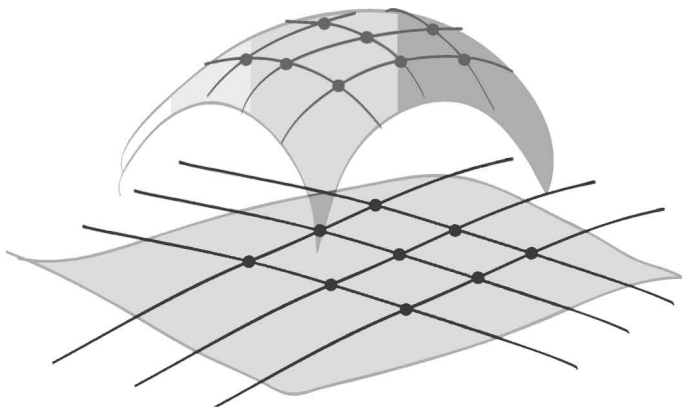


École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy  
Université Henry Poincaré ( Nancy 1)  
Institut National Polytechnique de Lorraine



David Davalos Sanchez

Master Design Global  
Architecture Modélisation Environnement  
Directeur : Mr Gilles Duchanoise  
MAP CRAI - Septembre 2011

Conception paramétrique des structures  
Approche bois tectonique à de formes non standard



# Remerciements

Merci à tous qui m'ont permis d'être ici. À tous qui m'ont accompagné pendant la réalisation de cette mémoire. À tous qui m'ont guidé, qui m'ont aidé, qui m'ont supporté et qui m'ont enseigné. Merci à vous tous.

# 1. Abstract

With the introduction of digital representation and advanced geometric description of architectural form, architectural design is confronted to a renewal of his formal and tectonic vocabulary. A deeper gap between architects-designers and engineers-producers it's been creating from the separations of competence at the earliest phases of conception. More than never, tectonics approaches and physical constraints are concepts that must be included to rationalize the non standard geometrical models in order to clarify the "design to production" process.

Optimizing the concept of arcs' grid projection, this paper re-introduces tectonics' considerations by approaching structural engineering analysis at the conception phase through an interactive perspective. By a series of tools, this work concatenates parametric design with structural analysis, and achieves interoperability between form and its structural performance. Using computer programming and easy access programs, Parametric Wood Design is linked to Structural Analysis to establish a framework that leads to performance based designs that respond to structural constrains and conditions. The tectonics synergy between form and structure is exemplified by interactively modeling, analyzing, validating and visualizing its response.

Keywords

---

Parametric modeling, digital design, tectonics, timber construction, structural analysis

# Sommaire

1. Abstract	3
2. Introduction	8
3. Contexte	10
3.1 Etat de l'art	12
3.1.1 AG Architectural Geometry et Evolute	12
3.1.2 DTP Desing to Production	13
3.1.3 Interactive Structural Analysis	15
3.2 La démarche à partir du modèle théorique-géométrique existe. «La grille des arcs »	16
3.3 Le contexte, premier conclusion	18
4. La méthode de calcul	20
4.1 Le calcul structurel: les paramètres	21
4.1.1 La géométrie	21
4.1.2 Les appuis	22
4.1.3 Les efforts	23
4.2 Le calcul structurel : processus	25
4.2.1 La stabilité, les assemblages et les appuis	25
4.2.2 Le dimensionnement	26

4.3 Calcul structurel par éléments finis	27
4.3.1 Le concept	27
4.3.2 La méthode	28
4.3.3 Représentation physique tectonique	29
4.4 Conclusion: la méthode du calcul et sa relation avec la grille des arcs, les paramètres	30
5. Le modèle et son processus	32
5.1 Les environnements choisis de modélisation paramétrique et calcul structurel	33
5.1.1 Grasshopper de Rhinoceros	33
5.1.2 GH Karamba	34
5.1.3 RDM6	35
5.2 Le processus	36
5.3 Le processus: conception géométrique	37
5.3.1 La surface, enveloppe formelle, et la surface d'appui	37
5.3.2 La grille des arches et sa projection	38
5.3.3 Les profils, les fuseaux et le décalage	39
5.3.4 Les nœuds, les assemblages et les appuis	41
5.3.5 La discrétisation et les éléments de sortie	41
5.4 Le processus: calcul structurel approximatif	42
5.4.1 Les paramètres	42
5.4.2 L'analyse structurelle approximative et l'interactivité avec le modèle géométrique	43
5.4.3 La validation	44
5.5 Le processus: calcul et validation structurel	44
5.5.1 Les paramètres et le processus	45
5.5.2 Le résultat et la validation	46
5.6 Conclusion	48

6. Expérimentation	49
6.1 Le processus: conception géométrique	50
6.1.1 La surface enveloppe formel et la surface d'appuie	50
6.1.2 La grille des arcs et sa projection	51
6.1.3 Les profils, les fuseaux et le décalage	51
6.1.4 Les nœuds, les assemblages et les appuis	52
6.1.5 La discrétisation et les éléments de sortie	52
6.2 Le processus: calcul structurel approximatif	53
6.2.1 Les paramètres	53
6.2.2 Analyse structurelle approximative et Interactivité	54
6.2.3 La validation	54
6.3 Le processus: calcul et validation structurel	55
6.3.1 Les paramètres en corrélation avec le processus	55
6.3.2 Le résultat et la validation	56
6.4 Conclusion	57
7. Conclusions et perspectives	58
7.1 Conclusion	58
7.2 Les Limites	60
7.3 Le travail futur	61
8. Notes	62
9. Table des illustrations	63
10. Références	66
10.1 Livres	66

10.2 Documents	66
10.3 Articles	67
10.4 Internet	68
10.4.1 Documents	68
10.4.2 Etat de l'Art	68
10.4.3 Logiciels	69
11. Annexes	70



## 2. Introduction

Ce travail de recherche prend place dans le cadre du Master Design Global spécialité « Architecture, Modélisation, Environnement », au sein du laboratoire MAP-CRAI, le CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie) étant le laboratoire de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. Le CRAI mène des recherches sur la simulation et visualisation pour l'architecture, et la simulation de la construction de bâtiments en développant aussi des méthodes et outils informatiques relatifs à la conception. Cette notion de conception architecturale représente une notion essentielle dans le cadre de la recherche qui va être exposée.

La « **Conception paramétrique des structures : approches tectoniques de formes non standard** », est un sujet de recherche encadré dans un continuum du travail de la thèse que mène actuellement Shaghayegh Shadkhou. Il est aussi un projet collaboratif qui vient compléter les travaux recherche de Michael Castex (Elaboration d'un outil d'aide à la transformation de modèles géométriques en géométries constructives-2010) et de Nicolas Jacobs (Elaboration d'un modèle paramétrique d'assemblages bois pour le calcul des structures non standard-2011) en cherchant une approche tectonique de formes non standard.

Le projet, d'une durée de cinq mois, a pour objectif la création d'un modèle géométrique structurel calculé et validé par la méthode des éléments finis. Il s'appuie sur la paramétrisation et l'optimisation du modèle de génération géométrique proposé dans la thèse mentionné précédemment. Pour arriver à ce résultat, ce rapport est subdivisé en fonction des objectifs suivants.

Dans un premier temps, on **analysera le contexte général des processus de conception des structures non standards dont les modèles déjà proposés au sein du CRAI**. Le contexte, la problématique générale, l'horizon des travaux similaires et l'état de l'art seront présentés donc une modèle précédemment proposé au sein du CRAI. Ensuite, **l'analyse de la méthode de calcul par éléments finis et ses besoins géométriques** seront exposés afin de définir les paramètres nécessaires dans le développement du modèle proposé dans ce mémoire.

La suite de ce rapport sera consacrée au modèle proposé. **A partir d'une architecture non standard en phase de conception, on cherche à développer un modèle et une méthodologie capable de générer un système géométrique structurel, à le pré-dimensionner, le calculer et le valider**. Le chapitre abordera le modèle proposé, le choix et les limites des environnements de modélisation paramétrique et calcul utilisés, et le processus appliqué.

Pour **valider le modèle proposé par l'expérimentation**, un projet contemporain et significatif d'architecture non-standard en structure bois sera abordé, remodelé, réinterprété et validé selon la méthode ici proposée.

Finalement, la dernière partie portera un regard critique sur la pertinence du modèle proposé et sa méthodologie, ses potentialités et limites et ouvrira finalement une perspective concernant le travail à venir.

### 3. Contexte

L'introduction de la modélisation et la paramétrisation numériques des formes géométriques non standards<sup>i</sup> dans le langage architectural est une réalité. De nouvelles formes de plus en plus complexes émergent dans les revues et les concours en attirant l'attention de toute la communauté architecturale. Des projets divers autour du monde nous montrent que le langage formel de l'architecture a changé et s'est complexifié, (ou au moins il a augmenté), en rendant plus difficile aussi leur planification, matérialisation, et mis en œuvre.

Le fait de négliger ou d'oublier la réflexion tectonique<sup>ii</sup> du modèle architectural non standard modelé dans les environnements numériques, génère des grands problèmes sur sa réalisation. En plus, la séparation presque totale des compétences entre l'architecture (géométrie) et l'ingénierie (calcul-matériau) dans les premières étapes de conception fait que des nombreux projets contemporains excèdent leurs temps de fabrication et de construction et leurs budgets initiaux en mettant aussi en question leur caractère durable depuis le premier moment.

Dans ce contexte, il semble nécessaire que la réflexion tectonique du projet, ses implications et contraintes physiques doivent être prises en compte directement à la phase de conception en accompagnant le processus. En réponse à cette problématique, la proposition d'un modèle ou d'une méthode de transition capable de répondre aux paramètres géométriques, structurels et du calcul est en train d'émerger. Des propositions diverses générées par des experts sont prises en compte pour la première fois comme une ensemble sous le titre de « Nouveau Structuralisme »<sup>1</sup>. Cette notion propose et

---

<sup>1</sup> « The New Structuralism », titre de la revue Architecture Design, aout 2010.

exemplifie la génération des étapes intermédiaires de conception pour valider la forme architecturale en fonction de sa performance structurelle en une claire réinterprétation de la notion de tectonique et en rapprochant l'architecture et l'ingénierie.

Deux concepts sont spécialement remarquables et renforcent la nécessité de générer un dialogue entre forme et structure, en démocratisant le processus de conception. Le premier concept est la figure de « design-engineer »<sup>2</sup>. Cette figure innovatrice, est un nouvel acteur qui, avec la connaissance sur une branche de l'ingénierie et une grande sensibilité architecturale, vient à jouer le rôle de consultant à la phase de conception d'un projet pour tester sa performance structurelle et sa pertinence géométrique par rapport sa logique constructive.

La mise en place d'un « Nouveau Structuralisme » essaie de mettre au jour une méthodologie de projet tectonique. Elle permettra de traverser les trois étapes du processus de conception: la recherche de la forme, puis le contrôle, le dimensionnement et la quantification de ses éléments selon une logique constructive qui tient compte des contraintes physiques, et enfin, la fabrication de tous ces éléments. Cette façon, logique et systémique, permet un aller-retour entre les étapes et une vraie compréhension et compénétration collaborative des compétences.

En fonction de cet nouvel espace pour la conception non standard; des architectes, des ingénieurs et des chercheurs autour du monde essaient de développer des méthodes, des modèles et des outils qui permettent un positionnement définitif, durable et éco responsable de l'architecture non standard dans la totalité de ces étapes et expressions. C'est dans cet espace que la recherche ici présentée vient à se développer et pourtant c'est dans cet espace aussi qu'il faut analyser des modèles déjà proposés dans l'état de l'art.

---

<sup>2</sup>OXMAN, Ryvka et Rober. – « the New Structuralism, Design, Engineering an Architectural Technologies », dans «Architectural Design 04-2010 *The new Structurelism*», Londres, John Willey, 2010.

### 3.1 L'état de l'art

---

Trois méthodes sur l'approximation tectonique et la relation architecture-ingénierie seront exposées en allant de la plus éloignée du modèle proposé au CRAI à la plus proche. Elles ont l'intention de guider le processus conception-fabrication numérique non standard par des approximations diverses mais complémentaires. La première (AG- Evolve) est une approche d'optimisation géométrique sur la modélisation. La deuxième (DTP) est une méthode de consultation de post conception formel jusqu'à la fabrication. Finalement et en approchant du travail ici développé, la troisième est une recherche sur la communication des logiciels de modélisation et des logiciels du calcul de façon interactive.

#### 3.1.1 AG Architectural Geometry et Evolute

Le concept et l'importance de la géométrie dans la composition architecturale ne sont pas nouveaux. Non plus l'idée de la rationalisation géométrique pour arriver à une forme structurelle- constructive. Néanmoins, quand la géométrie devient non standard la complexité formelle fait que l'analyse et la rationalisation géométrique ne sont plus évidentes. Helmut Pottmann<sup>iii</sup> et son équipe sont plusieurs groupes de recherche qui essaient de pousser l' « Architectural Geometry » vers un nouveau niveau de performance et compréhension capable de supporter le nouveau lexique architectural non standard.

A travers de ses nombreux écrits<sup>3</sup>, et spécialement comme consultant d' « Evolute » Pottmann insiste dans la potentialité de la géométrie non seulement pour créer une approximation générative plus excitante pour des architectes, mais aussi, pour rendre le processus de modélisation constructivement conscient et créer un continuum du flux d'information de la conception vers la fabrication. Dans « Evolute » (<http://evolute.at>), ces principes sont appliqués pour rationaliser des formes complexes en composants (facettes et substructures) les plus simples possibles pour optimiser le processus de



Figure 1 modèle original reçu

---

<sup>3</sup> Notamment: POTTMAN, H. – « Architectural Geometry as Design Knowledge », dans « Architectural Design 04-2010 *The new Structuralism* », Londres, John Willey, 2010. POTTMAN, H.; ASPERL, A.; HOFER, M. – « Architectural Geometry », Waltham, Bentley Institute Press, 2007.



Figure 2 modèle optimisé par AG

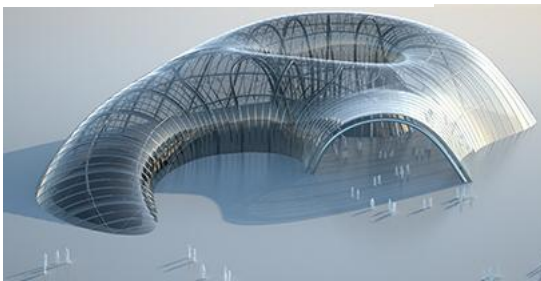


Figure 3 modèle final

fabrication.

La méthodologie d'optimisation de la géométrie non standard déjà modélisée commence par la recherche d'une subdivision rationnelle de l'objet en facettes. Le processus commence par une facettisation avec des facettes planaires. Si ce modèle n'est pas possible ou si le résultat diverge trop de la forme originale ou si ses composants complexifient davantage le processus de calcul structurel ou de fabrication, la facettisation recommence. Ils essayeront donc des formes de courbure simple régulières et irrégulières ; ensuite des facettes de courbure double et triple pour finalement chercher des combinaisons diverses des facettes et maillages. Le résultat cherchera toujours une nouvelle logique tectonique constructive par optimisation de ses composants (répétition, préfabrication, faisabilité, structuration) mais en gardant toujours la forme originale donnée par des architectes concepteurs.

Mais bien que les résultats aident à la compréhension formelle en fonction de sa géométrie et de sa génératrice mathématique dérivée, tout en donnant une approximation de la logique constructive, la difficulté réside dans l'interactivité limitée du modèle architectural qui est rarement modifié. En plus, le modèle proposée sert à rapprocher pas à pas à lier le modèle architectural (géométrie) et d'ingénierie (calcul-matériau) pour sa validation physique et sa séquence constructive. En conclusion, c'est une approximation valide pour l'optimisation géométrique des formes complexes mais elle paraît perdre force au moment d'interagir avec le processus de conception et lors de l'analyse structurelle qui est limitée.

### 3.1.2 DTP Design to Production

Ce n'est pas nouveau que l'intégration des connaissances et compétences tectoniques de structure, matérialité, fabrication et construction sont fondamentales pour la création de processus de planification et de réalisation efficaces autour d'un bon projet architectural. Ce qui a été modifié avec l'introduction des formes non standards modélisées par l'ordinateur est le fait que, cette intégration doit être

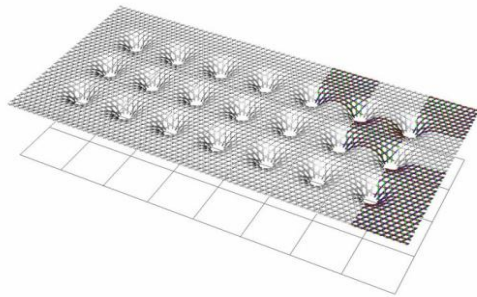


Figure 4 organisation de la forme. DTP

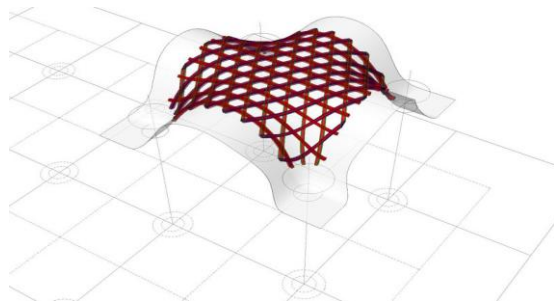


Figure 5 optimisation et simplification. DTP



Figure 6 fabrication. DTP

incorporée dans une chaîne de fabrication numérique capable de connecter la conception, la fabrication et la construction. L'optimisation et la fluidité de l'information doivent être aussi assurées en incluant toutes les transformations entre les divers formats des données. C'est exactement la proposition dans le bureau conseil « Design to Production » ([www.designtoproduction.ch](http://www.designtoproduction.ch)) conduit par Fabian Scheurer, Christoph Schindler et Arnold Walz.

DTP (Design to Production) est un bureau conseil qui se spécialise sur CFD<sup>iv</sup> des formes complexes. Ils ont développé leur propre méthode de confrontation vers des formes non standards qui cherche la faisabilité et l'optimisation des projets complexes. Ce processus peut être simplifié en quatre étapes successives qu'ils appellent l'organisation, l'optimisation, la simplification et la matérialisation.

Le processus commence par l'organisation. En prenant en compte les modèles de CAO existants, le projet va être remodelé avec des outils paramétriques dans le cadre d'un processus CFD et de contraintes physiques présélectionnées. Ensuite, et avec l'utilisation des outils numériques nécessaires, l'optimisation du modèle constructif, structurel et fonctionnel est gérée à partir des idées ou de formes génératrices. Puis, la simplification et la rationalisation de ces modèles sont réalisées grâce à une compréhension de la géométrie et de la façon de produire des éléments en recherchant des innovations par rapport aux matériaux et ses processus quand cela est possible ou nécessaire. Finalement, la gestion de la matérialisation est prise en compte par la collaboration fluide entre DTP et des fabricants pour produire et assembler des éléments, la structure et finalement le bâtiment de façon numérique.

En résumé, le processus que DTP utilise est un exemple assez complet de gestion pour rendre faisable des projets architecturaux à partir de formes non standards. La schématisation de ce processus leur permet de confronter chaque cas spécifique avec une certaine logique et méthode. Par contre, la difficulté réside dans le fait que chaque projet est généré d'une façon différente. Aussi, de par leur statut de consultants, leur approximation au projet arrive dans les dernières étapes de la conception dans une relation assez traditionnelle architecte- ingénieur qui ne permet pas l'intervention sur les décisions prises par des concepteurs. De plus, les outils qui permettent d'intégrer des prémisses tectoniques constructifs à la phase conception n'existent pas.

### 3.1.3 Interactive Structural Analysis

Les nouvelles approximations paramétriques de formes architecturales complexes et la quantité d'information qu'elles génèrent demandent un processus de conception plus fluide, dynamique et interactif, pas seulement en terme de recherche formelle mais aussi en termes de solutions physiques structurelles. Et bien que les outils numériques pour la recherche formelle architecturale ont évolué pour devenir interactifs en temps presque réel; les outils de calcul et de validation structurelle ne sont pas capables de répondre à la même vitesse en générant un délais dans le processus de conception des bâtiments. Si on veut avoir un processus intégral de conception, les outils CFD doivent être simultanés et complémentaires pour obtenir des solutions structurellement et tectoniquement logiques et performantes qui enrichissent la conception spatiale. La recherche de cette « méthode de dialogue » entre des logiciels de modélisation et de calcul est au cœur du travail exposé par Odysseas Georgiou de l'Université de Bath, Grand Bretagne, pendant les dernières conférences CAAD 2011<sup>4</sup>.

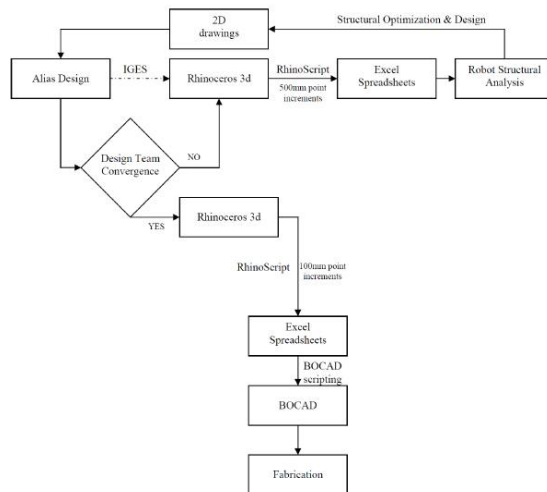


Fig. 2. Design data exchange flow diagram.

Figure 7 Schéma d'échange des données. OG

En gardant toujours l'idée qu'une relation plus proche entre architectes et ingénieurs au cours de la phase d'esquisse est fondamentale; le travail de recherche exposé par Georgiou cherche à relier des synergies entre conception- formalisation architecturale et analyse structurelle avec l'intégration de plugins et de scripts qui permettent une interaction entre des logiciels. La relation et l'échange des données entre les deux environnements devient la question principale à traiter vers une intégration au niveau conception des processus CFD.

Dans ce cadre, le choix des logiciels devient fondamental pour le développement du projet. *Rhinoceros* comme modèleur géométrique et *Robot Structural Analysis* d'Autodesk ont été choisis pour leur flexibilité et popularité commerciale. Dans une première phase, le modèle géométrique est optimisé en fonction des besoins du modèle de calcul. A partir de là, un processus de programmation en langage *C#* et *VB .NET* leur a permis de générer un moteur d'échange d'information pour obtenir un méta-modèle plus interactif d'analyse et validation structurelle.

<sup>4</sup> CAAD: 14eme conference international " Computer Aided Architectural Design", July 2011, Université de Liege



En conclusion, ce travail démontre la faisabilité des modèles d'intégration des environnements architecturaux et d'ingénierie. L'interface montrée présente de grandes possibilités de développement qui peuvent aider à une meilleure compréhension entre des environnements en aidant à réduire l'écart entre architecture et ingénierie. Néanmoins, le modèle ne traite pas des possibilités de paramétrisation des formes ni de la génération et de la conception des grilles. C'est surtout un travail de reconnexion des outils mais pas sur la conception architectonique tectonique des structures.

Pour finir l'analyse du contexte, et une fois que les travaux externes auront été exposés, il est impératif d'analyser les travaux précédents développés au sein du laboratoire CRAI, notamment le travail développé dans le cadre de la thèse doctorale de Shaghayegh Shadkhou. Connaître leurs principes, méthodologies, problématiques et limites est fondamental parce que ce travail s'inscrit dans le prolongement de la thèse.

### 3.2 La démarche à partir du modèle théorique- géométrique existant. «La grille des arcs »

Shaghayegh Shadkhou, Michael Castex

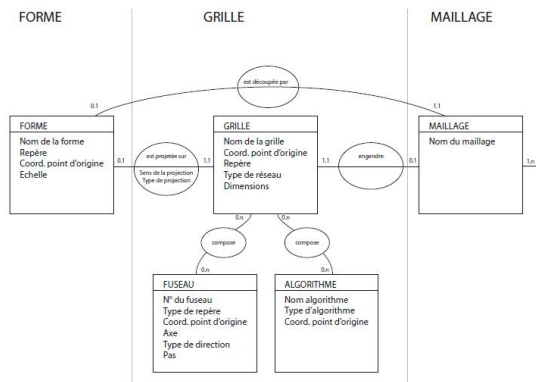


Figure 8 schéma du fonctionnement du modèle. Voir annexe 1

Comme mentionné précédemment, ce sujet de recherche est inscrit dans un continuum du travail de la thèse que mène actuellement Shaghayegh Shadkhou et du mémoire de recherche de Michael Castex (Elaboration d'un outil d'aide à la transformation de modèles géométriques en géométries constructives-2010). C'est pourtant important d'analyser cet axe pour déterminer le contexte, l'encadrement théorique, le lexique et enfin, le point de départ de la recherche qui sera présenté.

Le modèle paramétrique générique développé dans la thèse de Shadkhou a comme base la classification des familles morphologiques développées par JC Bignon. C'est un modèle qui analyse les comportements morphologiques et topologiques des diverses techniques constructives bois et qui les applique à des formes non standards. Le modèle dont l'objectif final d'assistance à la transformation d'un modèle géométrique général vers un modèle détaillé de fabrication, se présente comme une étape intermédiaire,

Niveau	Élément surfacique	Élément linéique	Élément ponctuel
FORME	Surface	Contour	Sommet
GRILLE	Réseau <i>Fuseau/Pas/Axe</i>	Ligne <i>Segment</i>	Point
MAILLAGE	Maille	Arête	Noeud
COMPOSANT	Panneau <i>Profil</i>	Barre <i>Profil</i>	Connexion <i>Assemblage/Connecteur</i>

Figure 9 résumé lexical du modèle. Voir annexe 2



FORME	<i>Shape</i>	Surface créée dans un modèleur et importée dans le modèle.	
GRILLE	<i>Grid</i>	Ensemble de lignes et de points situés sur une surface de projection.	
Point	<i>Point</i>	Situé sur une ligne, il définit une extrémité d'un segment. Il est engendré par l'intersection de lignes.	
Segment	<i>Segment</i>	Portion de la ligne délimitée par deux points	
Réseau	<i>Net</i>	Ensemble des segments de la grille.	
Fuseau	<i>Spindle</i>	Un fuseau est un réseau particulier, avec une régularité. C'est l'ensemble des lignes associées à un axe.	
Axe	<i>Axe</i>	Direction d'un fuseau défini par un vecteur.	
Pas	<i>Pitch</i>	Intervalle entre les lignes du fuseau.	
MAILLAGE	<i>Meshing</i>	Ensemble de mailles. Il s'agit du réseau (l'ensemble de segments et de points) qui appartient à la forme.	
Noeud	<i>Node</i>	Intersection de segments. Sommet de la maille. Un point peut être un noeud.	
Arête	<i>Edge</i>	Côté d'une maille, un segment peut être une arête.	
Maille	<i>Mesh</i>	Surface qui résulte du découpage de la forme par les lignes. Ses bords sont des arêtes et ses sommets des noeuds.	

Figure 10 description des composants. Voir annexe 2

un pont entre la conception et la fabrication digitale.

La grille, les sections et les nœuds sont trois concepts- paramètres fondamentaux pour la compréhension de ce modèle, et ils sont aussi le point de départ des travaux de recherche exposé ici. La grille (des arcs) est la projection sur une surface non standard (enveloppe) d'une trame des axes. Cette trame, qui peut être régulière ou irrégulière et des paramétrisations diverses, sert à construire conceptuellement et formellement la fibre médiane de la structure qui viendra supporter la forme. Une fois la grille et la fibre médiane de la structure proposées, le deuxième principe, c'est-à-dire le profil est sélectionné, et après extrudé sur ces « axes » pour nous donner des dimensionnements et des contraintes physiques structurelles. Finalement, les nœuds, ou points d'intersections entre les axes, servent à paramétrer les assemblages entre les profils et entre les profils et le sol. Les nœuds donnent aussi l'ordre constructif et, comme on le montrera après, la stabilité.

Pendant le processus d'élaboration de cette thèse, de nombreuses analyses sur des bâtiments non standards existants et aussi sur des formes et enveloppes proposées ont permis de valider ce modèle théorique-conceptuel. En même temps, des efforts pour faire avancer le modèle vers une méthode-outil applicable ont été produits. C'est le cas du mémoire de master recherche rédigé par Michael Castex sur l'élaboration d'un outil d'aide à la transformation de modèles géométriques en géométries constructives.

Ce travail recherche, qui est un continuum de la proposition de Shadkhou, cherche à « créer un outil qui à partir d'une forme non standard, réalisée préalablement dans un modèleur, puisse intervenir sur son maillage d'une part, et d'autre part sur sa matérialisation, tout en prenant soin d'établir des passerelles vers des logiciels de calculs de structure »<sup>5</sup>.

En partant de la méthode de construction par grille d'arcs dans le domaine du bois, le travail est un très intéressant point d'éclaircissement vers un modèle- outil fonctionnel. Par l'analyse des réalisations architecturales diverses et sa confrontation avec le modèle théorique proposé, Castex fait de grandes

<sup>5</sup> CASTEX, M. – « (Elaboration d'un outil d'aide à la transformation de modèles géométriques en géométries constructives », MAP-CRAI, 2010

avancées en proposant des schémas entités- associations qui vont non seulement décrire le modèle, mais aussi guider le processus de construction de l'outil. En plus, le processus de recherche sémantique, de classification et de paramétrisation des termes et des mots clés, est aussi important pour éclairer et bien définir le cadre théorique à utiliser.

Et si bien que le premier outil élaboré sur script dans le logiciel Maya Autodesk n'est pas totalement fonctionnel et présente trop de limites dans la programmation, la paramétrisation et l'utilisation. L'apport pour la création d'un langage, d'une grammaire capable de soutenir le modèle théorique et planifier le modèle-outil d'expérimentation est fondamental pour la suite du travail de recherche sur cet axe au sein du laboratoire CRAI.

### 3.3 Le contexte, première conclusion

---

Comme a été montré, l'importance du développement d'une méthodologie qui aide à réduire les distances entre architecture et calcul structurel est fondamentale. Et bien que la conception architecturale intégrale et tectonique ne soit pas nouvelle, les nouvelles approximations de formes non standards et de conception paramétrique demandent l'intégration et l'interaction des architectures et des structures dès la phase d'esquisse pour que le processus CDF devienne le plus efficace, logique et durable que possible.

En traitant le sujet, de nombreux travaux et bureaux de conseils ont commencé à apparaître dans le monde entier. L'émergence de diverses méthodologies, modèles et démarches de recherche et de conseils évoqués sont un clair exemple de l'importance actuelle et l'avenir de ce champ de recherche. Mais le problème de fond continue : une vraie conception tectonique des projets non standards avec l'interaction des processus de conception architecturale et structurelle, doit être prise plus à l'avance. En plus, et avec la quantité d'information à gérer actuellement, des projets doivent être le produit d'un vrai travail collaboratif et pas seulement d'un conseil post-design.

En partant de ce principe, le travail développé au sein du laboratoire CRAI exemplifié par la thèse doctoral de Shadkhou se montre comme une solution valable. Le fait de chercher une méthode qui permet l'intégration des processus CDF et l'opportunité de réfléchir au projet tectonique physique de la phase d'esquisse en prenant en compte des contraintes physiques est en fait une grande opportunité pour des concepteurs d'explorer les formes non standards de façon plus systématique et durable.

Par contre, il est évident que le modèle proposé au sein du CRAI est encore un modèle en développement. Il reste toujours l'élaboration d'un modèle-outil pour valider les concepts. A part la paramétrisation vraiment fonctionnelle d'une géométrie constructive à partir des géométries non standards, l'implémentation des contraintes physiques, et la liaison vers un logiciel de calcul et de validation structurelle, ne sont pas encore réalisées.

En prenant en compte l'état du développement du modèle, et toujours en cherchant la validation tectonique des projets non standards en phase d'esquisse; les étapes logiques suivantes seront l'optimisation et la paramétrisation du modèle géométrique-constructif, et sa validation tectonique par liaison avec des environnements de calcul structurel. Il faudra d'abord comprendre que l'adaptation d'un modèle purement géométrique aux contraintes techniques demande un traitement complémentaire adapté aux besoins des processus du calcul structurel des formes architecturales. Pourtant, il est nécessaire d'analyser et de comprendre la méthode de calcul structurel et ses besoins géométriques, sujet qui sera traité dans le chapitre suivant.

## 4. La méthode de calcul

Comme il a été mentionné, et pour optimiser et paramétrer le modèle géométrique existant, et le valider structurellement par la liaison avec des outils du calcul, il faut d'abord comprendre le processus de calcul des structures et ses paramètres (géométrie-calcul). Dans les pages suivantes, la description de cette méthode, des paramètres qui interviennent, des étapes qui la composent et finalement la méthode de calcul choisie seront abordés comme la partie d'une analyse qui cherche l'intégration de ces concepts dans le modèle général pour aboutir à un outil opérationnel référant.

Le calcul structurel est une méthode qui nous permet de tester mathématiquement et physiquement la stabilité d'un système structurel en fonction des contraintes physiques pour le valider ou le refuser, en fonction des paramètres, des limites et des normes établies. Et bien qu'il existe des approches et des méthodes diverses, le calcul structurel s'applique de façon systématique en prenant en compte des formules physiques existantes et en respectant toujours les limites établies par des codes constructifs. Pour mieux comprendre le calcul structurel, il faut en premier lieu, comprendre les paramètres qui interviennent dans son processus.

Il est important de mentionner que l'intention, ici, n'est pas d'analyser ni de décrire en détail ce calcul structurel, mais de le comprendre de leur processus et les paramètres qui sont appliqués pour une liaison architecturale tectonique.

## 4.1 Le calcul structurel: les paramètres

Divers paramètres participent dans le processus du calcul structurel. Et bien que ses paramètres varient dans chaque cas, il est possible de les classer selon leur nature dans trois familles qui seront décrites par la suite. Ces familles sont la géométrie, les appuis et les efforts.

### 4.1.1 La géométrie

Bien que la méthode de calcul structurel est en principe une méthode de vérification mathématique, l'implication aussi de la physique statique et dynamique rendent obligatoires l'existence des paramètres géométriques pour son développement. C'est important de comprendre que l'information géométrique dont un modèle de calcul a besoin n'est pas tout à fait la même que l'information générée par des modeleurs géométriques.

La géométrie pour le modèle de calcul est simplifiée aux éléments les plus simples possible pour décrire l'espace euclidien, notamment des lignes et des points permettant d'obtenir les volumes par des plans et des contraintes physiques. Aussi, et en considérant que cet ensemble de lignes-points est un système propre, c'est évident que le repère de chaque élément ne dépendra pas seulement des coordonnées générales mais aussi des repères locaux et des relations entre les divers éléments. En prenant en compte ces principes, des courbes-barres, des nœuds, et des profils sont les trois sub-paramètres géométriques qu'un modèle de calcul a besoin.

Dans tous les structures, les axes (généralement placés au centre de gravité ou fibre médiane des éléments) servent non seulement comme guides graphiques, mais plus important, ils vont guider le calcul structurel en prenant en compte la direction des éléments. Les courbes-barres sont la représentation de ces axes dans les modèles de calcul. Ils vont porter l'information des fibres médianes, la longueur, la position dans l'espace et la direction des éléments présents dans le système structurel. Ces barres, vont être composées par un point de début et un point de fin et la courbe elle-même avec sa longueur, sa

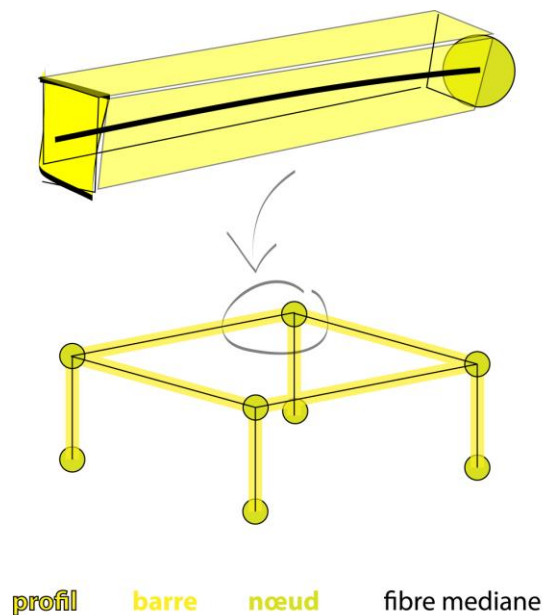


Figure 11 paramètres géométriques

direction, et sa position dans l'espace. Toutes ces informations peuvent être représentées dans l'espace à partir des repères globaux ou locaux, tout en fonction des méthodes choisies.

Mais presque toutes les structures sont un système : un ensemble d'éléments finis et donc, l'intersection ou l'union de ces éléments est fondamentale. Dans un modèle de calcul structurel dans lequel ces éléments sont représentés par des courbes, ces intersections seront toujours des points ou des nœuds. Les nœuds du calcul structurel vont donner l'information sur, non seulement l'origine et la fin de chaque élément dans l'espace, mais aussi sur la typologie des assemblages ou connexions (internes et vers l'extérieur) utilisés. Selon leurs propres paramètres ou « degrés de liberté »<sup>6</sup> les assemblages ont la fonction de permettre ou non l'échange et la transmission des forces et de gérer la mobilité des éléments et de la structure. Pourtant ils sont des éléments fondamentaux pour l'analyse de la stabilité structurelle comme il sera montré après.

Une fois que la structure est représentée dans l'espace par des courbes-éléments et ses nœuds d'intersections, le modèle a besoin de s'informer et d'obtenir un volume capable de supporter des paramètres et contraintes physiques. Le profil ou section des éléments sont des plans géométriques qui vont donner cette notion de volume. Les profils sont des éléments fils qui seront repérés par des coordonnées locales relatives aux lignes et barres à qui ils appartiennent. En fonction du type de profil, la structure obtiendra ses caractéristiques d'inertie et postérieurement de poids propre et volume en fonction du matériau.

#### **4.1.2 Les appuis**

Un deuxième paramètre dans les modèles de calcul structurel est l'appui. Pour chaque système qui va être testé dans la réalité, sa relation avec l'extérieur et l'échange d'information et de forces sont fondamentaux. Dans le cas des systèmes de structures des bâtiments, les appuis sont les éléments de liaison avec l'environnement et en conséquence, les responsables de transmission des efforts et des

---

<sup>6</sup> Les « degrés de liberté » sont la capacité d'un assemblage à transmettre ou supporter des forces selon l'acceptation ou non des translations et rotations dans les directions cartésiennes. Cette notion sera approfondie par la suite.

contraintes physiques de tout le bâtiment vers le sol en cherchant toujours une équilibre des forces générales.

En principe, les appuis ne sont plus que des assemblages vers l'extérieur, et pourtant, ils partagent des caractéristiques et paramètres similaires comme sa détermination physique par « degrés de liberté ». Comme les nœuds, les appuis sont représentés par des nœuds extrêmes des barres qui vont s'appuyer sur une surface quelconque. Lorsque les appuis sont générés par l'intersection des barres et cette surface, la « surface d'appui » devient un sub-paramètre important. Le concept est simple, la surface d'appui est une entité géométrique, une représentation des surfaces de contact vers l'extérieur. Le développement de ce concept général et sa modélisation géométrique permettent d'analyser des situations diverses d'appuis des bâtiments. La surface d'appui permet non seulement d'obtenir des nœuds d'appui mais permet aussi de concevoir des scénarios dans lesquels la structure est posée dans des terrains irréguliers ou sur des édificiations existantes.

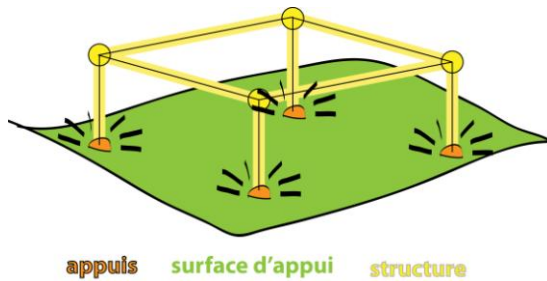


Figure 12 les appuis

L'existence des appuis finalement permet premièrement de penser un projet tectonique en fonction de ses systèmes constructifs et du processus d'édification. Ils servent aussi à donner une séquence, un ordre et une direction à des composants de la structure. Finalement, le plus important, ils permettent le calcul des structures en termes réels de transmission des forces et d'accrochement à l'environnement existant.

#### 4.1.3 Les efforts

Une fois que le modèle de calcul est décrit géométriquement par les barres, les nœuds et les profils c'est le moment d'appliquer des contraintes physiques et matérielles. Ces contraintes physiques ou « efforts » sont des charges liées à la statique et à la cinématique du calcul structurel des bâtiments et ils peuvent être décomposés en poids propre, en charges d'exploitation et en charges cinématiques. Les valeurs à appliquer pour ces efforts sont généralement définies dans des codes internationaux de calcul structurel.



Dans le cadre de ce travail de recherche, l'EUROCODE<sup>7</sup> de la construction sera le guide pour prendre en compte des valeurs à utiliser.

Le poids propre est bien évidemment le poids de la structure elle-même. Le poids propre dépend directement de la masse de la structure, de la relation entre la taille et le volume (géométriques) et des caractéristiques physiques du matériau sélectionné. En fonction de ces paramètres, les poids propres des structures peuvent être lourds, semi-lourds ou non lourds. Aussi, il y a des différences entre les éléments structurels « porteurs » et non structurels ou « enveloppe » du bâtiment. La partie structurelle du bâtiment est la plus importante dans un modèle de calcul et son information doit être précise et appliquée sur chaque élément. Par contre, l'enveloppe du bâtiment est calculée en prenant en compte la charge moyenne et en l'appliquant de façon homogène sur la surface.

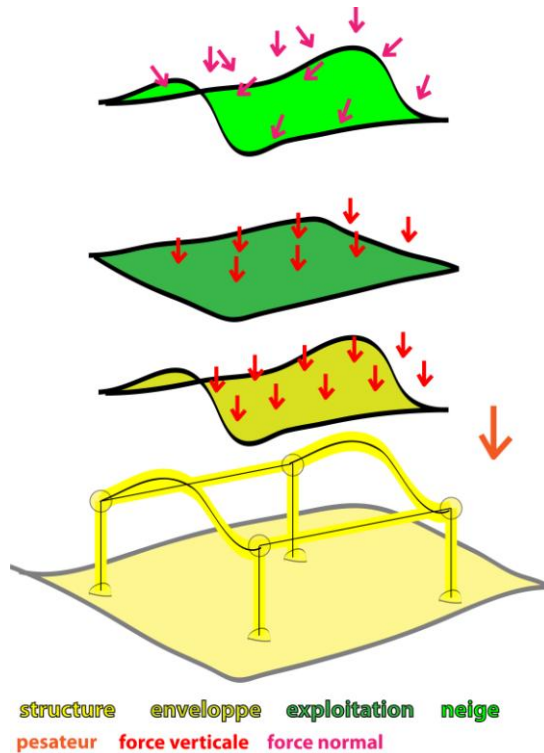


Figure 13 les efforts

Les charges d'exploitation sont des charges moyennes appliquées en fonction des types d'utilisation prévues pour les structures pendant le cycle de vie. Les charges d'exploitation sont clairement définies dans l'EUROCODE et elles seront appliquées en fonction du choix de type d'exploitation qui varie entre toiture sans utilisation et des exploitations très spécifiques comme les structures porteuses des machines lourdes. Aussi, la distinction entre charges vivantes et charges statiques est nécessaire entre les charges d'exploitation. Pendant que les charges statiques, que sont la moyenne des objets inertes à porter dans une structure (ex : bureaux, tables, chaises), sont relativement faciles à gérer; les charges vivantes, ou les utilisateurs mobiles, sont beaucoup plus complexes et dépendent des facteurs de sécurité en fonction du type de bâtiments.

Les derniers paramètres dans les efforts sont les charges cinématiques. Les tremblements de terre, la neige et le vent sont ces types de charges et elles viennent directement de l'interaction de la structure avec l'environnement et plus concrètement avec les facteurs climatiques. Un facteur important pour l'application est la situation géographique-climatique, l'environnement de la structure parce qu'il

<sup>7</sup> NF EN 1990 « MOREAU, M. – « Eurocodes - basis of structural design - national annex to NF EN 1990 », AFNOR, 2004.

déterminera la probable intensité maximale de la charge. Et bien que les charges sont aussi prises en compte dans les codes, leur nature « cinématique » fait que leur calcul est beaucoup plus complexe, difficile, et imprécis pour la simple raison que ce sont des forces qui peuvent avoir des magnitudes et des directions diverses et qui dialoguent de façon dynamique avec la structure.

#### 4.2 Le calcul structurel : processus

Une fois que les paramètres nécessaires pour réaliser un calcul structurel sont analysés, il faut connaître le processus lui-même pour comprendre l'importance de ses paramètres et le fonctionnement et la logique de ce calcul. Premièrement réussir la stabilité du système et deuxièmement pouvoir le dimensionner, voilà les étapes générales de la méthode.

##### 4.2.1 La stabilité, les assemblages et les appuis

Tout d'abord, le processus du calcul structurel est basé sur un principe de calcul systématique et en conséquence la première étape est de tester la stabilité du système. Dans le cas du système de structure des bâtiments, cette stabilité dépend entièrement de la mobilité interne et externe. Cette mobilité, comme mentionné, est à la fois gérée dans sa totalité par les « degrés de liberté » des assemblages et des appuis.

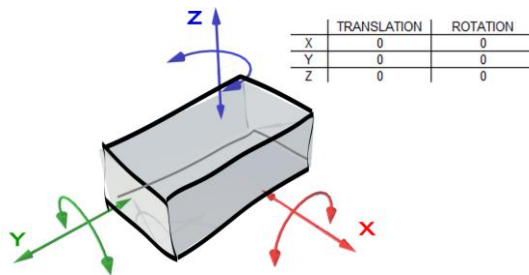


Figure 14 description des ddl

Les degrés de liberté (ddl) sont la capacité dans un point de supporter, de libérer ou pas un mouvement de l'élément assemblé à cet point-la dans l'espace. A chaque nœud, à savoir chaque assemblage et chaque appui, correspond six ddl, dont 3 rotations et 3 translations : une en direction de chaque axe cartésien. Si tous les ddl sont bloqués (valeur 1), le point est une liaison parfaite dans laquelle la continuité de matière et des charges et totale; si par contre, tous les ddl sont libérés (valeur 0), il y aura pas continuité ni de matière ni de charges et donc il n'y aura pas de stabilité. Entre ces deux valeurs et à

chaque une des rotations et translations, la dégénération des ddl dépend des types d'assemblages choisis. En conséquence, si le choix des assemblages est correct, la stabilité de la structure est possible et on peut passer au dimensionnement. Sinon, le système n'a pas de solutions et il faudra le reformuler.

#### 4.2.2 Le dimensionnement

Une fois que la structure est démontrée stable, l'étape suivante dans la méthode de calcul structurel est le dimensionnement de ses éléments pour que le modèle puisse se tester et construire dans la réalité. Le dimensionnement des structures est calculé pour supporter des valeurs des trois paramètres qui sont les efforts, les contraintes et les déplacements.

Les efforts, comme cela a été mentionné, sont des charges externes et internes appliquées au modèle. Le dimensionnement structurel doit être conçu pour que le poids propre, les charges d'exploitation et des charges cinématiques soient supportées par la structure de la façon plus efficacement que possible. Dans l'idée, les charges seront réparties de façon équilibrée dans la structure, laquelle devrait être capable de les transmettre vers la surface d'appui le plus directement possible.

Mais le dimensionnement structurel n'est pas fait que pour supporter des efforts comme système global, mais aussi pour des efforts qui sont pris dans chaque élément : ces efforts sont appelés contraintes. Les contraintes sont des forces internes qu'un élément doit supporter ou est capable de supporter avant sa rupture. L'admissibilité d'un élément quelconque aux contraintes dépend de ses caractéristiques physiques, de la combinaison de la résistance de leur matériel et de sa configuration géométrique. Et bien que pour des caractéristiques du matériel il existe des valeurs standards, données par des codes, ils peuvent être améliorés en fonction de la géométrie des éléments et de la combinaison des formes et matériels divers.

Finalement, une fois que la structure est capable de supporter des efforts et des contraintes, elle doit répondre de façon certaine aux déplacements. Les déplacements sont mesurés dans les nœuds et ils apparaissent en fonction de la déformation des éléments en interaction avec des efforts. En fonction des

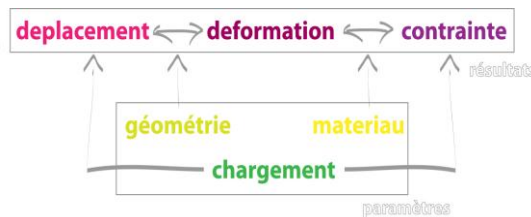


Figure 15 relations des paramètres intervenant dans le calcul structurel.

types de matériel et de la structure, le système ou des éléments particuliers seront plus ou moins élastiques et, dans presque tous les cas, une structure bien conçue sera capable de supporter des efforts et des contraintes selon les limites de sécurité. Mais dans certains cas, les déformations seront très importantes et bien que elles ne posent pas des problèmes à la structure, les mêmes peuvent poser des problèmes au reste du bâtiment, par exemple aux enveloppes ou des partitions internes. Aussi, si la structure est trop déformable, elle posera des problèmes de confort aux utilisateurs, raison pour laquelle, la déformation doit être minimale et dans les limites des réglementations.

#### 4.3 Calcul structurel par éléments finis

---

Différentes méthodes de calcul structurel existent. Elles répondent à des approches diverses et à des époques distinctes, mais s'agissant des structures complexes comme la grille d'arcs générée comme support de formes architecturales non-standards, la réponse la plus opérationnelle à l'heure actuelle est la méthode des éléments finis.

##### 4.3.1 Le concept

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles<sup>8</sup>. La flexibilité de cette méthode de calcul permet de calculer numériquement le comportement d'objets complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire. Utilisée dans l'industrie et l'ingénierie pour résoudre des problèmes hydrauliques, électroniques ou mécaniques en décrivant le fonctionnement d'un système composé d'éléments finis, cette méthode est à la fois opérante et flexible pour résoudre des problèmes de structure des bâtiments.

---

<sup>8</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode\\_des\\_%C3%A9l%C3%A9ments\\_finis](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_%C3%A9l%C3%A9ments_finis), 03-04-2011

S'agissant du calcul structurel, le principe de la méthode des éléments finis est une matrice des raideurs qui, dans une équation linéaire, va lier tous les efforts  $\{F\}$  de tous les nœuds  $[k]$  à tous les déplacements  $\{u\}$ . L'équation est décrite comme  $\{F\} = [k] \cdot \{u\}$ . Elle nécessite de connaître la somme des efforts appliqués et les valeurs à chaque nœud (positionnement initiale, résistance et ddl), qui constitueront les paramètres permettant de décrire les déplacements et par conséquent les déformations et contraintes des différents éléments.

#### 4.3.2 La méthode

Le principe de la méthode reste toujours le même. Premièrement, vérifier la stabilité, puis dimensionner le modèle. Comme mentionné plus haut, l'ensemble est une matrice des raideurs, dont la résolution passe tout d'abord par son inversion. Pour inverser la matrice  $[k]$ , il est nécessaire que la somme totale des ces valeurs soit non nulle. Les valeurs de cette matrice correspondant aux ddl des nœuds, cela signifie que ces ddl doivent être non nuls. En conséquence, les assemblages physiques ne peuvent être des liaisons libres, de sorte que la matrice puisse être mathématiquement inversée, l'équation résolue et ainsi que la stabilité du système soit démontrée.

Une fois que le système est stable, connaissant les efforts appliqués, il reste à résoudre l'équation comme n'importe quelle autre équation mathématique. Mais, en règle générale, cette équation présente une quantité conséquente de données, générant un calcul long et complexe. Il s'agit donc de la simplifier. Pour ce faire, il faut éliminer des inconnues en les substituant par des déplacements connus. Dans la logique mécanique structurelle, les appuis sont de simples points dans lesquels le déplacement est connu. Pour simplifier l'équation, il suffit d'indiquer le déplacement correspondant<sup>9</sup> à chaque appui. La connaissance de ces paramètres permet d'appliquer la méthode des éléments finis, et de déterminer les contraintes et déplacements inconnus.

---

<sup>9</sup> C'est pour cette raison que des structures avec plus des appuis sont en principe plus simples à calculer.

### 4.3.3 Représentation physique tectonique

La compréhension générale de la méthode de calcul par éléments finis maintenant acquise, il est nécessaire de préciser ses implications sur le modèle géométrique et tectonique physique, en explicitant également certaines de ses limites, avant sa validation.

En observant la formule générale, il est possible de distinguer trois parties. Chaque partie est la représentation mathématique des paramètres physiques. De cette façon, on distingue que  $\{F\}$  est la valeur des efforts et des charges physiques (poids propre, charges d'exploitation et charges cinématiques), qui sont appliquées au modèle.

La matrice  $[K]$  représente les nœuds et les ddl des assemblages. Les informations relatives aux nœuds, à leurs positions et à leurs connexions permettent de connaître, par déduction, les caractéristiques des barres. Une fois que la matrice est stable,  $[k]$  donnera les valeurs admissibles (géométriques et physiques) pour les assemblages et les barres. Par remplacement des formules, la matrice donne aussi les résultats pour les contraintes physiques internes. Pour être admissibles, ces valeurs doivent être validées par des valeurs précisées dans les codes réglementaires. Dans le cas des contraintes des éléments, la norme indique qu'ils doivent correspondre à  $1/3$  de la valeur limite de rupture du matériau, pour éviter la rupture par fatigue.

Enfin,  $\{U\}$  est la représentation mathématique des déplacements nodaux. Comme précisé auparavant, les appuis sont ici pris en compte car ils correspondent à des déplacements nodaux de valeurs connues. Le reste des déplacements doit aussi être inférieur aux valeurs admissibles. Dans ce cas, la convention pose que le déplacement doit être inférieur à  $1/300^{\text{ème}}$  de la longueur totale, sans toutefois préciser si ce ratio s'applique à la dimension de chaque élément ou à la dimension totale de la structure.

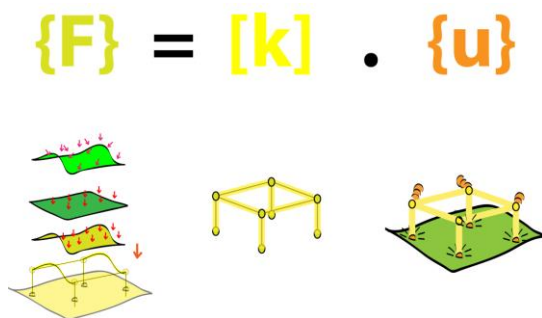


Figure 16 formule général et sa représentation

#### 4.4 Conclusion: la méthode du calcul et sa relation avec la grille des arcs, les paramètres choisis

---

La méthode du calcul structurel par éléments finis se décompose en deux étapes : la première consiste à vérifier la stabilité du système et la seconde à dimensionner les éléments. Cette méthode fait appel à trois types de paramètres : la géométrie, les charges d'exploitation et les charges cinématiques. La détermination de ces paramètres permettra d'atteindre l'objectif principal de ce travail de recherche. Ainsi, en partant d'une architecture non-standard en phase de conception, cette méthodologie permettra de pré-dimensionner, calculer et valider un système géométrique structurel.

L'application de paramètres géométriques à des formes non standard valide ainsi le principe des « grilles d'arcs » proposé par le CRAI. Une surface NURBS quelconque peut être simplifiée et analysée par sa discrétisation en facettes élémentaires. La projection d'une grille sur la surface génère un maillage tridimensionnel, puis courbes barres nécessaires pour créer des éléments structuraux. Parallèlement, l'intersection des axes entre eux génèrent des nœuds d'assemblages. Les profils peuvent enfin être paramétrés pour supporter la structure. Puis, l'insertion d'une surface d'appui et son intersection avec le modèle géométrique permettra de générer les points d'appuis nécessaires. Le modèle conçu sera donc théoriquement capable de fournir l'information géométrique nécessaire pour une analyse et une validation structurelle, fonction de la paramétrisation de la grille.

Le deuxième paramètre à prendre en compte concerne les charges de poids propre de la structure. Il dépend directement, d'une part, de l'information fournie par le modèle géométrique, d'un autre part, de la matérialité du modèle. Le matériau structurel dans le cadre de cette recherche se limitera à trois types de bois : bois massif, bois lamellé-collé et lamibois. Nous en définirons les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques, en conformité avec les valeurs fixées dans l'EUROCODE en vigueur<sup>10</sup>.

Le troisième paramètre à définir concerne les charges d'exploitation. Considérant que le travail ici présenté est encore au stade de développement, l'objectif principal est l'obtention d'un modèle fonctionnel. Aussi, la question des charges d'exploitation sera simplifiée au maximum pendant cette

---

<sup>10</sup> Voir annexe 3 sur table des valeurs pris pour des types du bois

première étape. C'est également pour cette raison qu'il a été décidé de concevoir une structure non-standard «toiture- enveloppe légère ». Ce faisant, les charges d'exploitations appliquées seront de 0.8 à 1.5 KN/m<sup>2</sup>, conformément à l'Eurocode<sup>11</sup>.

Enfin, reste à déterminer le paramètre relatif aux charges cinématiques. Bien que dans l'idéal il faudrait les prendre en compte dans leur ensemble, la limite temporelle de ce travail ne permet pas de toutes les intégrer. Les charges de vent ne seront pas appliquées à ce premier modèle, compte-tenu de la difficulté de modéliser les interactions complexes des fluides avec des formes non-standard. De même, et au regard de la situation géographique de l'expérimentation (Nancy, France), les charges sismiques seront également négligées. Les charges de neige seront quant à elles simplifiées à des charges uniformes appliquées selon la normale de la surface ou enveloppe-toiture. Ces charges moyennes seront aussi déterminées selon les EUROCODES, en respectant la location du projet analysé<sup>12</sup>.

Enfin, la paramétrisation des ddl des appuis et assemblages, nécessaires pour l'analyse de la statique du modèle, est issue du travail recherche de Nicolas Jacobs (Elaboration d'un modèle paramétrique d'assemblages bois pour le calcul des structures non standard), réalisé en étroite collaboration et en parfaite cohérence avec le présent travail.

---

<sup>11</sup> Voir annexe 4 sur charges d'exploitations pris

<sup>12</sup> Voir annexe 5 sur charges de la neige selon les régions européennes



## 5. Le modèle et son processus

Une fois que nous avons analysé le contexte et le modèle de départ, mais aussi le processus de calcul par éléments finis et ces paramètres, il faut développer un modèle et une méthodologie, qui, en partant d'une architecture non standard en phase de conception, sert à générer un système géométrique structurel, à le pré-dimensionner, à le calculer et à le valider.

Comme mentionné précédemment, le travail ici exposé se situe en continuum du travail de recherche sur les grilles des arches, élaboré dans le cadre de la thèse doctorale du Shaghayegh Shadkhou qui, enrichi par le travail de Michel Castex, est pris en compte comme base théorique et modèle d'approximation. Par ailleurs, le travail fait par Nicolas Jacobs vient enrichir le modèle par le paramétrage des informations sur des assemblages bois, et sur quelques étapes du traitement et échange des données.

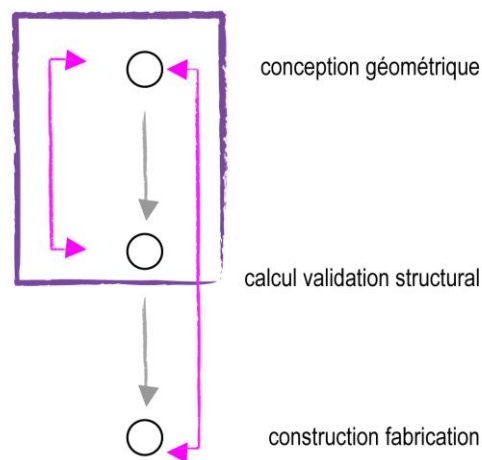


Figure 17 insertions dans le processus CFD

De cette manière, le modèle propose une interaction entre les différentes étapes du CFD (voir graphique ci-contre). En l'occurrence, l'intention est de lier le processus de conception-modélisation et le processus de calcul de vérification structurelle en essayant de diminuer la distance existante entre ces deux aspects toujours mentionnés dans le contexte et l'état de l'art. Cette interaction existera non seulement dans l'approximation des concepts, mais aussi dans le développement des interactions entre des environnements divers à la phase d'esquisse.

En prenant en compte ce cadre, et la difficulté de gérer d'un côté la modélisation géométrique, et de l'autre, le calcul et la validation structurelle, de façon à ce que la méthode proposée puisse être la plus universelle que possible. Il est évident que la façon la plus effective pour aboutir est de sélectionner des logiciels existants sur le marché pour les optimiser, les paramétrer et les relier en fonction des objectifs.

Cette sélection a été effectuée de sorte que les logiciels puissent supporter le modèle théorique développé, et qu'ils puissent être paramétrables en cherchant toujours une possible interactivité. Ce choix va naturellement conditionner le fonctionnement du modèle, raison pour laquelle il est nécessaire de dénombrer les environnements sur lesquels le travail a été décidé, ses avantages et inconvénients par rapport aux objectifs tracés. (Voir annexe 6

## 5.1 Les environnements choisis de modélisation paramétrique et calcul structurel

---

### 5.1.1 Grasshopper de Rhinoceros

Le premier logiciel a choisi est évidemment le logiciel de modélisation géométrique. Rhinoceros est un très puissant logiciel CAO développé par Robert McNeel & Associates de modélisation des formes complexes basé sur des géométries NURBS. Ce logiciel, initialement utilisé dans l'industrie véhiculaire et naval, a devenu de plus en plus populaire dans l'environnement architectural par sa versatilité et facile compréhension qui a permis l'introduction massive des formes non standard au langage morphologique.

Grasshopper (GH), par contre, est un plug-in associé à Rhinoceros qui, avec la même structure mathématique-informatique (NURBS et Visual Basic), permet une approximation paramétrique à des formes non standard. Et bien qu'il ne fasse des modélisations que pour la plateforme RHINO, il permet une approche à la paramétrisation des formes et, peut être plus important, il permet l'allégorisation des formes ou la génération des algorithmes de façon interactive. Et ce, par le biais d'une interface graphique notable qui permet de diminuer le plus que possible l'utilisation des scripts et de la programmation sans perdre de puissance.

Et bien que ces programmes aient logiquement des limites, le choix à faire entre ces logiciels est évident. D'une part, l'approximation a des formes non standard et NURBS, et d'autre part, la possibilité de générer des modèles paramétrables en construisant des algorithmes conçus spécialement pour les objectifs de

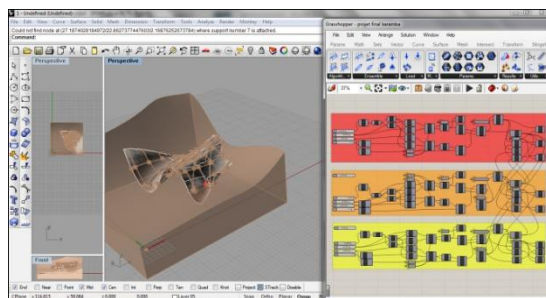


Figure 18 environnement Rhino-GH

cette recherche, son argument valable. Après, la popularité, le développement continu et les grandes communautés numériques dérivées devront assurer la généralisation, le partage et l'enrichissement du modèle. Finalement, la possibilité d'enrichir le logiciel en combinant des composants déjà existants ou en en créant de nouveaux, suppose la possible génération d'un modèle pas seulement fonctionnel lui-même, mais aussi interférent avec d'autres environnements. Ce modèle se verra également auto-constructif et auto-paramétrable, en fonction des besoins de l'utilisateur.

### 5.1.2 GH Karamba

Une fois que l'environnement de modélisation est choisi, vient le tour de l'environnement du calcul structurel. L'accessibilité aux fichiers pour sa modification et la possibilité d'accessibilité pour des utilisateurs ont été les critères requis pour faire ce choix. Le fait que les environnements pour le calcul structurel aient des configurations différentes par rapport aux logiciels de modélisation géométrique, et le fait qu'ils soient développés généralement par des entreprises différentes et en langages divers font que l'interaction entre eux est plus complexe que la simple communication. Ce n'est pas le cas du Karamba.

Karamba est un plugin de Grasshopper développé par Clemens Preisinger en coopération avec le «*Structural Design Institute de l'University of Applied Arts de Vienna*» et «*Bollinger-Grohmann-Schneider ZTGmbH*». En prenant les informations d'un modèle géométrique (barres et nœuds) et en paramétrant des charges, ce plugin permet une analyse structurelle approximative et interactive en générant leurs propres composants devenus des algorithmes, qui appliquent la méthode de calcul par éléments finis. Le grand avantage de ce plugin est qu'il permet une interactivité visuelle directe avec le modèle géométrique paramétré sur GH. Ceci permet de faire les modifications nécessaires plus facilement dans le modèle géométrique pour optimiser sa structure.

Le problème avec Karamba est le fait que, pour calculer des structures, il n'a pas besoin d'informations spécifiques sur des assemblages internes, fondamentales pour déterminer la stabilité, parce qu'il va prendre des valeurs moyennes des assemblages avec les ddls, le plus parfaitement possible. En résumé, il

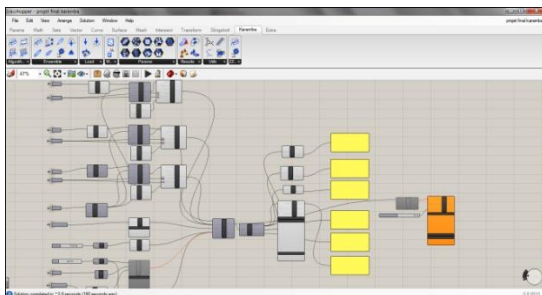


Figure 19 GH plugin: Karamba

va supposer que la structure proposée est déjà stable. Aussi, et pour être un outil en développement, il reste encore limité par rapport à la paramétrisation des profils, notamment sur le changement des formes, paramètre qui va aussi influencer sur la performance structurelle et la résistance de ses éléments. Malgré ces limites, l'opportunité qu'il propose d'une interaction visuelle avec un modèle géométrique, et la possibilité de l'optimiser pour réduire en les erreurs dans la conception, est importante. Pour cette raison, il sera utilisé comme outil de pré vérification structurelle qui, bien que peut-être ignorée par des utilisateurs très expérimentés, peut aussi optimiser énormément le processus CDF en montrant certains problèmes structuraux graves de la phase d'esquisse.

### 5.1.3 RDM6

Le troisième logiciel choisi est un environnement du calcul externe. RDM6 est un logiciel de licence libre développé par Yves Debard et l'Institut Universitaire de Technologie du Mans avec leur Département Génie Mécanique et Productique. Ce logiciel validé par des expertes dans le domaine, est aussi basé sur la méthode du calcul structurel par éléments finis. Bien que graphiquement il ne soit pas le plus puissant, il a l'énorme avantage d'être un logiciel complet de calcul structurel. Avec lui, tous les paramètres géométriques (assemblages aussi), le matériel, les charges d'exploitations et les charges cinématiques peuvent être parfaitement paramétrés. De plus, il a pour autre avantage, la facile manipulation des fichiers d'information (.por) qu'il contient pour des logiciels simples comme Note pad ou Excel. Cette facilité de manipulation donne la possibilité de mieux gérer l'optimisation interne et la communication, mais aussi l'interaction avec d'autres environnements choisis, comme Grasshopper et Rhino.

La gestion des données géométriques, le repère des éléments, la continuité et la connexion des mêmes sont les paramètres fondamentaux pour le calcul dans cet environnement. En rapport a cela, le fait que RDM6 soit capable de comprendre que des courbes de degré 1 soient une difficulté, est important à traiter par une logique de discrétisation des courbes et l'apparition des assemblages parfaits internes dans les éléments.

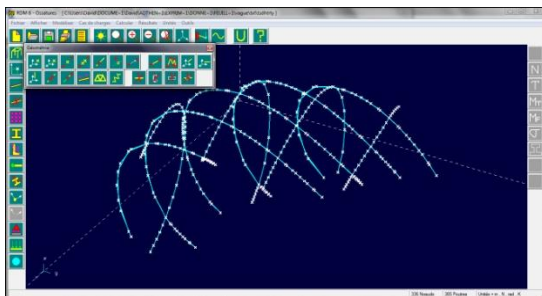


Figure 20 environnement du calcul: RDM6

Enfin, et une fois les logiciels ont été choisis, une partie importante du travail de recherche sera de gérer les échanges d'information pour générer des interactions nécessaires entre les mêmes pour l'exploitation maximale de ses aptitudes. Tout en fonction des objectifs généraux du modèle et du processus qui sera abordé à la suite.

## 5.2 Le processus

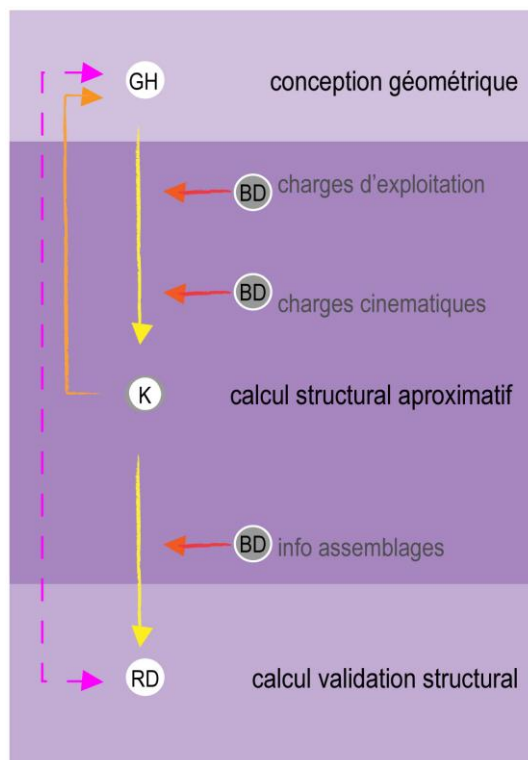


Figure 21 modèle et processus proposés

En prenant en compte tous les paramètres analysés, le cadre théorique et les environnements choisis, le modèle proposé (voir image à côté) est une méthode d'évaluation structurelle des formes non standard durant la phase d'esquisse, qui cherche l'approximation et l'interaction de la conception géométrique avec le calcul de validation structurelle. Comme il est mentionné, cette interaction cherche l'optimisation des processus CFD, qui ne peuvent être confrontés selon les paramètres classiques de relations architecte - ingénieur. Le modèle proposé a trois étapes séquentielles, et qui ne sont pas linéaires. Elles doivent être comprises dans une logique d'aller-retour continu. (Voir annexe 6 Schéma conceptuel du modèle).

Dans une première étape de « conception géométrique » dans l'environnement GH Rhinoceros, et en partant d'une surface NURBS quelconque, le modèle est capable de générer un système géométrique structurel par grilles des arcs. Dans une deuxième étape, ce modèle géométrique est enrichi par des informations physiques mécaniques choisies, qui proviennent des listes externes des valeurs moyennes acceptées dans les EUROCODES. Cette information est ajoutée à une version simplifiée du modèle géométrique pour un calcul structural approximatif, par méthode des éléments finis sur le plugin Karamba qui permet une optimisation visuelle et complètement interactive du modèle proposé.

Enfin, lors d'une troisième étape, le modèle géométrique structurel est premièrement enrichi avec l'information détaillée des assemblages choisis<sup>13</sup>, pour être ensuite envoyé dans l'environnement du calcul structural par méthode des éléments finis RDM6, lequel, en prenant les mêmes valeurs des charges

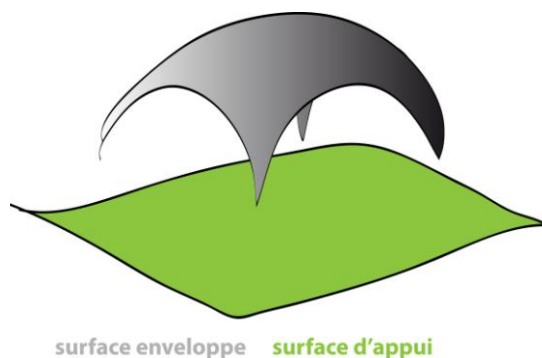
<sup>13</sup> Cette information provient des Bases de données élaborées dans le cadre du travail de recherche de Nicolas Jacobs «Elaboration d'un modèle paramétrique d'assemblages bois pour le calcul des structures non standard », travail fait dans un processus collaboratif au même temps que le travail ici présenté.

imposées et en ajoutant l'information des assemblages et des profils, calculera et validera ou non la structure bois proposée. Ultérieurement, une description plus précise du fonctionnement interne de ces étapes sera exposée.

### 5.3 Le processus: conception géométrique

---

La première étape du processus est la conception géométrique. Cette étape va transformer, grâce à des algorithmes qui travaillent sur des opérations géométriques paramétrables, une surface NURBS déjà modélisée en un système structurel de grille des arches. Pour commencer, ce processus a besoin de la surface, ou enveloppe formelle, et de la surface d'appui. Après, le processus peut être réalisé en trois étapes: l'étape de projection de la grille, l'étape de paramétrisation des profils et des fuseaux, et l'étape de paramétrisation des nœuds. Finalement, il est important comprendre le processus de discrétisation avec tous les éléments de sortie. (Voir annexe 7 l'algorithme générateur du modèle géométrique)



**Figure 22** surface enveloppe- surface d'appui

#### 5.3.1 La surface, enveloppe formelle, et la surface d'appui.

Ces deux surfaces sont des surfaces NURBS externes au modèle, et sont des éléments à fournir pour le concepteur. Elles peuvent être modélisées directement sur Rhino, ou importées à partir des autres outils de modélisation géométrique à condition qu'ils soient basés sur géométrie NURBS.

La surface enveloppe-formelle est la surface modélisée génératrice de la forme architecturale, et la forme choisie par le dessinateur après un processus de recherche formelle. Cette forme sert de guide pour la projection du maillage et la génération des profils de la grille des arches. La position de cette surface sert comme fibre médiane des axes avant un possible décalage<sup>14</sup> et sa normale sert comme axe d'extrusion pour le décalage même. Aussi, cette surface sert à générer des mailles moyennes pour positionner des

---

<sup>14</sup> Voir a continuation « Les profils, les fuseaux et le décalage »

charges. L'intention de cette méthode est que cette forme ne soit pas finie, sinon qu'elle soit une approximation d'une partie du processus de conception architecturale, qui permet de possibles modifications en fonction de l'analyse structurelle.

La surface d'appui, comme il a été expliqué, est un concept qui permet la représentation géométrique du site dans lequel le projet va se poser. Cette surface devra montrer les différents niveaux du site et générer les points d'appui de la structure proposée.

### 5.3.2 La grille des arches et sa projection

En prenant en compte les principes théoriques proposés au sein du CRAI, ce modèle prend un maillage quelconque et le projette sur la surface enveloppe en fonction d'une direction donnée. Pour cette première étape de développement, et en fonction des analyses de réalisations architecturales existantes, le choix de paramétrer un maillage orthogonal avec au maximum trois fuseaux a été fixé.

Grace à l'élaboration d'un algorithme basé sur des opérations géométriques, le modèle permet à l'utilisateur de paramétrer le point d'origine, la largeur, la quantité, et la distance (ou pad) entre des axes qui appartiennent à un fuseau. Il permet aussi de paramétrer l'angle de rotation (xy) du fuseau, ainsi que la direction et la distance d'extrusion (zy). Cette paramétrisation est répétée pour chacun des trois fuseaux, en ajoutant à chaque fois des opérations d'intersection entre eux, pour générer des points d'intersection et des segments. Ils seront devenus des barres et des nœuds une fois la grille créée.

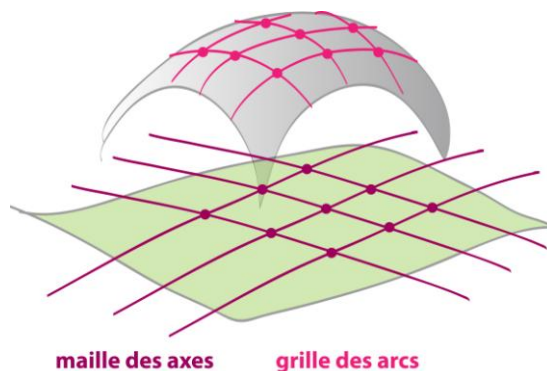


Figure 23 génération de grille des arcs

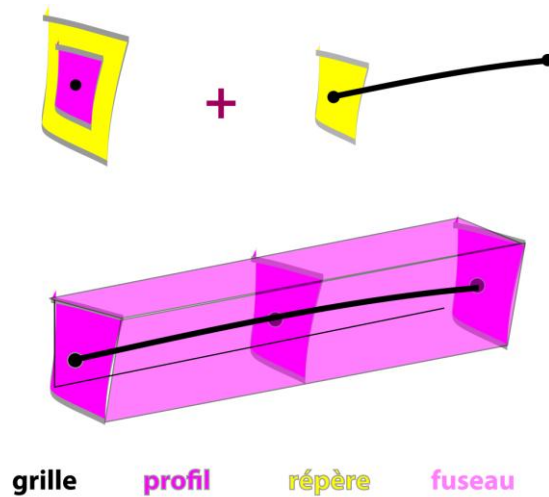
Une fois la maille, avec ses segments et points, générée dans le plan d'origine, elle est projetée deux fois, sur les surfaces mentionnées précédemment. La première projection se fait sur la surface d'appui et elle assure que le modèle géométrique aura toujours des appuis et qu'il commencera toujours à ce niveau. À partir de cette projection et en prenant toujours la direction de projection originale, une deuxième projection est réalisée, cette fois sur la surface enveloppe, et elle va générer la grille recherchée. En «imprimant» le maillage sur la surface enveloppe, cette deuxième opération génère les fuseaux, les axes, et les fibres médianes de la grille des arches, sur lesquels les profils seront extrudés. Elle va aussi générer



les nœuds structuraux sur lesquels les assemblages seront repérés et paramétrés.

### 5.3.3 Les profils, les fuseaux et le décalage

Une fois la grille positionnée sur la surface, c'est le moment de la paramétrisation de ses ? profils et de son extrusion pour générer les volumes des fuseaux. Les profils sont des surfaces qui représentent la section des éléments. En prenant en compte que le bois est le matériau choisi, ces profils sont compris comme des éléments solides. Pour pouvoir paramétrer des formes diverses, les profils sont générés par des surfaces circonscrites dans un cercle de rayon quelconque. À partir de la mesure de ce rayon, et de l'utilisation de son centre de gravité, des figures géométriques diverses peuvent être paramétrées en fonction du nombre des cotés et l'existence ou non des chanfreins. Aussi, la possibilité de tourner la figure permet de donner une direction. La relation entre hauteur et largeur permet de générer des déformations comme des rectangles, des ellipses ou des triangles non équilatères. Un facteur important est que, dans cette première étape, il existe un type de profil pour chaque type de fuseau.



Pour générer des éléments ou des barres, les profils paramétrés doivent être repérés sur la grille, et projetés ensuite en suivant la direction et la longueur des arrêtes selon ses fibres médianes. L'opération de repérage se base sur la relation entre le plan, leur centre de gravité et leur direction (x-y) du profil, et le plan normal à l'arrête qui se trouve sur le point d'origine de la courbe (v-w). Cela se résume à mettre en relation le repère global (x-y-z) avec des repères locaux (u-v-w). À chaque point d'origine de chaque arrête, une copie du profil sélectionné va être positionnée. Pour réussir cette opération géométrique, l'algorithme cherche le centre de gravité du profil et le positionne sur le point d'origine de l'arrête. Il va ensuite prendre la direction du plan du profil (x-y) et il va rediriger le profil positionné selon la normale de l'arrête au point (v-w). Après, ce profil est extrudé selon la direction de l'arrête. Direction qui est corrigée à chaque point pour suivre l'axe<sup>v</sup>.

Figure 24 formation des fuseaux

Le fait que la grille soit générée par une direction d'extrusion, garantit que les arrêtes générées ne possèdent pas de double courbures. Cela garantit aussi que les profils positionnés ne génèrent pas de fuseaux et d'éléments à double courbure, en ne facilitant pas seulement le processus du calcul, mais aussi



le processus tectonique de fabrication-construction, question fondamentale pour la faisabilité et la gestion des coûts dans un projet.

En considérant un processus tectonique de fabrication-construction, toutes les structures doivent être assemblées et tous ces éléments doivent être liés entre eux. Selon cette logique, et même si dans un même nœud convergent des éléments divers, un élément sera toujours attaché à un autre dans une relation parent-fils. Cette relation est fondamentale pour comprendre le processus tectonique, et par conséquent la bonne et logique désignation des éléments parents et des éléments fils qui servent au développement optimal d'un système structurel. Dans le cas du modèle exposé, avec la possibilité d'avoir trois fuseaux différents, le premier fuseau sera toujours désigné comme le fuseau parent et les éléments des autres fuseaux seront toujours attachés à ce premier fuseau.

La mise en valeur de ce concept et la désignation du premier fuseau comme le fuseau parent, permettent au modèle, de concevoir et de gérer des cases dans lesquelles les fuseaux ne sont pas positionnés à la même distance de la grille, ainsi que d'être capable de paramétrer et de gérer le décalage des fuseaux en donnant plus de flexibilité au modèle et à leur capacité d'analyser des cas divers.

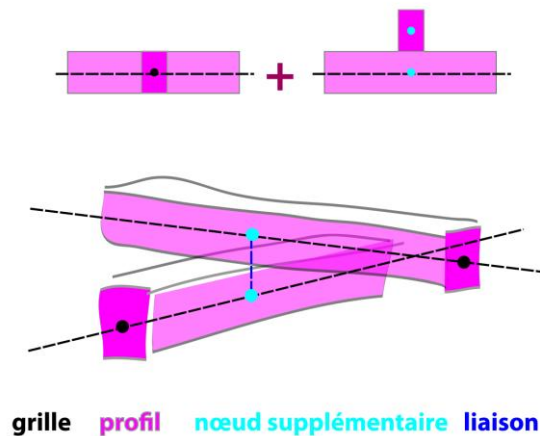


Figure 25 processus de décalage

Dans le cas des décalages, deux paramètres sont importants. Le premier est la distance du décalage, et le deuxième est le rapport entre les éléments décalés. En paramétrant la distance du décalage des fuseaux fils (2 et 3) en fonction du fuseau parent, l'algorithme proposé est capable de calculer géométriquement le déplacement et la croissance des éléments en fonction de leurs normales. De plus, il est capable de générer des fibres entre les nœuds des fuseaux parents et des fuseaux fils toujours en relations binaires. Il va lier les nœuds du fuseau 2 (intersection de fuseau 2 avec le fuseau 1) avec les nœuds du fuseau 1 correspondant (intersection des fuseaux 1-2). De la même manière, l'algorithme lie les nœuds correspondants entre les fuseaux 1 et 3 et finalement entre 2 et 3. Ces liaisons servent premièrement à trouver des relations parents-fils, et deuxièmement à trouver des types d'assemblages à choisir. Enfin, elles génèrent la continuité du système demandé par la méthode du calcul structurel et par la méthode des éléments finis. Sans cette partie, en théorie assez simple mais dans la pratique très complexe, il serait très difficile de gérer des décalages. Il n'y aurait pas de relations entre les éléments et pas suffisamment

d'informations pour établir les assemblages et réaliser le calcul structurel de façon intégral, ou seulement par arche individuel mais en donnant de faux résultats.

### 5.3.4 Les nœuds, les assemblages et les appuis

Les derniers paramètres géométriques générés par le modèle sont les nœuds c'est à dire les assemblages et les appuis. Le positionnement des nœuds dans l'espace est donné au moment même de la projection de la grille des arches et il est modifié automatiquement quand les fuseaux sont décalés ou quand les surfaces sont modifiées. Les nœuds, parmi la gestion des listes de coordonnées, sont classifiés entre appuis et assemblages. Ces derniers dépendent des fuseaux «parents», il est par conséquent possible d'avoir trois différents types d'assemblages en fonction des trois fuseaux possibles. Malgré cette classification, la numérotation des nœuds est globale et permet, par exemple, de trouver des nœuds spécifiques pour une analyse différente ou (en théorie) pour une paramétrisation spécifique selon les besoins structurels. L'information concernant le type d'assemblage et d'appui, et sa traduction en ddls, est introduite dans un modèle (modèle provenant de la base de données qui a été générée par le travail de Nicolas Jacobs, mentionné précédemment). Cette BD peut être lue et requêtée dans GH par le modèle qui prend l'information nécessaire selon le choix de l'utilisateur. Dans l'état actuel du travail, la modélisation géométrique des assemblages et appuis n'est pas encore ajoutée, mais le principe est formulé.

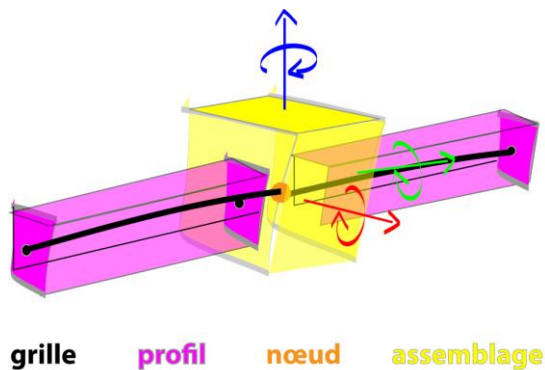


Figure 26 assemblage

### 5.3.5 La discrétisation et les éléments de sortie

Ce modèle géométrique est capable de générer non seulement l'information nécessaire à la modélisation, mais aussi les paramètres demandés pour l'environnement du calcul. Tous les composants de la grille des arches (les fibres médianes, les nœuds, les profils) et l'information des assemblages et appuis sont traduits en listes d'informations mathématiques numérotées par des coordonnées. Lesquelles, parmi des opérations de gestions des données, servent à lier le modèle géométrique constructif, le

modèle du calcul approximatif (Karamba), et le modèle de calcul et validation structurelle (RDM6). Dans une dernière étape, l'algorithme est également capable de discrétiser (en fonction de la largeur) les arrêtes courbes en sections droites en générant des nœuds internes de liaisons parfaites, qui sont lues comme des continuités du matériel. Ca permet que le processus de calcul sur RDM6 soit le plus précis possible.

#### 5.4 Le processus: calcul structurel approximatif

Avec ce modèle géométrique fonctionnel et ses éléments de sortie, il est possible de faire des connexions vers un premier modèle de calcul structurel approximatif sur Karamba qui, pour traiter d'un plugin du même GH donne la possibilité d'une connexion et d'une interaction plus fluide. Ainsi, cette étape est décrite de façon plus détaillée par ses paramètres fournis, le processus d'interaction avec le modèle géométrique et leur validation selon la performance structurelle.

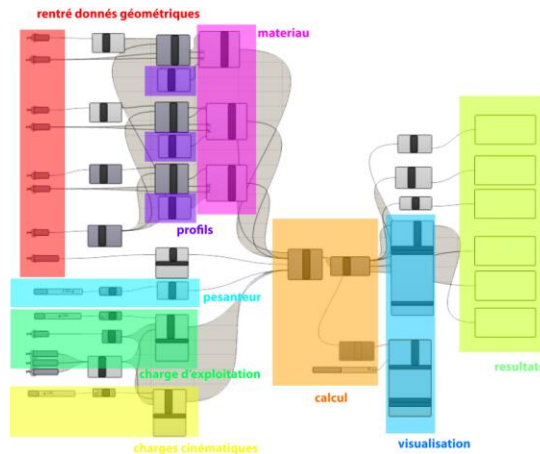


Figure 27 algorithme du processus. Voir Annexe 7

##### 5.4.1 Les paramètres

Pour traiter d'une méthode de calcul par éléments finis, l'outil Karamba à besoin des paramètres produits pour le modèle géométrique, notamment des nœuds et des barres. Cet outil possède une section circulaire comme section par défaut et ne peut être pas modifiée, raison pour la quelle seulement la hauteur du profil sera prise en compte. Le processus d'enregistrement des données commence par la recollection de tous les nœuds et toutes les barres discrétisés (arrêtes) nettoyées qui servent comme données de référence. La deuxième étape est l'enregistrement des appuis séparément pour sa paramétrisation en ddls et la troisième étape consiste en fournir des barres et des nœuds séparément selon les fuseaux existants et servent à régénérer le modèle. Une fois que la grille des arches est régénérée, c'est le moment d'appliquer des charges pour constituer le calcul du modèle.

La première étape de paramétrisation des charges est la désignation du matériel. Cette désignation est faite par lecture des BD qui contiennent l'information physique nécessaire pour le calcul. Ces BD ont été

remplis à l'avance avec les informations sélectionnées sur les types de bois à utiliser pour le modèle (voir 4.4 Conclusion: la méthode du calcul et sa relation avec la grille des arcs, les paramètres choisis). Une fois le matériel est sélectionné, il faut créer des cas de charges pour générer les efforts.

Dans le modèle proposé, trois cas des charges sont paramétrés. Le premier cas est la pesanteur ou gravité qui, pour raisons de sécurité structurelle est un vecteur fixé à  $12\text{m/s}^2$  (1.2 fois la gravité moyenne), ce cas sert à activer le poids propre de la structure en fonction de sa géométrie et de sa matérialité. Le deuxième cas est la charge d'exploitation. Pour gérer cette charge, une mesh<sup>15</sup> de chargement est générée à partir de la forme enveloppée et une charge uniformément répartie est placée sur cette mesh. Cette charge, prise en fonction de valeurs sélectionnées dans l'EUROCODE (section 4.4 de cette mémoire) est repérée globalement dans la direction de la gravité appliquée. Finalement un troisième cas pour les charges cinématiques est paramétré. Ce dernier cas est géré par une mesh générée également à partir de la forme de l'enveloppe mais aussi la charge moyenne (qui représente la charge de neige selon la région du projet) et est appliquée en directions normales à la mesh générée. Cette charge, uniformément répartie aura alors des efforts différents en fonction de la forme par exemple, elle sera plus concentrée dans les endroits convexes que dans les endroits concaves en prenant le principe de distribution de la neige sur les toitures.

#### 5.4.2 L'analyse structurelle approximative et l'interactivité avec le modèle géométrique

Une fois tous les paramètres nécessaires gérés, les problèmes, principalement les redondances, sont éliminés, l'algorithme généré à partir du plugin Karamba fera un premier calcul structurel. Il ne donne pas seulement des résultats mathématiques sur la déformation maximale, le poids de la structure, des contraintes internes et des forces appliqués mais aussi, il est capable de montrer visuellement ces résultats dans le même display de Rhino que le modèle géométrique GH; en résumé, il permet de visualiser les effets des chargements appliqués sur la structure et ses composants. Ces effets permettent de comprendre les problèmes, les points critiques et les possibles erreurs dans la conception et

---

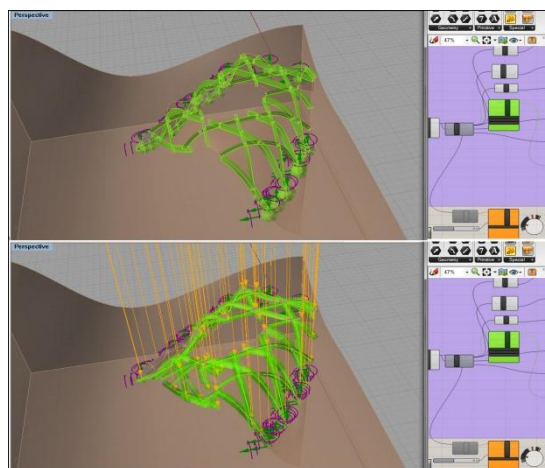
<sup>15</sup> Une Mesh est un objet tridimensionnel constitué de polygones, et pour tant le concept géométrique est différent d'une surface NURBS

modélisation de la forme et de la structure. Il permet au concepteur d'être capable de réagir en modifiant par exemple les paramètres de composition de la grille, la dimension des profils ou le choix du matériau. Tout ce processus interactif en temps réel permet l'évolution du projet architectural en cherchant une optimisation structurel qui déclenche sur une optimisation du processus CFD. Dans l'état actuelle d'avancement, ce processus est fait manuellement mais en théorie, l'optimisation de la structure par des algorithmes évolutives serais la forme plus rapide et précisé de évaluer et valider un projet à ce point.

### 5.4.3 La validation

L'optimisation du modèle géométrique structurel peut continuer dans un processus d'aller-retour jusqu'à ce que le concepteur soit d'accord avec le résultat, et pourtant la validation dépend du but de l'analyste. Par contre, il est important de déterminer certains paramètres pour la validation du modèle.

Il y a certains principes importants à prend en compte pour la validation, qui sont le fait que la structure doit être le plus optimale possible en terme de dimensionnement des éléments, quantité et type du matériau, poids propre, stabilité et déformation et faisabilité constructive. Et si cette relation est bien relative et que son choix dépend du concepteur, il est important prendre en compte que la structure doit respecter les limites de déformation maximales ( $\text{larguer}/300$ ), et ses éléments doivent respecter la limite des contraintes internes de  $1/3$  de la valeur de la limite de rupture du matériau. Une fois ces principes acceptables, le modèle géométrique peut être validé partiellement pour passer la dernière étape du processus proposé : le calcul et validation structurelle définitive de la structure conçu.



**Figure 28** déformation de la structure après calcul structurel approximatif

### 5.5 Le processus: calcul et validation structurel

---

La troisième étape du processus proposé est le calcul et validation structurelle définitive. Pour cette dernière étape, l'automatisation de la gestion des informations pour la communication et l'interaction

entre les environnements GH et RDM6 est primordial. En enrichissant le modèle optimisé avec l'information détaillée des assemblages et des profils choisis, l'environnement de calcul structurel par méthode des éléments finis RDM6, sera chargé de calculer le système structurel pour valider ou non la structure bois proposée. Et bien que l'analyse et la compréhension des paramètres et langages utilisés par RDM6 fait partie de ce travail de recherche; le processus opératif de gestions de BD et fichiers nécessaires pour l'interaction est produit dans le cadre du travail de Nicolas Jacobs déjà mentionné.

### 5.5.1 Les paramètres et le processus

RDM6 est un outil de calcul structurel par la méthode de calcul des éléments finis qui ont besoin de paramètres géométriques : les nœuds, les fibres moyennes, les barres et les profils. Les nœuds sont pris en fonction du repère global (x-y-z) et les autres composants sont pris en fonction des repères locaux formés par un point d'origine (nœud) et une direction qui suit l'axe attaché à ce point ( $x^n-y^n-z^n$ ).

Dans cette logique, les nœuds sont décrits par leur numérotation et par des coordonnées cartésiennes dans un ordre tectonique. Les barres sont décrites par leur propre numérotation et pour le couple des départ- fin ; elles ont l'information de positionnement des profils par un vecteur unitaire décrit par ses composants cartésiens et elles supportent aussi l'information codifiée du type de profil et type de matériau qu'il contient. Les codes pour les profils et les matériaux proviennent des BD modifiés en fonction des paramètres sélectionnés pour ce travail. Les barres aussi contiennent l'information codifiée par les types d'assemblages selon leur description physique-mécanique, description qui a été simplifiée en relation non seulement les nœuds, mais la réaction produit sur des barres attachés. Pour cette raison, les divers types d'assemblages sont décrits dans chaque barre de façon binaire et en fonction des nœuds<sup>16</sup>.

L'information détaille le type de profil choisi ainsi que la localisation et type des appuis sélectionnés est aussi compris sur le modèle. Le type de profil sera composé par un code propre, leur centre de gravité, le

---

<sup>16</sup> Voir annexe Y sur les assemblages et leur traduction sur RDM6

nombre d'arrêtes et leurs dimensions et tant que les appuis seront décrits par le nombre de nœuds et la typification mécanique propre à leur comportement.

Tous ces paramètres géométriques sont fournis à partir du modèle géométrique constructif (GH) et doivent être remplis dans un format spécifique à RDM6 pour être transmis dans l'environnement du calcul structurel. Ce remplissage et sa mise en page est fait de façon semi-automatique sur un fichier Excel développé dans le cadre du travail de Jacobs et, bien que l'objectif final est l'automatisation du processus, cette première motrice de communication sert à valider le travail réalisé sur la compréhension et la paramétrisation des besoins des environnements de modélisation et du calcul choisis.

Une fois l'information géométrique fournie, il faut paramétrer les charges. Le fichier introduit de GH contient déjà l'information codifiée nécessaire pour que RDM6 puissent appliquer le premier cas de charges: le matériel et la gravité appliqués dans le processus précédant. Le deuxième cas, la charge d'exploitation est paramétrée directement vers l'outil avec le même principe que celle de l'application une charge uniformément répartie sur la structure et la repéré globalement dans la direction de la gravité appliquée. Finalement, le troisième cas pour les charges cinématiques est paramétré aussi directement sur l'outil tout en prenant en compte les mêmes considérations que pour le calcul structurel approximatif. Cette charge, uniformément répartie, suit le vecteur normal à la surface et pourtant a des efforts différents en fonction de la courbure de la même et représente le charge produite par la neige dans les toitures. Le fait de reprendre les mêmes valeurs et principes que le calcul approximatif sert premièrement à avoir une continuation du processus et reprise des résultats, et deuxièmement pour comprendre les différences générées sur la structure par l'utilisation des valeurs réels des assemblages et profils choisis.

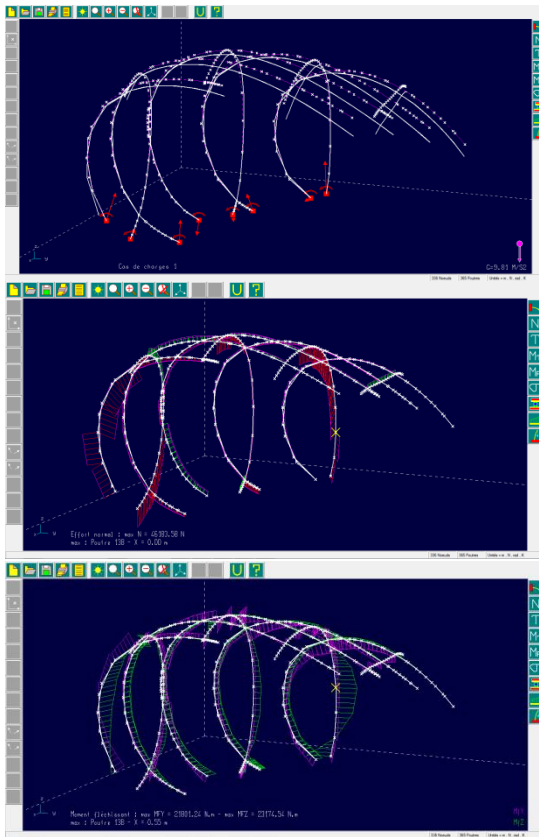


Figure 29 donnés GH-donnés RDM6

### 5.5.2 Le résultat et la validation

Avec les paramètres mis en place, le processus du calcul par méthode des éléments finis est lancé; trois scénarios sont possibles. Si le choix des assemblages ne serait pas correcte, il y a la possibilité de que le





**Figure 30** résultat après calcul structurel. déformation, effort normal et moment fléchissant

système ne soit pas stable. S'il est le cas, le modèle ne pourra pas être calculé et, en fonction des erreurs, les assemblages doivent être remplacés partiellement ou totalement. Le deuxième scénario est que la structure soit stable mais qu'elle ne puisse être validée parce que les résultats ne sont pas satisfaisants ou qu'ils n'arrivent pas aux limites permis. Cet outil de calcul structurel génère tous les résultats possibles sur la structure générale et sur chacun de ses composants et l'analyse de ses résultats devrait être faite par des experts. Mais l'intention de cet travail est de travailler et valider une modèle à la phase d'esquisse et

par conséquent, les résultats globales suffiront. Le fait que le déplacement nodal et la déformation de la structure soient minimaux validera le système, en tant que le fait de ne trouver pas des contraintes supérieurs aux limites permis par le code signifie que les efforts dans les éléments sont supportables. Le troisième et optimal scénario est que le calcul démontre que la structure proposée est parfaitement valable sans changement à faire.

En résumé, la comparaison graphique et mathématique des résultats avec les valeurs maximales admissibles est suffisante pour valider la proposition structurelle. Cette étape du développement du modèle, l'optimisation du système structurel est faite parmi la manipulation pour part de l'utilisateur; mais théoriquement il est possible de relier le modèle du calcul structurel avec le modèle géométrique par un processus d'optimisation évolutionnaire des structures (ESO)<sup>vi</sup> qui répondent à des paramètres divers. Finalement il est important de comprendre que si bien le modèle arrive déjà avec des paramètres préfixés à partir des choix sur le modèle géométrique, il n'est pas nécessaire de revenir à cette étape pour modifier les données sinon qu'ils peuvent être modifiés directement sur l'environnement RDM6 à la condition qu'une fois le modèle est validé ses changements doivent être réalisés aussi sur les paramètres du modèles GH et comme sa assurer la continuité des informations sur le processus CFD.



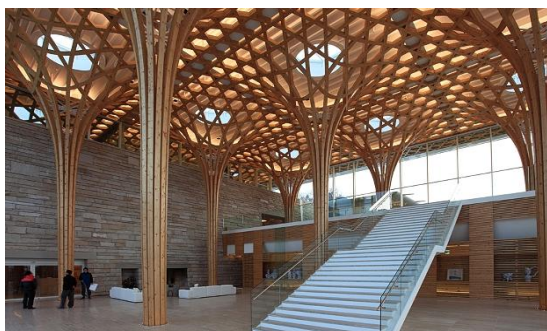
## 5.6 Conclusion

---

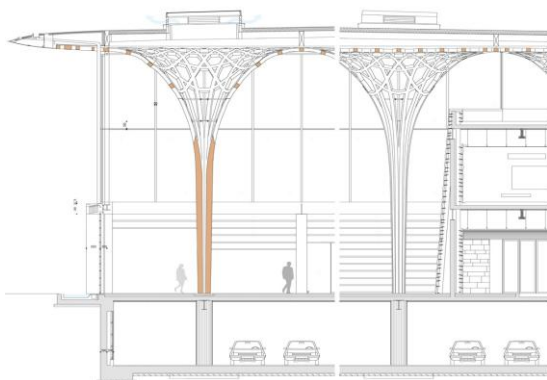
En résumé, la méthode et le modèle ici proposés, lesquels suivent les concepts proposés à l'avance pour les travaux de recherche au sein du CRAI, sont finalement capables de transformer une forme non standard et quelconque en un modèle paramétrique géométrique-structurel pour valider la proposition des grilles des arches en bois.

Grace à l'exploitation des outils commerciaux de modélisation géométrique et de calcul structurel par la méthode des éléments finis, le modèle est capable de générer une méthodologie qu'aide à lier la conception architecturale et le calcul structurel en validant le projet à la phase d'esquisse. En même temps, le modèle propose une méthodologie d'interaction des outils CAO-calculs que généralement il est très difficile d'aboutir. Et si bien le modèle a été testé avec des dizaines de formes, surfaces et de combinaisons de paramètres divers, le prochain et dernier chapitre de ce mémoire s'oriente vers le fonctionnement optimal du modèle et de sa méthodologie et sera testé pour remodeler une réalisation architecturale récente qui a poussé la tectonique du bois digital et le processus CFD vers de nouveaux niveaux de complexité.

## 6. Expérimentation



**Figure 31** Hall d'être Nine Bridges Country Club-Clubhouse



**Figure 32** coupe du projet Nine Bridges Country Club-Clubhouse

Dans ce dernier chapitre, le fonctionnement du modèle proposé est testé parmi la remodelisation géométrique, calcul et validation structurel de la structure générée pour le projet architectural « The Nine Bridges Country Club-Clubhouse (2010) » réalisé par l'architecte japonais Shigeru Ban et assisté par DTP pendant le processus CFD.

Le Nine Bridges Country Club-Clubhouse, est un projet de 16000 m<sup>2</sup> finalisé en 2010 en Corée du Sud qui sert de bâtiment d'accueil pour le club de golf. Le hall et la partie supérieure, contiennent l'accueil, un salon et le espace lounge, est caractérisé par des poteaux bois et une façade vitrée tandis que leur bassement la partie inférieure est faite en pierres locales et contient l'espace service.

Pour cette étude, la proposition la plus intéressante de ce bâtiment est la toiture de 36 x 72 m qui le protège. Cette toiture, modélisée à partir d'une surface NURBS non standard, est supporté par 21 poteaux en bois en forme d'arbres qui ont une hauteur de trois étages. Ces poteaux sont conformés pour une grille structurale a trois axes décalés qui va continuer sur la toiture en conformant un système de grilles des arcs modifiés. En prenant en compte des réglementations coréennes, la structure est formée par des éléments bois en lamellé collé de 6m de longueur maximale avec des assemblages demi-bois qui permettent d'avoir une grille structurale sans décalage des barres.

En connaissant ces paramètres, une partie de la toiture de quatre poteaux (surface enveloppe) avec le sol correspondant (surface d'appui) seront modélisés sur Rhino. Après, le modèle de « Conception paramétrique des structures : approche bois tectonique à des formes non standard » sera appliqué pour

la génération et validation physique géométrique de la structure générée.

## 6.1 Le processus: conception géométrique

---

Dans cette étape, grâce à des algorithmes conçus, un système géométrique structurel de grille des arcs similaire à la proposition réelle est modélisé. Pour commencer, les surfaces (enveloppe formelle et appuie) seront modèles. Après, le processus de paramétrisation se divise en trois étapes: l'étape de projection de la grille; l'étape de paramétrisation des profils et des fuseaux et l'étape de paramétrisation des nœuds. Toute la paramétrisation est faite pour représenter le système structurel dans le projet original. La discrétisation et la gestion des éléments de sortie sont aussi paramétrées.

### 6.1.1 La surface enveloppe formel et la surface d'appuie.

Ces deux surfaces NURBS, externes au modèle, sont modélisés directement sur Rhino chacun à partir d'une seule surface modélisée par déformation des points du contrôle.

La surface enveloppe formelle est modelée à partir d'une seule surface de 24x24m. Pour représenter la forme onctueuse et fluide de la toiture et les poteaux du projet choisi, la surface est subdivisée en quatre parties égales. Les points de contrôle au centre de chaque partie sont étirés vers la surface d'appui de façon régulière et approximative pour générer des cônes qui servent à générer les poteaux. Comme expliqué précédemment, cette surface servira pour placer les fibres médianes des arcs et comme support pour des mailles de charges.

La surface d'appuie permet la représentation géométrique du site dans lequel le projet va se poser. Dans le cas du Nine Bridges Country Club-Clubhouse, cette surface est un plan droit (x-y) qui est modelé à partir d'une seule surface NURBS. Les cônes qui représentent les poteaux du projet viennent à dépasser

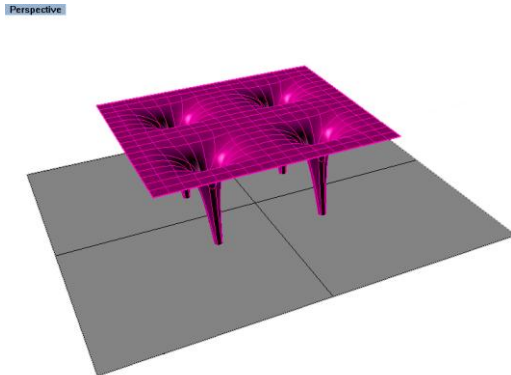


Figure33 surfaces modélisées par Rhino

cette surface pour générer des appuis des morceaux du projet modélisé.

### 6.1.2 La grille des arcs et sa projection

Dans cette étape la génération et paramétrisation de la grille grâce à un algorithme basé sur des opérations géométriques est mis en œuvre. Dans ce cas spécifique, la grille régulière a trois fuseaux forme des étoiles a six sommets sur le plan x-y. Pour arriver a cette configuration, les trois fuseaux orthogonales son paramétrés avec des différents points d'origines et des valeurs angulaires mais avec les mêmes dimensionnements et la même direction d'extrusion.

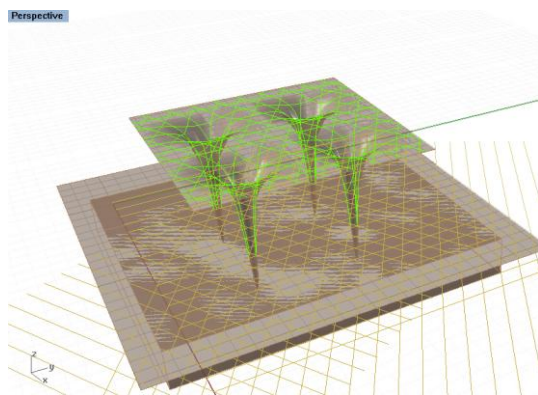


Figure 34 grille projetée

Le premier fuseau a un pont d'origine (-1, 10, 0 m) et une rotation de  $30^\circ$  sur le plan x-y. Le deuxième a son origine à (-5.5, 10, 0m) avec une rotation de  $-30^\circ$ . Le troisième fuseau a un pont d'origine (-1, 10, 0 m) et une rotation de  $30^\circ$ . Tous les fuseaux ont une largeur de 30m et chaque axe est disposé avec 1.5m de séparation du précédent. Finalement la direction d'extrusion est complètement verticale et avec une hauteur de 15m. En fonction de la configuration réelle du projet, les trois fuseaux ne sont pas décalés de ses fibres médianes.

Avec ses paramètres, l'algorithme génère un système structurel de grille des arcs sur la surface enveloppe avant d'être modélisé. Ce système est géométriquement similaire au système proposé pour le projet réel et permet non seulement de placer la structure sur la toiture mais aussi conformer les poteaux-arbres en reprenant l'esprit tectonique architectural du bâtiment.

### 6.1.3 Les profils, les fuseaux et le décalage

Une fois la grille positionnée sur la surface, les profils et s'extrusion sont paramétrés pour générer les volumes des fuseaux. En prenant en compte le projet et sa réalisation, les profils bois sont paramétrés pour des surfaces rectangulaires (0.4 x 0.2m). Puis, l'algorithme va placer les profils à partir de leur centre de gravité de façon vertical dans les nœuds d'intersection pour finalement les extruder en suivant les axes déjà projetés sur la surface-enveloppe. En suivant le projet, les fuseaux ne seront pas décalés,

Perspective

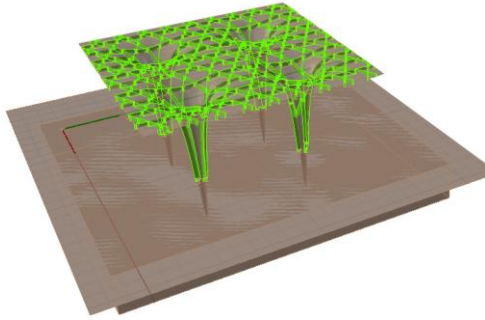


Figure 35 génération des fuseaux

Perspective

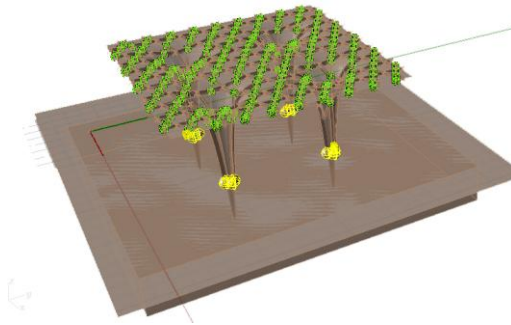


Figure 36 génération des assemblages et des appuis

mais au contraire de la réalisation analysée, ils seront toujours des éléments de courbure simple et pour conséquence leur fabrication pourra être fait par des processus plus simples. Cela à pour conséquence que leur fabrication pourra être faite par des processus plus simples, efficaces et rapides en gagnant du temps et en baissant le budget. Et bien que avec cette type de paramétrisation, la structure suivra un peu moins la fluidité de la surface proposée, elle donnera une logique tectonique plus claire et moins formelle, elle donnera aussi un caractère plus durable au processus CFD pour la réduction des temps et des coûts de production.

#### 6.1.4 Les nœuds, les assemblages et les appuis

A ce point là, les nœuds sont déjà modélisés par l’algorithme. Le positionnement des nœuds dans l’espace, leur numérotation et ses classements entre appuis et assemblages sont donnés au moment même de la projection de la grille des arcs. Il donc reste la paramétrisation de ces assemblages et ces appuis. Selon la description du projet analysé, l’assemblage choisi dans la plupart des cas est le mi-bois enrichi par des connecteurs métalliques. Cet assemblage par contact, qui permet la pénétration de plusieurs éléments ayant des directions différentes, est possible si les éléments son continues et dépend d’une logique constructive parent-fils. La grille des arcs proposée et la désignation des fuseaux comme parent ou fils permettent la modélisation optimale de ce type d’assemblage. Les appuis sont des appuis simples avec un degré de liberté de rotation pour éliminer le risque d’être hyperstatique. L’information physique concernant le type d’assemblage et d’appui et sa traduction en ddls est introduit toujours depuis la base de données générée dans le travail de Jacobs mentionné précédemment.

#### 6.1.5 La discrétisation et les éléments de sortie

Dans une dernière étape de la conception géométrique, l’algorithme discrétise, en fonction de la largeur, les arêtes courbes en sections droites. Dans cette cas d’étude, les courbes sont discrétisées par droites de moins de 0.5 mètres de largeur en générant aussi des nœuds internes de liaisons parfaites qui sont lues

comme des continuités du matériau. Cela permet davantage de précision du processus du calcul sur RDM6, et ce, afin qu'elle soit la plus précise que possible.

## 6.2 Le processus: calcul structurel approximatif

---

Avec l'information générée par le modèle géométrique, il est possible de réaliser un premier modèle de calcul structurel approximatif (notamment grâce au logiciel Karamba). Ce processus varie en fonction au projet analysé.

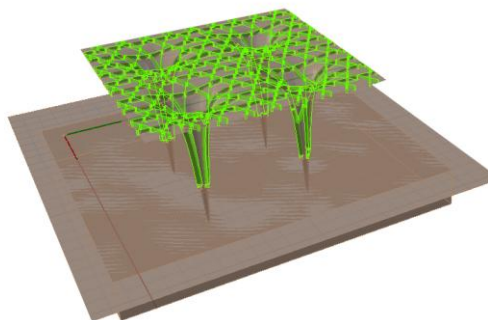
### 6.2.1 Les paramètres

Dans un premier temps, il faut rappeler que cet outil a besoin de « nœuds-barres » dans ses paramètres géométriques. Par contre, il n'est pas capable de prendre en compte les modifications apportées sur la section des profils. Conservant leur forme circulaire, ces derniers ignorent l'information contenue par les assemblages. Le processus d'entrée des données commence avec l'information des nœuds et des barres discrétisés qui servent de données de référence. Une deuxième étape consiste à rentrer séparément les appuis pour la paramétrisation en ddls. Dans la troisième étape, les barres et les nœuds sont rentrés unitairement dans chacun des trois fuseaux existants pour régénérer le modèle. La grille des arcs est régénérée. C'est le moment de paramétrer les charges pour constituer le modèle du calcul.

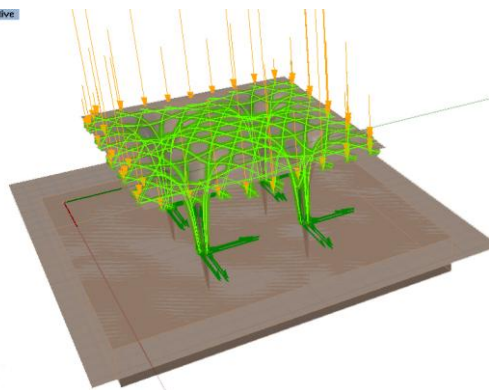
La première étape de la paramétrisation des charges est la définition du matériel. Cette désignation est faite par lecture des BD qui contiennent l'information physique nécessaire pour le calcul. Dans ce cas, le bois lamellé collé moyenné est utilisé pour le modèle (voir 4.4 Conclusion: la méthode du calcul et sa relation avec la grille des arcs, les paramètres choisis). Après la sélection du bois lamellé collé, les casses de charges sont paramétrés pour gérer les efforts.

Dans le modèle proposé, trois casses des charges sont paramétrés. Dans un premier temps, on a la pesanteur ou la gravité qui, pour des raisons de sécurité structurelle est fixé à  $12\text{m/s}^2$ . La pesanteur active

Perspective



Perspective



**Figure 37** déformation de la structure après calcul structurel approximatif

le poids propre de la structure en fonction de sa géométrie et de sa composition structurelle. Dans un second temps, la charge d'exploitation est paramétrée à partir de la génération d'une « mesh » de chargement à partir de la forme exploitée. Une charge de  $1.5 \text{ KN/m}^2$  est répartie uniformément sur cette « mesh » (voir section 4.4 en Annexe) et localisée globalement dans la direction de la gravité appliquée. Le cas des charges cinématiques est activé. Dans ce dernier exemple, qui représente la charge de la neige dans la région de la Lorraine en France, on a activé une « mesh » générée à partir de la forme globale. Cependant, la charge moyenne ( $1 \text{ KN/m}^2$ ) est appliquée à une norme directionnelle générée par la « mesh ».

### 6.2.2 Analyse structurelle approximative et Interactivité

Une fois tous les paramètres nécessaires mis en place et suite à un premier calcul structurel, l'algorithme est appliquée à partir du plugin « Karamba ». Il permet de tester la grille des arcs proposés mathématiquement et de visualiser les effets de charges appliqués sur la structure et ses composants. Cela permet d'appréhender des problèmes, des points critiques et des possibles erreurs de conception et de modélisation formelles et structurelles. Parmi la compréhension des résultats données, ce premier analyse permet de faire des modifications dans le modèle géométrique pour s'optimisation. Dans le cas spécifique du projet de Shigeru Ban, une analyse structurelle approximative démontre que la grille des arcs à trois fuseaux, est le choix le plus approprié dans les limites de la déformation acceptée. De plus, elle permet de se rendre compte que les profils choisis sont trop grands et que leurs sections peuvent être réduites sans perdre leurs efficacités structurelles.

### 6.2.3 La validation

L'optimisation du modèle géométrique structurel est paralysée pour remodeler le projet choisi avec une optimisation maximale de ses éléments. Les résultats prouvent qu'avec la paramétrisation choisie de la grille, et une réduction de la section des profils à  $0.35 \times 0.15 \text{ m}$ , la structure fonctionne parfaitement. Cette première analyse démontre qu'avec un poids propre de  $500 \text{ KN}$ , cette structure aura une déformation



inferieur à 0.03m et des contraintes internes admissibles. Par conséquence, le modèle géométrique structurel est revalidé et exporté vers RDM6 pour un calcul structurel et une validation définitive.

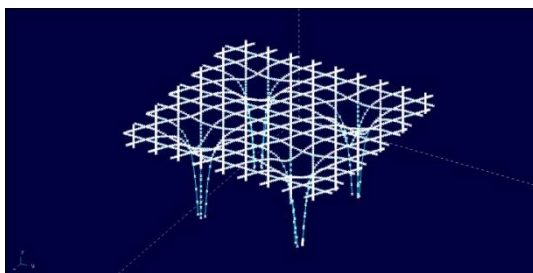


Figure 38 modèle rentré sur RDM6

### 6.3 Le processus: calcul et validation structurel

---

La troisième étape du développement proposé est le calcul et la validation structurels définitifs. En complétant le modèle optimisé avec des assemblages et des profils choisis, l'environnement opérationnel et structurel des éléments définis par RDM6, aura pour objectif de calculer le système structurel pour ainsi valider ou pas la structure bois proposée.

#### 6.3.1 Les paramètres en corrélation avec le processus

Comme nous l'avons mentionné avant, RDM6 est un outil de calcul structurel qui s'appuie sur une méthode de calcul liée à des éléments définis. Ceux-ci dépendent des paramètres géométriques et des contraintes physiques appliqués. Les nœuds sont positionnés en fonction d'un repère global (x-y-z) et les autres composants sont ajustés selon des repères locaux (formés par un point d'origine (nœud) et une direction qui suit l'axe attaché a ce point ( $x^n-y^n-z^n$ )).

Grâce a la gestion des listes et le post-traitement de l'information géométrique, toute information qui a été générée, est transmise à RDM6 pour une phase de traitement. Les données concernant les assemblages et les matériaux choisis, sont aussi comprises dans le processus de transmission des informations. Les nœuds et les barres sont de mêmes pris en compte pour le processus antérieur. Par exemple, pour un profil importé, on défini une surface rectangulaire de 0.35 x 0.15m. L'assemblage choisi est le midi-bois. Il est traduit comme des assemblages RIRI (rigide-rigide) dans RDM6. En concordance avec le processus suivi, les appuis sont appliqués sur des points d'appuis libérant des rotations. Tous ces paramètres sont fournis à partir du modèle géométrique constructive (GH) parmi un format spécifique à

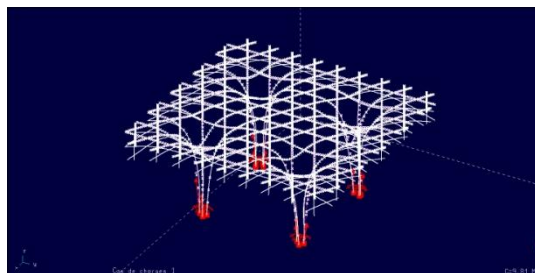
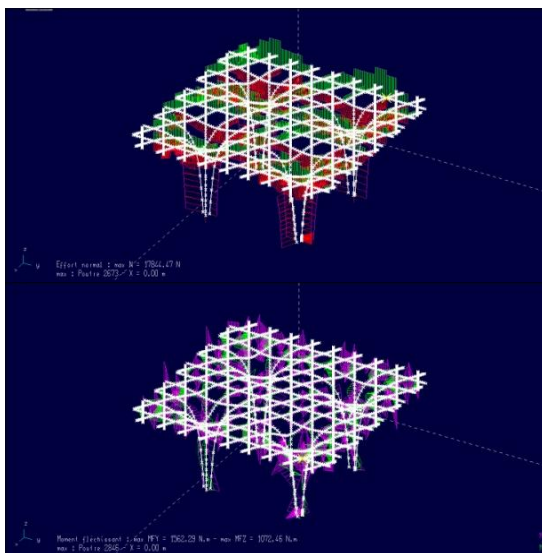
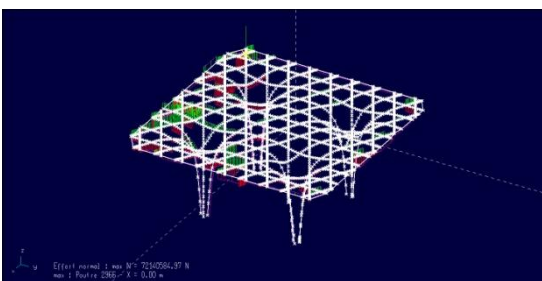


Figure 39 déformation maximale





**Figure 40** résultat après calcul structurel. effort normal et moment fléchissant



**Figure 41** effort normal avec une bande du borde

RDM6 (définissant un environnement de calcul structurel). Ce fichier est préparé de façon semi-automatique sur un fichier Excel (dans le cadre du travail de Nicolas Jacobs) servant à valider le travail réalisé sur la paramétrisation des besoins environnementales, résultante de notre modélisation et du calcul choisis.

Le fichier introduit de GH contient déjà l'information codifié nécessaire pour que RDM6 puisse appliquer un premier cas de charges. Nous utilisons comme matériel, le bois lamellé collé de résistance moyenne et une pesanteur de  $12\text{m/s}^2$  comme le processus précédant. Les charges d'exploitation sont paramétrées directement par cet outil avec la même idée d'appliquer une charge de  $1.5\text{KN/m}^2$  uniformément répartie sur la structure et sur l'ensemble de l'édifice. Finalement, les charges cinématiques sont paramétrées aussi directement par l'outil avec les mêmes considérations que le calcul structurel approximatif. La charge de  $1\text{KN/m}^2$  est uniformément répartie. Elle suit une norme vectorielle à la surface pour reprendre la charge de neige sur la toiture. Le fait de reprendre les mêmes valeurs et les principes de calculs approximatifs, serve à avoir une continuation du processus, et pour comprendre les différences générées sur la structure par l'utilisation des valeurs réels des assemblages et profils choisis.

### 6.3.2 Le résultat et la validation

Avec les paramètres choisis et le processus du calcul par méthode des éléments finis est lancé et les résultats sont très satisfaisants. Cet outil du calcule structurel gêner tous les résultats possibles sur la structure général et sur chacun de ses composants, résultats que son suffisants pour valider une modèle à la phase d'esquisse. Le fait que le déplacement nodal et la déformation de la structure soit minimales ( $0.05\text{ m}$ ) valide le système, en tant que le fait de ne trouver pas des contraintes importantes signifie que les efforts dans les éléments sont supportables. Finalement et même si les résultats ont été admissibles, des expérimentations ont été faites pour diminuer les efforts normaux. Le résultat trouvé est la création d'un bande de borde bois qui viens à rigidité la toiture.

#### 6.4 Conclusion

---

En résumé, la comparaison des résultats graphiques et mathématiques (contenant les valeurs maximales admissibles) est suffisante pour valider la proposition structurelle. Plus important pour le travail ici exposé, la remodelisation et la vérification par calcul structural d'un projet architecturale comme le Nine Bridges Country Club-Clubhouse de Shigeru Ban permettent la validation du modèle et du processus proposés dans ce travail de recherche. Il ouvre des perspectives importantes pour l'avancement, l'évolution et la complémentation d'un projet dans un future proche.

En résumé, le modèle est finalement capable de partir d'une forme non standard quelconque en une modèle paramétrique géométrique-structurel pour valider la proposition des grilles des arcs en bois. La capacité du modèle d'être paramétré et la flexibilité de chaque sub-processus d'être analysé et modifié en fonction aux besoins de l'utilisateur sont aussi considérations valables pour la validation du même.

## 7. Conclusion et perspectives

Grace à la méthode employée pour le développement de ce mémoire, les deux derniers chapitres peuvent être pris comme la conclusion du projet. Le caractère explicatif de ces chapitres montre bien le résultat final du modèle proposé et ses possibilités. Néanmoins, il faut les confronter avec les objectifs proposés pour valider non seulement le modèle final mais aussi la méthodologie utilisée.

### 7.1 Conclusion

---

D'abord, **l'analyse du contexte général des processus de conception des structures non standards dont les modèles, déjà proposés au sein du CRAI**, montrent l'importance du développement d'une méthodologie qui aide à réduire les distances entre l'architecture et le calcul structurel. Il est donc fondamental d'intégrer l'interaction entre l'architecture et la structure dès la phase d'esquisse afin que le processus CDF devienne le plus efficace, logique et durable que possible.

Le travail développé au sein du laboratoire CRAI exemplifié par la thèse doctoral de Shadkhou est une solution valable qui a été pris en compte comme point du départ. La recherche d'une méthode qui permet l'intégration des processus CDF et l'opportunité de réfléchir au projet tectonique physique de la phase d'esquisse est une grande opportunité pour des concepteurs afin d'explorer les formes non standards de façon plus systématique et durable. Par contre, cela reste toujours comme un modèle en développement qui n'est pas encore fonctionnel : ni géométriquement ni structurellement.

L'analyse de la méthode de calcul par éléments finis et ses besoins géométriques a été réalisée pour concevoir un modèle géométrique capable de communiquer avec un environnement de calcul pour sa validation postérieure. La méthode du calcul structurel par des éléments finis est basée sur deux étapes qui sont : la vérification de la stabilité du système et le processus de dimensionnement des éléments. En fonction de ces étapes, la méthode a besoin d'une géométrie, des charges d'exploitation et des charges cinématiques, paramètres en fonction à chaque cas.

En prenant en comptes les paramètres géométriques pour les appliquer sur des formes non standards, le principe des « grilles des arcs », proposé au sein du CRAI, devient valide. Une surface NURBS quelconque peut être simplifiée et analysée par sa discrétisation en facettes plus simples. Parmi des opérations géométriques, il est possible d'obtenir une grille qui permet générer des courbes- barres nécessaires pour créer des éléments structuraux. En même temps, l'interaction interne et externe de la grille peut gêner des assemblages et des appuis nécessaires pour le calcul.

Pour la paramétrisation du modèle géométrique structurel quelques pré-paramètres ont été sélectionnés en fonction aux EUROCODES du calcul des structures bois. Le matériau est limité à trois types de bois moyens avec leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. La décision de concevoir, initialement, la structure non standard comme une « toiture-enveloppe légère » fait que la charge d'exploitation soit de 0.8 à 1.5 KN/m<sup>2</sup><sup>17</sup> pour sa validation. Finalement les charges cinématiques prises en compte dans cette étape sont des charges prévues pour la neige, dans la région de la Lorraine France.

En parlant du modèle et la méthodologie générés dans ce travail de recherche, celui-ci est finalement capable d' à **partir d'une architecture non standard en phase de conception, générer un système géométrique structurel, à le pré-dimensionner, le calculer et le valider.** Grace à l'exploitation des outils commerciaux de modélisation géométrique et du calcul structurel par la méthode des éléments finis, le modèle est capable de générer une méthodologie qui aide à lier la conception architecturale et le calcul structurel tout en validant le projet dans la phase d'esquisse. En même temps, le modèle propose une méthodologie d'interaction des outils CAO-calcul qui est, en général, très difficile d'aboutir.

---

<sup>17</sup> Voir annexe X sur charges d'exploitations pris

Enfin et pour **valider le modèle proposé par l'expérimentation**, la structure du projet du Nine Bridges Country Club-Clubhouse de Shigeru Ban a été remodelisée, calculée et validée. Le modèle, résultat de ce travail de recherche, a permis la comparaison graphique et mathématique des résultats avec les valeurs maximales admissibles est suffisantes pour valider la proposition structurelle. La remodelisation géométrique et la vérification par calcul structurel de ce projet architectural permettent la validation du modèle et du processus proposés dans ce travail de recherche et ouvre des perspectives importantes pour l'avancement, l'évolution et la complémentarité dans un futur proche.

En résumé, le modèle est finalement capable de transformer une forme non standard quelconque en un modèle paramétrique géométrique-structurel pour valider la proposition des grilles des arcs en bois dans une logique de conception tectonique architectural. La capacité du modèle à être paramétrée et la flexibilité de chaque sub-processus d'être analysé est modifiée en fonction des besoins de l'utilisateur et sont aussi des considérations valables pour la validation.

## 7.2 Les Limites

---

Comme tout projet de recherche, le travail ici présenté a des limites qui proviennent de la méthodologie choisie et des outils pris. La première considération à prendre en compte est que : bien que le modèle soit fonctionnel, la méthodologie ici présentée est limitée aux grilles régulières. Dans cette étape de développement, le modèle ne prend pas en compte la paramétrisation et l'utilisation des grilles non régulières, spécialement générées pour des types d'approches différents à l'extrusion orthogonale. Aussi, il existe encore des limites sur la modélisation et sur la mise en œuvre des assemblages qui peuvent modifier le dimensionnement des profils pour le processus de fabrication.

La deuxième considération est en rapport avec les outils choisis. La paramétrisation et l'optimisation internes, ainsi que la communication et interaction entre des outils divers reste encore à perfectionner. L'amélioration des processus permettra non seulement un fonctionnement plus optimal du modèle, mais aussi, l'implémentation des nouvelles approches comme par exemple l'optimisation de la structure par

des algorithmes évolutifs ou la connexion automatique entre des outils. Finalement, le processus de retour des informations de RDM6 (calcul structurel) vers GH (géométrie constructif) reste encore à développer vers une modèle de fabrication et mise en œuvre.

### 7.3 Le travail futur

---

Comme il a été mentionné, le travail montré ici, ouvre d'importantes perspectives sur cet axe de recherche. L'obtention d'un modèle fonctionnel de génération géométrique, du calcul et la validation permettent d'avancer sur l'idée d'obtenir un processus qui guide justement tout le processus CFD.

L'amélioration du modèle et de la méthodologie est un travail qui doit être poursuivi. Aussi, l'optimisation du processus d'échange de l'information est un sujet à aborder dans un futur proche. La révision des outils pris en compte peut aussi re-potentialiser le processus. Finalement, la gestion des informations qui sert à obtenir le retour des données du modèle de validation structurel au modèle géométrique ainsi que sa transformation vers un modèle constructif de fabrication restent à développer.

En conclusion ce mémoire de recherche, il faudrait reprendre la définition de la tectonique comme « un rapport direct entre forme et force qui trouve son expression »<sup>18</sup> et le fait que "l'impact de l'ordinateur doit être envisagé comme une réorganisation de l'expérience physique et de la matérialité plutôt que comme quelque chose qui leur tourne le dos"<sup>19</sup> pour remarquer l'importance des travaux, comme l'ici exposé qui cherchent des approches plus logiques, systématiques et durables que des formes non standards.

---

<sup>18</sup> SEKLER, E. – « Structure, construction, tectonics », dans Structure Arts and Science (sous la direction de Gyorky Kepes), New York, George Braziller, 1965

<sup>19</sup> PICON, A. – « L'architecture et le virtuel : vers une nouvelle matérialité », dans Le projet Tectonique (sous la direction de Chupin JP), Paris, Archigraphy, 2005

## 8. Notes

---

<sup>i</sup>Géométrie non standard : « forme organique, non orthogonale, libre et complexe ». [SCH05], SCHEURER & SCHINDLER & BRAACH. – « From Design to Production, three Complex Structures Materialised in Wood ». – « Generative Art 2005 ». - Proceedings of the 6th International Conference, Milan : ed. Celestino Soddu, 2005.

<sup>ii</sup> Tectonique: « Un rapport direct entre forme et force trouve son expression » SEKLER, E. – « Structure, construction, tectonics », dans Structure Arts and Science (sous la direction de Gyorky Kepes), New York, George Braziller, 1965.

<sup>iii</sup> Dr. Helmut Pottmann est mathematician professor de «Geometric Modeling and Industrial Geometry» à la Vienna University of Technology. Il est aussi promoteur du symposium «Advances in Architectural Geometry» et a écrit des nombreuses livres et travaux sur le sujet. (<http://www.dmg.tuwien.ac.at/pottmann/>)

<sup>iv</sup> CFD: Conception Fabrication Digital

<sup>v</sup> Le fait que le plan du repère soit le  $u-n$  signifie que la direction d'extrusion sera  $+v$ , qui dans un repère global représente  $+x$ . Ce fait est fondamental pour la compression et la relation entre des modèles géométriques et de calcul, car dans la logique du calcul, l'axe d'extrusion des éléments individuels est toujours l'axe  $x$ .

<sup>vi</sup> L'« Evolutionary structurel optimization » (ESO) est une méthode d'optimisation topologique structurel créée initialement par Y.M. Xie and G.P. Steven dans 1992. Il permet l'optimisation des structures en cherchant des « équilibres limites » par exemple, par l'élimination des composants qui ne sont pas nécessaires ou par la réduction maximale de la matière.

## 9. Table des illustrations

Figure 1	Modèle original reçu par AG avant de l'optimisation géométrique (AD n° 208)	12
Figure 2	Modèle optimisé par AG (AD n° 208)	13
Figure 3	Modèle final proposé par AG (AD n° 208)	13
Figure 4	Organisation de la forme reçu par DTP (AD n° 208)	14
Figure 5	Optimisation et simplification de la structure par DTP (AD n° 208)	14
Figure 6	Processus de fabrication et mise en oeuvre (AD n° 208)	14
Figure 7	Schéma d'échange des donnés. (OG, CAAD 2011 )	15
Figure 8	Schéma du fonctionnement du modèle proposé par Michael Castex (MAP CRAI)	16
Figure 9	Résumé lexical du modèle élaboré par Michael Castex (MAP CRAI)	17
Figure 10	Description lexicale des composants (MAP CRAI)	17
Figure 11	Schéma des paramètres géométriques (DD)	21
Figure 12	Schéma des appuis(DD)	21



Figure 13	Schéma des efforts dans le processus de calcul (DD)	24
Figure 14	Schéma de description des ddls dans un élément (DD)	25
Figure 15	Relations des paramètres intervenants dans le calcul structurel(DD)	26
Figure 16	Formule général du calcul par éléments finis et sa représentation physique (DD)	29
Figure 17	Schéma d'insertion dans le processus CDF(DD)	32
Figure 18	Capture écran de l'environnement Rhino-GH(DD)	33
Figure 19	Capture écran de l'environnement Karamba-GH(DD)	34
Figure 20	Capture écran de l'environnement RDM6 (DD)	35
Figure 21	Schéma du modèle et processus proposés (DD)	36
Figure 22	Schéma des surfaces d'appui et d'enveloppe (DD)	37
Figure 23	Schéma de la génération de la grille des arcs (DD)	38
Figure 24	Schéma de la formation des fuseaux (DD)	39
Figure 25	Schéma du processus de décalage des fuseaux (DD)	40
Figure 26	Schéma d'un assemblage (DD)	41
Figure 27	Algorithme générateur du processus de calcul structurel approximatif (DD)	42
Figure 28	Déformation de la structure après calcul structurel approximatif (DD)	44
Figure 29	gestion des données dans GH et dans le fichier RDM6(DD)	46
Figure 30	Résultat après calcul structurel. Déformation, effort normal et moment fléchissant (DD)	47

Figure 31	Hall d'être Nine Bridges Country club house ( <a href="http://www.shigerubanarchitects.com">www.shigerubanarchitects.com</a> )	49
Figure 32	Coupe du project Nine Bridges Country club house ( <a href="http://www.shigerubanarchitects.com">www.shigerubanarchitects.com</a> )	49
Figure 33	Surface d'enveloppe et surface d'appui modélisées par Rhinoceros (DD)	50
Figure 34	Grille des arcs projetée par le modèle (DD)	51
Figure 35	Génération des fuseaux par le modèle (DD)	52
Figure 36	Génération des assemblages et des appuis par le modèle (DD)	52
Figure 37	Déformation de la structure après calcul structurel approximatif (DD)	54
Figure 38	Modèle importé vers RDM6 pour calcul structurel(DD)	55
Figure 39	Déformation de la structure après calcul structurel dans RDM6 (DD)	55
Figure 40	Résultat après calcul structurel sur RDM6. Effort normal et moment fléchissant (DD)	56
Figure 41	Baisse de l'effort normal grâce a l'inclusion de une bande de borde (DD)	56

# 10. Références

## 10.1 Livres

---

CHUPIN,JP. – « Le projet Tectonique » (sous la direction de Chupin JP), Paris, Archigraphy, 2005

POTTMAN, H.; ASPERL, A. – « Architectural Geometry», Waltham, Bentley Institute Press, 2007.

LECLERCQ, P. – « CAAD futures 2011», University of Liège, Belgium, 2010.

PORTEOUS, J. – « STRUCTURAL TIMBER DESIGN to Eurocode 5», Blackwell, , Oxford, 2007.

MOREAU, M. – « Eurocodes - basis of structural design - national annex to NF EN 1990», AFNOR, 2004.

## 10.2 Documents

---

OXMAN, N. - « The New Structuralism », Architectural Design AD, Office Editorial, volo 206, 08-2010.

DUCHANOIS, G. – « Cours de structures ENSA Nancy », ENSA Nancy, 2010.

BIGNON, JC. – « Etre ensable », ENSA Nancy, 2010.

BIGNON, JC. – « Mis en forme », ENSA Nancy, 2010.

ENSAS Strasbourg – « Note de cour sur les éléments finis », ENSAS Strasbourg, 2003.

DEBARD, Y. –« RDM – Ossatures Manuel d'utilisation », Institut Universitaire de Technologie, Le Mans, 2001.

PREISINGER, C. –« Karamba, User Manual », University of Applied Arts, Vienna, 2011.

ISSA, R. – « The Grasshopper Primer, Second Edition », Robert McNeel, 2009.

### 10.3 Articles

---

PICON, A. – « L'architecture et le virtuel : vers une nouvelle matérialité », dans Le projet Tectonique (sous la direction de Chupin JP), Paris, Archigraphy, 2005

SEKLER, E. – « Structure, construction, tectonics », dans Structure Arts and Science (sous la direction de Gyorky Kepes), New York, George Braziller, 1965

SHABADKHOV, S.; BIGNON, JC. – «Cooperative Design to Construction», MAP-CRAI, 2010

SHABADKHOV, S.; BIGNON, JC. – Architectural morphogenesis», MAP-CRAI, 2009

CASTEX, M. «Elaboration d'un outil d'aide à la transformation de modèles géométriques en géométries constructives », MAP-CRAI, 2010

GEORGIU, O. – « Interactive Structurel Analysis», University of Bath, CAAD 2011

BILORIA,N. - «Design Informatics», Technical University of Delf , ACADIA 2005

AGBODAN, D. – « A Data Model Architecture for Parametrics », LISI-ENSMA, 1999

CIBLAC, T. – « Conception paramétrique en fonction d'éléments standard», INSA Lyon, ACADIA 2010

BERNABEU, A. – «Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea», Escuela Politecnica de Madrid, 2007

POTTMAN, H. - «Geometry of Multi-layer Freeform Structures for Architecture», ACM New York, 2007

GUZIK, A. - «Digital fabrication inspired design”, University College London, 2009

OXMAN, R. « Theory and design in the first digital age », Faculty of Architecture and Town Planning Technion, Haifa, 2005

#### 10.4 Internet

---

##### **10.4.1 Documents**

<http://www.nancy.archi.fr/etudiants>

<http://cumincad.scix.net/cgbi-bin/works/Home>

##### **10.4.2 Etat de l’art et projet analysés**

<http://evolute.at/>

<http://www.architecturalgeometry.at/>

<http://www.architecturalgeometry.at/aag10/>

<http://www.designtoproduction.ch>

[http://www.shigerubanarchitects.com/SBA\\_WORKS/SBA\\_OTHERS/SBA\\_OTHERS\\_29/SBA\\_others\\_29.html](http://www.shigerubanarchitects.com/SBA_WORKS/SBA_OTHERS/SBA_OTHERS_29/SBA_others_29.html)

### **10.4.3 Logiciels**

<http://iut.univ-lemans.fr/ydlogi>

<http://iut.univ-lemans.fr/gmp/cours/rdmyd>

<http://www.rhino3d.com/>

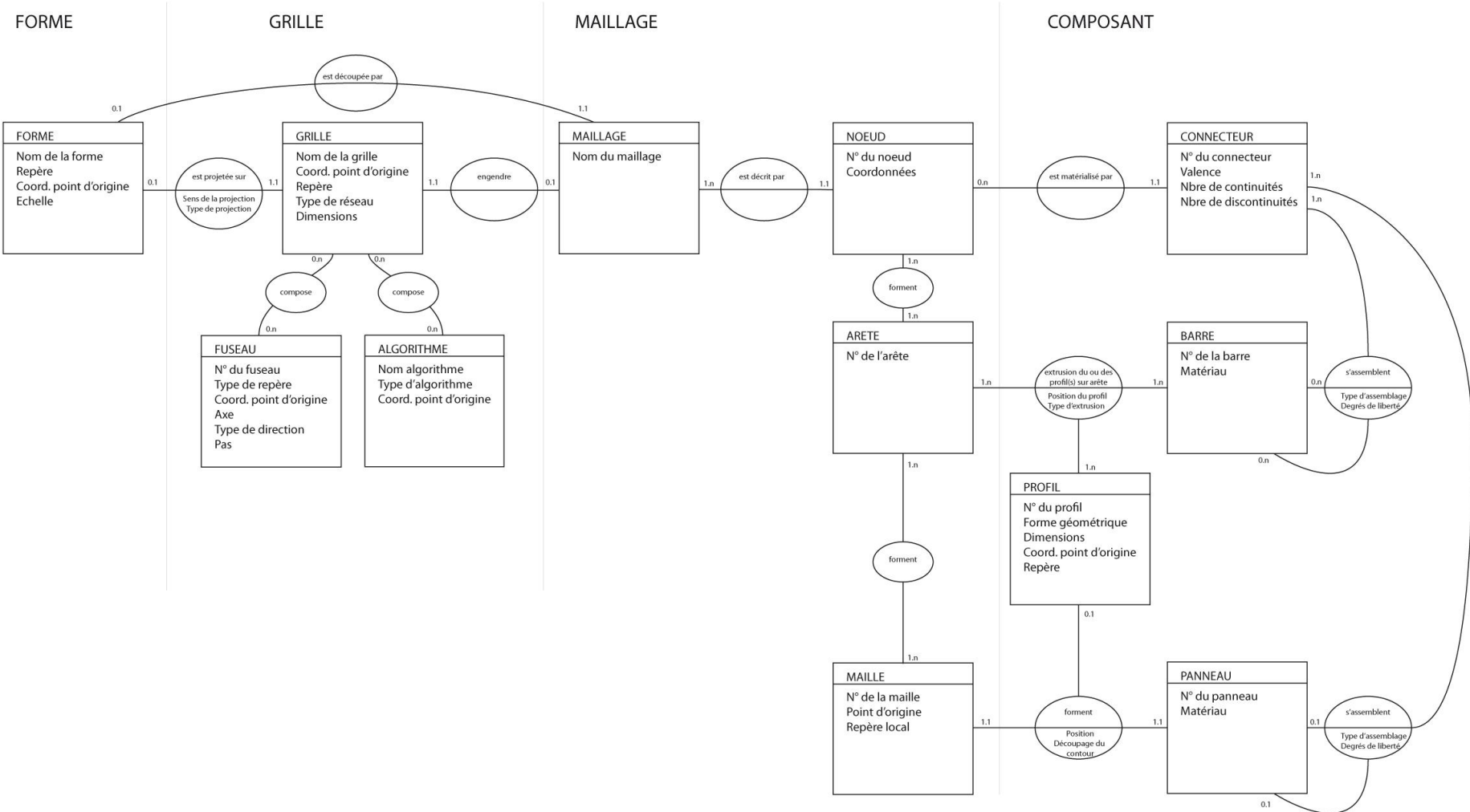
<http://www.grashopper3d.com/>

<http://www.grashopper.rhino3d.com.>

<http://www.grashopper3d.com/profile/karamba>




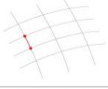



# 11. Annexes







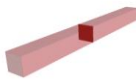

11.1 Modèle proposé au sein du CRAI. Michael Castex





## 11.2 Lexique du modèle. Michael Castex

FORME	Shape	Surface créée dans un modèleur et importée dans le modèle.	
GRILLE	Grid	Ensemble de lignes et de points situés sur une surface de projection.	
Point	Point	Situé sur une ligne, il définit une extrémité d'un segment. Il est engendré par l'intersection de lignes.	
Segment	Segment	Portion de la ligne délimitée par deux points	
Réseau	Net	Ensemble des segments de la grille.	
Fuseau	Spindle	Un fuseau est un réseau particulier, avec une régularité. C'est l'ensemble des lignes associées à un axe.	
Axe	Axe	Direction d'un fuseau définit par un vecteur.	
Pas	Pitch	Intervalle entre les lignes du fuseau.	

MAILLAGE	Meshing	Ensemble de mailles. Il s'agit du réseau (l'ensemble de segments et de points) qui appartient à la forme.	
Noeud	Node	Intersection de segments. Sommet de la maille. Un point peut être un noeud.	
Arête	Edge	Côté d'une maille, un segment peut être une arête.	
Maille	Mesh	Surface qui résulte du découpage de la forme par les lignes. Ses bords sont des arêtes et ses sommets des noeuds.	
COMPOSANT	Component	Chacun des éléments matériels de l'objet. Il s'agit soit d'une barre, soit d'un panneau, soit d'un connecteur.	
Connexion	Connection	Matérialisation du noeud ou de l'arête par des assemblages. Un connecteur peut être employé.	
Barre	Beam	Type de composant. Longue et étroite pièce de bois générée par l'extrusion d'un profil le long d'un segment.	
Panneau	Panel	Type de composant. Chacune des petites surfaces planes d'un objet séparées les unes des autres par des arêtes vives correspondant aux côtés de la maille.	
Profil	Section	Coupe orthogonale à l'axe de la barre.	
Assemblage	Joint	Liaison entre deux composants. Il recrée une continuité entre ces éléments avec des degrés de liberté.	
Valence	?	Nombre de segments arrivant à un noeud.	
OBJET	Object	Ensemble de tous les composants issus du modèle.	

### 11.3 Types du bois choisis. EUROCODE

## Propriétés des matériaux

### Comportement des matériaux bois

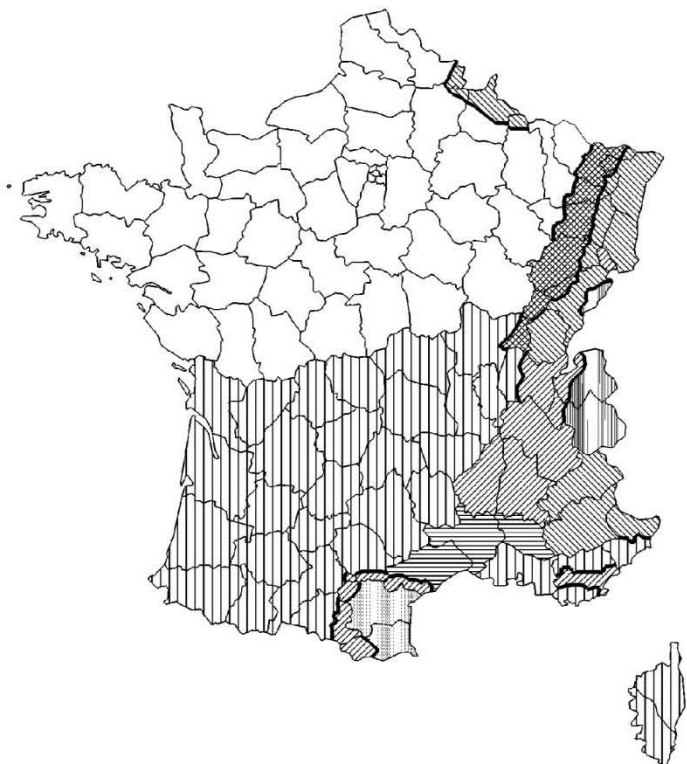
Type	Résistance compression (Mpa)	Résistance compression transversale (Mpa)	Flexion (Mpa)	Masse volumique (t/m3)	Module de Young (Mpa)	Rapport e/p
Bois massif	18-23	4.8-5.7	18-30	0.4-0.5	9000-12000	18000
Lamellé collé	21-26	4.8-5.7	22-30	0.4-0.6	10000-12000	16000-25000
LVL	25-35			0.50	10000-14000	20000-27000

### 11.4 Charges d'exploitation choisis. EUROCODE

### *Charges imposées aux toitures*

Catégorie de la surface		qK (KN/m2)	QK (KN)
Catégorie H	inaccessibles		
Catégorie I	Usages A-D		
Catégorie K	Casses particuliers		
Toitures a pente < 15%	étanchéité	0,8	1,5
Autres toitures		0,0	1,5

### 11.5 Charges cinématiques. Poids de la neige en France. EUROCODE



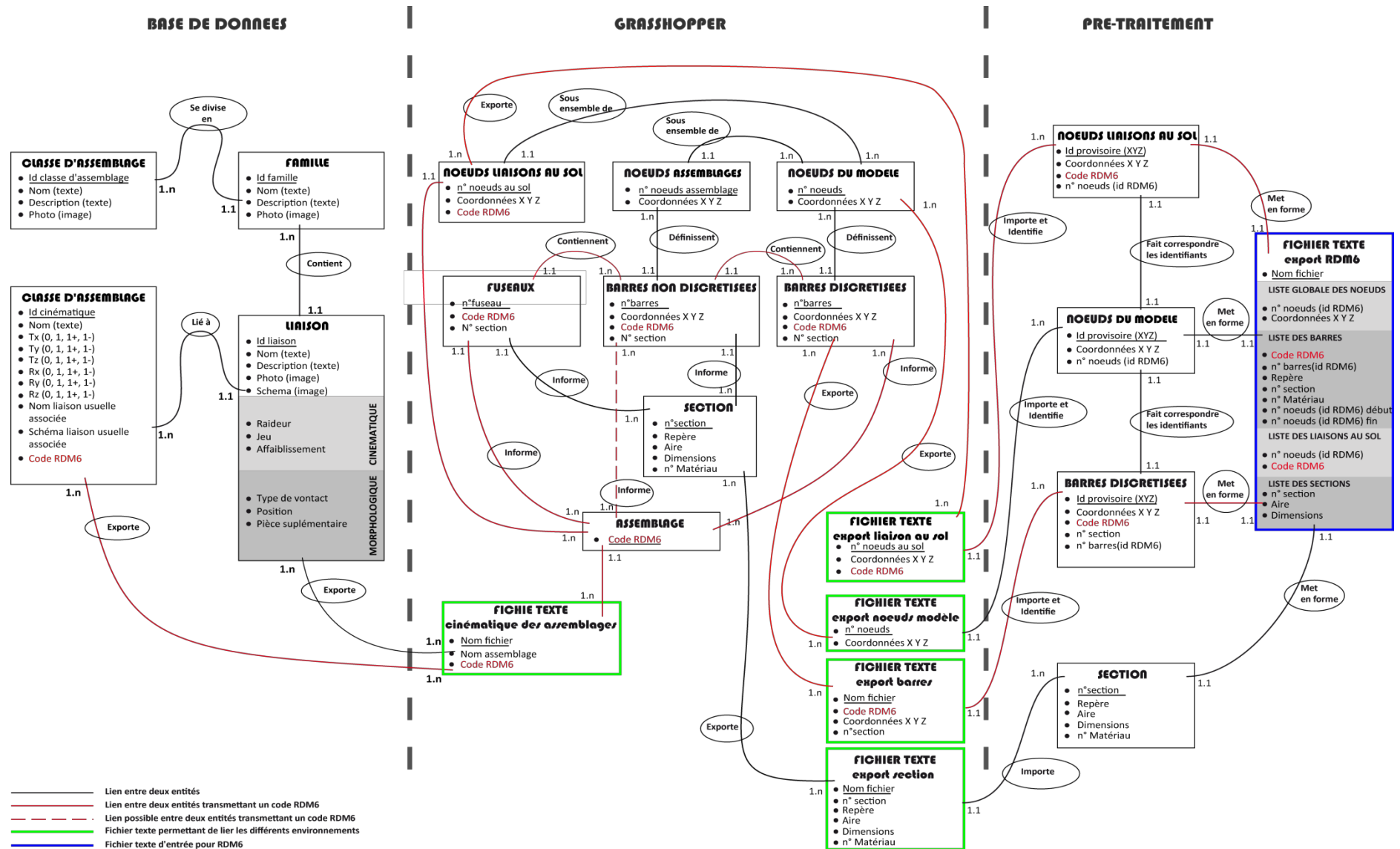
Régions :	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D	E
Valeur caractéristique ( $S_k$ ) de la charge de neige sur le sol à une altitude inférieure à 200 m :	0,45	0,45	0,55	0,55	0,65	0,65	0,90	1,40
Valeur de calcul ( $S_{Ad}$ ) de la charge exceptionnelle de neige sur le sol :	—	1,00	1,00	1,35	—	1,35	1,80	—
Loi de variation de la charge caractéristique pour une altitude supérieure à 200 :	$\Delta s_1$						$\Delta s_2$	

(charges en  $\text{KN/m}^2$ )

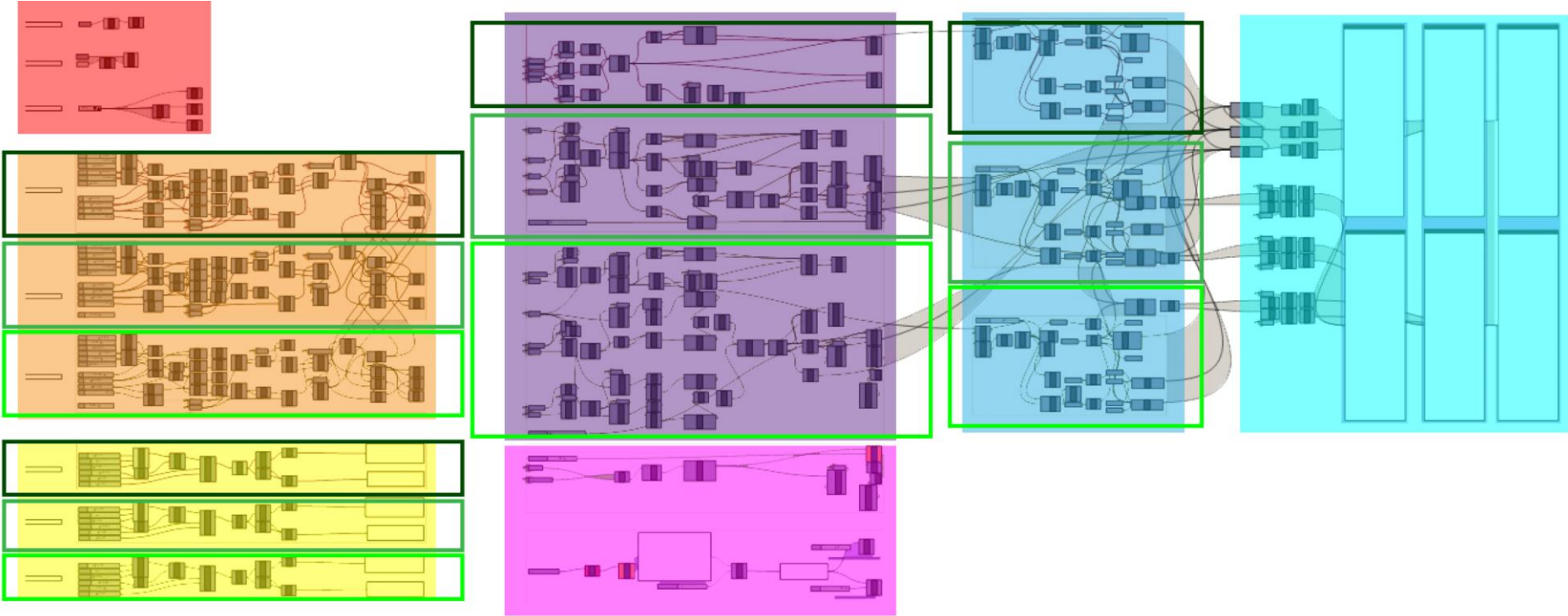
Altitude A	$\Delta s_1$	$\Delta s_2$
de 200 à 500 m	$A/1000 - 0,20$	$1,5 A/1000 - 0,30$
de 500 à 1000 m	$1,5 A/1000 - 0,45$	$3,5 A/1000 - 1,30$
de 1000 à 2000 m	$3,5 A/1000 - 2,45$	$7 A/1000 - 4,80$

Tableau A.1 - Classement des départements au regard des charges de neige

## 11.6 Schéma conceptuel de fonctionnement du modèle. Nicolas Jacob

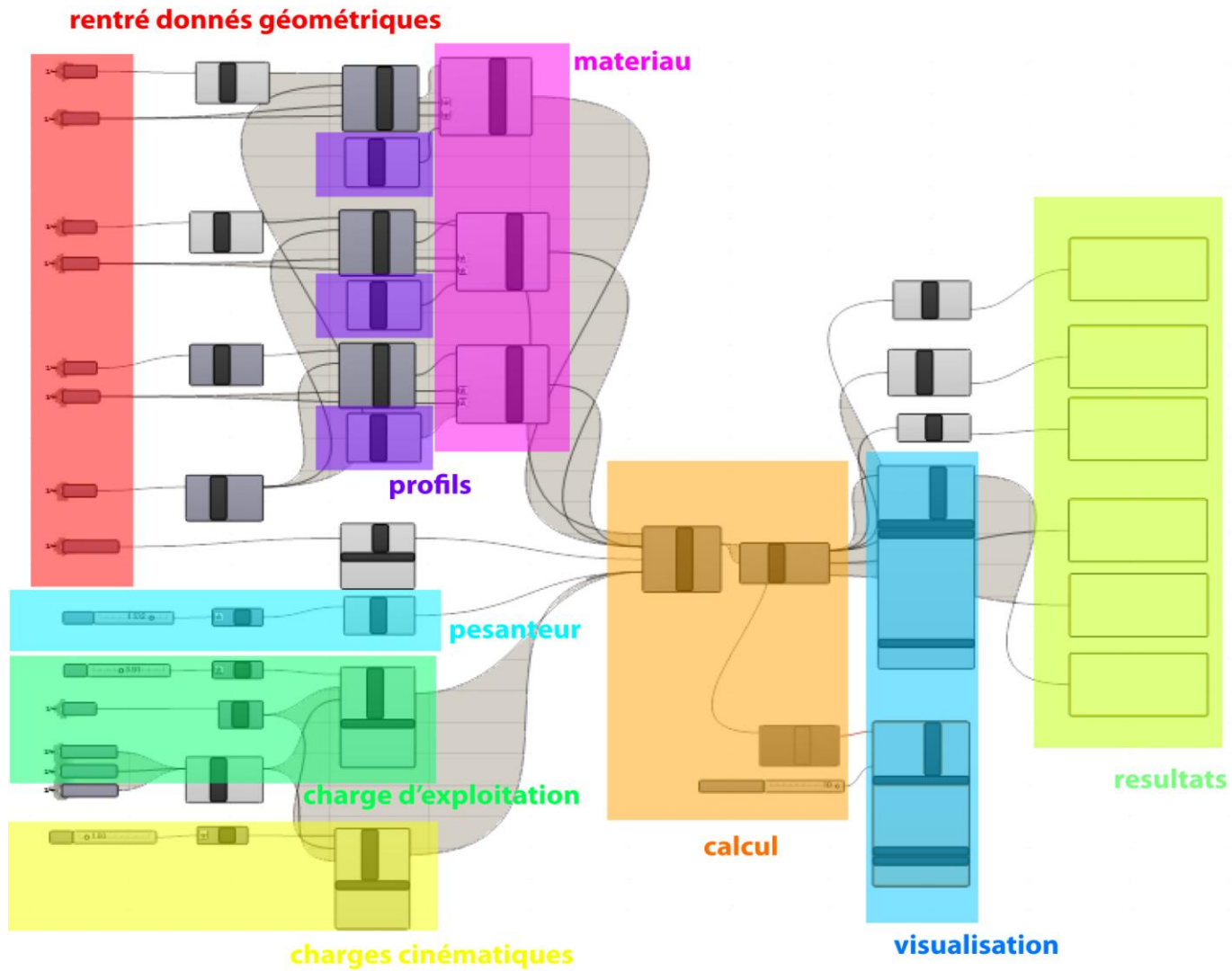


11.7 Résumé de l'algorithme générateur du modèle géométrique GH. David Davalos



rentre des surfaces  
 génération de la grille  
 generation des profils  
 génération des fuseaux  
 noeuds et appuis  
 discretisation des éléments  
 gestion des information  
fuseau parent  
fuseau 2  
fuseau 3

11.8 Résumé de l'algorithme générateur du modèle du calcul approximatif GH Karamba. David Davalos





11.9 Exemple de fichier de réentrée sur RDM6 (.por). David Davalos

```

RDM - Ossatures
Calcul des Structures par la Méthode des Éléments Finis
$debut du fichier
$SI unites
$nom du fichier resultat1.por
$date
$heure
$ossature spatiale

```

---

**Généralité sur le fichier**

```

$noeuds ( 3222 )
1 8.68875200000E+00 1.28225220000E+01 9.28751100000E+00
2 8.62750300000E+00 1.27871600000E+01 9.28751100000E+00

```

ID noeud	Coordonnées X	Coordonnées Y	Coordonnées Z
3221	1.89000000000E+01	8.18544000000E-01	9.28751100000E+00
3222	2.01000000000E+01	8.11769000000E-01	9.28751100000E+00

---

**Liste des noeuds du modèle**

```

$poutres ( 3457 )
1 RIRI 1 2 -4.99998657061E-01 8.66026179129E-01 0.00000000000E+00 11 11
2 RIRI 2 3 -4.99994174917E-01 8.66028766871E-01 0.00000000000E+00 11 11
3 RIRI 3 4 -4.99998657061E-01 8.66026179129E-01 0.00000000000E+00 11 11

```

ID noeud	cinématique RDM6	Code	Noeud Début et fin	Coordonnées X	Coordonnées Y	Coordonnées Z	Code section	Code matériau
3457	RIRI		2849 3161	-1.00000000000E+0	0.00000000000E+0	0.00000000000E+00	11	11

---

**Liste des barres du modèle**

```

$sections
11
TYPE PARAMETREE
NOM *Rectangle plein
DESIGNATION *LY = 99.0 LZ = 247.5 mm
.....
IWW 5.35396544876E-08
///

```

---

**Liste des sections du modèle**

```

0
$materiaux
11
NOM BOIS
MOD 1.200E+10
.....
LIM 2.500E+08
///

```

---

**Liste matériaux du modèle**

```

0
$liaisons ( 16 )
encastrement 3165
encastrement 3212

```

Code cinématique RDM6	ID noeud
	3165
	3212

---

**Liste des liaison au sol**

11.10 Résultat obtenus pour le calcul structurel RDM6. David Davalos

```

+-----+
| Déplacements nodaux [ m, rad ] |
+-----+
Noeud  dx   dy   dz   rotx  roty  rotz
-----
  1  2.141E-01 -2.010E-01 -1.134E-01  2.740E-02  9.431E-02 -5.082E-02
  2  4.436E-01 -1.752E-01 -2.620E-02  1.003E-02  3.895E-04 -5.060E-02
-----
 53  3.160E-03  4.245E-02 -5.443E-01  2.074E-02  6.996E-02 -1.473E-03

Déplacement maximal sur x = 1.4536E+00 m [ Noeud 18 ]
Déplacement maximal sur y = 1.3341E+00 m [ Noeud 49 ]
Déplacement maximal sur z = 7.3375E+00 m [ Noeud 18 ]
Déplacement maximal = 7.5151E+00 m [ Noeud 18 ]

+-----+
| Action(s) de liaison [ N N.m ] |
+-----+
Noeud 14 - Rx =  60984.4 Ry =  31840.9 Rz =  356187.3
          Mx = 392656.3 My =  74092.0 Mz = -292333.8
-----
Noeud 50 - Rx =   -0.0 Ry =   0.0 Rz =  17114.9
          Mx =  3761.3 My = 11974.1 Mz =   0.0

Somme des actions de liaison :

Rx =  0.0 N
Ry = -0.0 N
Rz = 1978356.9 N

Somme des forces appliquées à la structure :

Fx = -7.75835689026258E-0007 N
Fy = -6.55853712697269E-0006 N
Fz =  1.55546877067536E-0006 N

+-----+
| Efforts intérieurs [ N N.m ] |
+-----+
N = Effort normal      ( TY , TZ ) = Effort tranchant
Mt = Moment de torsion ( MFY , MFZ ) = Moment fléchissant

ELE ori  No  TYo  TZo  Mto  MfYo  MfZo  dL(m)
  ext  Ne  TYe  TZe  Mte  MfYe  MfZe
        TYmax TZmax      MfYmax MfZmax

  1  1 -99467.2 -118376.8 -270138.3  -9.2 1230673.0 -466783.0 -4.873E-05
  2 -99443.2 -83071.1 -270138.3  -9.2  -74.6  -7885.6
        118376.8 270138.3      1230673.0 466783.0
-----
 58 52 17029.0 -25013.7  -0.0  0.0  0.0 -48838.0  3.575E-06
  53  0.0  0.0  -0.0  0.0  -0.0  0.0
        25013.7  0.0      0.0 48838.0

```



$$\{F\} = [k] \cdot \{u\}$$

