels et les techniques de modélisation géométrique, permet de concevoir, d'étudier, de tester virtuellement et de réaliser des produits manufacturés[1].

Dans ce cadre initial, « la conception paramétrique est une approche innovante du design numérique qui permet de générer des formes à géométrie complexe, à partir de l'exploitation d'une grande quantité de données. Ces données peuvent être de type environnemental, acoustique, structurel, social, urbain » [2], ou encore des paramètres ou contraintes fixés et imposés par les architectes et les concepteurs eux-même. La pratique de la conception paramétrique, autrefois réservée aux domaines pointus de l'aéronautique et de l'industrie automobile, s'est peu à peu ouverte au monde du bâtiment, pour devenir un usage courant pour de nombreux architectes. Ainsi, les pratiques se sont diversifiées et développées au cours du temps, et aujourd'hui l'architecture paramétrique met en évidence une nouvelle démarche de projet, impliquant des processus d'analyse, de conception et même de fabrications numériques propres.

Partant de ce constat, nous pouvons rapidement nous questionner sur les rôles nouveaux des architectes, qui ne sont finalement plus de simples créateurs de formes et d'espaces, mais deviennent organisateurs et coordinateurs d'une suite d'opérations complexes qui permettent d'étudier, d'interpréter et de transformer des données. Dans ce mémoire, il est ainsi question de se demander comment les nouvelles technologies numériques, et plus précisément comment la modélisation paramétrique, influe-t-elle sur la pratique de la conception architecturale ?

1 CAO : Définition simple et facile du dictionnaire [en ligne]. Disponible sur : < http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/cao/ > (Consulté le 10/04/2015).

2 CINGOLANI Francesco, unMonastery : Architecture paramétrique et collaborative (3 Septembre 2013) [en ligne]. Disponible sur : < http://www.immaginoteca.com/unmonasteryparametrique/ > (Consulté le 05/10/2015).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

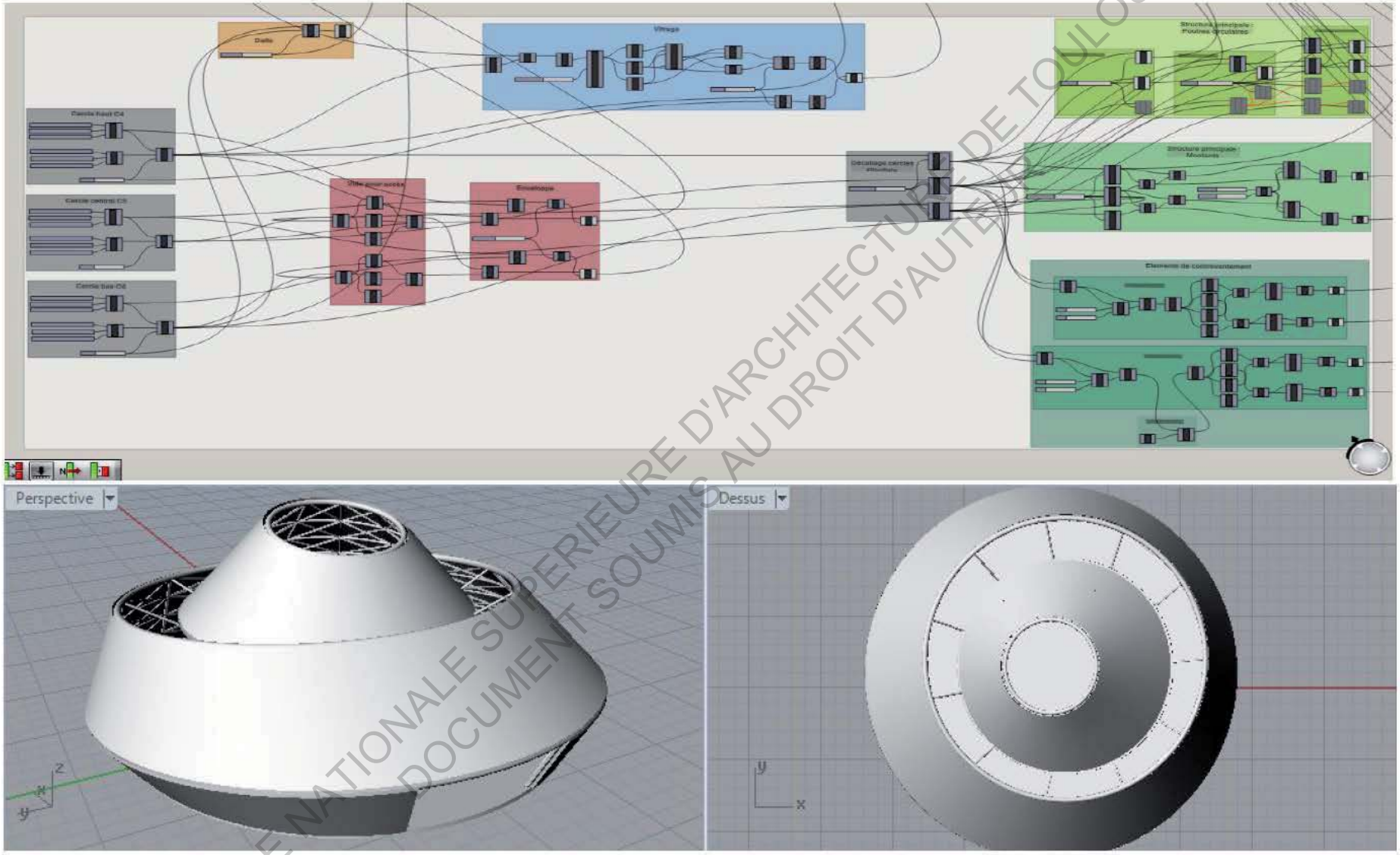


Figure 2 : Aperçu d'un projet d'étude conçu paramétriquement avec Grasshopper (dessus), et visualisé sur l'interface de Rhinocéros 3D (dessous) : Pavillon de production et d'exposition de maquettes physiques, projet réalisé dans le cadre du séminaire Architectures Numériques à l'ENSA Toulouse (2015).

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Axes de recherche

Comment le processus de modélisation paramétrique influe-t-il sur la conception architecturale ?

Nous nous intéressons ainsi dans cette recherche à l'influence de l'outil paramétrique sur l'architecture, et plus précisément sur la conception architecturale.

En premier lieu, nous définirons l'outil paramétrique ainsi que son mécanisme dans le processus de modélisation numérique : comment réaliser un modèle paramétrique, et avec quels outils ? Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons à l'usage du paramétrique dans la pratique de conception de l'architecte : comment ce dernier utilise-t-il cet outil ? en quel sens le paramétrique peut-il impacter sur le travail de l'architecte ? et quelles sont les limites de cette pratique ? Enfin, nous présenterons deux exemples de projets d'étude conçus avec l'aide des outils paramétriques, en décrivant pour chacun d'entre eux les enjeux de la conception architecturale et la modélisation paramétrée réalisée.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

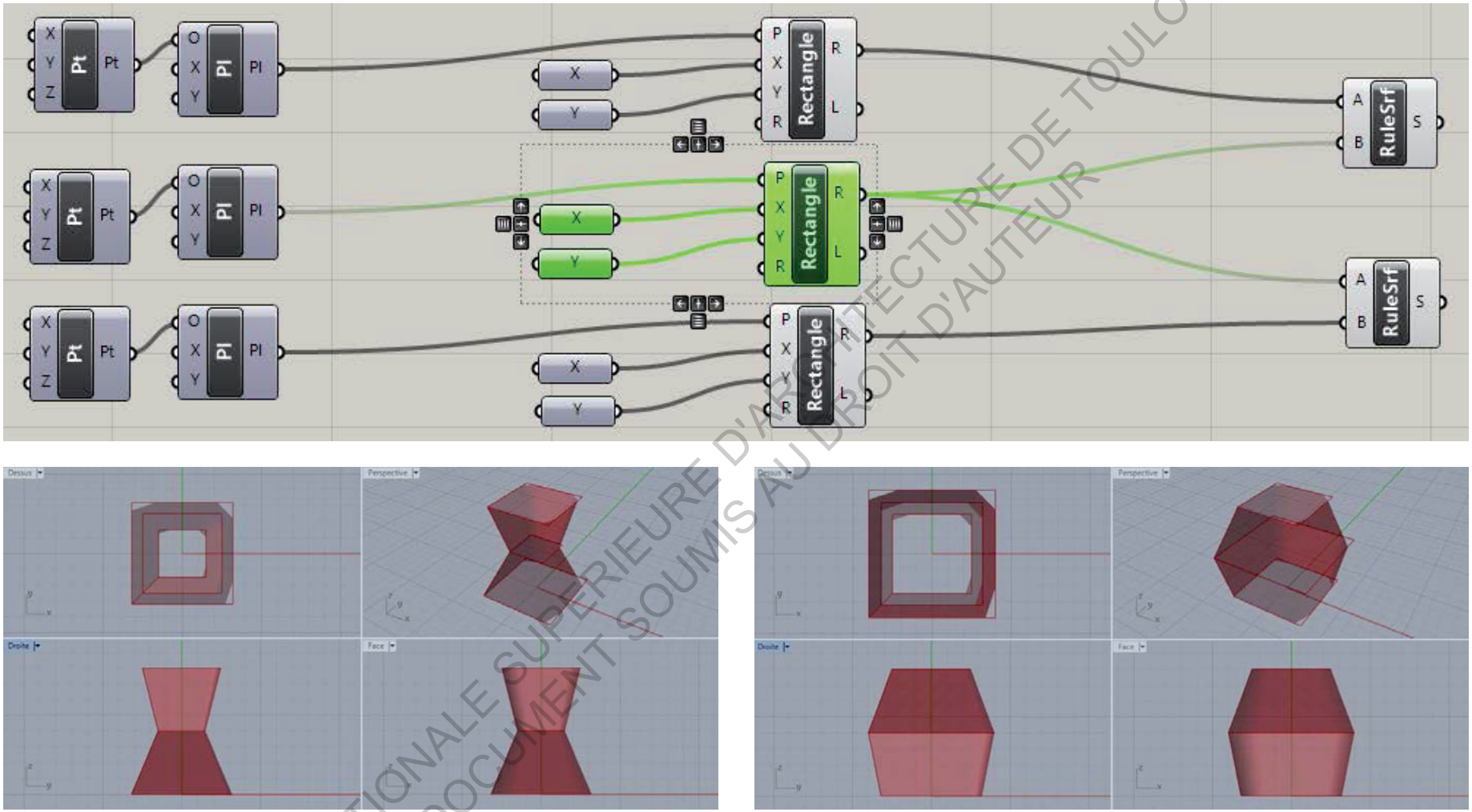


Figure 3 : Évolution d'un modèle paramétrique simple réalisé à l'aide de Grasshopper (haut) et visualisé sur Rhino (bas), suite à la modification d'un seul paramètre : la côte du carré central.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

I - L'OUTIL PARAMÉTRIQUE

Dans ce premier chapitre, nous proposons une présentation ainsi qu'une première réflexion quand à ce qui relève des modeleurs et de la modélisation paramétrique, par rapport à une modélisation dite directe. Dans un premier temps, nous identifierons et décrirons deux types de modeleurs paramétriques, pour ensuite préciser et expliciter les mécanismes liés au travail de modélisation (pour chacun de ces deux outils mis en valeur).

Commençons tout d'abord par définir la notion de paramétrique :

Paramétrique, *adj. inv.*
Qui contient un (ou des) paramètre(s), c'est-à-dire une « variable susceptible de recevoir une valeur constante pour un cas déterminé, et qui désigne certains coefficients ou certaines quantités en fonction desquels on veut exprimer une proposition ou les solutions d'un système d'équations. » [1]

Autrement dit, lorsque nous évoquons un modèle paramétrique, nous parlons d'un système dans lequel sont présents un ou plusieurs éléments (paramètres), dont on peut fixer la valeur pour une solution donnée (ces paramètres se distinguant donc de variables ou inconnues). Il s'agit donc ici de construire un modèle qui pourrait générer diverses et différentes solutions, et ce en fonction des valeurs définies pour chacun de nos paramètres. Ainsi, contrairement à une modélisation directe, il n'y a pas établissement et développement d'une unique solution dès la création du modèle. La modélisation paramétrique permet en effet au concepteur d'explorer différentes possibilités, puis de les enrichir et les affiner, jusqu'à aboutir au résultat le plus satisfaisant qui sera considéré comme la proposition finale. La figure 3 ci-contre illustre ce propos : il s'agit ici de l'exploration d'un même modèle paramétrique, très simple et réalisé sur Rhinocéros 3D et Grasshopper (logiciel de modélisation 3D et son plug-in, présentés à la page 14). Ce dernier a été généré à partir de trois carrés (représentés comme des rectangles dont les dimensions X et Y sont égales) liés entre eux par des surfaces, et dont le deuxième (central) a vu ses dimensions varier.

1 CNRTL (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales) : Paramétrique, Définition de paramétrique (2012) [en ligne]. Disponible sur : < http://www.cnrtl.fr/definition/paramétrique > (Consulté le 10/04/2015).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

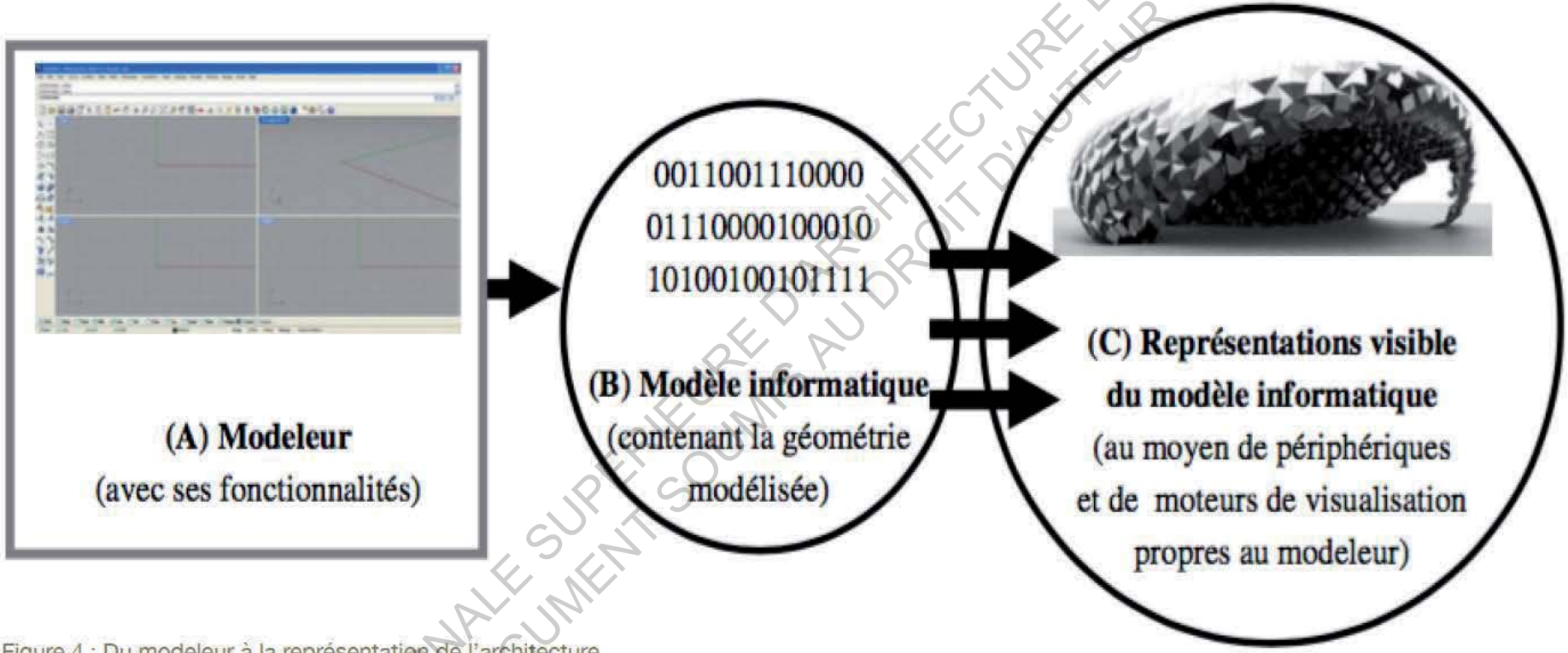


Figure 4 : Du modeleur à la représentation de l'architecture.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 - Les modeleurs paramétriques

Modeleur, *nm.*
« Logiciel informatique (figure 4.A) permettant de construire
un modèle géométrique numérique (figure 4.B), à partir duquel on produit
différentes représentations : visualisées sur des écrans, imprimées, exportées, etc. (figure 4.C). » [1]

Comme vu précédemment, un des éléments qui différencie la modélisation paramétrique de la modélisation directe est la possibilité d'explorer de très nombreuses solutions, parfois en nombre infini, pour un même processus génératif d'une forme (juste en modifiant certaines valeurs par exemple). Cette capacité est en réalité permise par la fonctionnalité principale d'un modeleur paramétrique : il offre au concepteur l'accès direct au modèle informatique (figure 4.B). Ce dernier peut ainsi manipuler directement le code générant la forme, c'est-à-dire le cœur de l'information-même du modèle, contrairement à un modeleur classique qui le contraint à effectuer des opérations précisément définies directement sur la forme géométrique. Dans ce deuxième cas les opérations sont comme figées, alors que dans le paramétrique « l'accès, même partiel, au modèle informatique, permet de générer facilement de multiples variantes d'une même géométrie » [1].

1.1 - Dans ce cadre précis, nous pouvons distinguer trois types de modeleurs paramétriques :

A - Les modeleurs «à base d'objets préconçus» : *Archicad, Revit, Vectorworks, etc.*
Très souvent dans ce premier type, l'accès aux données et paramètres est très limité, et en général seule une partie des paramètres du projet et des objets est accessible aux concepteurs, et donc nous sommes toujours limités à ceux que le logiciel nous permet de voir et modifier. En général, l'utilisation principale de ces modeleurs sont en rapport avec leurs fonctionnalités BIM, ils sont ainsi beaucoup moins performants en termes d'opérations et de formes complexes, et donc

1 DE BOISSIEU Aurélie, Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie. Architecture. Paris : Université Paris Est, ENSA Paris la Vilette, Juin 2013, p.23.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

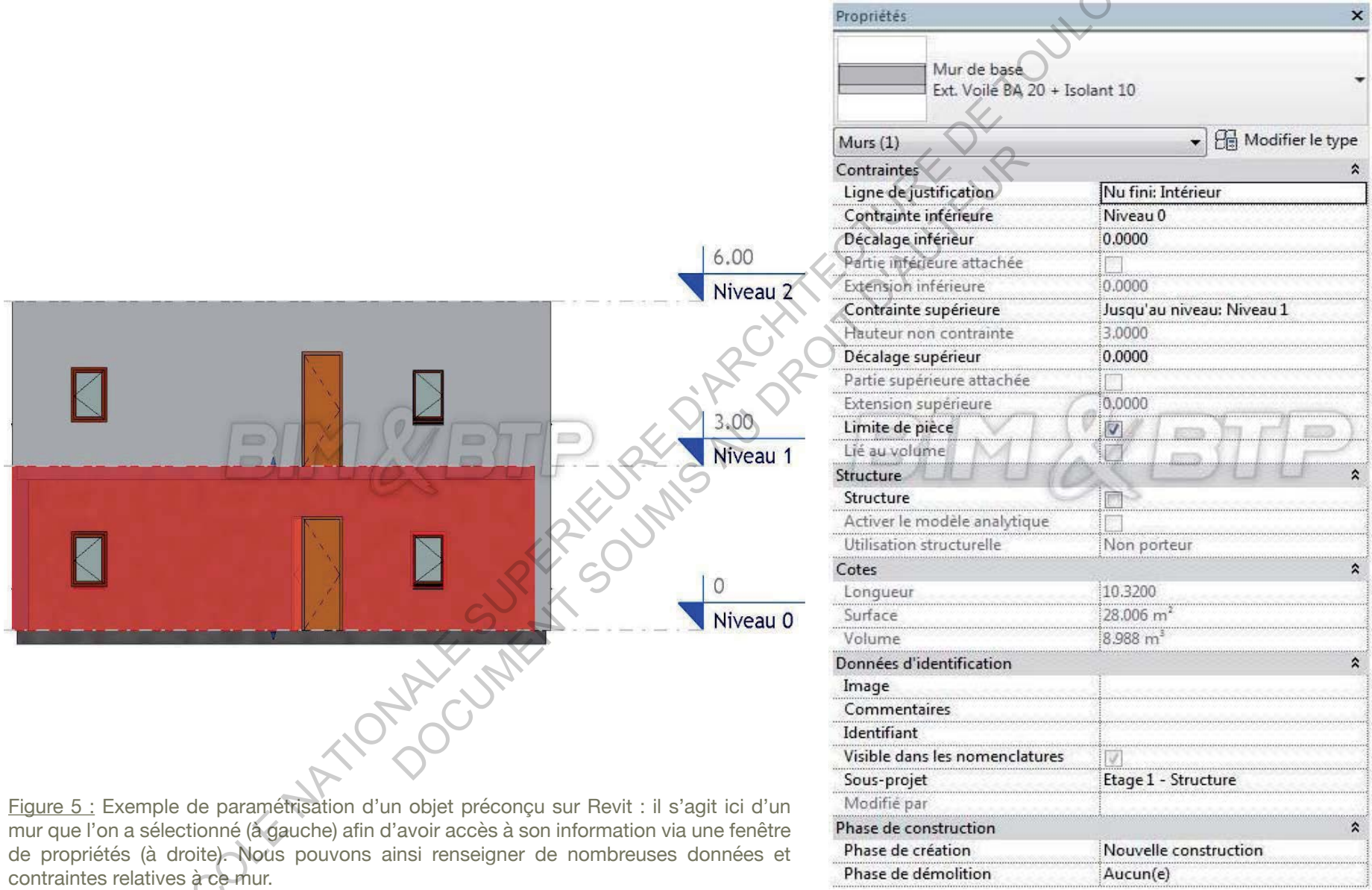


Figure 5 : Exemple de paramétrisation d'un objet préconçu sur Revit : il s'agit ici d'un mur que l'on a sélectionné (à gauche) afin d'avoir accès à son information via une fenêtre de propriétés (à droite). Nous pouvons ainsi renseigner de nombreuses données et contraintes relatives à ce mur.

BIM & BTP
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

le travail de modélisation se trouve plus rapide (le travail étant «pré-mâché»). La paramétrisation, quant-à-elle, concerne principalement les objets prédéfinis (là encore seulement une partie des paramètres) comme des murs, mobiliers, fenêtres, etc. dont nous pourrons paramétrer par exemple les dimensions ou matériaux (figure 5). Certains logiciels offrent néanmoins un peu plus de liberté de conception et paramétrisation : Revit (développé par Autodesk) a été l'un des premiers à offrir ces nouvelles fonctionnalités, qui nous permettent de créer de toutes pièces nos propres objets, et d'y indiquer certains paramètres que nous voulons modifiables par la suite. Aujourd'hui, la plupart de ces logiciels se sont mis à jour et offrent cette fonctionnalité. Mais cette méthode reste tout de même relativement lourde et longue, car il s'agit là finalement d'un travail de conception d'objets pré-réglés, tout comme ceux déjà proposés initialement par le logiciel (bibliothèque d'objets).

B - Les modeleurs «semi-restreints» : *Catia, 3DS Max, Autocad, Maya, etc.*

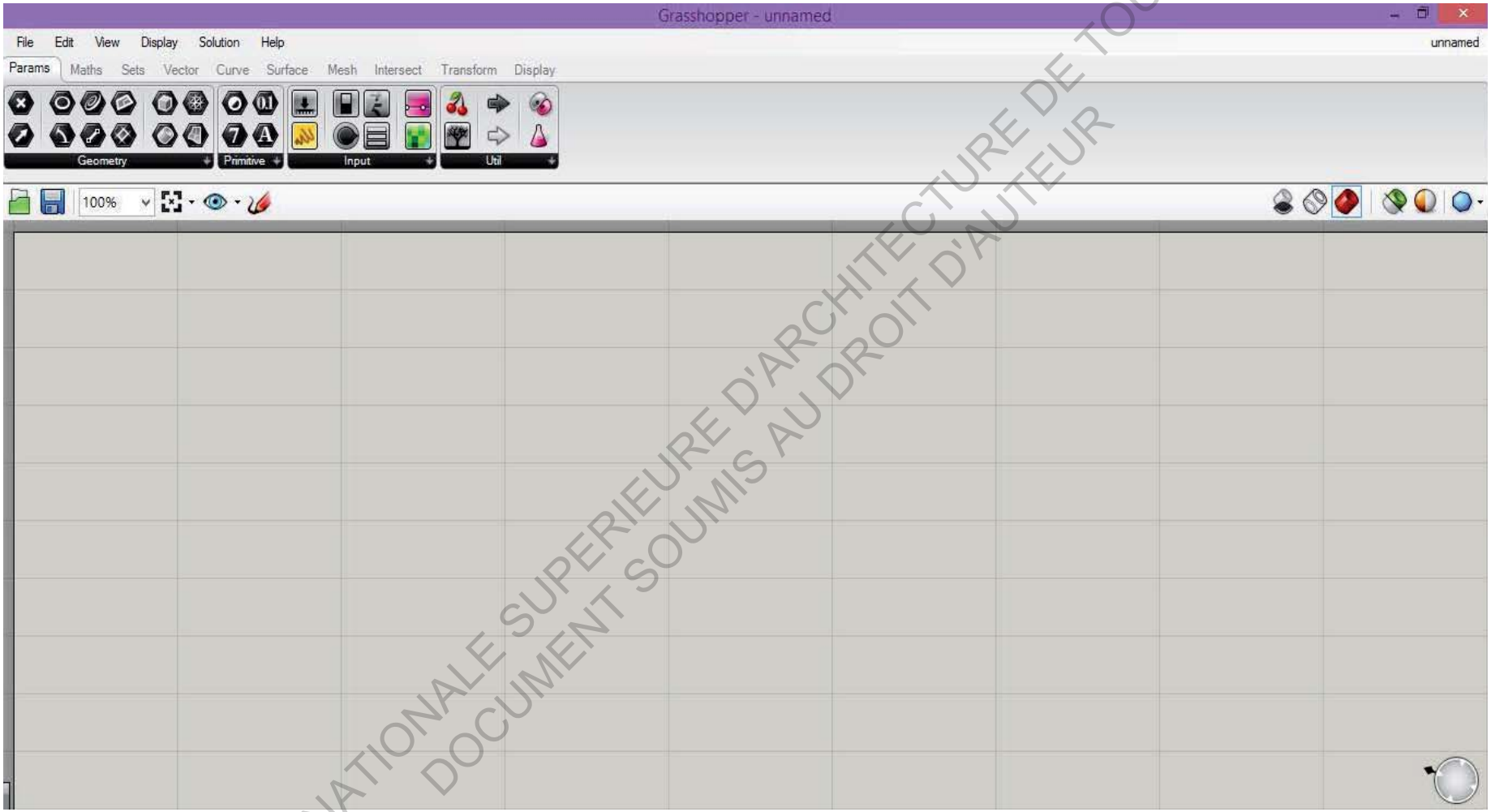
Ce sont ici des modeleurs qui offrent une plus grande liberté d'action et de conception vis-à-vis des modeleurs à base d'objets, mais toujours une paramétrisation plus réduite que les modeleurs libres. Nous pouvons ici établir plus de liens et de contraintes entre les objets, voire parfois créer une petite succession d'opérations à effectuer, avec possibilité de modification ultérieure. 3DS Max et Maya sont tous deux intéressants quant à la possibilité qu'ils offrent au concepteur d'intervenir sur les opérations enregistrées dans l'historique. Il faut tout de même garder en tête que ces modeleurs n'ont pas été initialement conçus pour le domaine de l'architecture, contrairement aux modeleurs à base d'objets (plus axés sur le BIM).

C - Les modeleurs «libres» : *Grasshopper (plug-in[1] de Rhinocéros 3D), Design Script, Generative Components, etc.*

Ces modeleurs sont les plus complets quant à la liberté de composition et paramétrisation qu'ils proposent. En effet, ils permettent un accès presque total aux données du modèle informatique, via un graphisme simplifié afin qu'il nous soit plus simple de paramétrer le modèle. Dans le cadre de la présente recherche, nous nous axerons spécifiquement sur ce type de modeleurs pour la liberté qu'ils peuvent offrir, et nous nous intéresserons plus particulièrement au cas de Grasshopper (via le logiciel de CAO Rhinocéros 3D), étant le modeleur sur lequel j'ai personnellement découvert et appris la modélisation paramétrique, et étant aussi l'un des plus complets et des plus utilisés aujourd'hui dans le domaine de l'architecture.

1 Un plug-in, appelé aussi module d'extension, est un programme complétant les fonctionnalités d'un logiciel.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Figure 6 : Interface de Grasshopper : la scène est l'espace central de travail, sur laquelle nous pouvons faire glisser des composants depuis la barre d'outils juste au dessus (classés par types de programmes).

1.2 - Présentation de Grasshopper, plug-in de Rhinocéros 3D :

« Choisi par des milliers d'architectes et designers dans le monde, plébiscité par les plus grandes agences dont BIG, Shigeru Ban, Zaha Hadid, Snohetta, Populous… Rhino est le modeleur surfacique et volumique le plus souple, le plus puissant et le plus rapide du marché. Associé à Grasshopper, il équipe autant les grandes agences d'architecture qu'il séduit par ses générations de formes non-standards, que les bureaux d'ingénierie qui apprécient ses puissants outils d'analyse. Egalement répandu dans l'univers aéronautique, l'automobile et le design produit en général, Rhino constitue l'outil favori des fablabs du monde entier. » [1]

Ce modeleur CAO et son plug-in ont été développés par Robert McNeel & Associates, et sont téléchargeables en libre accès (version d'évaluation 90jours pour Rhino, version complète pour Grasshopper). La première version de Grasshopper a été publiée en septembre 2007 et nommée à l'époque « Explicit History ». Il a plus tard évolué en tant que Grasshopper, extension de Rhinocéros 3D, pour finalement faire partie, à partir de Rhino 6.0, du jeu d'outils standard de ce dernier.

Aujourd'hui, Grasshopper offre une plateforme intuitive d'exploration du paramétrique, qui ne demande aucune connaissance de programmation ou d'écriture de script. Il s'agit en effet d'un environnement de programmation visuelle (notion développée page 20), libre, sans contraintes. Pour créer un modèle numérique, le concepteur est ainsi amené à faire glisser des composants (contenant des programmes) sur ce que nous pouvons définir comme la scène [2] de Grasshopper, puis à les organiser et créer des connexions logiques entre eux. Grasshopper est principalement utilisé pour créer des algorithmes génératifs d'une géométrie (2D ou 3D) plus ou moins complexe, mais les composants / programmes peuvent également contenir d'autres types d'algorithmes : textuels, audio-visuels, etc. Enfin, certaines fonctions plus avancées de Grasshopper permettent de réaliser une modélisation spécifique à l'architecture et sa fabrication, des études de structures, de consommation ou de performances énergétiques, etc.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 Rhino 3D : Accueil [en ligne]. Disponible sur : < https://rhino3d.abvent.com/#grasshopper > (Consulté le 20/02/2016).
2 Interface de Grasshopper sur laquelle nous pouvons construire le modèle paramétrique en manipulant ses composants.

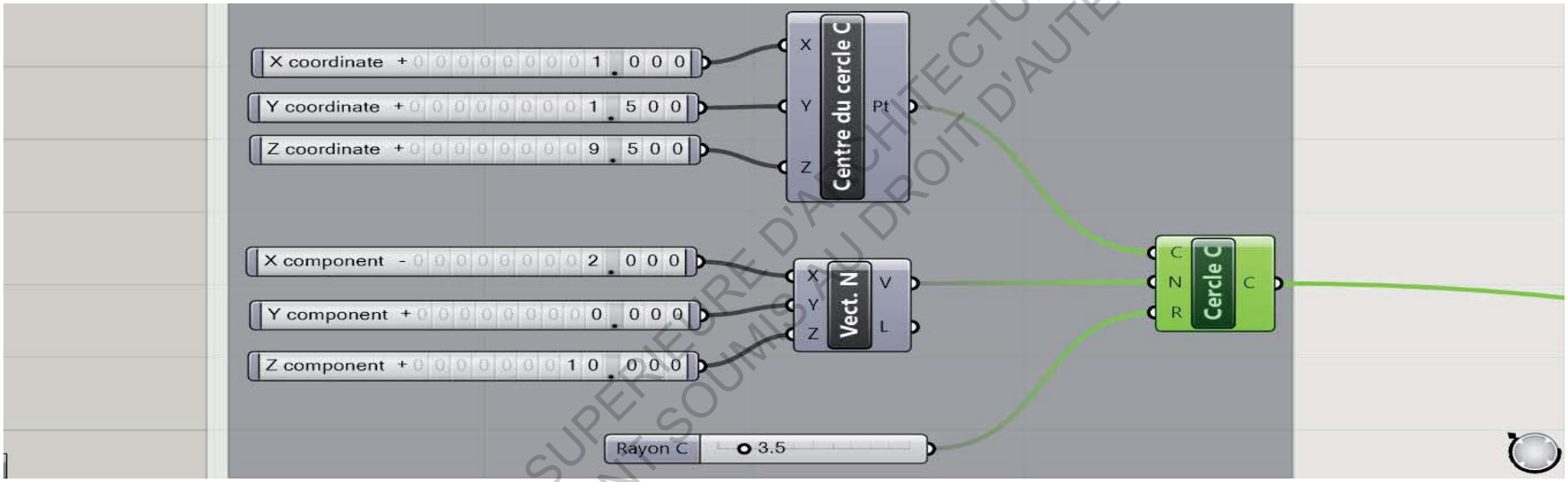


Figure 7 : Les composants (éléments) sont les blocs, chacun renfermant un programme. Le système de relations mis en place entre les éléments est représenté par les arcs qui les lie. Dans cet exemple, nous avons généré un cercle C (en surbrillance) en lui attribuant des données pour 3 de ses paramètres : son centre, son vecteur normal et son rayon.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2 - La modélisation paramétrique

Nous cherchons ici à définir plus en détails les caractéristiques de la modélisation paramétrique, toujours dans le cadre de l'analyse spécifique de Grasshopper. Ces caractéristiques sont importantes à connaître car elles permettent d'établir les grands principes d'utilisation des outils paramétriques par les concepteurs. Ainsi, après avoir défini la modélisation paramétrique dans un contexte général, nous étudierons de plus près l'interface de travail offerte par Grasshopper, dans le but d'en dégager des mécanismes de base pour la modélisation paramétrique sur ces derniers.

2.1 - Définition générale :

« Qu'est ce que la modélisation paramétrique ? » [1] est le titre qui dirige le deuxième chapitre du livre de Robert Woodbury (2010) [2]. Ce dernier consacre plus d'une dizaine de pages à la question, mais il n'y répond par une définition claire à aucun moment, et passe la plupart de ces pages expliquant le fonctionnement des modèles paramétriques dits « de propagation » (approche de la plupart des modeleurs paramétriques utilisés en architecture, notion qui sera développée page 22). Le propos le plus significatif que Woodbury énonce apparaît à la première page du chapitre : « la modélisation paramétrique introduit un changement fondamental : les « composants » (éléments), c'est-à-dire les *pièces de la conception*, sont liés par des relations et évoluent ensemble de manière coordonnée » [3]. L'auteur évoque ainsi ici un système basé sur des relations (également nommées contraintes) entre éléments (géométriques, numériques, etc.) (figure 7). Nous pouvons considérer ce système comme un ensemble d'équations mathématiques, qui une fois résolues, donne naissance à de nombreuses propositions de projet. Cette définition rejoint celle énoncée par De Boissieu [4] : « un modèle paramétrique est construit à partir d'un ensemble d'éléments mis en relation dans un système de dépendances».

1 Traduction française du titre original du chapitre 2 : « What is parametric modelling ? », Woodbury 2010, p.11 à 22.
2 WOODBURY Robert, Elements of Parametric Design, Routledge Editions, Londres, 2010.
3 "Parametric modelling introduces fundamental change: 'marks', that is, *parts of the design*, relate and change together in a coordinated way" (Woodbury 2010, p.11)
4 DE BOISSIEU Aurélie, Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie. Architecture. Paris : Université Paris Est, ENSA Paris la Vilette, Juin 2013, p.9.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

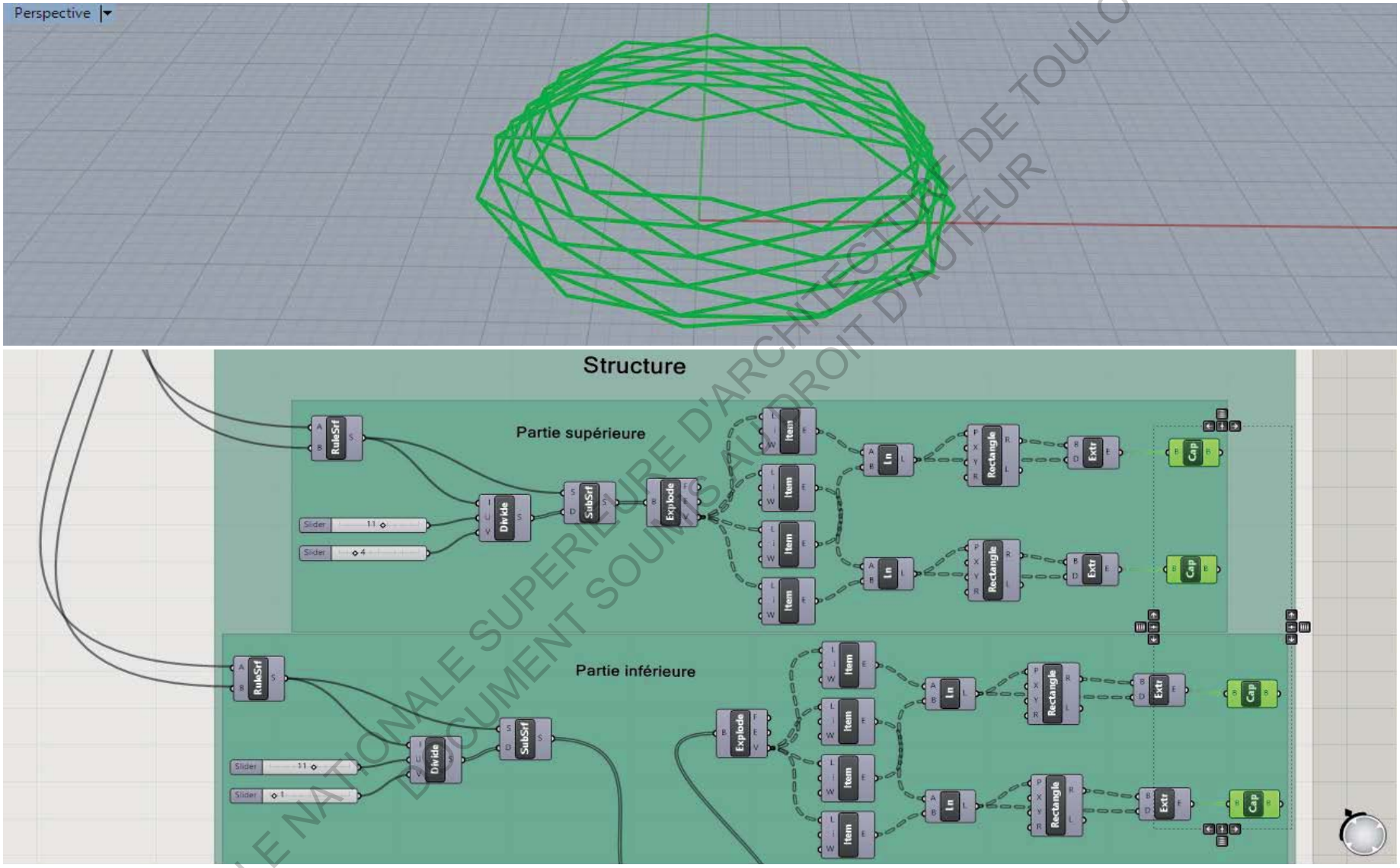


Figure 8 : Représentation explicite (haut) et symbolique (bas) d'une structure.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Un modèle paramétrique est donc conscient des caractéristiques de ses composants (paramètres) et des interactions entre eux. Il n'est pas figé, dans le sens où les paramètres qui le définissent sont constamment revisités, et il maintient les relations cohérentes entre ses éléments à mesure que le modèle est manipulé. Par exemple dans le cadre de la modélisation d'un bâtiment où les murs sont liés à la toiture, si la pente du toit est modifiée, les murs suivent automatiquement la ligne de toit révisée. Les composants étant modélisés avec des comportements et attributs réels, toutes les informations, données concernant un projet peuvent être regroupés au sein de son modèle paramétrique (à travers ses paramètres), celui-ci pouvant ainsi, en ce sens, être considéré comme sa pièce d'identité.

2.2 - Une information, deux représentations :

Nous pouvons à présent nous demander comment le concepteur visualise les différents paramètres et relations entre les données afin de mieux comprendre la manière dont il va travailler et interagir avec son modèle. Dans sa thèse de doctorat en informatique, Agbodan (2002) [1] définit un modèle paramétrique comme « une structure duale avec d'un côté les données et de l'autre le programme correspondant ». Ces deux notions renvoient à deux types de représentations qui nous sont offertes par les modeleurs paramétriques : la représentation « explicite » et la représentation « symbolique », qui renvoient finalement au même contenu (figure 8). La représentation explicite d'un modèle est la représentation graphique de sa géométrie, tandis que la représentation symbolique du modèle informatique est accompagnée d'algorithmes propres aux modeleurs, permettant de recalculer le modèle explicite (Boisseau, 2013). La représentation explicite est ainsi la plus simple d'accès, directement compréhensible et reconnaissable (vues 2D et 3D), tandis que la représentation symbolique constitue une représentation informée (paramètres, données, contraintes, etc.) du modèle, sur laquelle le concepteur peut intervenir pour transformer son objet. Ces deux représentations permettent de visualiser de manière concrète l'ensemble du projet dans tous ses aspects, toutes ses données, à travers toutes ses échelles - et tout cela en un seul et même modèle, qui devient alors le support principal du projet.

1 AGBOBAN Dago, Nomination persistante dans un modèle paramétrique, Identification non- ambiguë et appariement générique d'entités topologiques, Thèse de doctorat Université de Poitiers, Poitiers, 2002.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

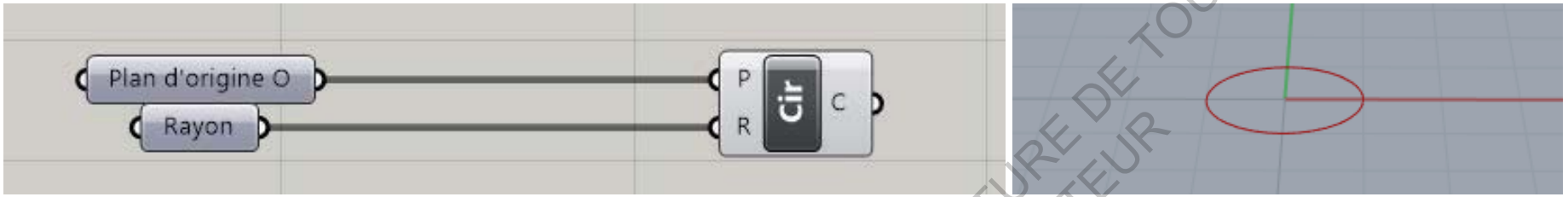


Figure 9.A : Génération d'un cercle à partir de deux paramètres : son plan de référence (dont l'origine sera le centre du cercle), et son rayon.

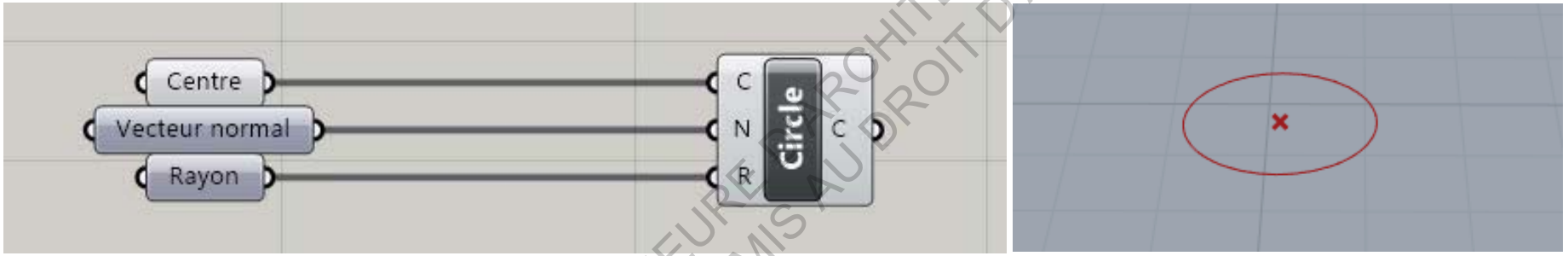


Figure 9.B : Génération d'un cercle à partir de trois paramètres : son centre, son vecteur normal et son rayon.

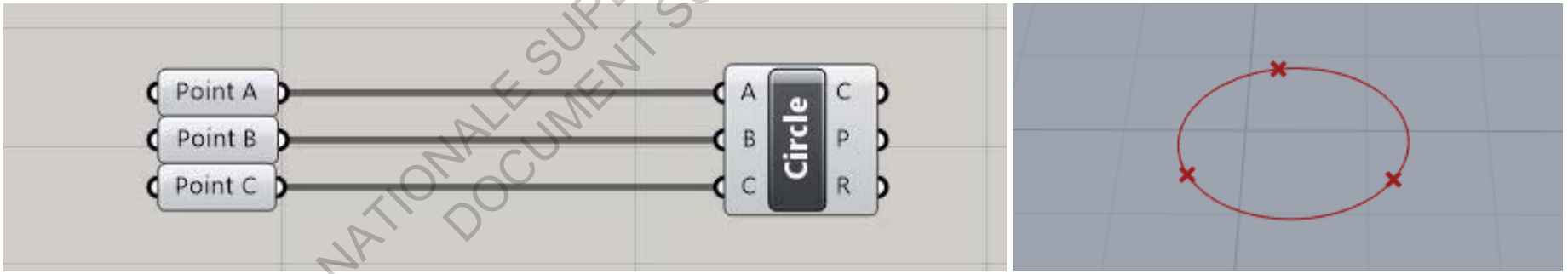


Figure 9.C : Génération d'un cercle à partir de trois données et une contrainte commune : le cercle doit passer par les trois points définis.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2.3 - Acte de modélisation avec Grasshopper :

Lors de son travail de modélisation, un concepteur est ainsi confronté à une représentation double de son projet. Mais bien que l'on retrouve une organisation générale similaire, en fonction du modeleur utilisé la manipulation différera. Dans le cas de Rhino et Grasshopper, l'interface de Rhino correspond à la représentation explicite du modèle qui permet de visualiser en temps réel le résultat de sa conception, et en parallèle l'interface de Grasshopper donne accès à la représentation symbolique en permettant au concepteur de décrire et développer son modèle à l'aide de composants (qui contiennent les données). Ces composants se présentent sous forme de blocs, correspondent à des programmes, et contiennent des paramètres d'entrée (à définir) et de sortie (aboutissement du programme sous forme de données). Pour un même type résultat attendu (sortie), il existe souvent différents composants, chacun exigeant des paramètres d'entrée spécifique, et contenant donc un programme générateur propre. Par exemple, pour générer un simple cercle il existe sept composants différents (trois d'entre eux sont présentés dans la figure 9).

Le processus de modélisation paramétrique correspond à un travail de programmation visuelle. En effet, la première étape du travail de modélisation paramétrique consiste en un choix quant aux composants à utiliser, en fonction des paramètres d'entrée et de sortie désirés. Le concepteur glisse ensuite les composants concernés sur la scène de Grasshopper et commence à renseigner les paramètres d'entrée : il leur attribue des données, valeurs de départ ou de référence, qui pourront être modifiés par la suite à tout moment. L'étape suivante consiste en une organisation et mise en relation de ces différents composants : le concepteur lie alors les paramètres de sortie de certains composants aux paramètres d'entrée de suivants par un flux de données. Par exemple (figure 9.C), les données de sortie de trois composants générant chacun un point peuvent être attribués aux données d'entrée d'un composant générant un cercle passant par ces trois points. Si l'un des points initiaux est modifié, le cercle sera automatiquement regénéré en fonction des modifications apportées, sur la base de la contrainte qui a été imposée. Dans Grasshopper toutes ces relations sont symbolisées par des « arcs » liant les différents paramètres entre eux. Bien évidemment, pour que les programmes soient correctement traités, ces liens ne peuvent être opérés qu'entre paramètres impliquant des données de même type (un point, une ligne, un volume, etc.).

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

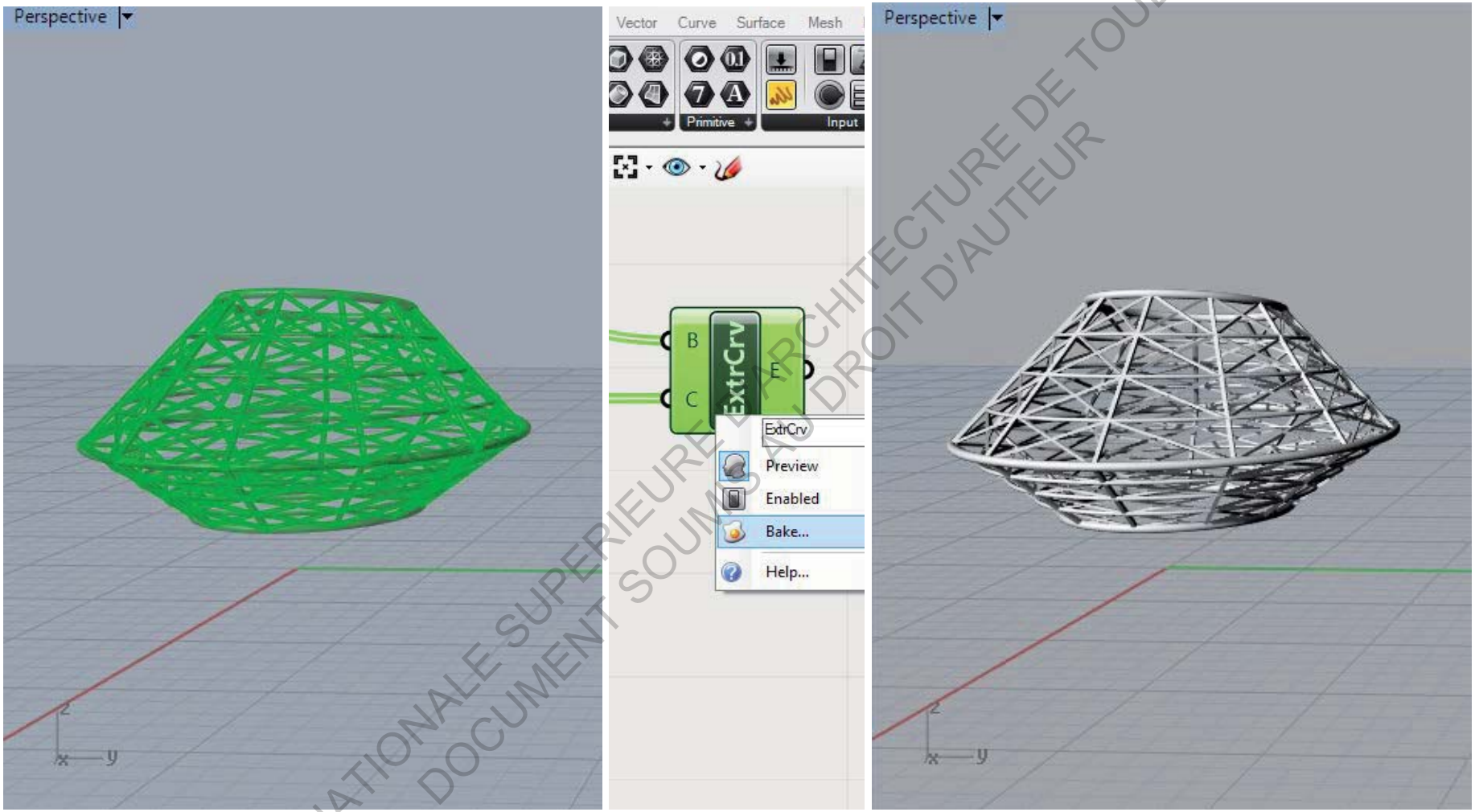


Figure 10 : Pendant la manipulation d'un modèle, la structure visualisée sur Rhino ne constitue qu'un aperçu de la géométrie que l'on est en train de concevoir (gauche). Après avoir opéré la fonction « bake », cette géométrie « se matérialise » dans Rhino (droite).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2.4 - Construction et résolution du système de relations :

Lors d'une modélisation paramétrique, un modeleur calcule constamment les programmes et données mis en œuvre. La construction et résolution du système de relations se fait ainsi en temps réel, selon une approche spécifique au modeleur utilisé. Il existe ainsi deux types d'approches paramétriques : variationnelle et fonctionnelle. La première « permet de traiter des paramètres et des contraintes indépendamment des opérations de construction géométrique et de leurs chronologies » (De Boissieu, 2013, p.33). Les équations peuvent ainsi y être calculées de manière indépendante et simultanée, contrairement aux problèmes fonctionnels qui sont résolus de façon séquentielle. Cette deuxième approche, et plus spécifiquement l'approche fonctionnelle basée sur la propagation, est la plus courante au sein des modeleurs utilisés pour l'architecture (dont Grasshopper), et est celle qui nous intéresse dans le cadre de cette étude. Il s'agit là pour le modeleur de résoudre les contraintes en suivant le « circuit » généré par le concepteur, c'est-à-dire la séquence d'opérations mise en place pour obtenir le modèle final. Dans ce schéma, les programmes étant dépendants, une contrainte ne peut donc être résolue avant une autre dont elle dépend. Le circuit généré est ainsi parcouru tel qu'il est construit pour être résolu, et on parle de propagation car les valeurs des paramètres y sont propagées selon un ordre précis, en partant de données indépendantes renseignées par le concepteur, et en suivant les différents programmes liés qui génèrent des valeurs de paramètres dépendants.

2.5 - Génération d'une géométrie « arrêtée » :

Une fois que le concepteur est satisfait du modèle généré et calculé, il doit le « figer » afin d'obtenir une géométrie « objet » sur l'interface de Rhino. En effet, lors de la manipulation d'un modèle avec Grasshopper, nous pouvons visualiser la géométrie résultante sur Rhino, mais celle-ci n'existe pas réellement en tant qu'objet, il s'agit seulement de l'affichage du résultat du « circuit » généré. Ainsi, si l'on désactive ou ferme le modèle Grasshopper, le visionnage sur Rhino s'arrête. Une option sur Grasshopper, appelée « bake », permet donc, une fois le modèle paramétrique achevé et arrangé, de générer une géométrie « arrêtée » sur Rhino (figure 10). Il s'agit ici de l'étape finale du travail de modélisation, la géométrie devenant fixe et indépendante du modèle qui l'a générée. A partir de là, la seule manipulation possible est une modification directe de l'objet géométrique (sur Rhino), celui-ci ayant perdu toute l'information concernant son historique de création et donc les données relatives au système de relations qui l'a généré.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Figure 11 : Image caractéristique, presque stéréotypée d'une architecture paramétrique. Projet de la tour de fibre de Kokkugia.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

II - Exploitation du paramétrique comme outil de conception pour l'architecture

Parler des possibilités de l'architecture paramétrique c'est par conséquent parler de tous les nouveaux modes de conception qu'elle implique. Qu'est ce que la conception paramétrique ? Un mode de conception élaboré à travers la notion de changements, changements dans les pratiques de l'architecture qui sont survenus durant les 50 dernières années. On peut penser à l'informatique, aux mathématiques, au langage de programmation, au codage, puis à l'arrivée de certains outils de modélisation et logiciels spécifiques. En parlant de paramétrique, nous pouvons ainsi évoquer différents termes associés : la géométrie associative, le script, la modélisation flexible, la conception algorithmique, etc. Tous ces termes renvoient à une notion en réalité commune, et leur diversité exprime l'importance croissante de la modélisation paramétrique dans le discours de l'architecture.

Découlant de l'évolution des outils utilisés par les architectes, on observe également aujourd'hui une adaptation des pratiques de projet. En effet, l'utilisation d'un modeleur paramétrique pour concevoir un projet architectural modifie grandement les méthodes classiques, aussi bien en phase et de conception et modélisation, que dans la gestion du projet et de ses éléments, ou encore la fabrication et construction. Dans cette deuxième partie, nous aborderons ce sujet d'un point de vue de la conception architecturale. Nous débuterons tout d'abord par un état de l'usage des outils paramétriques dans le domaine de l'architecture, avant de s'intéresser de plus près au processus de conception paramétrique, pour enfin en étudier les impacts sur le travail de l'architecte ainsi que les limites et difficultés rencontrées par ce dernier.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

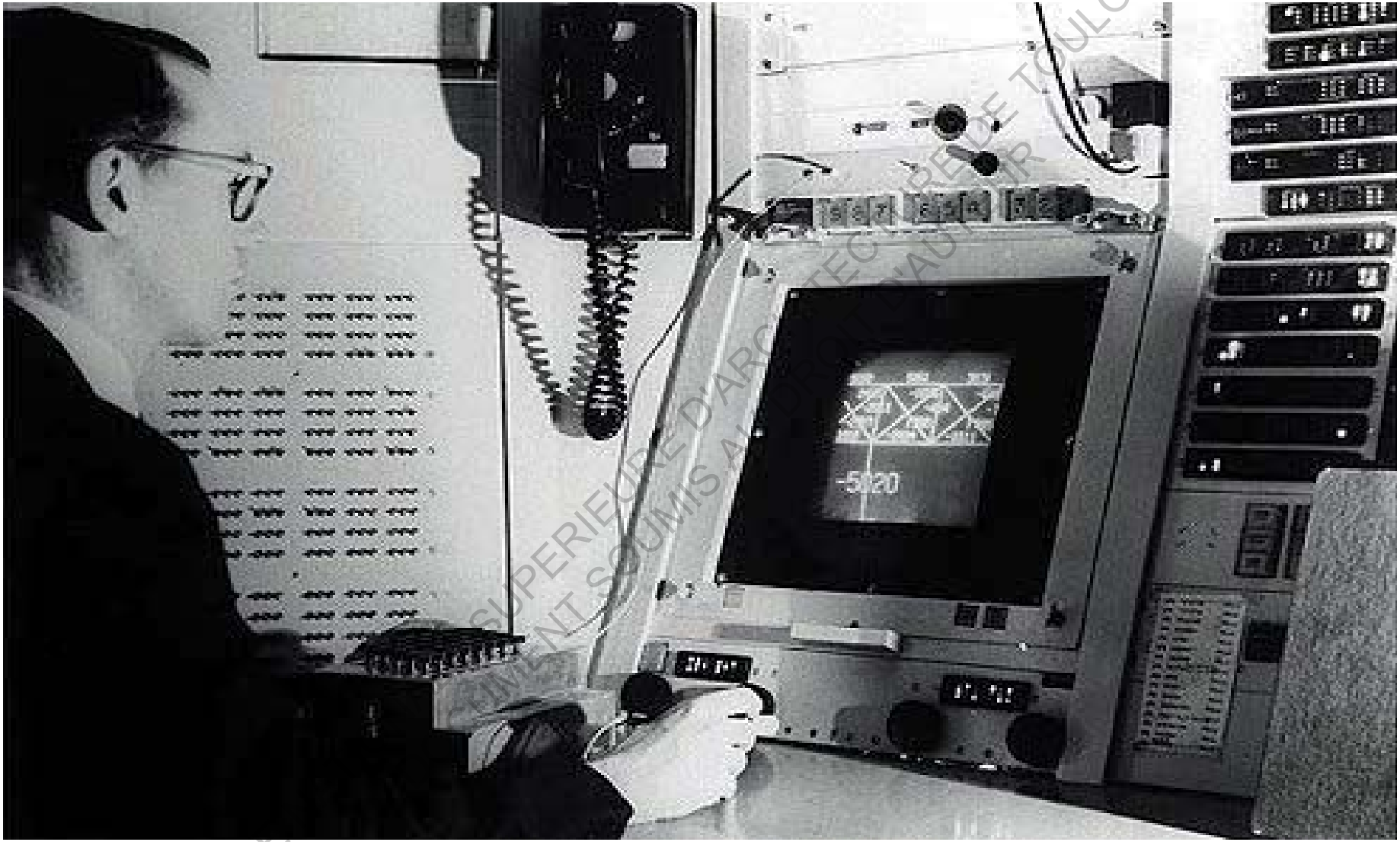


Figure 12 : Yvan Sutherland face à sa console Sketchpad. Sketchpad fonctionne à l'aide d'un stylet lumineux (dans sa main droite) et une boîte à commande avec de nombreux boutons poussoirs (face à lui). Les 4 boutons noirs sous l'écran servent à ajuster l'échelle et la position de l'image.

ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
TIMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 - Origine et évolution de l'usage du paramétrique en conception architecturale

Au commencement (le siècle dernier), l'informatique, les algorithmes et les simulations par ordinateurs ont été produits et utilisés dans des domaines comme les mathématiques, la physique, la biologie, les sciences sociales et bien d'autres, de manière à élaborer un niveau élevé de complexité, et capable de reproduire plusieurs fonctionnalités, que ce soit dans les systèmes abstraits mathématiques, les phénomènes économiques, la génération d'entités virtuelles, etc.

« L'un des foyers originels de la culture pré-numérique en architecture se situe dans le travail de Peter Eisenman[1] : en s'appuyant sur une somme théorique élaborée, il abordait le projet architectural à travers un processus que l'on pourrait qualifier de séquentiel. Ses démarches automatisaient une série de décisions (transposition de trames, décalages selon les trois axes, homothéties, etc.) donnant naissance à des enveloppes aux géométries séquentielles « déconstruites ». [...] Cette méthode de processus (*process based*) caractérise encore à bien des égards tout un pan de la culture numérique et paramétrique en architecture, à savoir la recherche d'une objectivité techno-conceptuelle reposant sur l'usage de diagrammes, d'algorithmes ou de scripts. Chez Eisenman, il ne s'agissait pas d'utiliser l'ordinateur pour une modélisation contrôlée, mais de voir la forme architecturale naître par le biais d'un ensemble d'automatismes. »[2.] Eisenman introduit ainsi l'idée d'une réflexion nouvelle sur le projet architectural, en abordant des notions comme la fragmentation et l'explicitation du processus de conception, par le biais d'algorithmes notamment.

Mais l'évolution de la pensée et de la pratique architecturale vers ces notions associées au paramétrique n'a pu se concrétiser que par le développement des outils utilisés par les architectes. En effet, dès 1960, nous observons l'émergence d'une recherche quant aux nouvelles capacités des logiciels de modélisation. Et c'est dans ce cadre qu'à l'université, Yvan Sutherland (Sutherland, 1963) (figure 12) aborde pour la première fois la question de la résolution des

1 Architecte et théoricien américain, devenu une figure majeure de la déconstruction architecturale (associée à un processus de design non linéaire, elle s'attaque aux causes qui mènent de l'origine à la fin d'une oeuvre architecturale). Il a intégré dans sa réflexion un questionnement philosophique quant au processus de conception, et ce depuis son travail de doctorat intitulé « The Formal Basis of Modern Architecture » (1963).

2 Architecture numérique : Culture et stratégies opératoires, Antoine Picon & Alireza Razavi, D'Architectures, Février 2011 (p.33).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

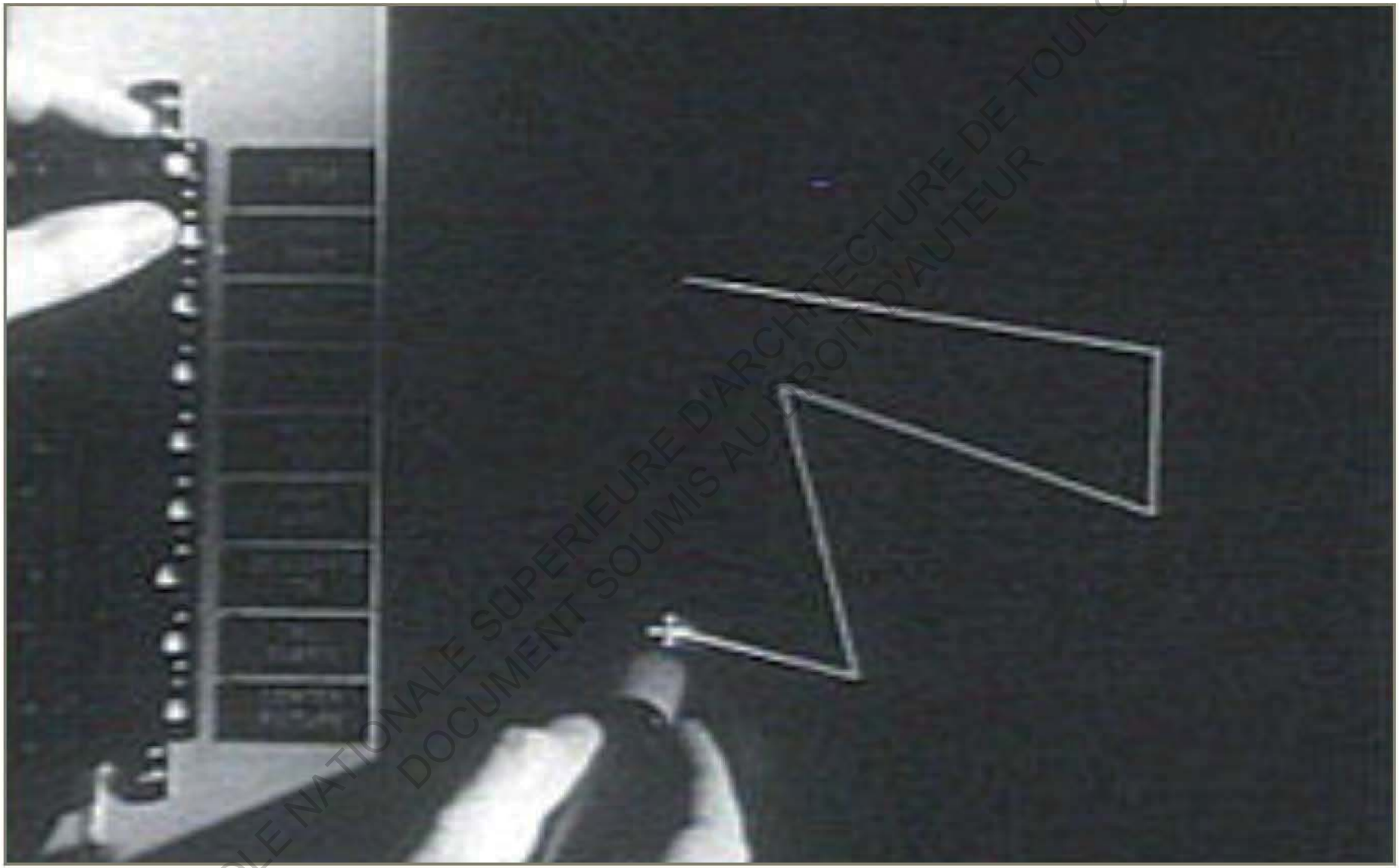


Figure 13 : Yvan Sutherland en train de réaliser une modélisation paramétrique sur Sketchpad.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

contraintes de la modélisation géométrique dans sa recherche « Sketchpad ». « Sketchpad est un modeleur proposant un algorithme de propagation de valeurs ainsi qu'un solveur de contraintes. Un opérateur peut intervenir sur une représentation géométrique 2D au moyen d'un stylet (figure 13) et de boutons poussoirs activant des contraintes (parallélisme, perpendicularité, incidence, etc.). Les contraintes du modèle peuvent être définies *a posteriori*. » (De Boissieu, 2013, p.40). C'est ici un premier bouleversement qui s'est opéré dans le monde de la modélisation géométrique : nous ne réalisons plus simplement un modèle géométrique explicite (à base de coordonnées figées), nous avons également la possibilité d'établir des contraintes qui seront prises en compte et calculées au sein du modèle.

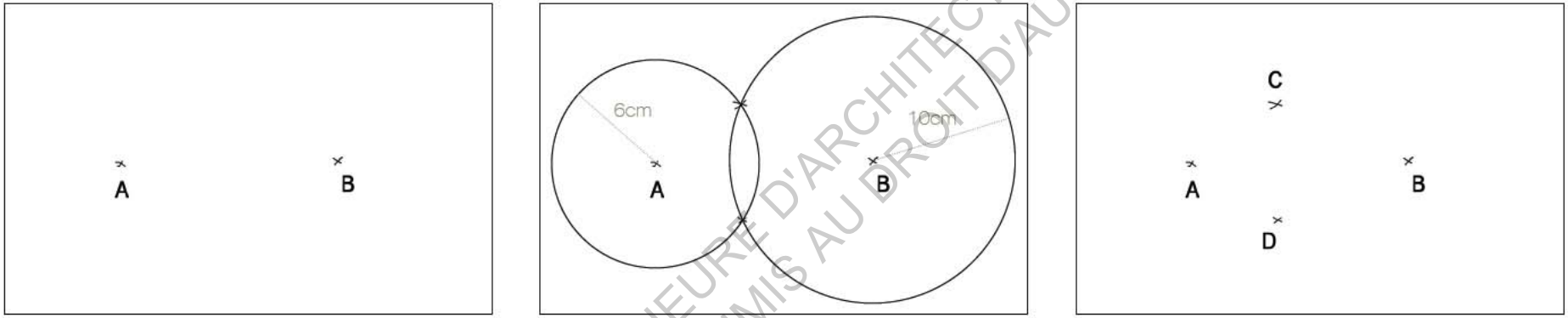
Par la suite, différents moteurs de modélisation paramétrique sont développés, offrant de plus en plus de possibilités aux concepteurs. Ces modeleurs sont en particulier développés comme des logiciels métiers dans les domaines de l'aéronautique et la mécanique. Par exemple, en 1970, la société Matra Datavision développe en France le modeleur paramétrique « Euclid » et Dassault System développe le modeleur CATIA (De Boissieu, 2013). Ces derniers s'appuient sur des paramètres afin de déterminer le comportement d'une entité graphique et définir les relations entre les composants du modèle. Par exemple : « le diamètre de ce cercle est de 2m » ou « le centre de ce cercle est situé sur la droite *(d)* à une distance de 5m du point A ». Il est ainsi désormais possible de capturer le mécanisme ou l'intention de conception au cours du processus de modélisation et de l'intégrer au sein de la création-même. L'apparition de cette technologie concrétise la notion de conception paramétrique, et séduit tout de suite de nombreux professionnels pour ses qualités en matière de performances mathématiques, techniques, organisationnelles, etc. Les architectes aussi ne tardent pas à s'approprier cet outil puissant pour servir leurs projets, et aujourd'hui la modélisation paramétrique s'impose comme un outil de choix dans le domaine de l'architecture. Une infinité de possibilités s'ouvrent ainsi aux architectes, qui voient aujourd'hui leurs pratiques évoluer à toutes les phases du projet, à commencer par le processus-même de conception.

2 - Concevoir un « projet paramétré »

2.1 - Concevoir une architecture de relations

Lorsque l'on pense aux moyens de conception classique (non paramétrique) en architecture, tout de suite nous vient l'image du typique « crayon, gomme et papier ». Tout d'abord pour esquisser une intention, puis expérimenter une idée, pour enfin la concrétiser en lui attribuant des mesures, formes, dimensions. Bien évidemment, dans ce processus,

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



1. Données de départ : 2 points

2. Représentation des contraintes : nous voulons construire 2 points C et D situés à 6cm de A et 10cm de B.

3. Géométrie finale

Figure 14 : Résolution d'un système de contraintes sans outil paramétrique.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

le concepteur est aidé de nombreux outils (qu'ils soient manuels ou informatiques), chacun lui permettant d'effectuer certains types d'opérations afin d'arriver au résultat souhaité. En réalité, nous pouvons relever dans ce travail deux opérations significatives, que Woodbury associe à deux outils premiers : « le crayon ajoute et la gomme soustrait » (Woodbury Robert, Elements of Parametric Design, 2010). En ajoutant à ces éléments premiers des outils d'aide à la liaison et au tracé [1], nous devrions pouvoir réaliser et représenter toute conception architecturale classique. Les concepteurs ont ainsi l'habitude de travailler de la sorte : ajouter des éléments et en soustraire d'autres. Ainsi, au moment de la réalisation et représentation d'une conception classique, les contraintes (relations mises en place) entre ces éléments se concrétisent, mais une fois le résultat obtenu ces contraintes n'ont plus de valeur et sont retirés. Par exemple (figure 14), si nous voulons marquer deux points C et D à une distance de 6cm d'un point A et 10cm d'un point B, nous dessinerons ou modéliserons deux cercles : le premier d'un rayon de 6m et de centre A, le deuxième d'un rayon de 10cm et de centre B. Les deux intersections entre ces deux cercles matérialiseront alors les positions des points C et D désirés. Une fois ces derniers définis, les cercles seront détruits puisqu'ils n'auront plus d'utilité d'un point de vue de la conception. Il s'agit ici d'un travail « manuel » d'établissement de contraintes (ici les distances), qui est finalement opéré de manière unique et singulière pour chaque contrainte.

Ce processus se trouve modifié dans le cadre d'une conception paramétrique. En effet, les relations entre les paramètres (distances) ne sont plus décrites par des repères graphiques singuliers (cercles), mais sont formulées de manière à faire partie intégrante de la réalisation et donc de la réflexion du concepteur. Ainsi, il ne s'agit plus pour ce dernier de simplement ajouter et soustraire des éléments, mais également d'établir des relations entre ces derniers, les manipuler, et éventuellement les arranger. Cette nouvelle démarche implique de la part du concepteur une réflexion aiguë quant aux paramètres à mettre en œuvre, au type de relation à mettre en place, en fonction de tous les éléments de projet, et des manipulations présentes et futures souhaitées. En effet, en plus de penser à ce qu'ils conçoivent, les architectes travaillant avec des modèles paramétriques doivent également penser à la succession logique des paramètres, et des relations qui expliquent comment créer leurs géométries (Aish 2005, p.12) [2]. Apprendre à « penser paramétriquement » est une compétence qui peut être difficilement acquise, car elle va à l'encontre de l'ordre intuitif de la réflexion (on

1 Dans le cadre d'un travail manuel il peut s'agir de compas, règle, équerre, etc. Dans le cadre d'un travail sur informatique nous pouvons par exemple parler d'outil de rotation, d'alignement, ou même de grilles et repères.

2 AISH Robert, "From Intuition to Precision.", *23rd eCAADe Conference Proceedings*, Lisbonne, Université Technique de Lisbonne, 2005.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

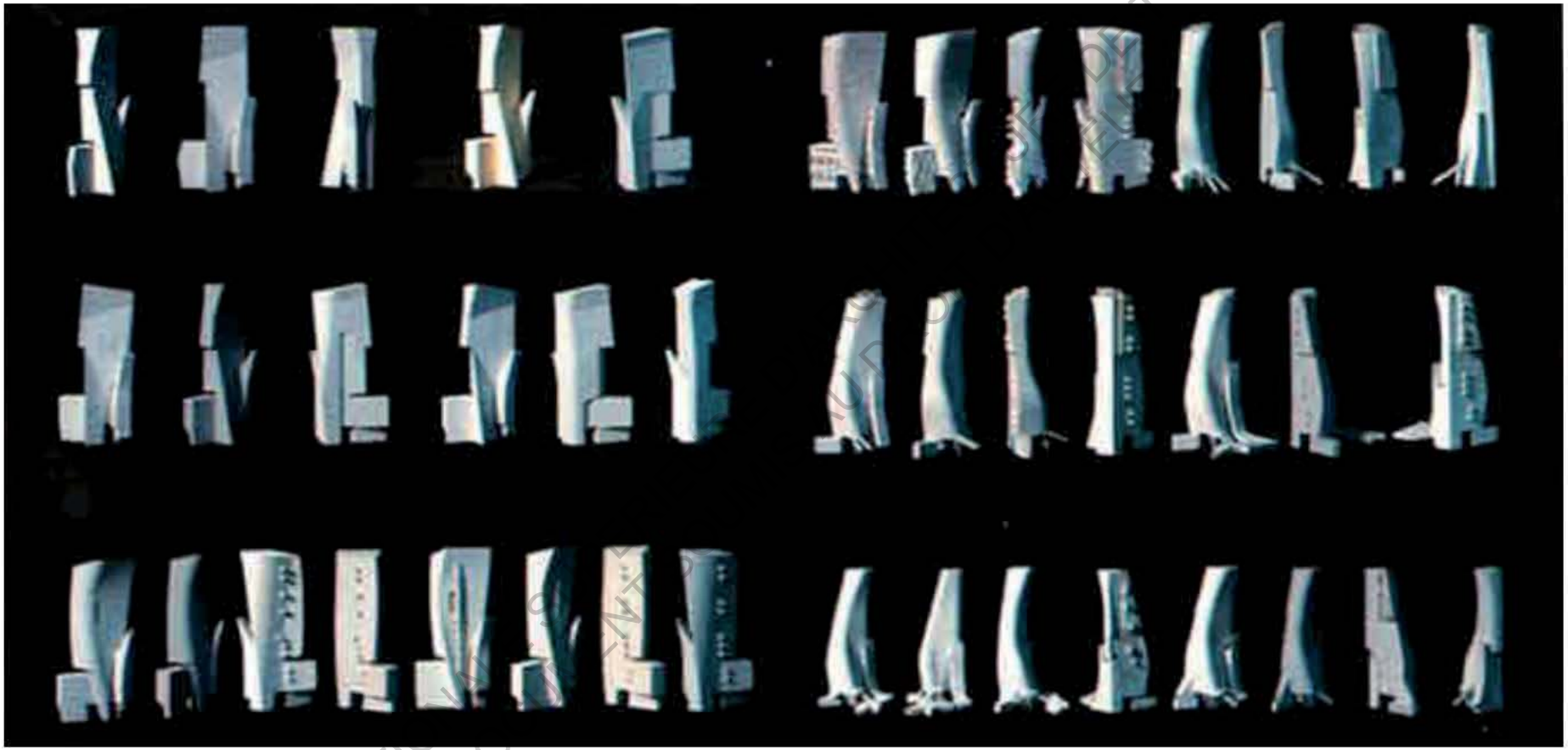


Figure 15 : Exploration d'une grande quantité de variantes dans le cadre du projet de la tour Phare à Paris (agence Morphosis), rendue possible grâce aux outils paramétriques.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE

pense un projet par l'aboutissement souhaité, et non par le processus qui le crée). Mais bien que l'apprentissage de cette manière de concevoir puisse être difficile, la précision et la logique de cette pratique peut en contre partie être très satisfaisante pour les concepteurs qui apprécient « jouer avec » les contraintes imposées, ou encore préciser et établir explicitement chacune des relations géométriques qu'ils opèrent. La conception devient alors dynamique et intelligente, où chaque élément est basé sur des relations bien précises générées à l'aide de l'outil paramétrique. Il en découle ici une conception évolutive et variable, basée sur un système génératif plutôt que sur un résultat figé. Ainsi, tout projet paramétré peut facilement être manipulé et modifié, et aussi donner lieu à une multitude de variantes (figure 15).

2.2 - Concevoir une architecture de paramètres

Il s'agit ici également pour l'architecte de concevoir une architecture de paramètres, c'est-à-dire où chaque paramètre l'aide à définir, comprendre, et développer un système bien particulier. Le projet étant pensé et généré par ses paramètres, l'impact sur le processus de conception est inévitable. En effet, lors d'une conception classique, les multiples données liées aux paramètres sont soit traitées en amont de la réflexion de projet (phase d'étude) afin d'être analysées et faire émerger des problématiques voire des pistes de conception, ou alors sont posés en tant qu'exigences à obtenir, et dans ce cas interviennent en phase de création comme des valeurs références que le projet doit vérifier (dans ce cas il faut contrôler régulièrement la conformité du projet face à ces exigences). Pour une conception paramétrique en revanche, toutes ces données peuvent être directement intégrées dès le départ en les associant aux différents paramètres mis en œuvre dans le projet. Elles peuvent ainsi être exploitées, analysées et organisées de manière à participer activement à la réflexion et conception de l'architecte, qui se veut finalement répondre au mieux aux problématiques du projet. En ce sens, la conception paramétrique se veut adaptable et personnalisable aux contextes socio-environnementaux et aux besoins des personnes. En tirant parti de la puissance de calcul de l'outil paramétrique, l'architecte peut plus facilement et précisément veiller à ce que chaque décision morphologique réponde aux multiples exigences et paramètres des différents environnements.

En somme, nous pouvons dire que concevoir un projet paramétré revient à concevoir une architecture complexe, une architecture qui reflète un nouveau point de vue, sur la compréhension d'une architecture non linéaire et qui essaye de s'adapter à des paramètres et contraintes de plus en plus complexes. L'architecte est amené à revoir son processus de conception, basant sa réflexion sur un système de paramètres, en créant des relations afin de générer et enrichir le projet - relations qui sont finalement témoins de la réflexion qui a généré ce projet.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

In analyzing the use of parametric digital modeling within the AEC industry and especially with regards to CATIA V5 and Digital Project, the following are some of the realities and issues we observed:

- When you model using parametrics you are programming following similar logic and procedural steps as you would in software programming. You first have to conceptualize what it is you're going to model in advance and its logic. You then program, debug and test all the possible ramifications where the parametric program might fail. In doing so you may over constrain or find that you need to adjust the program or begin programming all over again because you have taken the wrong approach.

- Once you think you have a working parametric model you may still find you haven't programmed a parameter of the geometry in a way that is adjustable to a designer's future request. A designer might say I want to move and twist this wall, but you did not foresee that move and there is no parameter to accommodate the change. It then unravels your program. Many times you will have to start all over again. Imagine trying to do this on a complex and fully integrated building.

- After all the time and effort of programming the geometry to where you think you have it right, you may find you still have to start all over again because the initial design concept has completely changed.

- Once you have your program working if anyone changes a parameter it could affect the geometry somewhere in the design that you didn't want to be changed. This occurs often and the change may not be detected until much later in the design phase, or even worse, in the more expensive construction phase.

- This also points to the fact that any operator using the model needs intimate knowledge of the parametric program that is written for that specific design. This logic knowledge is not easily transferred with the 3D model. In a sense the original programmer of the model then becomes the owner of the model. Many times if the program is too complex the original programmer is the only one who can work with it.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Figure 16 : Deuxième page du rapport de Rick Smith. Il y décrit 5 difficultés rencontrés par les architectes lors de l'utilisation d'outils paramétriques : les modèles exigent un important travail de renseignement de données en amont, anticiper la flexibilité du modèle peut être difficile, les grands changements tuent les modèles, certains changements peuvent être difficiles à repérer, et enfin la réutilisation et le partage des modèles posent problème. (Smith, 2007).

3 - Impacts de l'utilisation du paramétrique sur la conception de l'architecte

3.1 - Impacts sur l'efficacité et le temps passé par l'architecte à faire évoluer le modèle :

Comme vu précédemment, dans le cas d'une modélisation directe (non paramétrique), lorsque le concepteur manipule et modifie son modèle, ses actions se retrouvent « figées ». Pourquoi ? Ce dernier manipule directement la forme géométrique générée à travers des opérations spécifiques effectuées une seule fois (sauf répétition de la part du concepteur), et auxquelles on attribue des valeurs précises. A partir de là, on comprend bien que le modèle se retrouve comme fixé, et si l'on veut modifier une opération effectuée avec un paramètre à valeur «X» pour une nouvelle valeur «Y» par exemple, il faudra annuler l'opération «X» pour la ré-exécuter en saisissant la valeur «Y» (ou dans le cas d'une réalisation manuelle, effacer tout ce qui a été produit lors de cette opération pour la réaliser à nouveau). Dans le cadre d'une modélisation paramétrique, la démarche est toute autre. Le concepteur manipule directement le programme informatique générant la forme, qui garde lui en mémoire tous les éléments insérés et toutes les opérations effectuées, et ce depuis la création du modèle. Le modèle paramétrique offre ainsi la possibilité au concepteur de modifier ultérieurement certaines valeurs (ici remplacer «X» par «Y»), directement au cœur de l'élément ou l'opération concerné(e), sans avoir à réitérer ces derniers. L'architecte fait ainsi face à un gain de temps considérable dans le cadre de l'évolution et donc la manipulation de son modèle. De plus, l'architecte manipulant directement le circuit génératif de son projet, ce circuit lui permet de garder un recul sur son travail (en ayant une vision d'ensemble sur son processus de création), tout en maîtrisant sa conception dans le détail (maîtrise de tous les paramètres qu'elle implique). Lors de l'évolution d'un projet impliquant la modification du modèle paramétrique, cette double expertise (vision d'ensemble et détail) lui permet de rapidement cibler le ou les éléments à corriger, et facilite donc le travail au concepteur.

Mais il faut garder à l'esprit que la modification d'un modèle paramétrique peut au contraire s'avérer très longue et fastidieuse dans le cas d'une importante transformation. En effet, comme le souligne Rick Smith dans son rapport de 2007 [1] (figure 16), «après avoir donné du temps et des efforts dans la programmation d'un modèle géométrique, nous pouvons nous retrouver à peut-être tout recommencer parce que l'idée initiale de conception aura complètement changé». Lors de modifications majeures, il est ainsi souvent plus intéressant de repartir à zéro et restructurer complètement le modèle paramétrique, plutôt que de compromettre ses intentions de conception pour s'adapter aux limitations que nous impose un modèle paramétrique existant.

1 SMITH Rick, Technical Notes from experiences and studies in using Parametric and BIM architectural software [en ligne] Virtual Build Technologies, 2007, 6p, Format PDF. Disponible sur < http://www.vbtllc.com/images/VBTTechnicalNotes.pdf > (Consulté le 11/10/2016)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

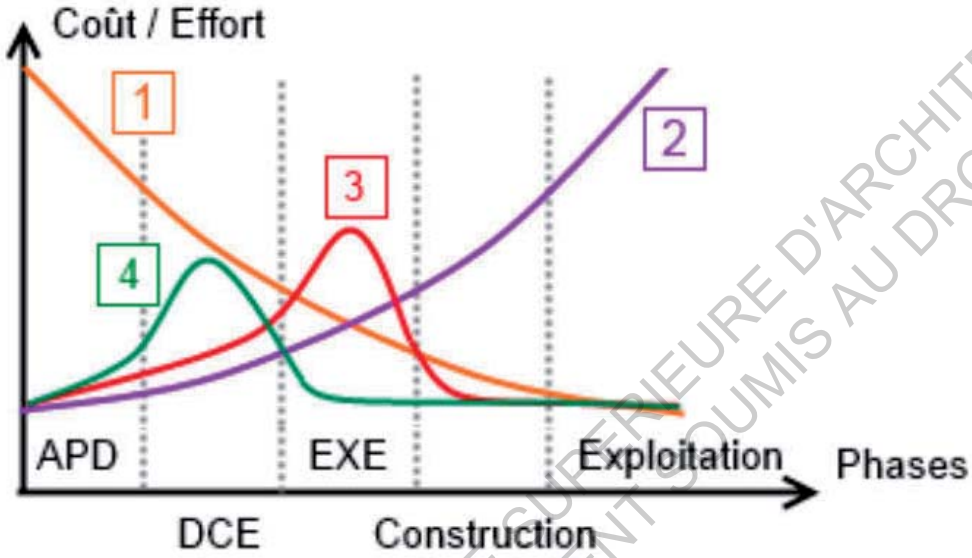


Figure 17 : Courbe de Patrick MacLeamy.

1 Facilité à apporter des modifications

2 Coût des modifications

3 Processus classique

4 Processus BIM

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.2 - Impacts sur la productivité et l'effort produit par l'architecte :

En 2004, Patrick MacLeamy (Président de HOK, et Président de buildingSMART) [1] réalise un graphique (figure 17) montrant qu'un concepteur est plus apte à apporter des modifications sur son projet en début de conception, et que cette aptitude diminue au fur et à mesure de l'avancement dans le processus de projet (courbe 1). Ce graphique dévoile également que le coût de ces modifications augmente avec le temps (courbe 2). A partir de ces constatations premières, MacLeamy (2010) [2] préconise de développer et pousser la conception dès les premières phases de projet (déplacement de l'effort de conception en amont), ses premières courbes montrant clairement que les changements de conception sont moins coûteux et moins difficiles à opérer en début de projet. Il s'agit ainsi ici de répartir l'essentiel des efforts en amont de la phase d'exécution (courbe 4). Mais ceci est difficilement réalisable dans le cadre d'un processus de conception classique (la courbe 3 tend vers la droite). MacLeamy indique ainsi deux procédures qui, pour lui, doivent être intégrées dès le premier stade de la conception afin de réduire les risques liés à l'évolution d'un projet :

1 - Injecter et travailler avec les données relatives au projet, afin de guider l'équipe de conception vers des solutions viables dès le départ

2 - Intégrer une démarche BIM (Building Information Modeling), qui consiste en un processus collaboratif de travail, rendu possible par le concept de maquette numérique (2D ou 3D) partagée et informée

Le processus de conception paramétrique (couplé à un processus BIM) se trouve ainsi être le plus intéressant vis à vis de ces recommandations, et il décrit en ce sens naturellement ce que l'on vise, c'est-à-dire transférer la majeure partie des efforts des concepteurs en amont du projet (courbe 4). Comment cela est-il possible ? Lors de l'utilisation des outils paramétriques, les données relatives au projet (liées aux paramètres) sont définies et décrites beaucoup plus tôt dans le processus de conception, et forment une base de données qui servira ensuite de socle commun aux différents intervenants (favorisant la démarche collaborative BIM), et ce à toutes les étapes du projet. Ainsi, la conception paramétrique demande à l'architecte un effort beaucoup plus important aux premières phases du projet, mais en contrepartie permet de générer un gain de productivité considérable, ainsi qu'une meilleure maîtrise de l'évolution et des coûts du projet.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 HOK est l'une des plus grandes firmes d'architecture du monde, tandis que buildingSMART est un organisme international regroupant fabricants et utilisateurs de CAO, dont le but est d'appuyer le programme openBIM.

2 MACLEAMY Patrick, «Patrick MacLeamy on the Future of the Building Industry» [en ligne] HOK, 2010. Disponible sur < http://www.hok.com/thought-leadership/patrick-macleamy-on-the-future-of-the-building-industry/ > (Consulté le 16/04/2016).



Figure 18 : Différentes vues composées puis exportées depuis un modèle 3D conçu paramétriquement. Images du projet « Chroniques d'une guérison » de Yaojen Chuang.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3.3 - Impacts sur le style propre de l'architecte :

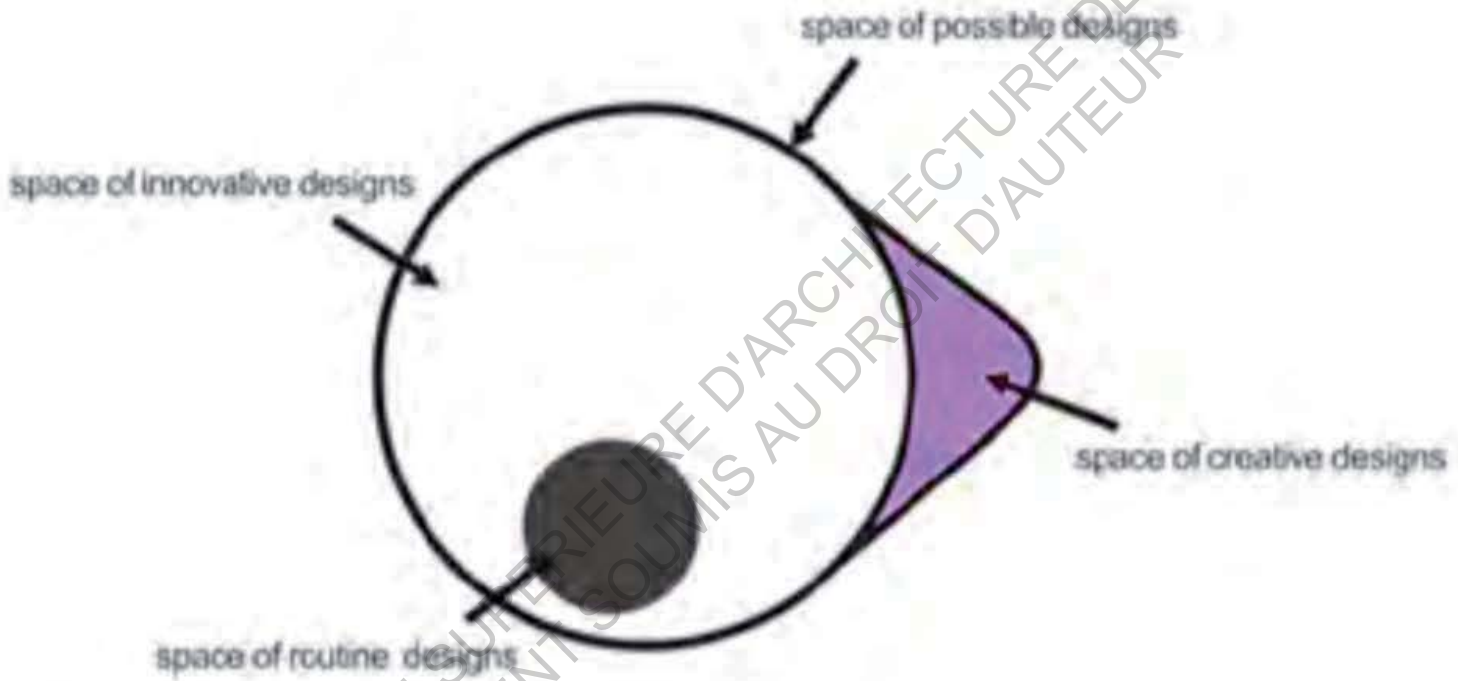
L'architecte se doit de s'approprier les outils qu'il utilise pour sa conception afin de mener au mieux son travail. On parle ici d'un processus de « personnalisation » de la pratique du paramétrique, donnant lieu à un style propre que l'architecte va développer.

En terme de représentation, ce processus de personnalisation est facilement relevable : chaque architecte développe effectivement un certain style de croquis, réalise ses plans ou images de synthèse avec un certain graphisme, etc. Nous pouvons dire qu'il s'agit ici de la « signature graphique » du créateur, qui témoigne de sa touche artistique unique. Plus précisément pour ce qui est de la représentation d'un modèle paramétrique, nous devons aborder la notion d'exportation de vues avant de pouvoir évoquer le graphisme. En effet, un modèle paramétrique, une fois achevé, donne lieu à un objet géométrique [1] . Mais pour en extraire des représentations, il faut définir les vues (figure 18) que nous souhaitons, avant de les exporter en tant qu'images. La signature graphique peut ici s'exprimer au travers du choix du point de vue, ou même encore au travers du réglage des paramètres d'exportation (lumière, contraste, saturation des couleurs, etc.). Mais le principal travail graphique est en réalité réalisé en amont de l'exportation, lors de la composition de la vue. En effet, pour les différentes vues établies, le créateur va définir un certain style de traits, des matières pour les surfaces, des éléments à ajouter comme des personnages, des éléments présents (affichés) à mettre en valeur et d'autres à masquer (considérés comme sans importance dans cette vue-là précisément), etc. C'est ainsi un travail de composition de l'image qui révèle tout autant la signature graphique de l'architecte, sauf qu'au lieu de s'opérer sur une image 2D, il est réalisé au sein du modèle 3D selon un certain point de vue. Ce travail peut être parfois compliqué (penser la perspective), c'est pour cela que certains concepteurs préfèrent exporter une vue « vierge » avant de travailler le graphisme de l'image sur un logiciel de traitement de l'image (comme Adobe Photoshop).

En terme de conception, de nombreuses approches différentes ont été développées par les architectes, et même si nous pouvons les théoriser et en regrouper certaines selon des principes généraux similaires, chaque architecte possède bien un style propre de conception, qui est révélateur d'une réflexion personnelle. Celle-ci est influencée par de

1 Sur Grasshopper, cet objet géométrique (en 3D) est obtenu en opérant la fonction « bake » sur les composants concernés. Il peut ensuite être visualisé (et manipulé en tant que géométrie explicite) sur l'interface de Rhino.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Figure 19 : Espaces de conception : En 1990, Gero aborde le processus créatif en conception par les notions de conception routinière, conception innovante et conception créative. Les conceptions innovantes sont pour lui des conceptions de structure familière, mais d'apparence nouvelle, car les valeurs des variables déterminantes ne sont pas familières, alors que les conceptions créatives sont obtenues en introduisant de nouvelles variables qui vont produire de nouveaux types (Gero, 1990, p.34-35).

nombreux facteurs individuels : qu'il s'agisse de la représentation que l'architecte a du monde, de sa propre expérience de l'espace et de l'architecture, de ses savoirs, ses préoccupations, etc. On peut parler ici de « signature créative » de l'architecte. En conception paramétrique, il faut savoir qu'un même projet peut être généré par de nombreuses méthodes de conception et modélisation différentes. En effet, nous pouvons arriver à un même résultat en terme d'objet géométrique (une même représentation explicite), mais qui aura été généré par différents programmes (différentes représentations symboliques). C'est donc le processus « circuit » génératif du projet qui va être révélateur de la pensée de l'architecte, et donc de sa signature créative. De plus, les possibilités de conception étant infinies avec les outils paramétriques, l' « espace de solutions » se trouve également infini, et le créateur est libre de développer de manière très précise son style propre, qui pourra donc d'autant plus se distinguer du travail des autres architectes.

3.4 - Impacts sur la créativité de l'architecte :

Lors d'une conception paramétrique, l'architecte n'utilise plus simplement l'outil informatique comme le scénario d'un outil de représentation pour modeler des formes externes, il l'utilise comme un instrument générateur qui crée une logique interne, laquelle peut se développer afin de produire une ample gamme de possibilités. En effet, un design paramétrique décrit un spectre de possibilités au lieu d'un objet fixe. Cette technique permet au concepteur d'explorer avec facilité les possibilités et variations d'un modèle donné. Cette technique s'utilise largement dans le domaine de l'ingénierie afin d'obtenir des solutions optimum à plusieurs problèmes. En architecture, elle permet, grâce aux processus algorithmiques, d'explorer de nombreuses possibilités de création. Ainsi, le paramétrique peut être à l'origine de la recherche de forme, soit pour aboutir à une forme qui répond au mieux aux contraintes fixées au départ ou à une certaine performance exigée, soit dans l'optique d'explorer les variantes d'un objet à concevoir. Dans le premier cas, la création de l'architecte est seulement orientée vers une palette de solutions plus justes, qui augmente la précision de la réponse apportée par ce dernier. Dans le deuxième cas, les variantes sont délimitées par un espace de transformations déterminé par le concepteur lui-même lors de la construction du modèle. Mais au sein même de cet espace de transformations, les possibilités sont si nombreuses et si facilement générables qu'elles incitent le concepteur à circuler dans le champ des solutions en jouant sur les paramètres et données, pour pouvoir ensuite choisir le résultat voulu. La conception se veut ainsi ici ouverte, laissant place à diverses possibilités, et quelques fois, des résultats inespérés. La créativité de l'architecte n'en ressort donc qu'augmentée, puisque l'ensemble des solutions qu'il explore se trouve élargi, et parfois même il se retrouve face à des solutions non envisagées auparavant (figure 19).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

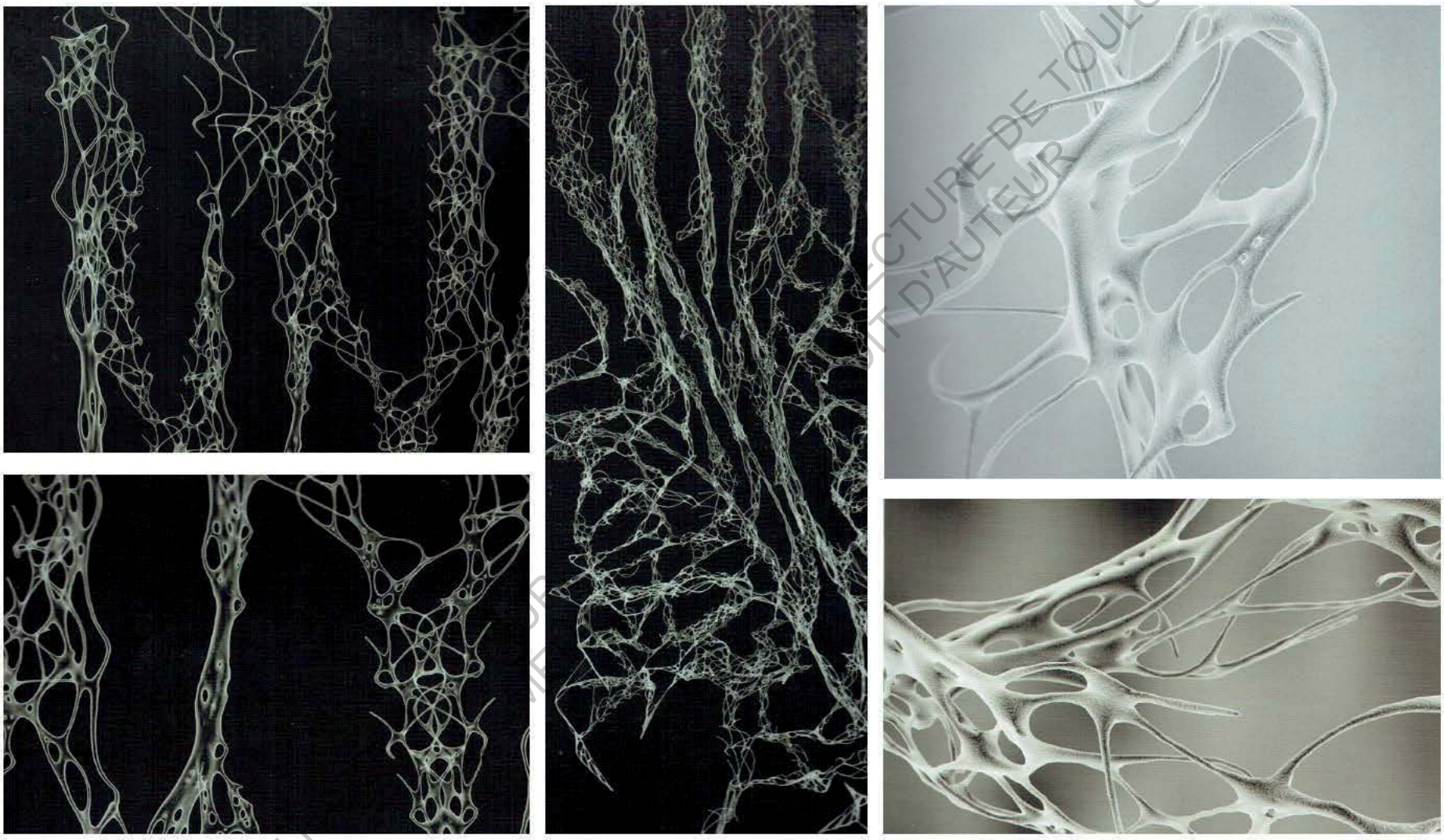


Figure 20 : Swarm Matter est une recherche menée par Kokkugia, qui explore la génération de géométries ornementales au moyen de la modélisation paramétrique.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DROIT D'AUTEUR

Enfin, comme vu précédemment, la modélisation paramétrique permet d'approcher de plus près toutes les données d'un projet, et donc de « jouer » plus facilement avec ces données. Les contraintes de la modélisation géométrique résolues, l'architecte peut alors se livrer sans soucis à une création géométrique très développée, originale, complexe (figure 20), basée sur la manipulation des données du projet et des algorithmes mis en place entre elles. La conception paramétrique est ainsi la réponse apportée aujourd'hui aux contraintes et limites des méthodes « classiques », quant à l'expression et la création du projet (création géométrique notamment). Les outils paramétriques et algorithmiques donnent lieu finalement, du point de vue de la création, à une liberté considérable, et la créativité de l'architecte peut alors complètement s'exprimer (comme elle n'est pas contrainte par un outil aux capacités limitées).

4 - Des difficultés et limites à connaître

L'architecture paramétrique est une approche qui permet de générer et de contrôler des formes complexes et évolutives, mais qui demande en contrepartie une maitrise importante des enjeux artistiques et techniques liés à la conception de ces formes. Dans cette partie, nous aborderons les limites des outils paramétriques, les difficultés qui en découlent, rencontrées par les architectes dans leur travail, ainsi que certaines précautions qu'ils doivent garder vis à vis des modeleurs paramétriques.

4.1 - La complexité de l'outil :

Les logiciels paramétriques ont chacun un type de représentation symbolique propre, avec des caractéristiques, codes et symboles propres qui ne sont pas toujours intuitifs ou facilement compréhensibles par tous. Bien que la modélisation paramétrique ne demande pas de compétences particulières en matière de codage (comme il s'agit de programmation visuelle), il faut néanmoins bien comprendre le fonctionnement de l'outil et de ses différents composants avant de pouvoir travailler avec le modeleur paramétrique.

Tout d'abord, il faut prendre connaissance et bien saisir l'action et les signes des différents composants du modeleur. En effet, la représentation symbolique d'un modèle (c'est-à-dire ce que manipule réellement le concepteur) est constituée de signes « symboliques » (qui renvoient à des conventions extérieures) auxquels s'ajoutent parfois des

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

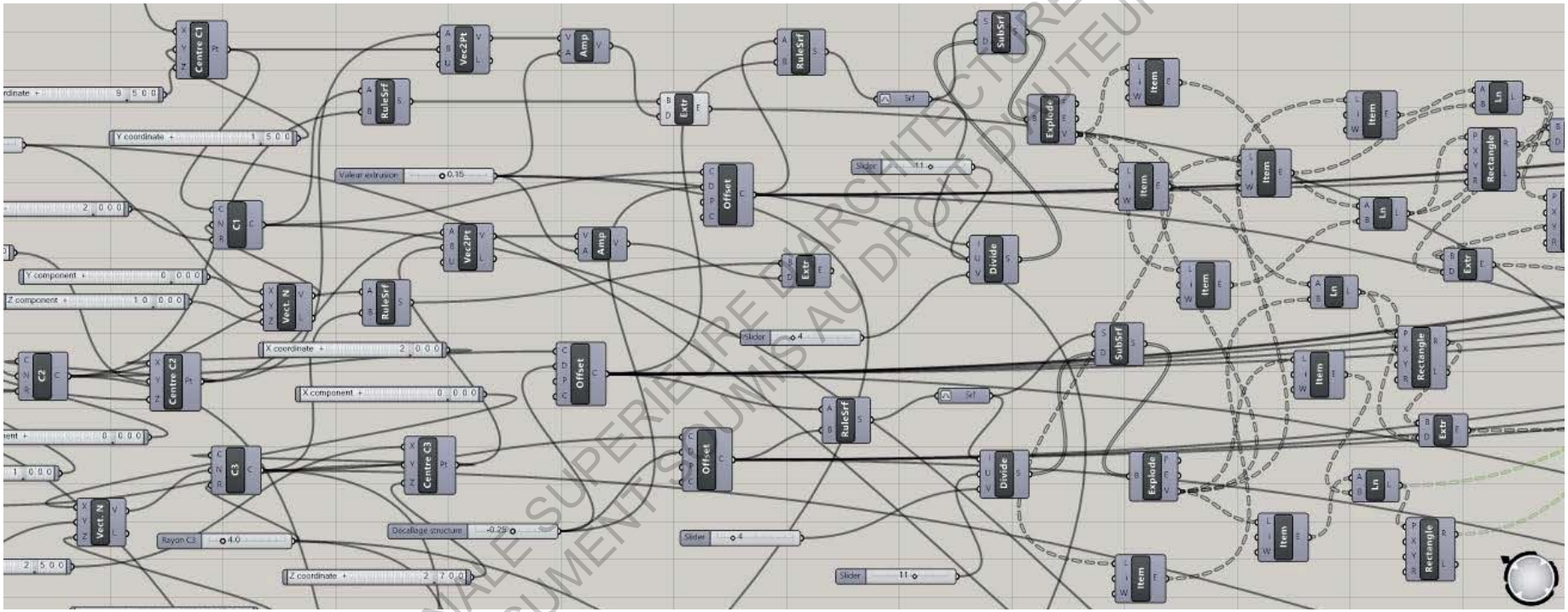


Figure 21 : Manque de lisibilité d'un modèle paramétrique : plus le programme généré est complexe, plus le circuit devient incompréhensible.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

signes « iconiques » (qui entretiennent un lien direct avec ce qu'ils représentent) (Everaert-Desmedt, 1995)[1]. Ces signes ne sont pas toujours explicites, et demandent au concepteur de développer une connaissance de ces derniers et des différents composants et fonctions auxquels ils sont associés. Cette expertise peut s'avérer parfois compliquée car peu de documentations claires existent sur le sujet[2], mais elles se développent en général avec le temps et l'expérience (comme la maîtrise de raccourcis d'un logiciel par exemple). Il faut ainsi penser à prendre en main le logiciel en amont de la réalisation d'un premier projet, afin d'explorer les possibilités des différents composants et en assimiler les signes. Il s'agit ici de ne pas se retrouver limité dans la conception à cause d'un manque de maîtrise de l'outil utilisé. Les signes eux, avec de la pratique et de l'habitude, deviennent par la suite de plus en plus évidents pour le créateur, qui voit ainsi sa manipulation se fluidifier et gagner en productivité.

L'usage d'un modeleur paramétrique demande également, de la part du concepteur, une maîtrise des flux et des structures de données, ainsi que du système d'organisation de contraintes. Lors de la conception d'un modèle paramétrique sur Grasshopper (système basé sur la propagation), toutes les étapes de construction d'une géométrie sont décrites, et ce de manière hiérarchique : le concepteur définit lui-même les paramètres, variables, contraintes, leur organisation et leur ordre de résolution. Ce processus demande une réflexion logique accrue quant à la structuration des flux de valeurs parcourant le modèle, qui ne peut être correctement opérée que s'il y a maîtrise des différents composants et de leurs données d'entrée et de sortie. En effet, l'action d'un composant étant déterminée par ces données, le travail d'un concepteur est facilité et même enrichi si ce dernier les exploite de manière adéquate : il peut ainsi complexifier son modèle et ses opérations, et il en résulte une plus grande liberté et justesse quant à sa conception.

4.2 - La lisibilité du modèle :

Comme l'énonce De Boissieu (De Boissieu, 2013, p.49), « l'apparente simplicité d'usage de Grasshopper (pas de syntaxe à apprendre, visualisation du flux des données) est à nuancer par la rapide complexification du modèle : dès que plusieurs traitements, nœuds et arcs sont mis en œuvre, le modèle peut devenir peu lisible (figure 21). Ce manque de lisibilité est une difficulté pour faire évoluer le modèle symbolique, comme pour son partage ou sa réutilisation. ». En effet, jusque-là nous avons vu des exemples très simples et basiques illustrant à l'échelle de quelques composants les

1 EVERAERT-DESMEDT Nicole, Le processus interprétatif: Introduction à la sémiotique de Ch.S. Peirce, Paris, Mardaga, 1995.
2 Le site officiel McNeel < grasshopper3D.com > peut néanmoins fournir d'importantes informations pour Grasshopper.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

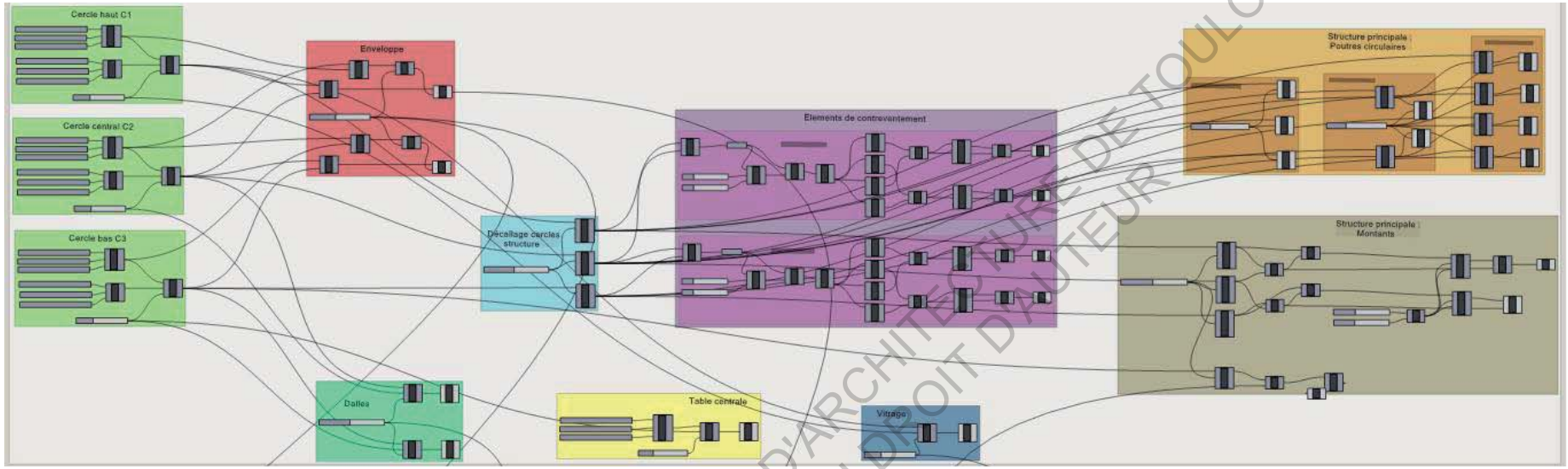


Figure 22 : Regroupement des composants d'un modèle paramétrique en blocs, qui permet une meilleure clarté du circuit.

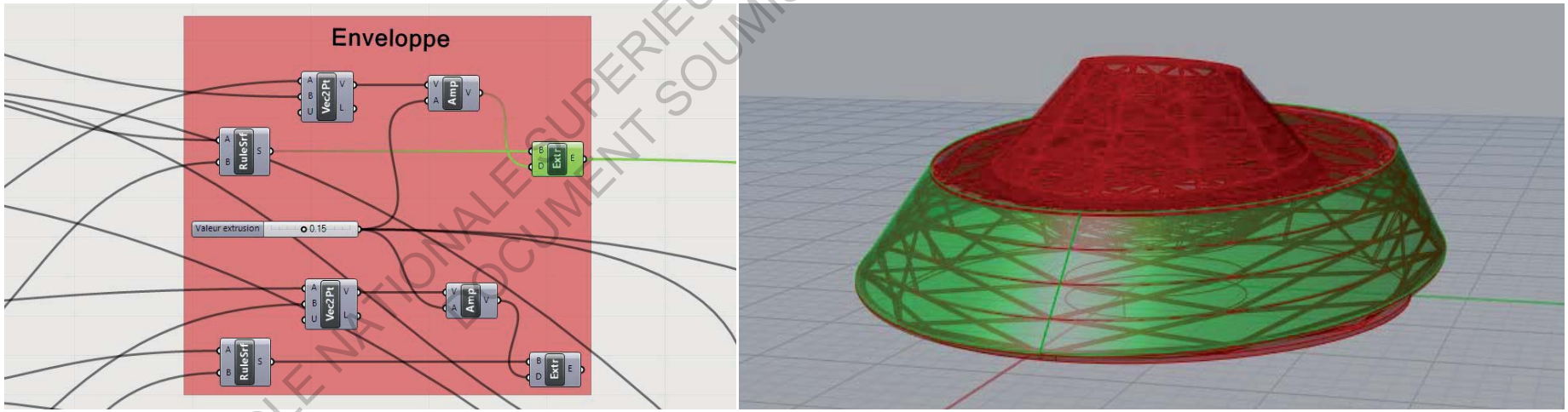


Figure 23 : Mise en évidence d'un composant et de la géométrie qu'il a généré (en surbrillance en vert).

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

mécanismes ou caractéristiques d'une modélisation paramétrique. Mais pour comprendre l'importance du propos de De Boissieu, il faut prendre conscience de la complexité d'un modèle à l'échelle d'un projet d'architecture (nombre important paramètres, composants, flux de données, etc.). Pour arriver à se repérer et ne pas se perdre dans un modèle de telle envergure, deux fonctionnalités offertes par Grasshopper peuvent être opérées, facilitant ainsi parfois le travail du concepteur.

Tout d'abord, il est possible d'organiser, au sein même de la représentation symbolique d'un modèle, les composants générés par groupes ou blocs, ce qui permet de garder une meilleure visibilité sur le circuit généré. Ces blocs peuvent par exemple être engendrés afin de regrouper différents programmes qui agissent ensemble pour une même opération. De plus, pour faciliter la reconnaissance visuelle de ces blocs, nous pouvons ensuite leur attribuer une certaine couleur ou un certain titre (figure 22).

La deuxième fonctionnalité de Grasshopper pouvant aider le concepteur à se repérer dans son modèle passe tout simplement par la sélection d'un composant qu'il veut introspecter, ce qui le mettra en surbrillance ainsi que la géométrie spécifique qu'il aura généré (sur l'interface de Rhino), de manière isolée ou plus généralement dans le modèle entier (figure 23). Cette fonctionnalité est très utile dans le cadre de la manipulation d'un circuit long et complexe, comme la représentation explicite peut aussi rapidement devenir illisible. En effet, chaque composant mis en œuvre générant une certaine géométrie, et toutes étant visibles en même temps, la superposition de ces dernières peut compliquer la lecture du modèle. Ainsi, la sélection d'un composant permet une aide à la reconnaissance de l'élément et de la fonction associée à ce dernier, en révélant la géométrie explicite qu'il contient, facilitant alors le travail pour le concepteur. De la façon opposée, ce dernier peut également décider de purifier son modèle en choisissant de désactiver l'aperçu de la géométrie générée par certains composants. En général, il masquera l'aperçu de composants impliquant des opérations « intermédiaires » pour ne garder que la géométrie recherchée. (Par exemple si l'on cherche à expliciter un point d'intersection entre deux droites, il faudra générer ces deux dernières avant d'obtenir le point désiré. Mais si ces deux droites n'ont été construites que pour la génération du point, nous pourrons les masquer à la fin de l'opération afin qu'ils n'encombrent pas inutilement le modèle).

4.3 - Le partage et la réutilisation du modèle :

Nous avons ainsi vu que certaines facultés (regroupement des éléments par blocs, mise en évidence de certains

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Figure 24 : Projet de la tour Phare à Paris réalisé par l'agence Morphosis.

ÉCOLE NA... D'ARCHITECTU... TOULOUSE
...AU DROIT D...

composants spécifiques) sont permises par Grasshopper afin de faciliter la lisibilité d'un modèle paramétrique, mais il arrive que celles-ci ne soient pas suffisantes pour garder ce modèle clair et organisé, ce qui peut mettre des freins au travail de conception, de modélisation ou de modification, mais également rendre difficile le partage ou la réutilisation du modèle. En effet, après la création d'un modèle, d'autres concepteurs ne peuvent pas facilement le retravailler car ils ne possèdent pas toutes les connaissances sur la façon dont il a été créé et l'intention de conception initiale qui l'a généré. Smith (Smith, 2007, p.2) observe qu'en un sens, le concepteur original du modèle devient comme « propriétaire » de ce dernier. Souvent, lorsque le programme généré est trop complexe, le concepteur original est ainsi le seul à pouvoir le manipuler et le modifier, car après tout, si ce dernier rencontre des difficultés en tentant de mettre en œuvre des changements, alors un autre concepteur (peu familier au modèle) sera dans une bien pire position pour adapter ce modèle à des circonstances nouvelles.

4.4 - Une vigilance à garder vis à vis de l'outil :

Peut-on conserver une distance critique vis-à-vis des outils de conception ? La liberté créatrice de l'architecte lui vient-elle de l'outil ? Ou ce dernier fournit-il simplement un moyen d'expression plus pointu sans entraver ses idées ? Ce sont ici des problématiques très pertinentes à développer, surtout lorsque nous utilisons des outils dont l'impact sur la création est fort (comme dans le cas d'une conception paramétrique). Ces questions ont été posées à Thom Mayne, architecte à la tête de l'agence californienne Morphosis, lauréate du concours pour le projet de la tour Phare à Paris (figure 24). Mayne a aujourd'hui près de 50ans de métier derrière lui, et son expérience « lui apporte la confiance nécessaire pour voir dans le numérique un formidable accessoire de conception, sans pour autant perdre sa prérogative d'architecte, afin de rester maître du processus créatif dans une liberté qui caractérise son travail depuis toujours » [1] . Ainsi pour Mayne, un architecte reste maître de sa conception et de son projet, et l'outil qu'il utilise est un moyen de le concrétiser. Antoine Habillat, directeur du pôle Développement bureaux France, qui a suivi de près les étapes constructives de la tour Phare, affirme en effet que « si le numérique a autorisé la naissance de la forme architecturale de la tour, celle-ci n'en reste pas moins le fruit d'une maturation architecturale et d'une somme d'expériences propres à un architecte » [1] . Même si l'outil paramétrique a énormément contribué ici à la conception et réalisation du projet, il

1 PICON Antoine & RAZAVI Alireza, Architecture numérique : Culture et stratégies opératoires, D'Architectures, Février 2011 (p.31 à 47)

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Figure 25 : Poésie et technique : Bien utilisés, les outils paramétriques s'intègrent finalement très bien au processus de conception architecturale, en apportant non seulement leur capacité technique et constructive, mais également leur potentiel poétique et symbolique.
Image du projet de cliniques et laboratoire de transplantation d'organes, Jeanes Bong et Jonathan Alotto, Hong Kong.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DROIT D'AUTEUR

avait un rôle premier d'aide et d'assistance (par l'intégration de nombreuses contraintes paramétrables, recherche de solutions, etc.) au travail de l'architecte. La limite de l'impact de l'outil sur la conception d'un projet est ainsi à définir par l'architecte lui-même. Si Mayne a pu concevoir un tel projet sans que l'outil numérique entrave sur son travail, c'est qu'il a atteint une maturation dans sa réflexion quant au rôle et à l'usage de cet outil. Mais pour de jeunes architectes ou d'autres manipulant nouvellement un outil aussi puissant que le paramétrique, il y a une vigilance constante à garder vis à vis de cette pratique. Comme le souligne Matt Gary, chef de projet de la tour Phare, « l'architecture numérique autorisant une grande liberté, l'autodiscipline est vitale pour ne pas perdre sa crédibilité ». Il ajoute également que le numérique ne doit pas devenir un « pousse au crime », qu'il ne peut pas devenir le guide unique de l'architecte ou représenter une expression unique[1]. Ainsi, l'attention à avoir est notamment importante pour aboutir à une utilisation contrôlée du logiciel : il faut, à toutes les étapes, rester maître de son outil et de sa conception, et ne pas se laisser « emporter » ou s'enfermer uniquement dans l'espace exécutif du logiciel (erreur qui peut très facilement être commise par des débutants, sans même s'en rendre compte). Finalement, pour une bonne pratique paramétrique, un équilibre est à trouver. Kostas Terzidis évoque cette idée dans son ouvrage Algorithmic Architecture (2006) : il montre « l'ordinateur non comme une extension des facultés de l'architecte, mais comme un partenaire radicalement « autre », faisant osciller la pratique de l'architecte entre la spontanéité de ce qu'il nomme la création et la rigueur de son explicitation dans un algorithme. » (De Boissieu, 2013, p.16).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 PICON Antoine & RAZAVI Alireza, Architecture numérique : Culture et stratégies opératoires, D'Architectures, Février 2011 (p.31 à 47)



Figure 26 : Planches de rendu et maquettes réalisées dans le cadre du projet « Imposante légèreté ».

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

III - Retour d'expérience : conception paramétrique du projet « Imposante légèreté »

Après avoir étudié de plus près les enjeux liés à la conception architecturale dans le cadre de l'utilisation des outils paramétriques, il est question dans ce dernier chapitre de présenter un projet conçu paramétriquement à l'aide de Grasshopper.

Ce dernier, intitulé « Imposante légèreté », est un projet d'étude réalisé en binôme avec Clarisse Moncoucut, dans le cadre de l'atelier de projet expérimental proposé à l'ENSA Toulouse en 2013. Il était question dans cet atelier d'aborder de manière novatrice l'architecture, en ouvrant sa pratique à de nouvelles sensibilités telle que celles permises par les outils numériques (notamment paramétriques), ou encore celles qui s'inspirent de la nature (biomorphisme) en vue de performances techniques et structurelles hors du commun. C'est ainsi dans le cadre de cet atelier que j'ai personnellement approché pour la première fois toutes ces notions, et découvert de nouvelles pratiques architecturales, telles que la conception paramétrique ou encore la fabrication numérique (grâce à un partenariat qui a été développé avec le FabLab de Toulouse). Toutes ces nouvelles connaissances m'ont permis, par la suite, d'enrichir de nombreux projets et d'explorer plus en profondeur ces différentes pratiques.

Nous développerons ainsi dans cette partie ce projet, en y dévoilant la conception architecturale ainsi que la modélisation paramétrique qui y ont été réalisés, les différentes pratiques qui en ont émergé, ainsi que les enjeux auxquels ma binôme et moi-même avons dû faire face dans notre travail.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



Figure 27 : Premières maquettes d'expérimentation réalisées avec des matériaux souples.

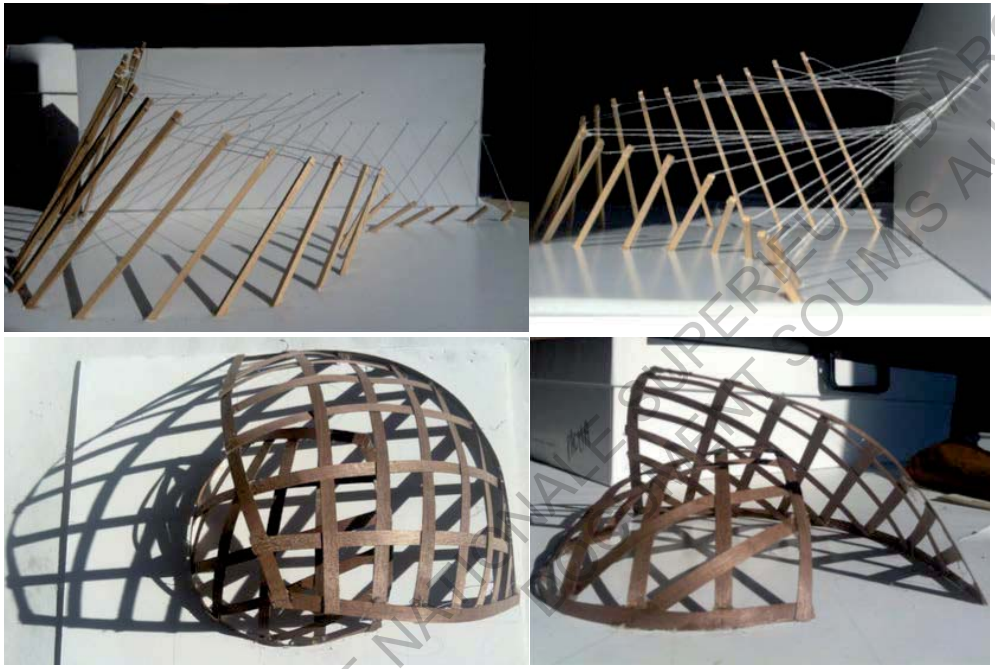


Figure 28 : Deux principes explorés au travers de maquettes d'étude : le travail des éléments en tension (haut) et le tressage (bas).

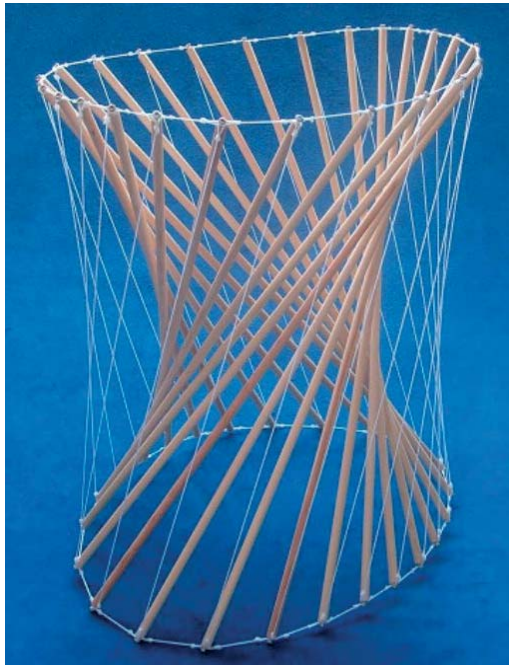


Figure 29 : Maquette réalisée sur le principe de la tenségrité.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

1 - Orientation et émergence de l'idée première

Pour ce premier projet, il s'agissait de concevoir une halle (programme libre à déterminer), ouverte ou non, qui serait située sur le parking actuel faisant face à la préfecture de Toulouse. Les enjeux liés à la conception de ce projet étant principalement d'explorer des méthodes et formes expérimentales, nos premières recherches, avec ma binôme, se sont orientées vers l'architecture organique et la nature. Ce travail en amont a commencé à faire naître quelques idées pour le futur projet. Nous nous sommes notamment arrêtées sur « la toile d'araignée », structure à la fois solide et légère. Des recherches architecturales sont venues compléter ce travail, tel que sur les projets de l'architecte Frei Otto. Des premières maquettes d'expérimentation (figure 27) ont suite à cela été réalisées avec des matériaux souples (bois de noyer, ficelle, etc.).

Sont alors apparues deux approches différentes : le tressage et le travail des éléments en tension (figure 28) qui permettent tous deux de créer des structures solides à partir d'éléments légers et déformables. Dans une volonté de rationaliser les formes de ces premières maquettes, nous avons orienté nos recherches sur la tenségrité, principe qui consiste à stabiliser une structure par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent. C'est l'application de ce dernier qui a guidé l'élaboration du projet. Chaque maquette (physique) à partir de cette étape a été réalisée grâce au même principe structurel : une succession de poteaux inclinés (travaillant en compression) retenus par des câbles (répondant aux forces de compression par la tension). Ce principe a permis l'émergence d'une forme originale caractéristique pour le futur projet, inspirée d'une figure de tenségrité (figure 29) qui nous a particulièrement intéressée pour ses qualités géométriques et structurelles (structure auto-tendante).

Afin d'explorer les possibilités de cette forme première particulière, il nous fallait à ce stade la modéliser afin de pouvoir la manipuler. Nous nous sommes ainsi retrouvées face à la problématique de l'outil de modélisation à utiliser. Il faut dire qu'au commencement de notre travail de création, nous ne connaissions pas encore l'outil paramétrique, et nous sommes ainsi orientées vers des logiciels de modélisation 3D que nous maîtrisions. Mais nous verrons qu'au fur et à mesure de l'avancement de notre conception, les outils et les méthodes de travail employés se sont adaptés, et ont eu un grand impact sur notre réalisation et notre efficacité.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AUX DROITS D'AUTEUR

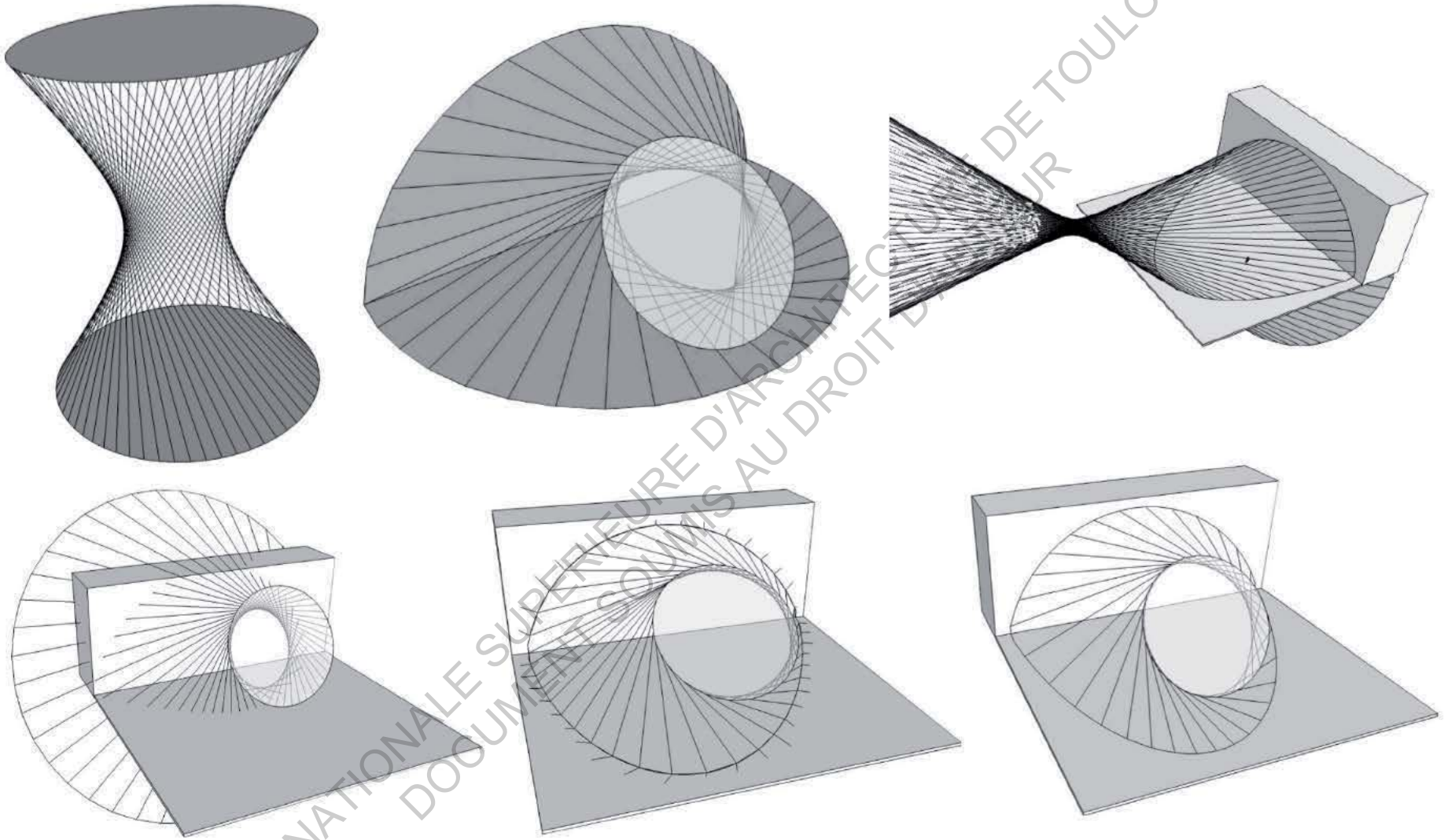


Figure 30 : Modélisation et transformation de l'hyperboloïde sur SketchUp.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

2 - Première tentative de modélisation sur SketchUp

SketchUp est un logiciel interactif de modélisation 3D, développé en 2000 par la startup américaine Last Software, puis acquis et popularisé par Google en 2006. « Actuellement détenu par Trimble Navigation ce dernier est disponible à la fois en version freeware: SketchUp Make pour un usage personnel, et en version payante incluant des fonctionnalités supplémentaires: SketchUp Pro. Depuis le début, son développement a principalement mis l'accent sur sa facilité d'utilisation et sa prise en main rapide »[1]. En effet, pour réaliser un modèle, rien de plus simple : il faut commencer par dessiner des lignes ou des formes, générer des surfaces et les transformer en formes 3D en les poussant ou les tirant, pour ensuite les modifier en fonction du résultat souhaité (copier, étirer, pivoter, etc.). Il s'agit donc ici d'une modélisation directe (non paramétrique), qui exige de la part du concepteur de réaliser chacune de ces opérations de transformation ponctuellement.

Dans le cas de notre projet, notre souhait à ce stade était de pouvoir modéliser une forme de base pour ensuite effectuer dessus différentes opérations de transformation. Nous nous sommes ainsi orientées naturellement vers SketchUp pour l'accomplissement de ce travail, celui-ci répondant parfaitement à nos exigences. Nous avons ainsi pu construire notre forme (une hyperboloïde), et réaliser des déplacements, rotations, redimensionnements de différents éléments afin de créer différentes variantes (figure 30). Mais ce travail « manuel » s'est en réalité avéré être beaucoup moins intéressant et beaucoup plus long que prévu, du fait du temps passé à retravailler le modèle géométrique et les vues. En effet, pour réaliser des représentations « propres » de notre modèle, nous avons dû exporter les vues souhaitées en format d'image, pour ensuite les redessiner en 2D sur Archicad ou Autocad (logiciels de CAO). En plus de nous faire perdre du temps, le passage d'un logiciel à l'autre a fait ici diminuer la précision de notre travail (perte des dimensions par exemple), qui commençait alors à être victime des limites du logiciel utilisé initialement (c'est-à-dire SketchUp). Nous avons ainsi commencé à nous demander si cet outil était réellement pertinent pour notre recherche, et n'avons pas tardé à obtenir la réponse dès la découverte de Grasshopper.

1 Sketchup : logiciel gratuit de modélisation 3D [en ligne]. Disponible sur : < https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/sketchup-definition-fr/ > (Consulté le 06/11/2016).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

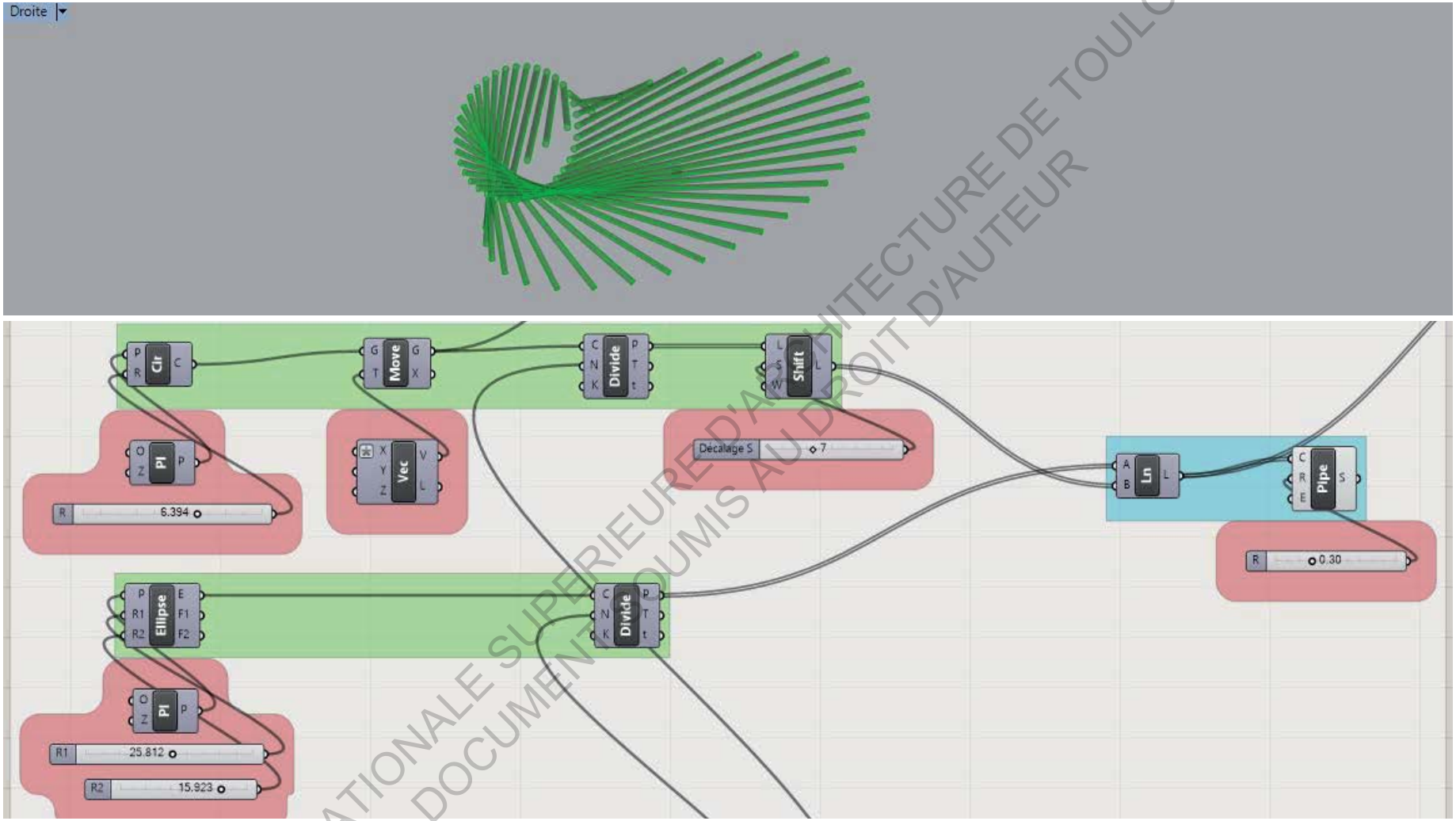


Figure 31 : Représentations explicite et symbolique des poutres et poteaux de la structure.
Pour faciliter la lecture du modèle, un code couleur a été généré : En vert les deux éléments principaux (cercle et ellipse) et les opérations de transformation effectués dessus. En bleu la création des lignes les liant aboutissant sur la génération des éléments de la structure (poutres et poteaux). En rouge les différents paramètres des composants, auxquels nous avons attribué des valeurs.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

3 - Modélisation paramétrique de la structure sur Grasshopper :

Après avoir été introduits à l'outil paramétrique dans le cadre de l'atelier de projet expérimental, il était évident pour nous que l'utilisation de cette technique allait grandement jouer en notre faveur dans le cadre de ce projet. Nous avons ainsi réalisé la modélisation à l'aide de Grasshopper, qui était au départ relativement maladroite mais qui s'est précisée et affinée avec le temps. Nous avons, tout comme sur SketchUp, commencé par construire le modèle de l'hyperboloïde (figure 31). Pour cela, nous avons généré deux éléments principaux : un cercle (composant *Cir*, à partir de son plan normal et son rayon) et une ellipse (composant *Ellipse*, à partir de son plan normal et ses deux rayons). Le cercle, constituant la partie haute de l'hyperboloïde, a été déplacé (composant *Move*) selon le vecteur *Vec* afin d'atteindre la position et l'inclinaison souhaités. Le cercle et l'ellipse ont ensuite été divisés (composant *Divide*) en un même nombre d'éléments (paramètre N en entrée) afin de générer le même nombre de points (paramètre P en sortie). Enfin, ces points ont été liés par le composant *Ln*, qui a généré des lignes entre les points du cercle et ceux de l'ellipse. Pour réaliser la torsion de l'hyperboloïde, différentes possibilités s'offraient à nous (comme par exemple faire pivoter le cercle), mais nous avons ici décidé d'opérer la fonction *Shift* sur les points de division du cercle : cette commande a opéré un décalage des points, qui correspond graphiquement à leur rotation le long du cercle, en prenant la position des points précédents ou suivants. Ce décalage a été fixé ici avec une valeur de 7, ce qui veut dire que chacun des points a été décalé de x-7 points par rapport à sa position initiale sur le cercle (x représentant le nombre d'éléments à décaler, et dans ce cas nous avons 36 points au total). A ce stade, la modélisation de l'hyperboloïde seule était terminée. Mais ce modèle ne représentait en rien la figure de tenségrité qui nous intéressait initialement. Il fallait donc «matérialiser» les éléments de la structure qui travailleraient en compression (poutres et poteaux), ainsi que ceux qui y répondraient en tension (câbles). Pour ce faire, la commande *Pipe* (tuyau en anglais) a été opérée sur les différentes lignes générées, afin de créer des tubes circulaires le long de ces lignes (selon un rayon R). Cette dernière opération avait pour but de donner une certaine épaisseur aux éléments géométriques nécessaires à la structure. Une fois tout ce circuit terminé, nous l'avons dupliqué dans le but d'attribuer l'un à la génération des poutres et poteaux, et le deuxième aux câbles (figure 32, p.59). Enfin, nous avons dû renseigner les valeurs désirées pour chacun des paramètres de ces deux entités. Les différences entre les valeurs attribuées dans les deux circuits se sont opérées principalement sur deux paramètres : le rayon R du composant *Pipe*, représentant l'épaisseur des éléments générés et donc étant plus important pour les poutres et poteaux que pour les câbles, ainsi que le décalage S du composant *Shift*. Ce dernier était le plus déterminant pour notre modèle, puisque tout le principe de notre figure de tenségrité reposait dessus. En effet, dans cette géométrie, les efforts de compression et de tension ne peuvent se répondre qu'à une seule condition : la torsion (ici représentée par x - le décalage S) des

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

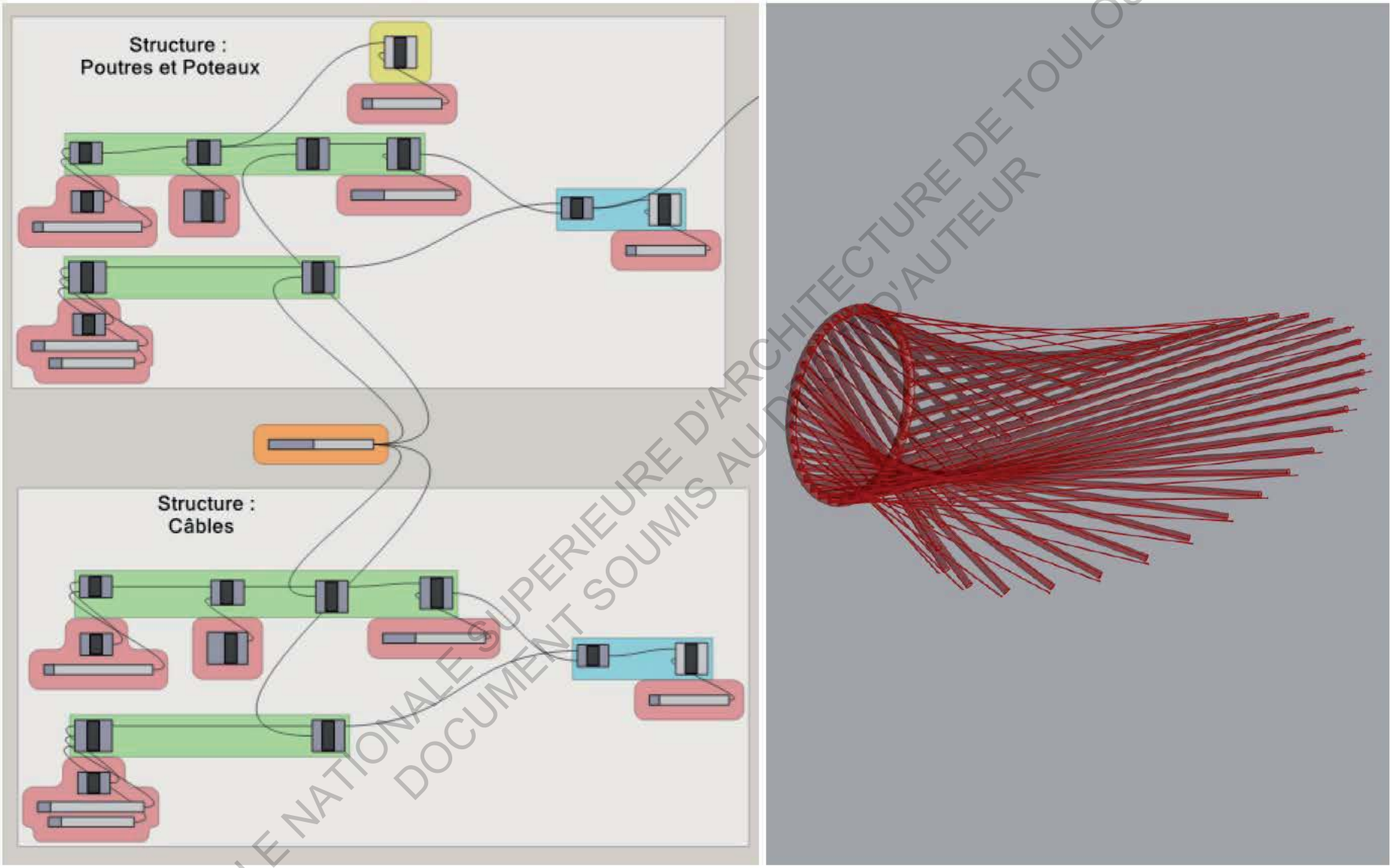


Figure 32 : Représentation explicite et symbolique de l'ensemble de la forme géométrique basée sur le principe de tenségrité.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

éléments en compression doit être plus importante que celle des éléments en tension. C'est ainsi que pour un décalage fixé à 7 pour les poutres et poteaux, nous avons défini la valeur 11 pour les câbles (qui génère finalement une torsion moins élevée). Mais si ce paramètre (décalage S des points du cercle) doit fondamentalement avoir des valeurs différentes dans les deux circuits pour aboutir à une structure de tenségrité valide, un autre paramètre, lui, doit au contraire absolument être identique dans ces deux circuits et pour les deux composants qu'il implique : le nombre par lequel les cercles et ellipses sont divisés. Cette deuxième contrainte a été intégrée à la modélisation en définissant une variable commune aux quatre composants impliqués (dans la figure 32, il s'agit de la variable contenue dans le bloc orange). Si ces deux contraintes en matière de valeurs à attribuer aux paramètres sont satisfaites, alors le modèle est valable d'un point de vue de la performance structurelle recherchée (auto-tendante).

Finalement, c'est ici un système qui a été modélisé, et qui a constitué le point de départ de toute notre conception. Jusque là, il ne s'agissait effectivement que du concept général de la figure de tenségrité, que l'on devait encore manipuler et transformer en vue de l'adapter pour notre projet. Mais nous pouvions déjà à ce stade affirmer que la modélisation paramétrique est celle qui a rendu possible cette géométrie complexe, et qui nous a permis de la « conquérir ». En effet, nous sommes parties de cette forme de tenségrité pour ses qualités structurelles notamment, mais qu'il s'agissait ensuite de comprendre, décomposer et rationaliser dans le cadre d'un modèle paramétrique. L'outil paramétrique nous a ainsi ici permis de comprendre les vecteurs de complexité de cette forme, et nous a offert une plateforme adaptée de travail pour notre projet.

4 - Adaptation aux exigences du site et recherche de forme :

Après avoir réalisé le modèle initial, il s'agissait maintenant pour nous de l'exploiter dans le cadre du site du projet, avec ses problématiques et données propres, et de le faire évoluer conjointement avec notre conception. Nous avons ainsi retravaillé ce modèle afin de l'adapter au site, à ses enjeux et ses exigences, à la recherche de la forme la plus adéquate.

Dans un premier temps, nous avons manipulé la modélisation en orientant la forme initiale vers celle souhaitée pour la future halle. Mais il ne s'agissait jusque là que de l'intervention sur la géométrie de la structure. Bien qu'en la travaillant et pensant en fonction du site dans laquelle elle s'implanterait, ce dernier n'avait pas d'existence réelle dans le modèle, et certaines difficultés associées ont commencé à s'en ressentir dans notre travail. En effet, pour ce qui est de

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

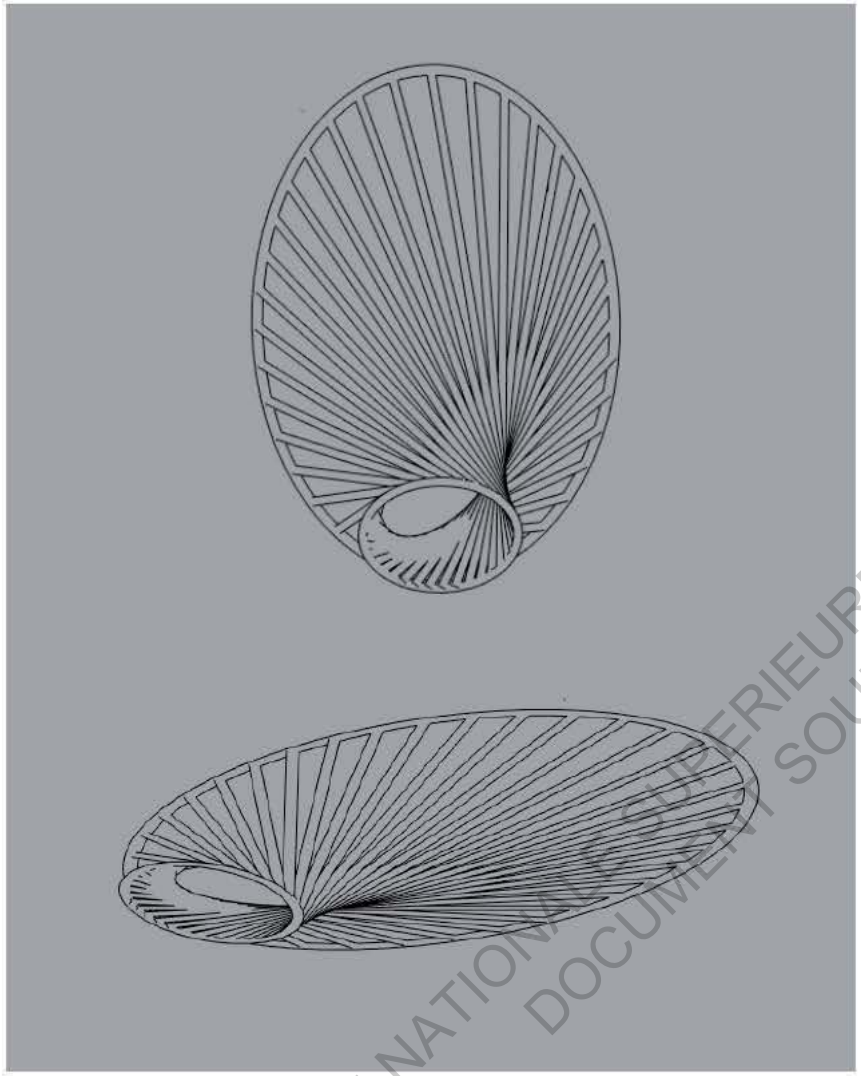


Figure 33 : Projection 2D de la géométrie 3D, réalisée sur Rhino.

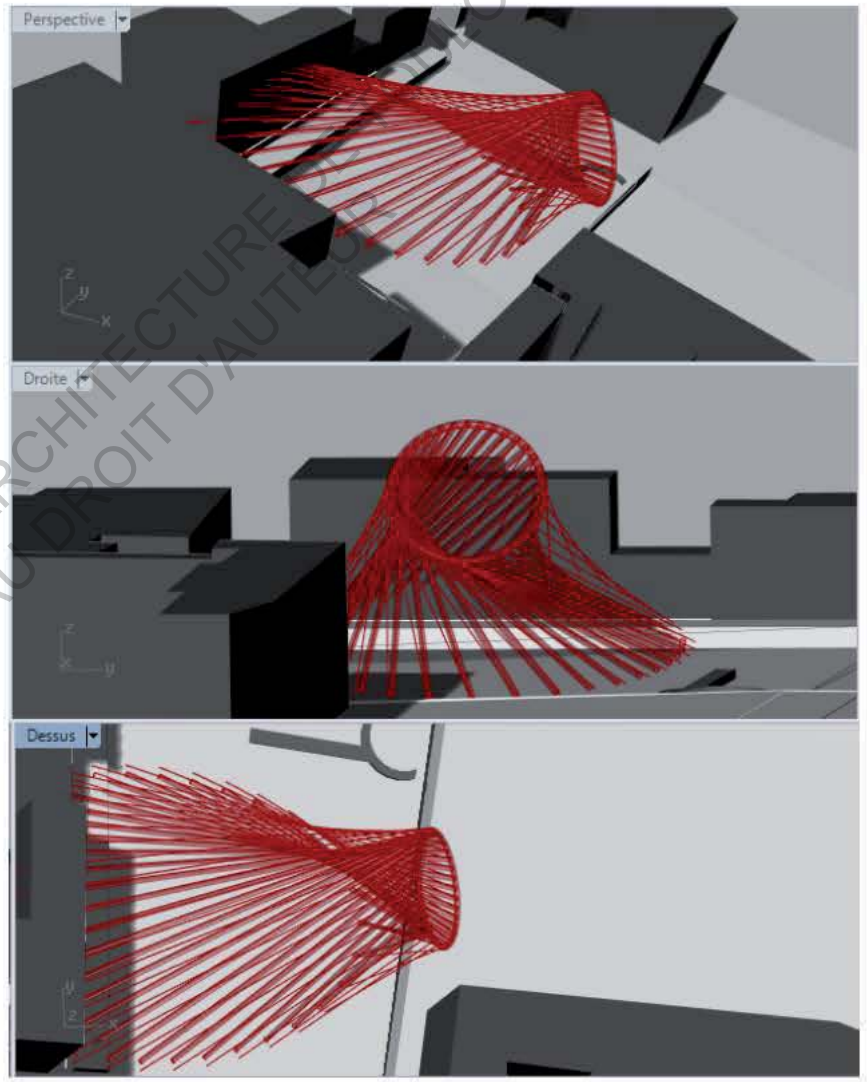


Figure 34 : Visualisation du modèle paramétrique de la structure dans la géométrie du site modélisée sur Rhino.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

la représentation en plan et élévations par exemple, notre travail a été compliqué puisqu'il s'agissait de réaliser une opération de projection 2D de la géométrie 3D générée sur Rhino (figure 33), avant de l'exporter pour l'intégrer au document de fond de plan ou d'élévation du site correspondant. De plus, la forme étant générée « approximativement » en essayant de la visualiser dans ce site, nous n'avions pas pu atteindre la précision voulue dans notre conception. Ce n'est que dans un deuxième temps que nous avons réellement inclus le site dans la modélisation, ce qui a permis une uniformisation des outils utilisés et qui a simplifié notre travail de conception et représentation. Le site a en effet été modélisé en 3D en tant qu'objet géométrique dans Rhino, mais n'était pas paramétrique car il n'y avait pas besoin d'effectuer des variations dessus (données fixes). Bien que l'on travaillait avec deux fichiers différents (la géométrie du site étant contenue dans un fichier 3D Rhino, et la forme de la halle dans un modèle paramétré sur Grasshopper), ces derniers étaient néanmoins liés, et la visualisation de la forme paramétrée générée sur Grasshopper dans le modèle Rhino contenant la géométrie du site a permis une meilleure intégration de la forme dans ce site (figure 34). Il en a ainsi découlé une adaptation plus précise de cette forme aux données et enjeux du site, ainsi qu'une recherche de forme plus juste.

En jouant avec les valeurs des paramètres et variables (dans les figures 31 et 32, tous ces paramètres ont été mis en valeur en étant regroupés dans des blocs rouges), nous nous sommes donc livrées à un travail de recherche de forme, dans le but d'aboutir à la géométrie la plus satisfaisante quant à nos intentions de projet et aux exigences propres du site. Cette phase d'optimisation a été indispensable, et la forme initiale, étant modélisée paramétriquement, s'est facilement prêtée aux transformations nécessaires. Le paramétrique a ainsi ici été exploité comme partie active du développement du projet. Après avoir défini les plages possibles pour les valeurs des variables (dans les blocs rouges), nous avons pu altérer ces dernières afin de découvrir les différentes possibilités du modèle. Et c'est par un jeu de croissance/décroissance et d'inclinaison que nous avons expérimenté plusieurs formes et volumétries. De ce principe, s'est petit à petit élaborée notre forme finale : émergeant d'abord du sol, se développant ensuite sur le mur pignon du site, pour finalement se densifier par un jeu de torsions.

5 - Évolution de la forme jusqu'à l'aboutissement à la proposition finale

C'est durant cette phase que notre conception s'est réellement affinée. L'utilisation de l'outil paramétrique dès le départ nous a été très utile, car nous pouvions ensuite penser et développer le projet dans une totalité géométrique, en étant toujours capable de le considérer dans l'ensemble de ses aspects plutôt que de se référer alternativement à ses

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

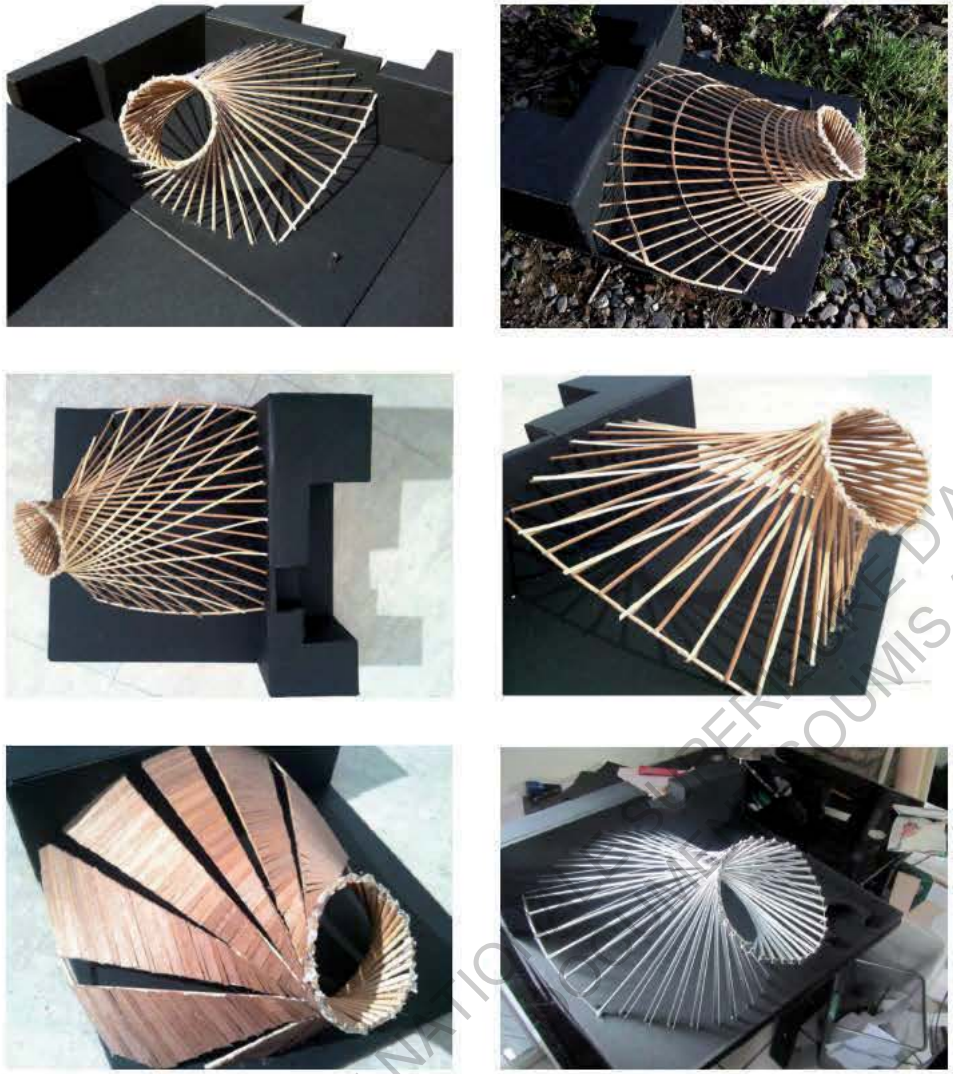


Figure 35 : Nombreuses maquettes d'étude réalisées dans le cadre de ce projet.

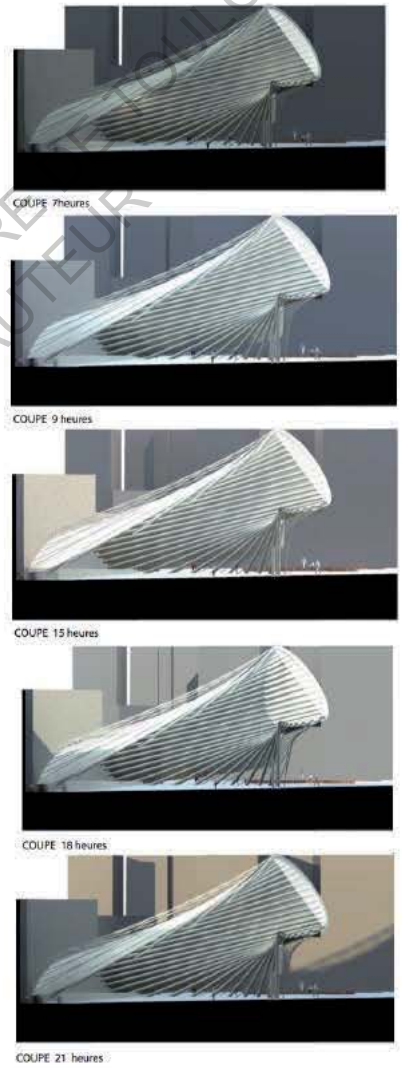


Figure 36 : Etude de l'ensoleillement sur le site et dans la halle, réalisée sur Rhino

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
MÉMOIRE PROTÉGÉ PAR LE DROIT D'AUTEUR

parties distinctes en plan, coupes, élévations (c'est pourtant ce travail que l'on avait amorcé durant les premières semaines de conception, mais nous nous sommes rapidement rendues compte que cette méthode n'était pas viable). Les documents 2D réalisés à partir de là ont été extraits du modèle 3D afin d'apporter ponctuellement des réponses à des problèmes différentes de celles que pose le modèle paramétrique 3D (notamment pour penser les assemblages constructifs). Ainsi, la démarche paramétrique est restée pour nous complémentaire à certains outils traditionnels qui n'ont pas été exclus (réalisation de très nombreuses maquettes d'étude physiques par exemple, voir figure 35).

Néanmoins, c'est au travers des outils paramétriques que nous avons réalisé le principal travail de conception, qui à cette phase était déjà bien amorcé. Après avoir repensé et retravaillé la forme initiale en fonction du site, nous avons effectué un grand travail de recherche de forme plus « poétique », s'adaptant cette fois-ci au programme défini pour la halle. En effet, la forme et la volumétrie de cette halle offrait un espace adapté à l'accueil d'événements artistiques (musique, le théâtre, le cinéma et le cirque). Cette dernière faisait écho dans sa forme au théâtre antique romain et grec, le mur pignon pouvant se transformer à tout moment en frons scenae avec pour projecteur naturel la fenêtre sur le ciel (cercle haut de la structure). De manière plus sensible et artistique, la structure choisie renvoyait au monde circassien. Les différentes images que l'on peut avoir du monde du cirque ont été réinscrites dans la halle (dans sa structure autant que dans sa forme). Tensions, suspensions, gravité, poids, jeux de force, légèreté, air, font partie d'un vocabulaire commun aux deux. Le programme a volontairement laissé une grande part de liberté. L'espace, généré par une demi-ellipse au sol, n'était ainsi pas contraint à une fonction précise, pour au contraire favoriser la spontanéité des événements qui pourraient s'y produire. La grande quantité de variantes réalisées à partir du modèle paramétrique illustrait bien cette volonté de chercher une harmonie de tous les paramètres dans notre proposition finale (plutôt que de se reposer sur une série de décisions conditionnées par l'usage du paramétrique). Ces variantes ont été permises et le travail facilité par l'outil paramétrique, le modèle évoluant de manière très aisée et beaucoup plus rapide que sur SketchUp (au départ). La forme finale a été le fruit des étapes de transformation et d'adaptation du projet au site, programme, intentions, etc. Cette transformation de la forme pour aboutir à la proposition finale répondait également à la prise en compte de données physiques tel que l'orientation du soleil (figure 36).

Pour finir, après avoir bien développé la forme et la structure de la halle, il nous fallait réaliser un dernier travail de conception, cette fois-ci de la couverture de la halle. Ce travail a naturellement découlé de nos intentions premières de projet : nous l'avons recouverte d'une toile en fibre de verre, tendue entre chaque poteau. Par sa légèreté, elle évitait ainsi des charges supplémentaires à la structure, et avait pour caractéristique d'être opaque le jour et translucide la

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

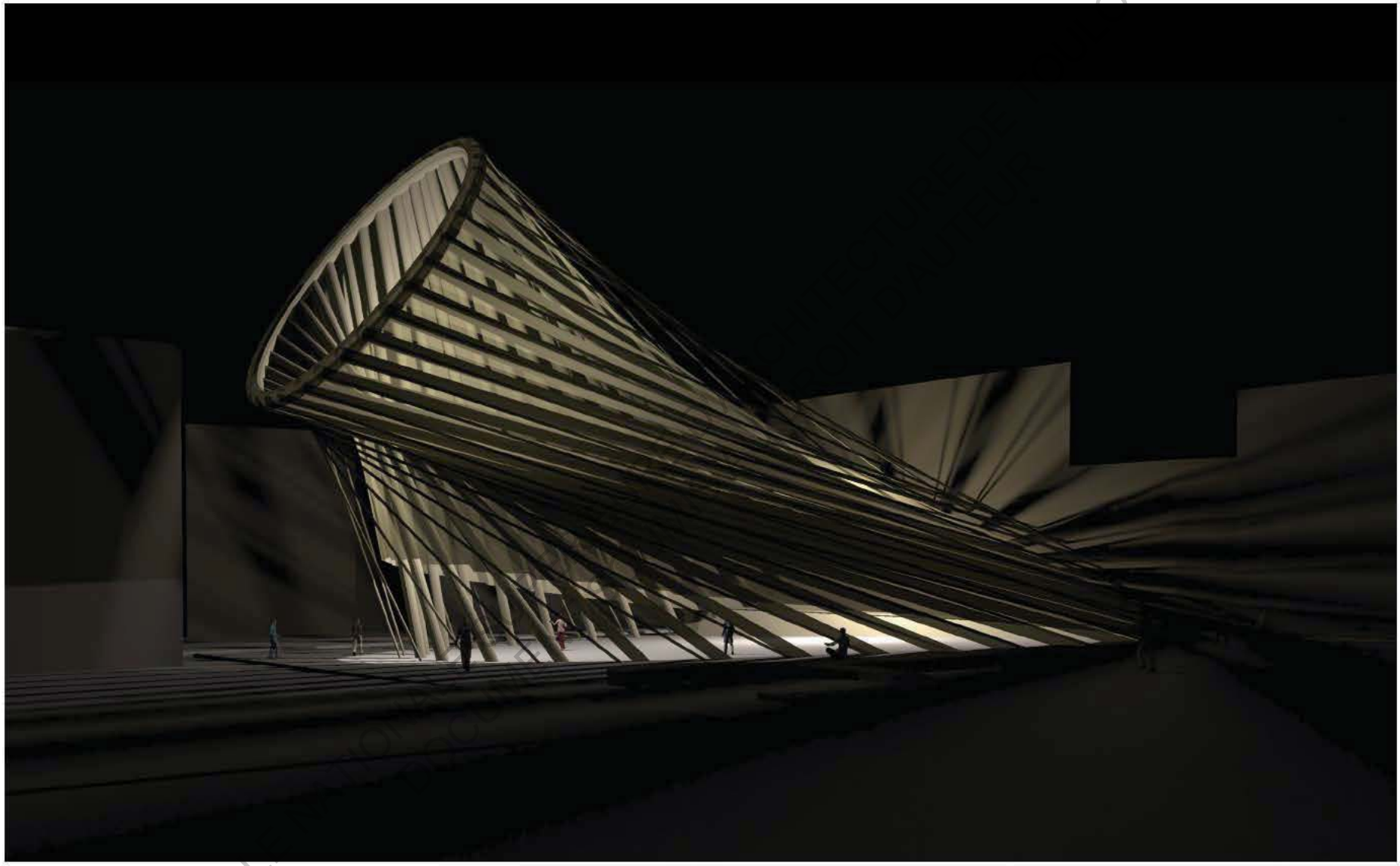


Figure 37 : Vue perspective de nuit du projet.

nuit, révélant à nouveau les lignes initiales de la structure (figure 37). Dans ce dernier travail, Grasshopper nous a permis de rationaliser et concrétiser les éléments de la couverture. La forme de la halle à couvrir étant complexe, nous n'aurions effectivement pas pu effectuer un calcul et une représentation de cette toile tendue à mettre en œuvre sans les outils paramétriques.

6 - Ouverture à de nouvelles sensibilités et pratiques architecturales

Au final, au travers de ce projet et de l'utilisation des outils paramétriques, j'ai eu l'occasion de découvrir tout un nouveau monde de possibilités quant à la conception et plus généralement la pratique architecturale.

Tout d'abord, la modélisation paramétrique nous a permis de modéliser et informer de manière précise la géométrie du projet, qui visait dans les dernières phases de conception à être évaluée (d'un point de vue de la cohérence du projet, de l'étude de l'ensoleillement, etc.). De la même façon, elle a été utilisée dans les premières phases pour interroger les propriétés géométriques, structurelles et techniques de la halle.

De plus, elle nous a permis d'aborder une notion liée à l'usage du paramétrique : l'architecture bio-inspirée (ou biomorphisme). Il s'agit ici de questionnements de la nature et de ses systèmes, au travers de schémas fonctionnels appliqués à l'architecture grâce au paramétrique. Bien que la figure de tenségrité par laquelle notre projet a été inspiré ne soit pas d'origine naturelle, nous avons, au travers de notre projet, abordé un processus de travail similaire (exploration technique et géométrique d'un système d'organisation nouveau, complexe, par sa rationalisation au sein d'un modeleur).

Enfin, nous avons également découvert avec ces nouveaux outils des possibilités de production nouvelles, numériques. On parle ici dans notre cas plus précisément de l'impression 3D et de la découpe laser, que l'on a pu expérimenter au FabLab de Toulouse. En effet, grâce à l'utilisation du paramétrique, comme nous avons accès et pouvons manipuler toute information contenue dans le modèle, il est très aisé de faire ressortir les données relatives à une fabrication numérique. Il suffit effectivement d'«exporter» les valeurs des éléments concernés puis de les intégrer au processus de fabrication : par exemple exporter le profil d'une pièce en vue de sa découpe (découpe laser), ou encore exporter un volume géométrique en vue de sa fabrication intégrale (impression 3D). Dans le monde du bâtiment, la numérisation de la production est aujourd'hui de plus en plus courante, et concerne tout autant la construction de formes complexes que la préfabrication d'éléments d'un bâtiment (usinage, prototypage, etc.).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Conclusion

En conclusion de cette recherche, nous pouvons affirmer que depuis leur émergence il y a 50ans, les outils paramétriques se sont beaucoup développés et ont été révolutionnaires dans le domaine de l'architecture. Assisté par ces outils puissants, l'architecte peut se livrer à la modélisation de géométries complexes, pensées et générées à partir d'un système de contraintes basé sur les paramètres du projet. On parle ici d'architecture de relations, ou architecture de paramètres. Cette pratique nouvelle influe grandement sur le travail du concepteur, qui voit sa réflexion guidée par ce système nouveau d'équations mathématiques et algorithmiques. D'une liberté considérable, ces outils permettent une conception sans contraintes de création, modélisation ou réalisation, ce qui a déjà séduit de nombreux professionnels dans le design et l'architecture. En plus de leur permettre un gain de temps considérable, cette technique laisse place à une plus grande créativité, et invite à l'exploration de nombreuses possibilités et variations de solutions architecturales à partir d'un même modèle. Par les données, contraintes, et toutes autres informations qu'un modèle paramétrique peut contenir, celui-ci se voit être une « pièce d'identité » du projet, témoin à la fois de la forme géométrique sensible représentant le projet, mais également de la réflexion du concepteur qui l'a généré. L'intégration de toutes ces données dans un modèle sont également souvent à l'origine d'études techniques, géométriques, structurelles, etc. très poussées, qui prennent en compte tous les aspects du projet, et qui peuvent en ce sens donner lieu à des conceptions novatrices très performantes. Enfin, cet outil assiste de nos jours l'architecte dans son rôle de créateur, en permettant l'émergence de nouvelles sensibilités ainsi que l'enrichissement de nombreuses pratiques autour de la conception, comme la fabrication numérique, le biomorphisme, ou encore la collaboration et le partage de données (BIM). Ces enjeux nouveaux mènent alors vers un rôle encore plus large de l'architecte, et aujourd'hui, les outils ainsi que leurs possibilités et pratiques associées sont en constante évolution. Ce phénomène soulève de nombreuses questions concernant les défis qui attendent la discipline architecturale de demain.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

BIBLIOGRAPHIE

AGBOBAN Dago, Nomination persistante dans un modèle paramétrique, Identification non- ambiguë et appariement générique d'entités topologiques. Thèse de doctorat Université de Poitiers, Poitiers, 2002.

AISH Robert, "From Intuition to Precision.", 23rd eCAADe Conference Proceedings, Lisbonne, Université Technique de Lisbonne, 2005.

BOSIA Daniel, Mathematics of space: Long form and algorithm. Article de la revue Architectural design n°4, Juill-Août 2011.

DE BOISSIEU Aurélie, Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie. Architecture. Paris : Université Paris Est, ENSA Paris la Vilette, Juin 2013.

EVERAERT-DESMEDT Nicole, Le processus interprétatif: Introduction à la sémiotique de Ch.S. Peirce, Paris, Mardaga,1995.

GERO John S., Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design, AI Magazine, Volume 11, 1990, p. 26 à 36.

JABI Wassim, Parametric Design for Architecture, Editions Laurence King, Londres, 2013.

KALAY Yeruda E., Architecture's New Media : Principles, Theories and Methods of Computer- Aided Design, 2004.

KRAUEL Jacobo, Conception et fabrication numériques : Architecture et design contemporain, Editions Links, 2010.

MACLEAMY Patrick, «Patrick MacLeamy on the Future of the Building Industry» [en ligne] HOK, 2010. Disponible sur < http://www.hok.com/thought-leadership/patrick-macleamy-on-the-future-of-the-building-industry/ > (Consulté le 16/04/2016).

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

PICON Antoine & RAZAVI Alireza, Architecture numérique : Culture et stratégies opératoires, D'Architectures, Février 2011, p.31 à 49.

SCHEURER Fabian & STEHLING Hanno, Matematics of space : Lost in parameter space ? Article de la revue Architectural design n°4, Juill-Août 2011.

SCHUMACHER Patrik, 2008. Parametricism as Style, Parametricist Manifesto. [en ligne] Disponible sur < http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm >. (Consulté 05/12/2015).

SHELDEN Dennis R., Digital surface representation and the constructibility of Gehry's architecture. Thèse de doctorat Massachusetts Institute of Technology, 2002.

SMITH Rick, Technical Notes from experiences and studies in using Parametric and BIM architectural software [en ligne] Virtual Build Technologies, 2007, 6p, Format PDF. Disponible sur < http://www.vbtllc.com/images/VBTTechnicalNotes.pdf > (Consulté le 11/10/2016)

SUTHERLAND Ivan Edward, Sketchpad : A man-machine graphical communication system. Thèse de Doctorat, Cambridge, University of Cambridge, 1963.

WOODBURY Robert, Elements of Parametric Design, Routledge Editions, Londres, 2010.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Table des illustrations

Couverture : Rendu d'une vue perspective de nuit du projet « Imposante légèreté », réalisé à l'ENSA Toulouse en 2013, en binôme avec Clarisse Moncoucut.

Page 3 : Figure 1 : Exemple de conception paramétrique, projet «Gathering» conçu par Dale Suttle, So Sugita, et Ginna Nguyen (New York), Source : < http://bustler.net/news/1710/sukkah-city-2010-winners-announced >.

Page 5 : Figure 2 : Aperçu d'un projet d'étude conçu paramétriquement avec Grasshopper, et visualisé sur l'interface de Rhinocéros 3D : Pavillon de production et d'exposition de maquettes physiques, projet réalisé dans le cadre du séminaire Architectures Numériques à l'ENSA Toulouse (2015).

Page 7 : Figure 3 : Évolution d'un modèle paramétrique simple réalisé à l'aide de Grasshopper et visualisé sur Rhino, suite à la modification d'un seul paramètre : la côte du carré central.

Page 9 : Figure 4 : Du modeleur à la représentation de l'architecture. Source : DE BOISSIEU Aurélie, Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie. Architecture. Paris : Université Paris Est, ENSA Paris la Vilette, Juin 2013, p.23.

Page 11 : Figure 5 : Exemple de paramétrisation d'un objet préconçu sur Revit : il s'agit ici d'un mur que l'on a sélectionné afin d'avoir accès à son information via une fenêtre de propriétés. Nous pouvons ainsi renseigner de nombreuses données et contraintes relatives à ce mur.

Page 13 : Figure 6 : Interface de Grasshopper : la scène est l'espace central de travail, sur laquelle nous pouvons faire glisser des composants depuis la barre d'outils juste au dessus (classés par types de programmes).

Page 15 : Figure 7 : Les composants (éléments) sont les blocs, chacun renfermant un programme. Le système de relations mis en place entre les éléments est représenté par les arcs qui les lie. Dans cet exemple, nous avons généré un cercle C en lui attribuant des données pour 3 de ses paramètres : son centre, son vecteur normal et son rayon.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Page 17 : Figure 8 : Représentation explicite et symbolique d'une structure.

Page 19 : Figure 9.A : Génération d'un cercle à partir de deux paramètres : son plan de référence (dont l'origine sera le centre du cercle), et son rayon.
Figure 9.B : Génération d'un cercle à partir de trois paramètres : son centre, son vecteur normal et son rayon.
Figure 9.C : Génération d'un cercle à partir de trois données et une contrainte commune : le cercle doit passer par les trois points définis.

Page 21 : Figure 10 : Pendant la manipulation d'un modèle, la structure visualisée sur Rhino ne constitue qu'un aperçu de la géométrie que l'on est en train de concevoir. Après avoir opéré la fonction « bake », cette géométrie « se matérialise » dans Rhino.

Page 23 : Figure 11 : Image caractéristique, presque stéréotypée d'une architecture paramétrique. Projet de la tour de fibre de Kokkugia. Source : KRAUEL Jacobo, Conception et fabrication numériques : Architecture et design contemporain, Editions Links, p.118.

Page 25 : Figure 12 : Yvan Sutherland face à sa console Sketchpad. Sketchpad fonctionne à l'aide d'un stylet lumineux (dans sa main droite) et une boîte à commande avec de nombreux boutons poussoirs (face à lui). Les 4 boutons noirs sous l'écran servent à ajuster l'échelle et la position de l'image. Source : < http://www.designworldonline.com/50-years-of-cad/ >.

Page 27 : Figure 13 : Yvan Sutherland en train de réaliser une modélisation paramétrique sur Sketchpad. Source : < http://www.pbs.org/wgbh/nova/specialfx2/1960.html >.

Page 29 : Figure 14 : Résolution d'un système de contraintes sans outil paramétrique.

Page 31 : Figure 15 : Exploration d'une grande quantité de variantes dans le cadre du projet de la tour Phare à Paris (agence Morphosis), rendue possible grâce aux outils paramétriques. Source : PICON Antoine & RAZAVI Alireza, Architecture numérique : Culture et stratégies opératoires, D'Architectures, Février 2011, p.44.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Page 33 : Figure 16 : Deuxième page du rapport de Rick Smith. Il y décrit 5 difficultés rencontrés par les architectes lors de l'utilisation d'outils paramétriques : les modèles exigent un important travail de renseignement de données en amont, anticiper la flexibilité du modèle peut être difficile, les grands changements tuent les modèles, certains changements peuvent être difficiles à repérer, et enfin la réutilisation et le partage des modèles posent problème. Source : < http://www.vbtllc.com/images/VBTTechnicalNotes.pdf >.

Page 35 : Figure 17 : Courbe de Patrick MacLeamy. Source : < http://www.esl-29.com/notre-savoir-faire-2/bim2/ >.

Page 37 : Figure 18 : Différentes vues composées puis exportées depuis un modèle 3D conçu paramétriquement. Images du projet « Chroniques d'une guérison » de Yaojen Chuang. Source : KRAUEL Jacobo, Conception et fabrication numériques : Architecture et design contemporain, Editions Links, 2010, p.378 à 385.

Page 39 : Figure 19 : Espaces de conception : En 1990, Gero aborde le processus créatif en conception par les notions de conception routinière, conception innovante et conception créative. Les conceptions innovantes sont pour lui des conceptions de structure familière, mais d'apparence nouvelle, car les valeurs des variables déterminantes ne sont pas familières, alors que les conceptions créatives sont obtenues en introduisant de nouvelles variables qui vont produire de nouveaux types. Source : GERO John S., Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design, AI Magazine, Volume 11, 1990, p. 26 à 36.

Page 41 : Figure 20 : Swarm Matter est une recherche menée par Kokkugia, qui explore la génération de géométries ornementales au moyen de la modélisation paramétrique. Source : KRAUEL Jacobo, Conception et fabrication numériques : Architecture et design contemporain, Editions Links, p.126 à 129.

Page 43 : Figure 21 : Manque de lisibilité d'un modèle paramétrique : plus le programme généré est complexe, plus le circuit devient incompréhensible.

Page 45 : Figure 22 : Regroupement des composants d'un modèle paramétrique en blocs, qui permet une meilleure clarté du circuit.
Figure 23 : Mise en évidence d'un composant et de la géométrie qu'il a généré (en surbrillance).

Page 47 : Figure 24 : Projet de la tour Phare à Paris réalisé par l'agence Morphosis. Sources : < http://is-arquitectura.es/2012/05/07/phare-tower-rascacielos-la-defense-paris/ >, < http://www.e-architect.co.uk/paris/phare-tower-paris >.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Page 49 : Figure 25 : Poésie et technique : Bien utilisés, les outils paramétriques s'intègrent finalement très bien au processus de conception architecturale, en apportant non seulement leur capacité technique et constructive, mais également leur potentiel poétique et symbolique.
Image du projet de cliniques et laboratoire de transplantation d'organes, Jeanes Bong et Jonathan Alotto, Hong Kong.
Source : KRAUEL Jacobo, Conception et fabrication numériques : Architecture et design contemporain, Editions Links, p.365.

Page 51 : Figure 26 : Planches de rendu et maquettes réalisées dans le cadre du projet « Imposante légèreté ».

Page 53 : Figure 27 : Premières maquettes d'expérimentation réalisées avec des matériaux souples.
Figure 28 : Deux principes explorés au travers de maquettes d'étude : le travail des éléments en tension et le tressage.
Figure 29 : Maquette réalisée sur le principe de la tenségrité. Source : < http://www.tensegriteit.nl/e-ellipse.html >.

Page 55 : Figure 30 : Modélisation et transformation de l'hyperboloïde sur SketchUp.

Page 57 : Figure 31 : Représentations explicite et symbolique des poutres et poteaux de la structure.
Pour faciliter la lecture du modèle, un code couleur a été généré : En vert les deux éléments principaux (cercle et ellipse) et les opérations de transformation effectués dessus. En bleu la création des lignes les liant aboutissant sur la génération des éléments de la structure (poutres et poteaux). En rouge les différents paramètres des composants, auxquels nous avons attribué des valeurs.

Page 59 : Figure 32 : Représentation explicite et symbolique de l'ensemble de la forme géométrique basée sur le principe de tenségrité.

Page 61 : Figure 33 : Projection 2D de la géométrie 3D, réalisée sur Rhino.
Figure 34 : Visualisation du modèle paramétrique de la structure dans la géométrie du site modélisée sur Rhino.

Page 63 : Figure 35 : Nombreuses maquettes d'étude réalisées dans le cadre de ce projet.
Figure 36 : Etude de l'ensoleillement sur le site et dans la halle, réalisée sur Rhino.

Page 65 : Figure 37 : Vue perspective de nuit du projet.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE

Mémoire de séminaire : conditions de consultation

Ce document est protégé par le droit d'auteur (art. L. 112-1 du Code de la propriété intellectuelle).

L'auteur du document accorde les droits d'usages suivant :

	OUI	NON
Consultation sur place	☑	☐
Impression	☑	☐
Diffusion Intranet	☑	☐
Diffusion Internet	☑	☐
Exposition	☑	☐
Publication non commerciale	☑	☐

ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

École nationale supérieure d'architecture de Toulouse _83 rue Aristide-Maillol _BP 10629 _31106 Toulouse cedex 1
Tél. : 33 (0)5 62 11 50 50 _Fax : 33 (0)5 62 11 50 99 _Courriel : ensa@toulouse.archi.fr _Site : www.toulouse.archi.fr

Établissement public décret 81.333 du 6-4-81 _N° siret : 193 101 508/00011 _Code ape : 9215