

Mémoire de Travail de Fin d'Etudes
Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
Septembre 2011

Auteur :
Vincent Monier
Promotion 56
VA Bâtiment

Vers des structures non-standards en bois fondées sur l'utilisation de composants irréguliers

Elaboration d'un outil numérique de conception architecturale

Sous la direction de :
Jean-Claude Bignon, architecte
Gilles Duchanois, ingénieur structure

Président du Jury :
Laurent Arnaud, ingénieur

Expert technique :
Thierry Ciblac, ingénieur

Laboratoire d'accueil :
MAP/CRAI
Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie
Ecole d'Architecture de Nancy



Remerciements

J'adresse ici mes remerciements à Jean-Claude Bignon et Gilles Duchanois, tous deux enseignants-chercheurs du CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie) pour l'accueil qu'ils m'ont réservé au sein du laboratoire et pour le suivi critique des travaux que j'ai mené. Je les remercie également pour leur disponibilité et pour toutes les connaissances qu'ils m'ont apportées durant ces trois mois.

Par ailleurs, j'adresse mes remerciements à Monsieur Jean-Pierre Perrin, Directeur du CRAI, pour mon intégration en tant que stagiaire au sein de son laboratoire.

Remerciements également à Christian Stanton, chercheur au Massachusetts Institute of Technology, pour les explications détaillées qu'il m'a fournies.

Remerciements enfin à tous les membres du laboratoire que j'ai eu le plaisir de côtoyer durant la réalisation de ce projet ainsi qu'à l'équipe des Défis du Bois pour m'avoir permis de participer à cette manifestation exceptionnelle et riche d'enseignements.

AUTEUR	MONIER Vincent		
TITRE DU TFE	Vers des structures non-standards en bois fondées sur l'utilisation de composants irréguliers, <i>Elaboration d'un outil numérique de conception architecturale</i>		
MAITRES DE TFE	MAP/CRAI Nancy Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie	BIGNON Jean-Claude DUCHANOIS Gilles	
COLLATION	Nombre de pages du rapport 46	Nbre d'annexes 0	Nbre de réf. biblio. 9
MOTS CLES	<p>Bois : domaine de la recherche, matériau employé.</p> <p>Numérique : il s'agit ici d'élaborer un outil numérique de conception.</p> <p>Non-standard : la ressource employée oriente les recherches vers le domaine de l'architecture non-standard, que ce soit sur le plan morphologique ou technologique (structure, liaison).</p> <p>Environnement : la démarche d'optimisation de la ressource bois ainsi que l'usage de ressources non valorisées (ressources organiques forestières, bois de démontage, éléments non commercialisables de l'industrie du bois) place ce projet dans une dynamique environnementale.</p>		
ABSTRACT	<p>This project deals with architecture and engineering involved in the process of architectural design. Based on irregular components, it aims for developing an innovative approach in the conception of non-standard structures. Contemporary architecture, and its non-classical structures require the design of customized pieces. This process, which consumes huge amounts of energy and resources, does not take always into account the intrinsic material properties. Environmentally concerned, this project develops a way to optimize in architectural structures the use of wood elements that are not industrially transformed. It can also be applied to recycled pieces of carpentry.</p> <p>After modeling the available resources, and defining an architectural intention, the placement of those resource is optimized to generate the structure. The framework chosen is the modeling tool Rhinoceros with its plug-in Grasshopper which allows us to create algorithms capable of generating non-standard geometric structure from existing resource. The idea is to incorporate structural conception from the very beginning of architectural creative process. Two approaches are tested to create the algorithm generating the structure : first, a natural morphogenetic way of building (eg a nest), and second, the assimilation to a well known constructive technique (eg a grid of arches).</p>		

Sommaire

1. Cadre des recherches	6
1.1. Problématique.....	6
1.1.1. Contexte et objectifs	6
1.1.2. La gestion de la ressource	7
1.1.3. La mise en œuvre de la ressource	7
1.2. Le choix de l'espace de travail	8
1.2.1. Une visée interactive	8
1.2.2. Une interface de travail non restrictive	9
1.3. Etat de l'art	10
1.3.1. Modélisation du végétal.....	10
1.3.2. Architecture, tectonique et ingénierie	11
1.3.3. Non-standard et éléments irréguliers	12
1.3.4. Pratiques similaires dans les domaines de l'art et de l'artisanat	15
2. Organisation caractérisée de la ressource	18
2.1. Caractérisation de la ressource	18
2.2. Modélisation d'un élément de la ressource	18
2.2.1. La portion élémentaire	18
2.2.2. La méthode du « chemin extrudé »	19
2.3. Programmation du modèle sous Rhinoceros/Grasshopper	21
2.3.1. Structure générale de l'algorithme	22
2.3.2. La modélisation d'un tronçon élémentaire.....	22
2.3.3. Les données transmises par le modèle	23
2.3.4. Exemple	24
2.4. Conclusion.....	25
3. Mise en œuvre de la ressource.....	26
3.1. Objectifs visés	26
3.1.1. Les possibilités de mise en œuvre.....	26
3.1.2. La méthode retenue	27
3.1.3. La prise en comptes des contraintes structurelles.....	30
3.2. Démarche de mise en œuvre de la ressource.....	31
3.2.1. Démarche générale adoptée.....	31
3.2.2. Le positionnement d'un élément de ressource	32
3.2.3. L'évaluation de la pertinence d'une position par rapport à différents critères.....	33
3.3. Programmation sous Rhinoceros/Grasshopper.....	35
3.3.1. Structure générale de l'algorithme de génération.....	35
3.3.2. Processus de génération des positions	37
3.3.3. Processus de sélection d'une position	38
3.3.4. Exemple	41
3.4. Conclusion.....	42
4. Conclusion.....	43
4.1. Bilan	43
4.2. Perspectives	44
4.2.1. Fabrication.....	44
4.2.2. Calcul aux éléments finis des performances structurales	44
4.2.3. L'adaptation d'une peau	44
Bibliographie.....	46

Table des illustrations

Figure 1 : graphique de principe.....	8
Figure 2 : exemple de la topologie d'un système ramifié, <i>source : P. Lewis</i>	11
Figure 3 : Forme réalisée avec Maya puis construite en bois , <i>source : CRAI</i>	12
Figure 4 : canopée de Séville, arch. Jürgen Mayer, <i>source : D. Monier</i>	13
Figure 5 : Vue depuis l'intérieur de la résille, <i>source : D. Monier</i>	13
Figure 6 : Branche modélisée et répartition de branches sur une surface, <i>source : Ch. Stanton</i>	14
Figure 7 : Exemple de courbes polygonales déterminées par un algorithme, <i>source : T. Ciblac</i>	15
Figure 8 : Sculptures de Dougherty, <i>source : JC Bignon</i>	16
Figure 9 : œuvres artistiques réalisées avec des branchages et bois divers, <i>source : JC Bignon</i>	16
Figure 10 : Maison de Simon Dale, Wales, <i>source : www.simondale.net</i>	17
Figure 11 : Mosquée de Danakil, Ethiopie.....	17
Figure 12 : principe de la portion élémentaire constitutive des éléments de la ressource.....	19
Figure 13 : Photographie et schémas du modèle d'une branche à 5 portions élémentaires et 2 ramifications.....	20
Figure 14 : schéma du paramétrage relatif de trois segments de portions élémentaires.....	20
Figure 15 : schéma du paramétrage angulaire de la flèche d'une portion élémentaire	21
Figure 16 : l'algorithme de modélisation sous GH et le visuel de 3 éléments de ressource superposés sous Rhino	22
Figure 17 : l'algorithme de modélisation d'un tronçon sous GH et le visuel d'un tronçon sous Rhino	23
Figure 18 : Fichier texte des paramètres permettant de modéliser l'élément de ressource.....	24
Figure 19 : une branche ressource et sa modélisation associée dans l'environnement Rhinoceros.....	24
Figure 20 : parallèle entre discrétisation selon un élément standard ou selon des éléments irréguliers	26
Figure 21 : mise en œuvre de la ressource selon des contraintes géométriques imposées par le concepteur	27
Figure 22 : Nid de pie.....	28
Figure 23 : Approche d'une forme architecturale par la technique du nid de pie.....	28
Figure 24 : Approche d'une forme architecturale avec l'algorithme de génération de grille d'arcs.....	29
Figure 25 : répartition de la ressource selon deux types d'arcs	29
Figure 26 : système de liaison adaptable à des éléments de ressource, <i>source : Orangerie de Chiddington</i>	30
Figure 27 : schémas de principe de l'algorithme de génération de structure.....	31
Figure 28 : Schéma de principe du critère de densité.....	34
Figure 29 : schéma de principe sur l'évaluation du critère de proximité avec la surface de référence..	35
Figure 30 : schéma d'une organisation possible de l'algorithme	36
Figure 31 : placement d'un élément de ressource tel que les axes fixes et ancrés soient confondus.....	38
Figure 32 : Schéma de deux points projetés sur la surface de référence	39
Figure 33 : schéma des points captés par chaque portion de l'élément de ressource.....	40
Figure 34 : positionnement du premier élément de ressource sur la surface de référence	41
Figure 35 : positionnement des éléments 2, 3, 4 et 5 de la ressource.....	42
Figure 36 : Orangerie de Chiddington, résille bidirectionnelle recouverte de facettes en verre,	45
Figure 37 : dessins de Heinz Isler	45

1. Cadre des recherches

Le projet de recherche traité dans ce rapport est réalisé dans le cadre de mon Travail de Fin d'Etudes d'ingénieur à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Ce travail s'est déroulé au sein du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie, laboratoire rattaché à l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, sous la codirection de Jean-Claude Bignon, architecte et Gilles Duchanois, ingénieur structure, tous deux enseignants-chercheurs. Le projet s'insère dans la thématique sur la morphogénèse des volumétries non-standards que développe actuellement Shaghayegh Shadkhou dans sa thèse au sein du laboratoire.

1.1. Problématique

1.1.1. Contexte et objectifs

Ce projet se place dans le cadre d'une ingénierie constructive développée dans le respect de l'environnement avec l'idée de réutilisation d'un matériau de récupération ou d'utilisation d'un matériau ayant subi le moins de transformations possibles. Ce matériau est dans notre cas le bois, matériau présentant des avantages sur le plan environnemental (stockage d'une tonne de CO₂ par m³ de bois mis en œuvre) et des performances qui lui sont particulières sur le plan technique.

L'objet de l'étude est la mise en œuvre d'une ressource (stock d'éléments en bois donné) afin de générer de manière optimale une structure. Cette structure devra tirer profit des particularités de la ressource, approche opposée au mode de conception classique qui consiste à standardiser au maximum la ressource pour l'utiliser par la suite de manière indifférenciée.

L'approche consiste à penser dans le même temps la conception formelle de l'objet architectural et sa réalité constructive en fonction de la ressource disponible. La ressource constitue une contrainte sur le plan conceptuel mais peut s'avérer source de création dans la mesure où elle est composée d'éléments irréguliers présentant différentes caractéristiques.

Cette approche du problème de la conception architecturale comporte une dimension environnementale majeure. La volonté d'employer des éléments non-standards déjà existants, fournis par la nature ou récupérés dans le démontage d'un ouvrage, permet d'économiser à la fois matière et énergie. L'enjeu est de parvenir à mettre en adéquation des volontés architecturales avec des éléments caractérisés de ressource imposés. La pratique actuelle du non-standard est plutôt orientée vers la production d'éléments caractérisés, le plus souvent découpés dans des éléments standards, ce qui est générateur de perte de matière.

Une théorie développée actuellement par Rivka Oxman vise à reconsidérer l'architecture avec un processus de conception ancré dans le matériau source. Il s'agit du *New Structuralism* qui sera de nouveau évoqué par la suite dans l'état de l'art. L'idée consiste à intégrer la définition et la fabrication du matériau dès les prémices du projet architectural afin de renforcer la relation entre la géométrie, la structure et l'architecture. Cette réflexion aboutit à la mise en place de nouvelles techniques et technologies de construction. Le projet présenté dans ce rapport s'intègre dans cette dynamique en prenant le parti d'intégrer le matériau à l'origine du processus créatif mais avec toutefois une contrainte supplémentaire : utiliser le matériau sous la forme dans laquelle il est disponible. La notion de disponibilité rentre dans une logique environnementale de réutilisation et d'économie de matière et d'énergie de transformation.

1.1.2. La gestion de la ressource

La gestion de la ressource constitue la première phase du travail. Il faut s'approprier la ressource afin de pouvoir la mettre en œuvre par la suite. L'établissement des caractéristiques différenciées des éléments de ressource disponibles permettra de reconstituer numériquement le stock de la ressource. La gestion des informations collectées dans ce stock numérique doit permettre de visualiser ces éléments dans un modèleur 3D. Pour cela il faudra convenir d'un codage de type code barre ou empreinte digitale qui possèdera le « patrimoine génétique » de l'élément : géométrie (partie la plus conséquente à programmer), essence, taux d'humidité, densité, poids (lié à la densité et à la géométrie)... Ce patrimoine sera par la suite utilisé par l'algorithme de génération de structure pour optimiser la disposition et l'utilisation de l'élément.

Le processus de caractérisation de la ressource doit pouvoir permettre par la suite l'exploitation de la ressource. Nous nous limiterons dans notre cas à traiter les caractéristiques géométriques de la ressource, ainsi que celles structurelles qui en découlent. L'essence, le taux d'humidité, la densité... seront pris en compte au travers d'un même coefficient qui mettra en corrélation la géométrie de la ressource et ses performances mécaniques.

1.1.3. La mise en œuvre de la ressource

Cette seconde phase consiste à concevoir un algorithme capable de proposer différentes structures possibles et réalisables avec la ressource disponible. Ces différentes propositions présenteront des formes différentes ainsi que des propriétés mécaniques qui leur seront spécifiques. L'intérêt de l'algorithme sera de mettre en œuvre la ressource à partir d'une intention formelle (matérialiser une nappe, une surface NURBS...), architecturale (développer un franchissement entre deux points, deux droites... avec des contraintes d'espace à préserver) ou technique (supporter une charge). Le dernier point met directement en jeu des notions structurelles d'ingénierie. Le traitement dans l'algorithme de cette partie ne sera donc réalisé qu'à titre d'ébauche, il faudra pour davantage de précisions développer la communication entre l'algorithme et un logiciel de calcul de structure (RDM6 par exemple).

Différentes logiques constructives peuvent être développées par l'algorithme : système de coque, de facettes, de caissons, de résille... C'est le concepteur qui impose à l'algorithme son intention en termes de principe de construction. Il doit toutefois composer avec la ressource dont il dispose. Dans notre cas, nous nous limiterons aux éléments de ressource dont l'élanement permet de considérer la dimension principale grande devant toutes les autres dimensions de l'élément.

L'objectif est de développer un outil d'aide à la conception dans le cas de la mise en œuvre d'une ressource déterminée, la structure générée par l'outil devra pouvoir être modifiée par l'architecte/ingénieur/concepteur de manière interactive. Ceci implique d'offrir la possibilité de modifier partiellement les contraintes initiales ou de rajouter des contraintes *a posteriori* à un modèle généré par l'algorithme. Dans le second cas, l'algorithme produit une(de) nouvelle(s) proposition(s) à partir du premier modèle en intégrant ces nouvelles contraintes. Ce dernier aspect plus complexe sera seulement abordé dans la réflexion globale mais ne sera pas approfondi.

L'idée visée est le développement d'un algorithme d'exploration et d'expression formelle qui puiserait dans une base d'éléments irréguliers. Ce projet concerne la phase conceptuelle de l'esquisse, où les objectifs fonctionnels mêlés aux choix techniques donnent naissance à une forme architecturale. C'est le moment idéal pour allier les performances constructives et l'esthétique formelle qui guideront le projet durant son évolution.

Le schéma suivant illustre l'objectif de ce projet en mettant en relation le concepteur de l'ouvrage avec le processus algorithmique que nous allons développer.

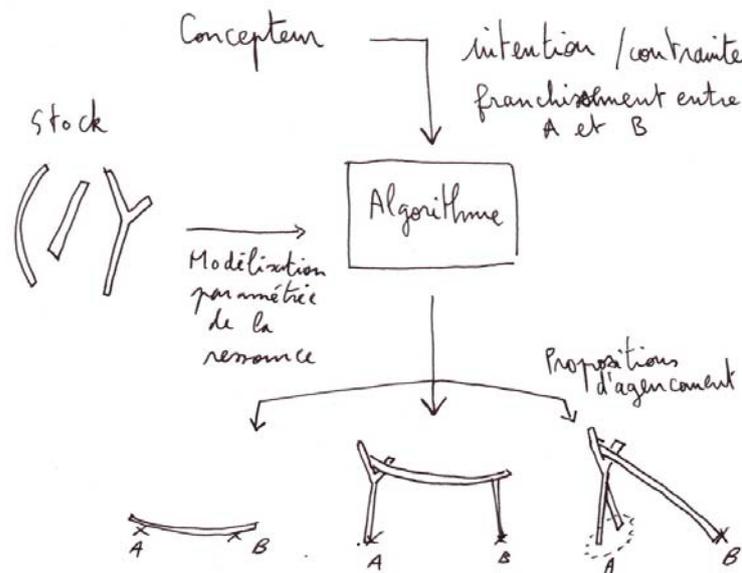


Figure 1 : graphique de principe

1.2. Le choix de l'espace de travail

1.2.1. Une visée interactive

Le travail présenté dans ce rapport traite à la fois de conception architecturale et de programmation informatique. L'objectif poursuivi est de programmer des réflexions élémentaires de construction que le concepteur pourrait avoir. Il s'agit ici de créer des programmes informatiques élémentaires indépendants fonctionnant avec un nombre d'entrées limité pour produire un résultat. La juxtaposition de ces cellules informatiques a lieu par la suite pour créer un processus constructif. L'informatisation d'étapes de réflexion élémentaires équivaut à traduire par une succession d'opérations logiques (i.e. un algorithme) le raisonnement que le concepteur mène pour une tâche bien délimitée. L'intérêt étant de pouvoir répéter ce raisonnement de manière rapide et automatique une multitude de fois.

Il est important de préciser la distinction qui est faite dans ce travail entre la logique de conception dans sa globalité qui appartient entièrement à l'architecte et les réflexions élémentaires identifiables répétées dans un raisonnement. Ces dernières, de part leur aspect répétitif et élémentaire peuvent être programmées.

Les réflexions élémentaires sont de l'ordre des exemples suivants :

- orientation d'un élément de ressource pour approcher au mieux une intention formelle
- juxtaposition de ressources jusqu'à obtenir une résistance structurelle suffisante par rapport à une consigne déterminée par le concepteur
- triangulation d'une structure pour obtenir sa stabilité interne

Ces quelques exemples, donnés de manière non exhaustive, peuvent être comparés aux opérateurs numériques d'une calculatrice. Ces réflexions élémentaires feront l'objet d'algorithmes encapsulés facilement manipulables par l'utilisateur. Ils doivent permettre à l'utilisateur de réaliser des simulations d'ouvrage et de tester des méthodes constructives dans des délais raisonnables. Le concepteur connecte ces algorithmes élémentaires les uns aux autres selon le raisonnement constructif qu'il aura établi.

1.2.2. Une interface de travail non restrictive

Le codage d'un algorithme dans un langage de programmation comme le VB, le C ou le C++ a quelque chose de définitif pour l'architecte qui recevra le programme élaboré par un informaticien. En effet, il serait difficile pour un non-initié d'apporter des modifications au programme. Le programme ainsi élaboré serait limité dans son application à la seule logique initialement codée.

Notre volonté dans ce travail a été de favoriser la liberté de l'architecte dans le processus de création. Pour cela, il dispose d'opérateurs constructifs simples qu'il ordonne selon ses intentions conceptuelles. Les recherches relatées dans ce présent rapport visent à explorer les possibilités de construction non-standard à partir d'éléments irréguliers à grande échelle. En identifiant des procédés intellectuels de base qui se répètent dans un raisonnement de conception, il est alors possible de les traduire sous forme d'algorithmes qui seront la base d'un programme informatique de conception architecturale. Il nous a semblé important de préserver la partie *assemblage des algorithmes de base* dans le champ de l'architecte concepteur de l'édifice.

Le modèleur 3D Rhinoceros couplé au plug-in Grasshopper offre une interface simple à prendre en main et une certaine liberté dans les opérations programmables. Toutefois, il n'est pas possible sans script de réaliser des boucles dans l'interface Grasshopper. Ce problème peut être contourné par la juxtaposition autant de fois que désiré du même algorithme élémentaire encapsulé.

Les possibilités pour l'utilisateur de s'appropriier l'outil sont d'autant plus grandes que les cellules constituées peuvent être utilisées au sein d'un programme quelconque à partir du moment où la logique de base est respectée. Ceci rend l'outil malléable et souple pour mener à bien une réflexion de conception, c'est pourquoi les recherches relatées dans ce rapport seront appliquées au modèleur 3D Rhinoceros couplé au plug-in Grasshopper.

1.3. Etat de l'art

L'état de l'art qui suit porte sur les différents domaines que j'ai abordé pour élaborer ce projet. Dans un premier temps, il s'agit de travaux menés dans le champs de la modélisation du végétal et de l'architecture des arbres. Ces travaux sont en lien avec la partie 2 du rapport portant sur la modélisation de la ressource. Dans un second temps, je relate des études menées sur le rapport entre architecture et ingénierie, forme et structure, où la technique constructive est l'alliée de la réflexion architecturale dès les prémices du projet. Cette partie se rapporte à la démarche globale adoptée pour ce projet mêlant ingénierie et architecture dans l'optique de favoriser la création architecturale. Le troisième volet présente des travaux sur la constructibilité des formes non-standard, l'approche paramétrique et l'introduction d'éléments irréguliers dans le processus de conception architectural. Ces travaux sont en lien direct avec la partie 3 de ce présent rapport portant sur l'élaboration des algorithmes de génération de structure. Enfin, je présente des travaux d'artistes et d'artisans qui créent à partir de bois non usinés ou récupérés.

1.3.1. Modélisation du végétal

Tout d'abord, en matière d'architecture du végétal, il existe la distinction entre :

- la structure géométrique de la plante qui définit la façon dont sont distribués les éléments de végétation dans l'espace (distance entre deux points, angle entre deux directions, angle entre deux plans) et,
- la structure topologique de la plante qui définit les relations de liaison entre les organes de la plante (relation de parenté entre les branches, ramifications d'ordre 1, ramifications d'ordre 2...)

La description d'un système ramifié comme cela va être le cas pour la modélisation des ressources forestières non-usinées nécessite de coupler les aspects géométriques et topologiques de l'architecture des plantes.

Les études réalisées jusqu'ici portent principalement sur la modélisation de l'architecture des plantes dans l'optique de prévoir leur développement dans le temps et peu sur le moyen de recueillir et coder la morphologie de la plante une fois qu'elle s'est développée.

Ainsi, il existe différents programmes capables de simuler la croissance et le développement d'une plante en fonction des conditions environnementales auxquelles elle est exposée. Aristid Lindenmayer introduit en 1968 une méthode pour simuler le développement des organismes multicellulaires qui sera par la suite nommée *L-system*. Par exemple, le BPMS (*Botanical Plant Modelling System*) est une forme de L-system paramétrique dans lequel un modèle paramétrique est utilisé pour définir la forme et les dimensions de chaque partie de la plante. Il tend à faciliter la modélisation de la structure des plantes en résumant celle-ci dans une chaîne de caractères comme présenté sur la figure suivante.

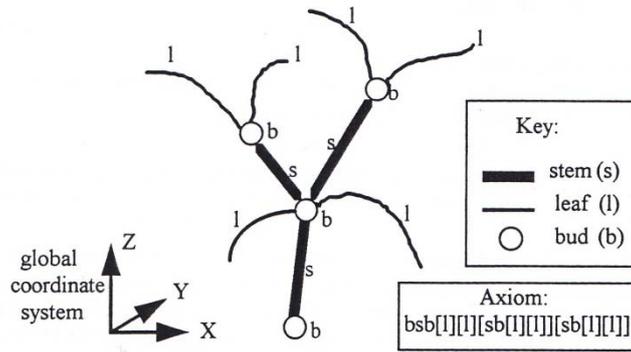


Figure 2 : exemple de la topologie d'un système ramifié, source : P. Lewis

Toutefois, des méthodologies de description des plantes ont été développées. C. Godin et Y. Guédon dans leur article *Représentation et analyse de l'architecture des plantes*¹ présentent une méthodologie implémentée dans le logiciel AMAPmod (Godin et al.) qui permet à l'utilisateur de construire des représentations informatiques de plantes réelles puis d'analyser ces représentations à l'aide d'outils appropriés.

Ces différents travaux ont tout de même nécessité la création d'un système de codage propre au problème posé dans ce travail pour être en mesure de modéliser à la fois des éléments de ressource de type branchage et de type usiné. Par ailleurs le codage de la ressource sera développé en parallèle de l'élaboration de l'algorithme de génération de structure pour garantir l'adéquation dans le traitement des données. Le modèle numérique de la ressource ne doit pas présenter d'informations qui ne puissent être traitées par la suite par l'algorithme générateur de structure.

1.3.2. Architecture, tectonique et ingénierie

1.3.2.1. La tectonique

La tectonique est un concept développé par la culture allemande au milieu du XIXe siècle posant la question du style en architecture. Quel sont les statuts du visuel et du constructif dans l'architecture ? La construction prend part au débat esthétique et possède une signification visuelle essentielle à la compréhension de l'objet architectural.

Dans *Studies in tectonic culture* (1995), Kenneth Frampton met l'accent sur la dimension matérielle de la production architecturale fin du XIXe et courant XXe. L'approche tectonique de l'architecture met en exergue « une évidence visuelle superposée à la franchise d'un concept constructif et à la clarté d'une forme plastique. » L'idée de « superposition visuelle et matérielle des concepts de structure et d'espace, sous les traits d'une évidence constructive et fonctionnelle »² est à rapprocher du sujet la présente étude.

En effet, la configuration formelle de la ressource doit permettre d'envisager des formes sculpturales en adéquation avec une réalité structurelle contenue dans les caractéristiques de la ressource. On recherche ici à intégrer dès la phase d'esquisse des prémisses constructifs tectoniques.

1.3.2.2. Design engineering

La revue *Architectural Design* a édité un numéro intitulé *The new structuralism* dans lequel elle relate différentes avancées des connaissances en matière de conception d'architecture non-standard. Cette

¹ Article extrait des actes du séminaire sur la modélisation des plantes tenu par l'INRA à Paris, 10-12 mars 1997
² www.lespressesdureel.com/extrait.php?id=883&menu

nouvelle façon d’appréhender la structure consiste à inverser la traditionnelle séquence de conception qui commence par développer une forme, puis s’intéresse ensuite à sa réalité structurelle et enfin à la matérialité de l’objet mis en œuvre. Le renversement opéré place le matériau à l’origine du processus de conception, la structure et la forme suivent, développées simultanément par l’architecte et l’ingénieur structure.

Cecil Blamond évoque à ce propos le *design-engineer*, ingénieur intervenant en phase de conception, en collaboration avec l’architecte. L’intérêt que présente cette façon d’aborder le projet est de ne pas se retrouver dans l’impasse d’une forme n’ayant aucune réalité matérielle et constructive. La forme étant développée simultanément dans des algorithmes de génération de structures conçus pour répondre à des contraintes de matériau (longueur d’éléments de construction, angle entre deux éléments au niveau d’un nœud...), celle-ci possède une réalité technique qui permet sa mise en œuvre.

1.3.3. Non-standard et éléments irréguliers

1.3.3.1. Morphogenèse des volumes non-standard, passage d’une forme libre géométrique à une forme constructible

Les travaux menés actuellement au CRAI, dans le cadre de la thèse développée par Shaghayegh Shadkhou, portent sur la constructibilité d’une forme non-standard et les différents principes constructifs pouvant être mis en œuvre.

Différentes familles de principes constructifs ont été identifiés :

- *L’empilement* est une superposition d’éléments horizontaux dans un système d’encorbellement, les frottements entre les éléments annulant les forces horizontales.
- *La tessellation* ou facettisation, est constituée d’éléments de surface (caissons) fixés bord à bord. La surface ainsi obtenue est à la fois structure et peau.
- *La résille* se compose comme une grille d’arcs ou un réseau de barres travaillant en traction ou en compression et épouse la forme de l’ouvrage.
- *La membrane* est réalisée à partir d’éléments linéaires ou plans pliés, sorte de coque ou de voûte composée d’un même élément.
- *La trame* est constituée par exemple de poteaux et de poutres.

Un modèle paramétrique a été développé pour extraire d’une géométrie non-standard une grille d’arc constructible comme le montre la figure suivante.

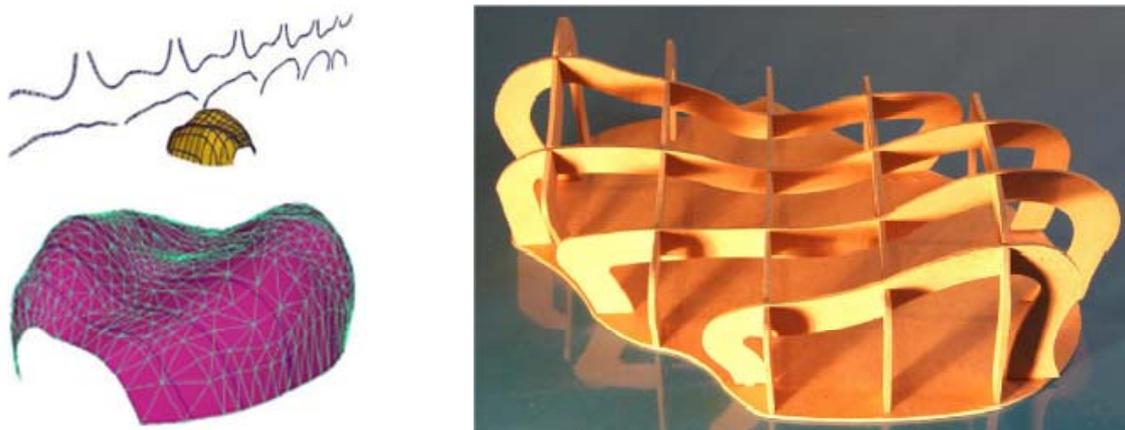


Figure 3 : Forme réalisée avec Maya puis construite en bois , source : CRAI

Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique dans la mesure où il s'agit de donner une réalité constructive à une forme quelconque mais cette fois-ci à partir d'éléments existants qu'il faut agencer de manière optimisée. Les recherches pourront être couplées pour envisager par exemple la confection des arcs issus de l'algorithme présenté ci-dessus au moyen d'éléments de ressource irréguliers.

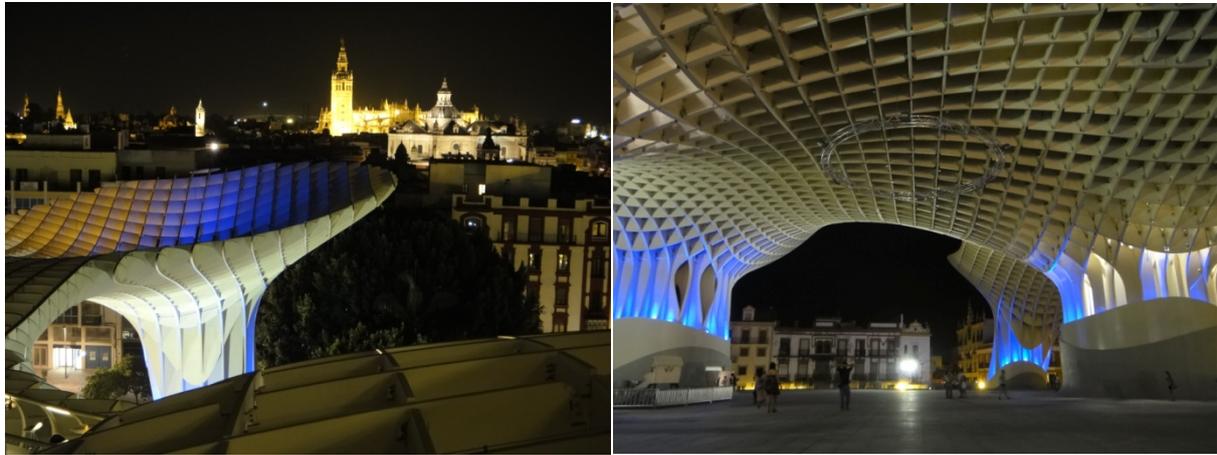


Figure 4 : canopée de Séville, arch. Jürgen Mayer, source : D. Monier

La canopée de Séville réalisée en 2011, conçue par l'architecte Jürgen Mayer, est un exemple de réalisation à grande échelle créant par l'assemblage d'éléments plans dans deux directions orthogonales l'illusion d'un volume organique. Cette volumétrie non-standard est révélée par la résille orthogonale qui la structure. Au niveau de l'épaisseur de la canopée, au-dessus de la place, la résille est extrudée selon le plan horizontal afin de faire naître une cavité qui peut être parcourue (cf. figure suivante).



Figure 5 : Vue depuis l'intérieur de la résille, source : D. Monier

1.3.3.2. *L'utilisation d'une ressource locale faiblement transformée en architecture*

Christian Stanton dans son article *Digital mediated use of localized material in architecture*³ propose d'aborder la conception architecturale à partir d'un algorithme mettant en œuvre des éléments spécifiques de ressource disponibles à proximité du site. L'idée consiste à numériser la ressource puis à la mettre en œuvre de manière optimisée par rapport à une intention formelle. L'idée qu'il applique à une ressource en bois peut être appliquée à des pierres, c'est l'exemple du vieux mur de pierre, où chaque élément qui compose le mur a été minutieusement disposé pour répondre à des contraintes de forme et de stabilité.

³ Article extrait des Actes de Sigradi, 2010.

L'exemple qu'il propose se limite à faire évoluer sur une surface déterminée des éléments de bois de type Y composés de trois parties linéaires. Une fois constitué un large inventaire de branches, celles-ci sont réparties uniformément selon les coordonnées de la surface en cherchant toutefois à optimiser la correspondance entre la courbure de la branche et la courbure de la surface dans la configuration où se trouve la branche.

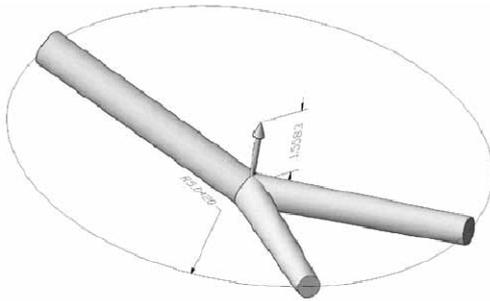


Figure 2. Normal and radius during inventory

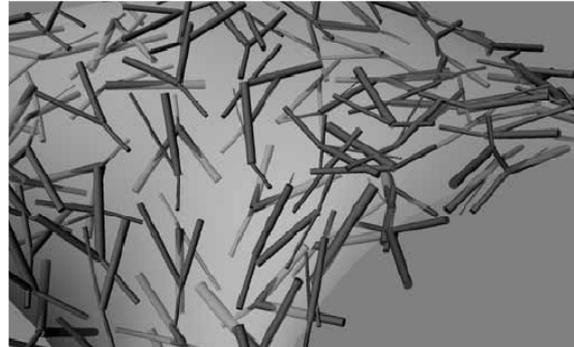


Figure 3. Initial seeding of limbs before using attraction

Figure 6 : Branche modélisée et répartition de branches sur une surface, source : Ch. Stanton

Ensuite les branches sont déplacées les unes vers les autres au moyen d'un algorithme attracteur. Elles sont autorisées à s'écarter de la surface dans la mesure d'une marge d'écart paramétrée au préalable. L'algorithme déplace ainsi les branches les unes par rapport aux autres afin de créer entre elles des contacts jusqu'à un certain degré d'interférence. Si une fois le degré d'interférence atteint il persiste des zones sans branchages, le processus est réitéré avec une nouvelle distribution de branches limitée cette fois-ci aux zones vides. Le processus est répété plusieurs fois dans son intégralité pour obtenir différentes structures qui puissent être par la suite comparées.

Ces travaux qui se trouvent parfaitement dans le champ de l'étude traité dans ce rapport présentent une façon de générer des structures à partir d'éléments irréguliers donnés préalablement à la structure.

1.3.3.3. Volumétrie non-standard approchée par des éléments standards

L'étude⁴ menée par Thierry Ciblac dans le domaine de la conception paramétrique de structure non-standard à partir d'éléments standards vise à déterminer via des algorithmes de résolution de contraintes des modélisations paramétriques de structures. L'objectif recherché est d'apporter une aide au concepteur dans la définition des contraintes de standardisation qui seront nécessaires pour approcher la forme architecturale désirée. Le non-standard génère des contraintes de surcoût pour la fabrication d'éléments sur-mesure, on a donc économiquement intérêt à rechercher une discrétisation basée sur des éléments standards de la forme globale non-standard.

Thierry Ciblac cherche à produire des modèles satisfaisant les contraintes de standardisation et susceptibles d'évoluer dynamiquement. La résolution des contraintes passe par l'intégration de codes écrits en *Visual Basic* dans Grasshopper. Le processus habituel de rationalisation d'une forme quelconque est renversé pour générer à partir d'éléments rationalisés une forme quelconque. Les travaux développés par Thierry Ciblac mettent en évidence le fait que la standardisation dans le domaine du non standard n'est pas source de restriction en termes de créativité. Ce processus de conception révèle la complexité formelle qui peut être atteinte à partir d'éléments simples.

⁴ Conception paramétrique en fonction d'éléments standards, article extrait de SCAN'10

Cette étude vise à générer du non-standard à partir d'un élément standard de base. Dans notre cas l'objectif est le même, i.e. produire une architecture non-standard, mais à partir cette fois-ci d'un nombre limité (stock défini) d'éléments non-standards, irréguliers.

- a : Courbe polygonale droite alignée sur la droite $D=(P_{deb}, P_{fin})$. L'extrémité de cette courbe rectiligne ne peut être P_{fin} compte tenu de sa longueur.
- b : Courbe polygonale en arc de cercle.
- c : Courbe polygonale en arc de spirale. Pour b et c, un calcul itératif permet de déterminer les courbes dont les extrémités sont P_{deb}, P_{fin} .
- d : Courbe polygonale suivant un modèle de courbe, extrémités sur D. La courbe modèle (à droite de la figure 2) est tracée librement par le concepteur et discrétisée en fonction du nombre n de segments choisi.
- e : Courbe polygonale pliée en accordéon entre P_{deb} et P_{fin} . Le pliage en accordéon est toujours possible même si la longueur de la courbe est très importante.

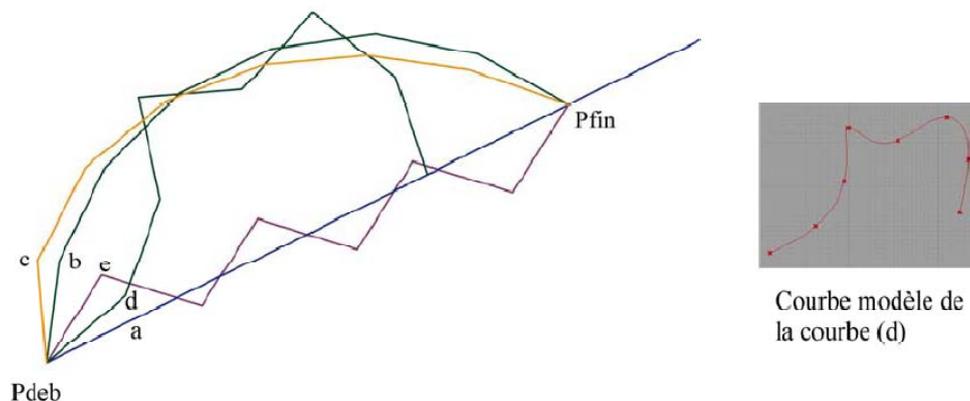


Figure 2 : Exemple de courbes polygonales définies par $n=7$ segments de longueur $L_s=4$ unités. Courbes polygonales a) rectiligne, b) en arc de cercle, c) en arc de spirale, d) suivant un modèle de courbe représenté à droite, et e) pliée en accordéon.

Figure 7 : Exemple de courbes polygonales déterminées par un algorithme, source : T. Ciblac

1.3.4. Pratiques similaires dans les domaines de l'art et de l'artisanat

1.3.4.1. Les sculptures tressées de Patrick Dougherty

Patrick Dougherty a réalisé de nombreuses sculptures en bois à travers le monde. Il utilise des bois longs et fins qu'il tresse et entremêle pour créer une masse. Ces bois proviennent de jeunes pousses, ce qui leur donne une flexibilité et permet à l'artiste de venir épouser les formes qu'il désire. Chaque sculpture est unique, inspirée de l'environnement dans lequel elle est conçue.

Les œuvres, entièrement conçues en bois ne différent pas structures et enveloppes, c'est la multiplicité des fins branchages et leur entremêlement qui confère à la structure rigidité et stabilité. Dans le même temps, ces éléments élancés de bois juxtaposés dessinent une résille fine laissant parfois passer la lumière tout en créant une peau séparant l'intérieur de l'extérieur.



Figure 8 : Sculptures de Dougherty, source : JC Bignon

1.3.4.2. Œuvres d'art géantes réalisées à partir de bois ramassés

La démarche adoptée dans les deux cas présentés ci-dessous relève de la récupération de pièces de bois et de leur utilisation tel-quel dans l'édification de l'œuvre. Les deux photographies de gauche de la figure suivante représentent une tour réalisée par l'artiste russe Nikolaï Polissky constituée de branchages assemblés les uns aux autres au moyen de tiges filetées et d'écrous. La photographie de droite présente l'œuvre de l'artiste suédois Lars Vilks qui alimente sa construction au grès des bois flottés que lui livre la mer. Il obtient ainsi une structure qui se développe au fil du temps selon les ressources dont il dispose.



Figure 9 : œuvres artistiques réalisées avec des branchages et bois divers, source : JC Bignon

1.3.4.3. *Constructions artisanales*

Dans les constructions suivantes, le matériau est intelligemment employé pour venir constituer l'ouvrage. L'orientation des bois est pensée pour tirer partie au maximum de ses caractéristiques et limiter les transformations à lui apporter. Cette démarche économe en matière et en énergie permet d'atteindre des résultats uniques en termes de rendu visuel de part la diversité formelle du matériau employé. La structure obtenue tire partie de la richesse de cette diversité pour intégrer parfaitement des particularités répondant à des contraintes fonctionnelles. Le linteau de la porte principale de la maison de Simon Dale en est l'exemple.



Figure 10 : Maison de Simon Dale, Wales, source : www.simondale.net



Figure 11 : Mosquée de Danakil, Ethiopie

Ces différentes réalisations construites à partir de bois non-usinés, employés employés en l'état, me permette de terminer le propos introductif au travail qui va être présenté dans les deux parties suivantes : tout d'abord l'organisation d'une ressource irrégulière puis ensuite la mise en œuvre de celle-ci pour répondre à des intentions architecturales.

2. Organisation caractérisée de la ressource

Nous nous intéressons ici au matériau bois comme ressource structurelle pour l'édification de formes architecturales. Il s'agit dans un premier temps de définir la typologie des éléments qui constitueront la ressource. Ensuite, je propose un modèle paramétrique rassemblant les propriétés géométriques d'un élément de ressource qui puisse être appliqué, moyennant quelques approximations, à tout élément de la ressource. L'étape d'après consiste à coder ce modèle paramétrique dans l'interface Grasshopper du modèleur 3D Rhinoceros. Enfin, j'évoquerai les possibilités de numérisation de la ressource au moyen d'un scanner 3D et le traitement qui s'en suit pour déterminer les paramètres du modèle à partir d'un nuage de points.

2.1. Caractérisation de la ressource

On se place ici dans le cas d'une ressource constituée d'un stock d'éléments provenant de démontages d'ouvrages ou d'éléments faiblement usinés (de type branchage ou tronc avec départs de branches). Les bois de démontages présenteront des particularités en termes de percements (présence de mortaises, de trous d'assemblage...), d'usinage (tenons, encoches, biais...) et de vieillissement et fatigue du matériau. Les bois peu usinés seront de l'ordre de la branche ou du tronc et présenteront des caractéristiques géométriques ne favorisant pas leur usage industriel (courbure, ramifications, nœuds, variation de section...). Ces derniers peuvent aussi être des bois disponibles à proximité d'un site, favorisant ainsi l'usage d'une ressource locale comme le présente Christian Stanton dans son article *Digital use of localized material in architecture*⁵.

La première étape du projet consiste à s'approprier la ressource en établissant une bibliothèque des éléments dans laquelle l'algorithme de génération viendra puiser. Cette classification doit caractériser la ressource de manière précise afin de reconstituer virtuellement l'élément dans le modèleur 3D Rhinoceros. La gestion des caractéristiques différenciées de la ressource passe par l'utilisation d'un codage qui est en quelque sorte le « patrimoine génétique » de l'élément.

On différencie trois sources possibles pour la ressource :

- Source forestière : baliveaux, bois d'éclaircie
- Résidus de l'activité de scierie : dosses, sections « carrées » résultantes de la découpe d'une grume mais ne présentant pas les sections standards de l'industrie du bois
- Bois de récupération issus de bâtiments démontés (solives, bois de charpente...)

Par la suite, nous allons nous concentrer plus particulièrement sur l'élaboration d'un modèle paramétrique adapté aux bois non usinés présentant des courbures aléatoires et des ramifications. Nous veillerons cependant à rester en mesure de modéliser des éléments rectilignes ou courbes de section rectangulaire dans le cas d'éléments de charpente par exemple.

2.2. Modélisation d'un élément de la ressource

2.2.1. La portion élémentaire

Une des possibilités pour constituer les éléments différenciés de la ressource est de concevoir une portion élémentaire qui serait définie par deux points, une flèche (qui serait nulle dans le cas d'un élément rectiligne) et une section à extruder le long de la fibre médiane ainsi constituée. La section, inscrite dans un cercle dont la trajectoire du centre dessine la fibre médiane, est à définir dans sa géométrie (cercle, quadrilatère, triangle) et ses dimensions (rayon, rapport b/h).

⁵ Article extrait des Actes de Sigradi 2010

Ainsi, tout élément de la ressource doit pouvoir être modélisé en juxtaposant autant de fois que nécessaire cette portion élémentaire. La figure suivante présente schématiquement une portion élémentaire et deux éléments caractérisés de la ressource. A gauche un élément rectiligne obtenu à partir d'une seule portion élémentaire et à droite un élément curviligne ramifié composé de trois portions élémentaires juxtaposées.

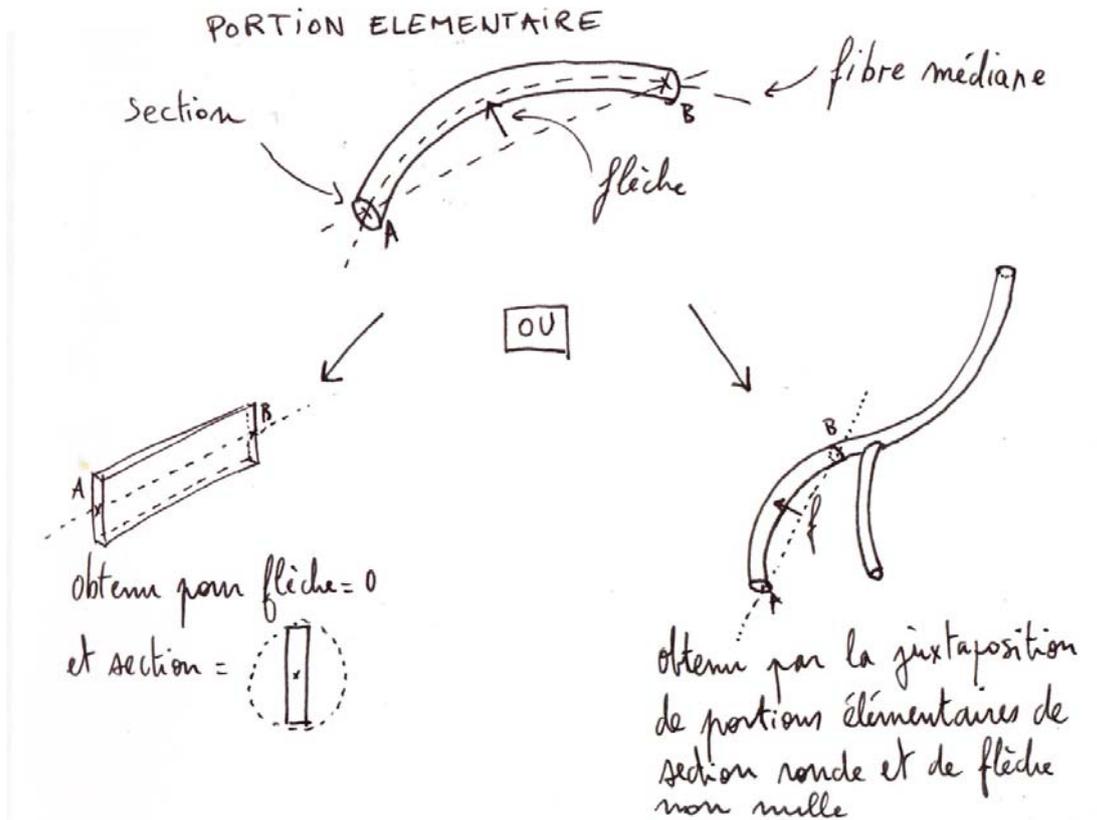


Figure 12 : principe de la portion élémentaire constitutive des éléments de la ressource

Les irrégularités de la ressource telles des nœuds ou des trous peuvent être prises en compte de manière paramétrique. Ces particularités ayant pour conséquence un affaiblissement des performances mécaniques de l'élément de ressource concerné, il peut être traduit sur le modèle par un affaiblissement de la section.

Une fois cette portion élémentaire définie, il s'agit pour élaborer le modèle d'un élément de ressource ramifié dont la fibre médiane principale est une courbe gauche de positionner spatialement les portions élémentaires les unes par rapport aux autres.

2.2.2. La méthode du « chemin extrudé »

Cette méthode consiste à définir une courbe (qui peut être gauche) qui suit l'axe principal de l'élément de la ressource et de définir des sections à extruder sur des portions de cette courbe (afin de gérer les éléments à section variable). La présence de ramifications se traite par juxtaposition de deux éléments définis comme l'on vient de l'indiquer.

L'idée proposée est de construire le chemin extrudé par juxtaposition de portions élémentaires telles qu'elles ont été définies précédemment. On obtient ainsi une courbe qui peut être anguleuse et gauche, composée de différentes portions élémentaires rectilignes ou courbes. Le positionnement d'une ramification se faisant par rapport à la portion élémentaire de fibre médiane principale à laquelle elle est rattachée.

La reconstitution paramétrique d'objets ramifiés complexes ne faisant pas partie de nos objectifs, nous nous limiterons donc à un objet dont la fibre principale peut être décomposée en cinq portions élémentaires pouvant chacune recevoir une ramification simple (i.e. composée d'une seule portion élémentaire). L'exemple qui suit illustre la complexité atteignable avec un tel modèle.

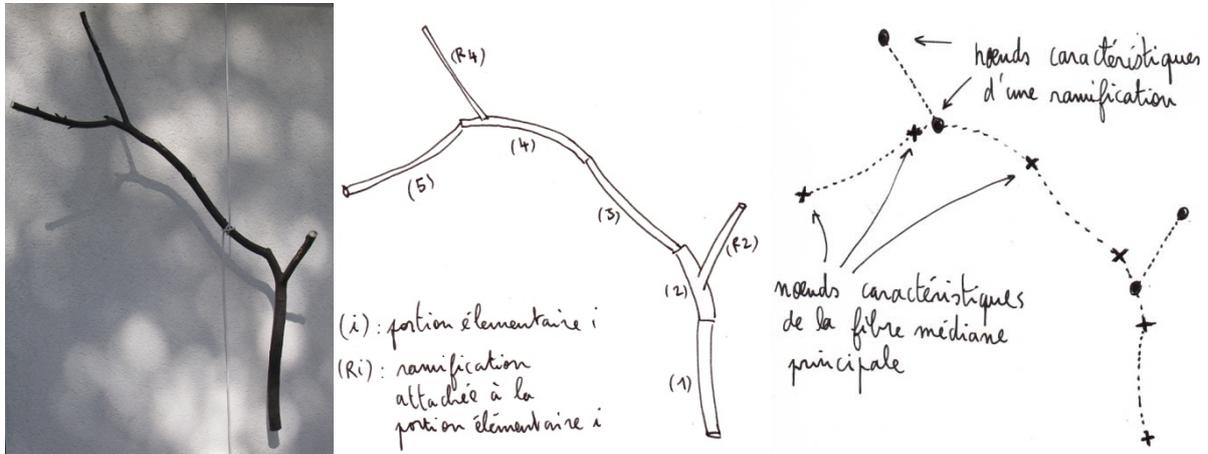


Figure 13 : Photographie et schémas du modèle d'une branche à 5 portions élémentaires et 2 ramifications

Il s'agit maintenant de positionner les portions élémentaires dans l'espace les unes par rapport aux autres. La démarche adoptée est de positionner dans un premier temps tous les nœuds caractéristiques de la fibre médiane principale dans l'espace.

Ils sont positionnés de proche en proche par rapport à :

- la distance entre deux points consécutifs,
- l'angle que forment deux segments consécutifs, que l'on nommera β ,
- l'angle que forment les deux plans consécutifs respectivement générés par les segments $i-1$ et i d'une part et i et $i+1$ d'autre part, que l'on nommera α .

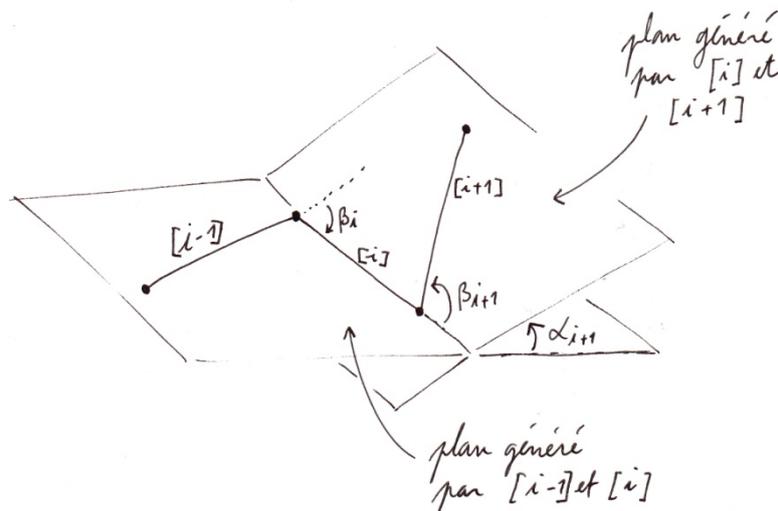


Figure 14 : schéma du paramétrage relatif de trois segments de portions élémentaires

Une fois ces points localisés, il s'agit de préciser l'angle θ formant la flèche éventuelle de la portion élémentaire avec le vecteur y dans le plan de rotation de normale x . Ce repère local est défini tel que x est le vecteur directeur du segment i et y le vecteur formant un angle de $\pi/2$ avec x et contenu dans le

plan orienté généré par les segments $i-1$ et i (le cas particulier de la première portion élémentaire d'un élément de ressource doit être défini par défaut).

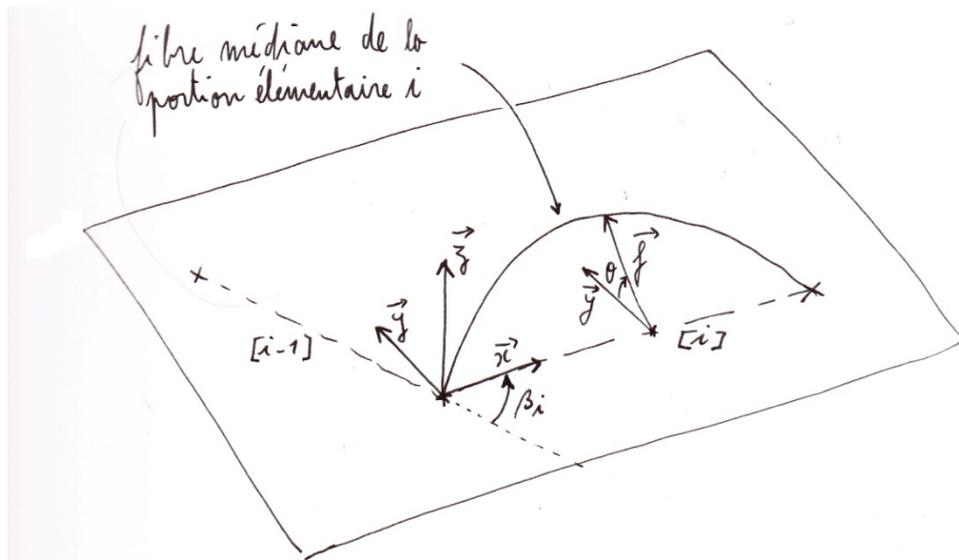


Figure 15 : schéma du paramétrage angulaire de la flèche d'une portion élémentaire

La méthode de modélisation qui vient d'être présentée va maintenant être programmée dans l'environnement Grasshopper afin de visualiser les modèles 3D des éléments de ressource avec Rhinoceros. Cette méthode a été développée dans une optique pratique qui permet de relever les paramètres sur un objet réel le plus simplement possible.

Toutefois, la métrologie pour un objet en trois dimensions reste complexe et d'autres méthodes pourraient être développées comme par exemple le relevé des distances entre chaque point caractéristique (extrémités des portions élémentaires et points de flèche). Ces paramètres permettraient de concevoir le modèle de l'objet sans avoir de mesure d'angle à réaliser, mesures toujours délicates à effectuer.

La méthode présentée précédemment ayant été retenue pour la suite des travaux, nous allons maintenant nous intéresser à sa traduction informatique.

2.3. Programmation du modèle sous Rhinoceros/Grasshopper

La programmation d'un algorithme par le biais du plug-in Grasshopper ne permet pas l'intégration de boucle sans avoir recours à un langage de programmation tel que le *Visual Basic* ou le *C#*. Pour les raisons développées dans la partie introductive, nous tenons à réaliser l'algorithme sous forme de cellules connectables les unes aux autres dans l'interface Grasshopper. Le codage partiel de l'algorithme en VB pour créer une cellule capable de fonctionner en boucle avec d'autres cellules n'est pas réalisable. La logique développée dans Grasshopper fonctionne pour le traitement de listes de données de manière séquentielle. L'algorithme a donc été programmé en conséquence pour, à partir d'une liste de paramètres définissant n éléments de ressource, produire une liste de n modèles 3D visualisables dans Rhinoceros. Ces modèles 3D devant pouvoir être récupérés et traités par l'algorithme de génération de structure qui sera présenté par la suite.

2.3.1. Structure générale de l'algorithme

L'algorithme de modélisation de la ressource est programmé de la façon suivante, les nombres entre parenthèses faisant référence à l'illustration qui suit :

- Un tronçon élémentaire constitue une cellule de base (1) qui sera dupliquée dans le programme. Un tronçon élémentaire est composé d'une portion élémentaire i de la fibre médiane principale et de la portion élémentaire R_i de la ramification associée.
- Cinq cellules de base identiques constituent l'élément de ressource, elles correspondent aux cinq tronçons que peut comporter le modèle d'un élément de ressource.
- Des paramètres de sortie des cellules $i-2$ et $i-1$ (2) constituent des paramètres d'entrée de la cellule i afin de gérer le positionnement dans l'espace de la portion élémentaire i par rapport aux deux précédentes (des valeurs par défaut (3) sont implémentées pour les cas particuliers des deux premières cellules).
- Les paramètres définissant les éléments de ressource sont distribués (4) aux différentes cellules selon le tronçon auquel ils correspondent.
- Les données de sortie de chaque cellule sont regroupées (5) par élément de ressource modélisé.
- Les modèles 3D des éléments de ressource sont finalement regroupés dans la liste qui sera fournie en entrée de l'algorithme de génération de structure (6).

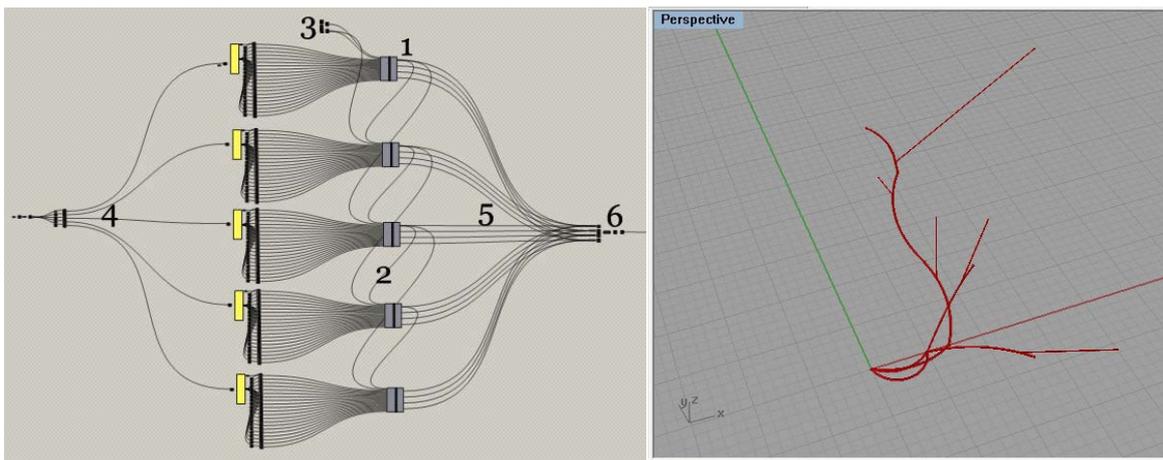


Figure 16 : l'algorithme de modélisation sous GH et le visuel de 3 éléments de ressource superposés sous Rhino

La structure globale ayant été présentée, il s'agit maintenant de détailler le fonctionnement d'une cellule de base correspondant à la modélisation d'un tronçon élémentaire.

2.3.2. La modélisation d'un tronçon élémentaire

La structure d'une cellule de base se décompose en une séquence d'opérations distinctes, les données de sortie d'une opération constituent une partie des données d'entrée de l'opération suivante. Pour faciliter la manipulation et la compréhension, l'algorithme de la cellule de base est encapsulé dans une entité appelée *cluster* ne laissant paraître que les entrées et les sorties.

Une cellule de base est en mesure de générer deux portions élémentaires : la première forme la fibre médiane principale de l'élément de ressource et la deuxième forme la ramification. Par la suite, la première sera nommée portion élémentaire principale et la seconde portion élémentaire ramifiée.

Voici l'énumération de ces opérations, à mettre en lien avec la figure qui suit :

- (1) Le segment porteur de la portion élémentaire principale est positionné à partir des angles α et β ainsi que de la distance entre les deux extrémités de la portion.
- (2) La fibre médiane arquée de la portion élémentaire principale est positionnée à partir de l'angle θ et de la distance de flèche.
- (3) La partie extrudée de la portion élémentaire principale est constituée à partir des paramètres de définition de la section. L'élaboration de la section constitue une opération encapsulée dans un *cluster*.
- (1') Le segment porteur de la portion élémentaire ramifiée est positionné à partir des angles α_R et β_R ainsi que de la distance entre les deux extrémités de la portion.
- (2') La fibre médiane arquée de la portion élémentaire ramifiée est positionnée à partir de l'angle θ_R et de la distance de flèche.
- (3') La partie extrudée de la portion élémentaire ramifiée est constituée à partir des paramètres de définition de la section.

Une fois l'algorithme encapsulé il n'apparaît plus que les entrées pour les paramètres de définition du tronçon (4) et les quatre sorties qui sont pour les portions élémentaires principale et ramifiée les fibres médianes (resp. 5 et 5') et les tubes extrudés (resp. 6 et 6').

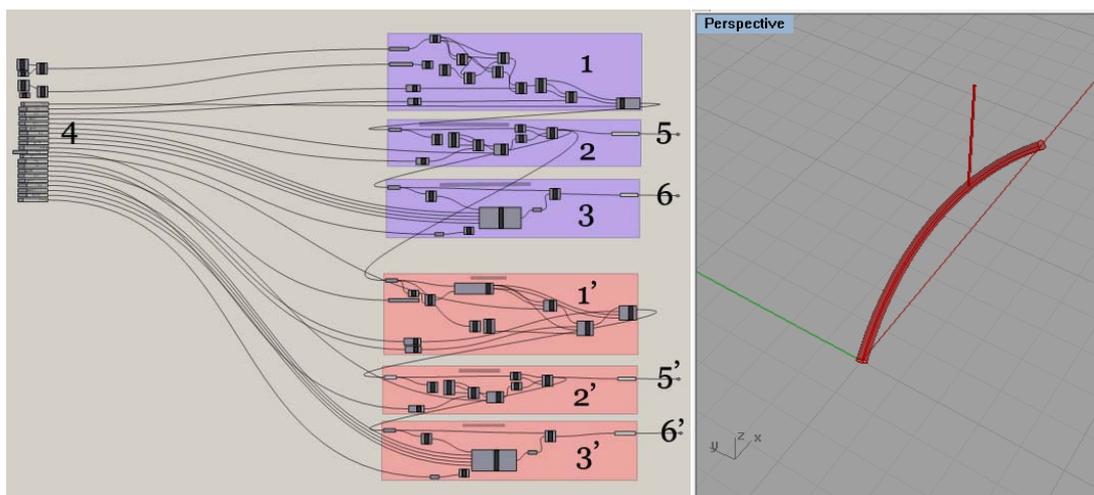


Figure 17 : l'algorithme de modélisation d'un tronçon sous GH et le visuel d'un tronçon sous Rhino

2.3.3. Les données transmises par le modèle

Les modèles générés ont pour but d'être ensuite positionnés de manière optimale dans des structures. Les informations fournies par le modèle sont de deux types différents :

- La fibre médiane principale et les fibres médianes des ramifications permettent d'établir le squelette de la branche. Nous limitons l'étude à des éléments de ressource dont les dimensions des fibres médianes sont grandes devant les autres dimensions, le squelette constitué des fibres médianes est donc suffisant pour positionner l'élément de ressource selon le critère spatial.
- Les tubes extrudés selon les sections de chaque portion élémentaire permettent d'évaluer la quantité de matière tout au long de la fibre médiane et ainsi la résistance structurelle de l'élément. Cette donnée sera utilisée par l'algorithme pour gérer les performances mécaniques de la structure.

Ces informations sont transmises à l'algorithme générateur sous la forme d'un groupe de deux groupes : tout d'abord, les deux types de données sont regroupés dans deux groupes différents, ensuite, ces deux groupes forment un nouveau groupe rassemblant cette fois-ci toutes les données du modèle 3D. Le groupe global ainsi constitué fige les différents éléments du modèle 3D les uns par rapport aux autres. De cette façon, le modèle est pris en charge dans l'algorithme comme un objet unique qui peut être dégroupé pour récupérer une information particulière.

2.3.4. Exemple

Les paramètres de modélisation de l'élément de ressource une fois qu'ils ont été relevés sur l'objet réel sont enregistrés dans un fichier texte comme l'illustre la figure suivante.

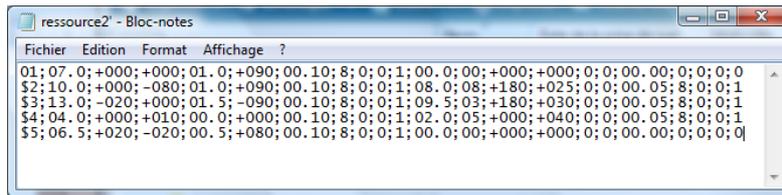


Figure 18 : Fichier texte des paramètres permettant de modéliser l'élément de ressource

Ce fichier texte est importé dans l'environnement Grasshopper puis traité par l'algorithme de modélisation pour obtenir le modèle 3D présenté sur la figure suivante.

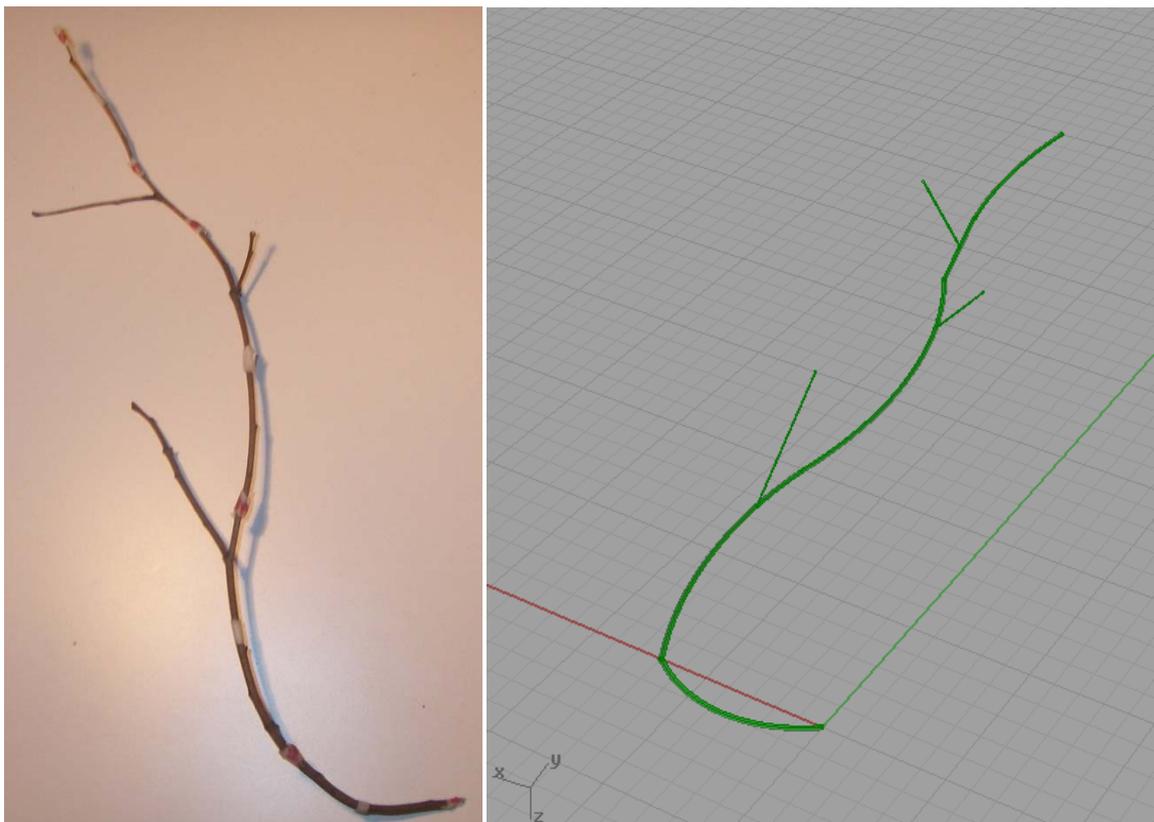


Figure 19 : une branche ressource et sa modélisation associée dans l'environnement Rhinoceros

2.4. Conclusion

L'objet virtuel 3D obtenu rassemble les informations qui seront nécessaires pour l'utiliser dans la conception d'une structure comme nous allons le voir dans la partie suivante. Le volume créé autour du squelette de l'élément de ressource traduit à travers le volume de matière qu'il modélise une partie des caractéristiques mécaniques de l'élément. La section a été définie de façon à pouvoir être adaptée aussi bien à des éléments de section rectangulaire que de section ronde.

Les cellules de base présentées précédemment sont reliées entre elles de manière à constituer l'objet sous la forme d'une partie principale constituée de cinq portions élémentaires juxtaposées pouvant chacune recevoir une ramification simple. Cependant, il est possible de créer toute autre arborescence à partir de ces mêmes cellules. Par exemple, en implémentant une cellule avec la fibre médiane d'une portion ramifiée, on ajoute à l'extrémité de celle-ci un tronçon. La nouvelle configuration obtenue possède donc deux générations de ramification.

Le relevé des paramètres nécessaires pour établir le modèle a été réalisé manuellement pour tous les exemples présentés dans ce rapport. Les points caractéristiques sont matérialisés sur l'objet puis mesurés manuellement. Pour le relevé des paramètres d'un grand nombre de ressources, des méthodes numériques pourraient être mise en place. Le relevé des points caractéristiques peut être réalisé au moyen d'un scanner. Il faut envisager dans ce cas un algorithme capable de retrouver les paramètres à partir d'un ensemble de points. Ceci est abordé de manière suggestive et pourrait faire l'objet d'un travail de recherche à part entière.

La ressource est maintenant caractérisée et modélisée, la partie qui suit traite de sa mise en œuvre pour générer des structures utilisant intelligemment les caractéristiques différenciées de la ressource.

3. Mise en œuvre de la ressource

3.1. Objectifs visés

3.1.1. Les possibilités de mise en œuvre

Une fois la ressource modélisée de manière paramétrique, l'objectif est d'élaborer l'algorithme de génération de structure qui la mettra en œuvre. Deux principaux critères apparaissent au niveau des intentions du concepteur : la forme plastique à adopter et les performances mécaniques à atteindre. L'algorithme sera développé dans un souci constant d'intégration de la variabilité des caractéristiques de la ressource.

Le bois se différencie des matériaux de synthèse de part ses particularités mécaniques (matériau orthotrope, fibres ininterrompues pour un bois non-usiné), son mode de production naturel et sa variété formelle dans son état initial (courbures, ramifications, variations de section). L'enjeu de ce projet est d'exploiter les possibilités constructives offertes par une ressource faiblement transformée comme le bois. L'algorithme générateur sera conçu de manière à formuler des propositions de structure optimisant l'usage de la ressource tout en intégrant les intentions du concepteur.

La ressource impose une première contrainte sur l'ouvrage de part sa morphologie. Il est donc intéressant de produire différents ouvrages employant les mêmes ressources dans des dispositions différentes pour au final pouvoir les comparer en termes de stabilité, de performances mécaniques, de poids de l'ouvrage, de nombres d'éléments de ressource employés... Dans le même temps, le concepteur observe les dispositions les plus favorables à l'expression de ses intentions architecturales.

L'intention du concepteur peut être subdivisée selon plusieurs aspects :

- Intention formelle, la question est alors : comment organiser la ressource pour matérialiser une forme architecturale ? Afin d'approcher la géométrie définie par le concepteur, on procède en quelque sorte à une discrétisation du modèle formel selon les éléments irréguliers disponibles de la ressource. Cela revient à chercher quel élément de la ressource matérialise au plus proche telle ou telle partie de l'intention formelle. La figure suivante illustre le parallèle qui est fait ici avec une méthode de discrétisation standard. Dans le cas présent d'une ressource présentant des singularités, celles-ci peuvent devenir source d'inspiration pour le concepteur.

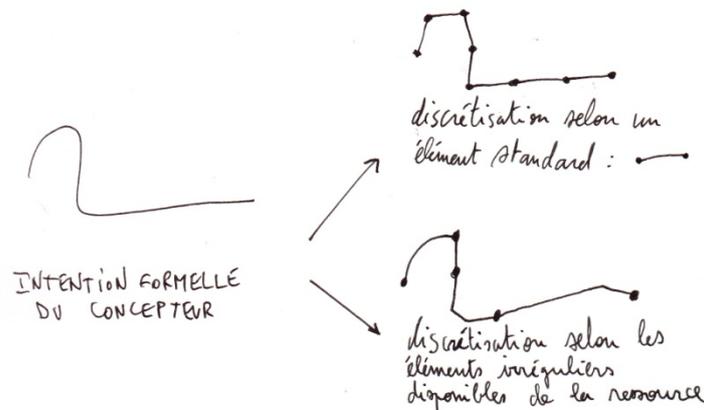


Figure 20 : parallèle entre discrétisation selon un élément standard ou selon des éléments irréguliers

- Intention fonctionnelle : cela consiste à générer une structure répondant à des contraintes spatiales, par exemple le franchissement d'un espace en imposant seulement des points ou zones d'appui comme l'illustre la figure suivante.

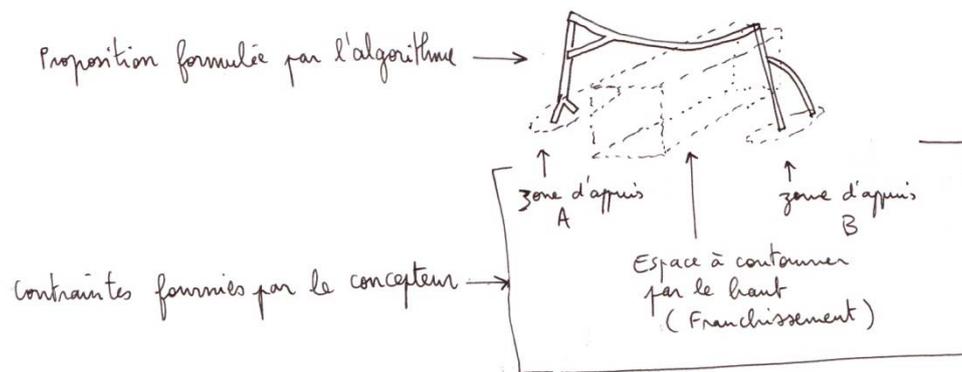


Figure 21 : mise en œuvre de la ressource selon des contraintes géométriques imposées par le concepteur

- Intention technico-structurale : la structure doit satisfaire des contraintes mécaniques imposées par le concepteur. L'algorithme dispose donc la ressource de manière à intégrer et gérer au mieux les efforts générés par les charges. La question des performances structurelles de l'ouvrage peut être traitée par une approche géométrique. Toutefois, la formulation des caractéristiques mécaniques précises de la structure se fera au moyen d'un logiciel de calcul de structure. Ce point serait à développer en lien avec les travaux menés par David Davalos au sein du CRAI sur le transfert d'un modèle entre le logiciel de modélisation 3D Rhinoceros et le logiciel de calcul de structure RDM6.

3.1.2. La méthode retenue

3.1.2.1. Présentation générale

Les différents aspects à prendre en compte dans l'intention du concepteur pour l'aider dans sa démarche créative sont à intégrer dans l'algorithme générateur de structure. Cette dissociation subjective que je propose a pour but de faciliter l'élaboration de l'algorithme en subdivisant le problème. Ainsi, les questions de forme, d'appuis et de résistance mécanique sont traitées séparément de manière séquentielle dans un ordre qui reste à définir. Les résultats obtenus pour ces différentes questions sont pondérés par le concepteur selon ses intentions.

L'idée est de remplir structurellement une forme architecturale avec la ressource disponible. La méthode adoptée consiste à approcher une surface en y répartissant de manière optimale les éléments de ressource disponibles. Cette surface est nommée surface de référence. Cette méthode générale peut ensuite être adaptée à plusieurs techniques constructives.

Deux façons de procéder ont été développées. Une première technique consiste à disposer la ressource de manière optimale sur la surface de référence sans adopter de logique constructive qui puisse être assimilée à une technique structurelle classique. La deuxième méthode vient s'insérer dans le prolongement des travaux menés par David Davalos et Nicolas Jacob : élaboration d'une grille d'arc adaptée à une nappe quelconque. Cette fois-ci il n'est plus question d'approcher la surface globale de la forme architecturale mais les arcs qui ont été dessinés sur celle-ci. L'algorithme cherchera dans ce cas à approcher les arcs de la résille avec la ressource disponible en intégrant des critères de résistance structurelle.

3.1.2.2. La technique du « nid de pie »

Telle une pie qui constitue son nid d'une multitude de brindilles et petits branchages entremêlés, l'algorithme composera la structure en disposant de manière optimale les différents éléments de la ressource pour venir épouser la forme désirée et lui conférer dans le même temps sa rigidité structurelle.



Figure 22 : Nid de pie

L'illustration précédente représente un nid de pie, la partie supérieure constitue une protection en branchages au dessus de la nichée. Ce procédé de construction rassemblant une multitude d'éléments de petite section permet tout de même d'atteindre des performances considérables en termes de résistance structurelle. De plus, la forme approchée est sphérique, ce qui montre la malléabilité formelle à laquelle peuvent se prêter des projets élaborés sur ce principe. Il est important de noter que dans le cas du nid de pie, les assemblages sont pour ainsi dire inexistant, la structure fonctionnant par la mise sous contrainte de certains éléments formant en quelque sorte un tressage rigide. La liberté que confèreraient des assemblages ligaturés à une structure de la sorte permettrait de concevoir toute sorte de forme modélisable par une nappe.

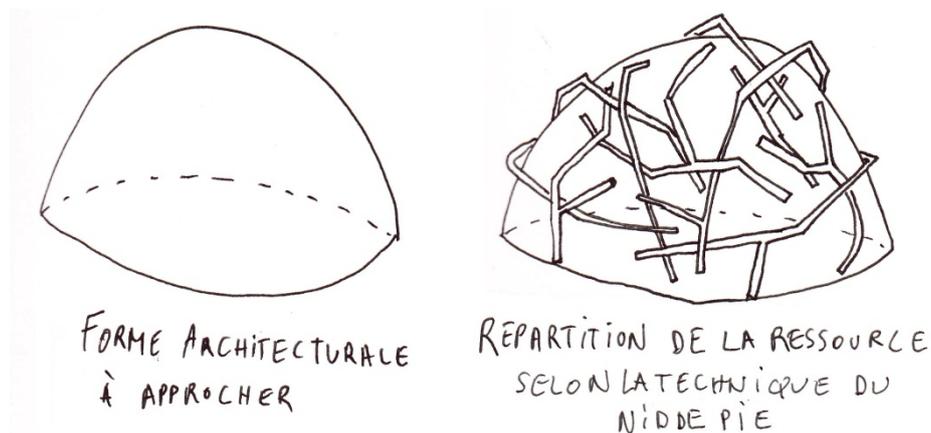


Figure 23 : Approche d'une forme architecturale par la technique du nid de pie

La figure précédente illustre une répartition uniforme de la ressource sur la forme architecturale.

3.1.2.3. La technique de la « grille d'arcs »

Cette deuxième méthode de mise en œuvre de la ressource vient se placer dans la continuité de travaux menés par David Davalos et Nicolas Jacob. L'objet de leurs travaux est d'élaborer de manière paramétrique des grilles d'arcs qui permettent de structurer des formes non standards. On obtient ainsi pour une forme plastique quelconque des possibilités constructives basées sur un système de résille paramétrée. Il s'agit ensuite dans notre cas de disposer la ressource de manière optimale par rapport au

schéma de structure proposé par cet algorithme. L'algorithme de génération de la grille d'arcs peut produire des grilles à une, deux ou trois directions. Dans le cas présent de l'étude, en considérant les ressources employées, seule la grille d'arc à une direction présente une réalité constructive.

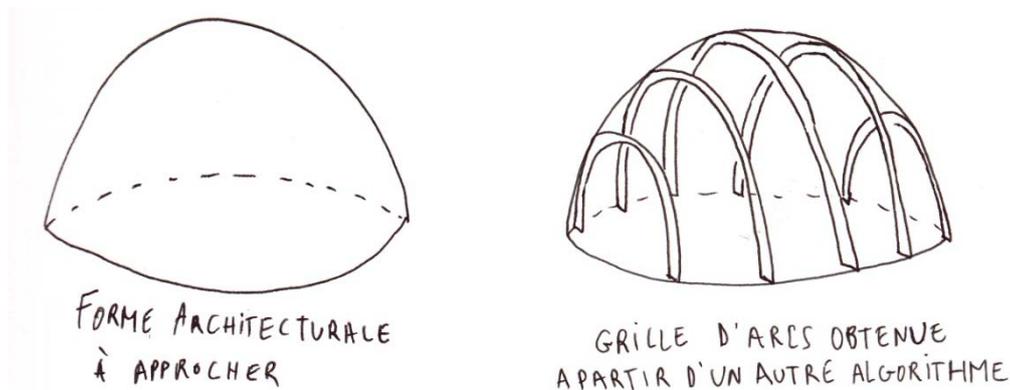


Figure 24 : Approche d'une forme architecturale avec l'algorithme de génération de grille d'arcs

La surface de référence modélisant l'arc peut être paramétrée de différentes façons qui auront des répercussions non seulement visuelles sur l'ouvrage mais aussi mécaniques. Une première façon de faire est de créer une surface plane verticalement dans le plan de la fibre médiane de l'arc. Ainsi la composante de l'inertie générée selon la normale à l'arc contenue dans le plan vertical est d'autant plus importante que la surface est étendue de part et d'autre de la fibre médiane. Une seconde façon de faire consiste à générer une surface tubulaire tout au tour de la fibre médiane de l'arc. Ainsi les ressources sont réparties uniformément autour de la fibre médiane de l'arc sans préférence pour une composante de l'inertie plutôt qu'une autre.

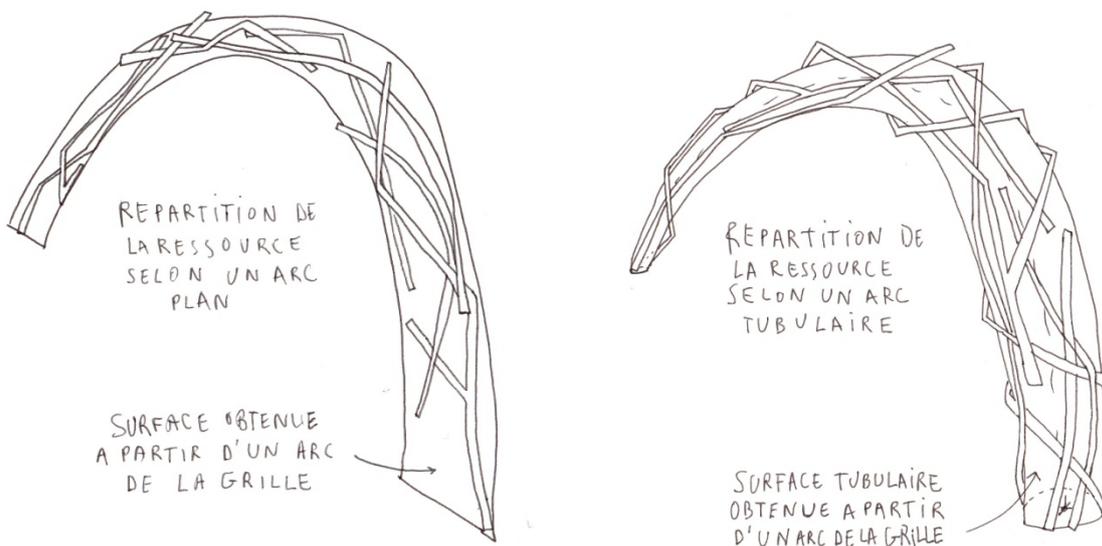


Figure 25 : répartition de la ressource selon deux types d'arcs

3.1.3. La prise en compte des contraintes structurelles

3.1.3.1. Stabilité

La stabilité interne d'une structure résulte des assemblages qui sont réalisés entre les différents éléments rigides qui la constituent.

Dans le cas où les assemblages réalisés sont des ligatures, traduites sur le plan de la statique par des rotules, il faut alors s'intéresser à la triangulation structurelle qui doit avoir lieu entre les différents éléments de la structure pour en assurer la stabilité. La structure étant développée dans les trois dimensions de l'espace, la triangulation d'une partie de la structure ne constitue toutefois pas une condition suffisante pour en assurer la stabilité.



Figure 26 : système de liaison adaptable à des éléments de ressource, source : Orangerie de Chiddington

D'autres modes de liaison peuvent être envisagés : système de tige filetée boulonnée, système de platines en étau (figure précédente)... qui permettrait de supprimer certains degrés de liberté au niveau de la liaison. Des câbles peuvent également être ajoutés *a posteriori* entre certains nœuds judicieusement choisis pour stabiliser l'ensemble de la structure. Dans l'hypothèse où les liaisons seraient équivalentes à des encastremets, la stabilité interne de la structure est assurée à partir du moment où tous les éléments de la structure sont liés.

Une fois la structure constituée, un moyen de tester sa stabilité est de la soumettre à un logiciel de calcul de structure, si celui-ci est en mesure de calculer la matrice de rigidité de la structure à partir des données renseignées sur les liaisons, c'est que la structure est stable.

3.1.3.2. Résistance

La résistance des différents éléments de ressource employés rentre en compte dans l'élaboration de la structure pour pouvoir caractériser sa résistance finale aux efforts. Les éléments de ressources non-usinés présentent l'avantage de posséder une continuité intacte dans les fibres qui les constituent. Pour des bois de sections équivalentes, un élément non-usiné présente une résistance supérieure à celle d'un élément dont la continuité de certaines fibres est rompue.

La résistance des éléments permet de les répartir sur la surface de manière à créer une reprise des charges uniforme sur l'ensemble de la structure. La résistance des éléments est calculée à partir de leur géométrie et des caractéristiques du bois qui les constitue.

3.2. Démarche de mise en œuvre de la ressource

3.2.1. Démarche générale adoptée

La démarche adoptée pour la mise en œuvre est la suivante : les éléments de ressource fournis à l'algorithme sous la forme d'une liste sont traités les uns après les autres. Le classement de la liste peut être réalisé selon différentes relations d'ordre (encombrement, section, longueur de la fibre médiane principale...). Le traitement d'un élément de ressource aboutit à la détermination d'une position jugée optimale selon les critères de forme et de densité définis par le concepteur. Cette position est alors mémorisée et l'élément de ressource suivant dans la liste est traité à son tour.

Deux notions fondamentales pour la suite viennent d'être introduites, il s'agit des :

- critère de forme : ce critère juge de la proximité de l'ensemble de l'élément de ressource avec la surface à approcher représentant l'intention architecturale du concepteur. On nommera par la suite surface de référence cette surface.
- critère de densité : ce critère juge de la densité en éléments de ressource par unité d'aire sur la surface de référence. Ce critère permet de limiter le chevauchement des éléments de ressource et ainsi veiller à la répartition uniforme de ces éléments sur la surface de référence. De cette densité découlent des caractéristiques mécaniques de la structure et un moyen d'arrêter le processus lorsqu'une densité requise est atteinte.

Ces critères sont appliqués à une population de positions possibles pour un élément de ressource pour n'en retenir qu'une. La taille de la population de positions est déterminée par le concepteur, plus celle-ci est grande, plus la probabilité pour qu'elle contienne des positions très optimisées est grande (la définition de la population de positions est expliquée par la suite). La liste des positions est classée selon les critères précédemment évoqués afin d'en retenir le premier terme.

Le fait de ne retenir au final qu'une seule position est subjectif étant donné que la seconde position dans l'ordre de la liste classée peut s'avérer tout à fait différente et aussi intéressante que la première. On perd en ne retenant que la première position d'autres positions alternatives qui pourraient mener à des structures différentes que l'on pourrait alors comparer entre elles. Toutefois pour alléger l'algorithme, nous nous limiterons dans notre étude à ne retenir qu'une seule des positions.

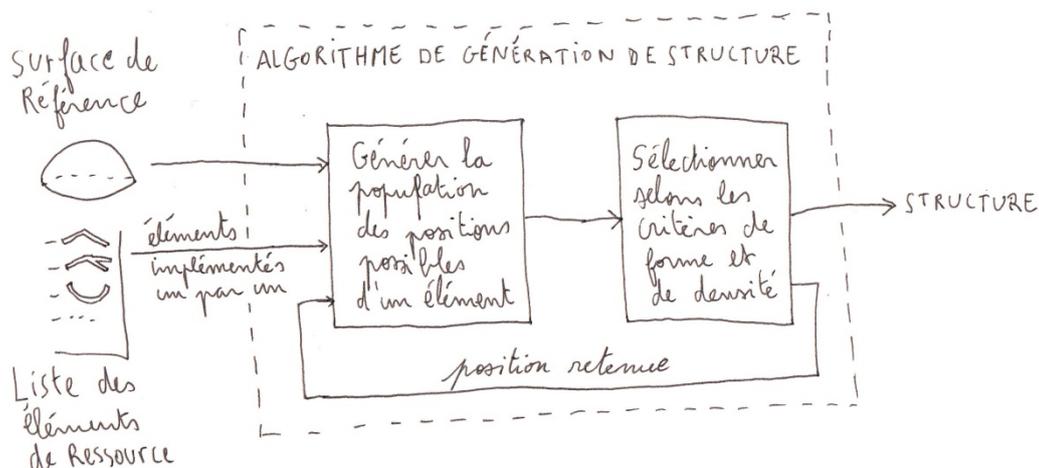


Figure 27 : schémas de principe de l'algorithme de génération de structure

La figure précédente du schéma de principe de l'algorithme générateur de structures illustre la démarche adoptée. Le fonctionnement théorique des opérateurs de positionnement et de sélection peut maintenant être présenté.

3.2.2. Le positionnement d'un élément de ressource

Le positionnement d'un élément de ressource par rapport à une surface de référence peut être traité de différentes façons mais aboutit dans la majeure partie des cas à maximiser ou minimiser une variable. Voici quelques possibilités envisagées :

- Observer les courbures en chaque point de la surface de référence et en chaque point de l'élément de ressource puis rechercher la position dans laquelle la différence moyenne entre courbures mesurées sur l'élément et celles mesurées sur la surface est la plus faible.
- Distribuer des vecteurs tangents le long de la fibre médiane de l'élément de ressource puis rechercher la position dans laquelle ces vecteurs se décomposent principalement selon des vecteurs tangents à la surface.
- Distribuer des points le long de la fibre médiane de l'objet et les projeter sur la surface puis rechercher la position dans laquelle la somme des distances entre chaque point de la ressource et son projeté est la plus faible.

C'est la dernière possibilité qui a été retenue et qui est développée par la suite en raison de sa simplicité par rapport aux deux autres possibilités. Le positionnement de l'élément de ressource ne pouvant pas être réalisé de manière continue afin d'observer l'évolution d'un critère, le choix a été fait de réaliser une recherche discrète. Cette recherche est réalisée sur l'étendue de la surface de référence et des positions possibles propres à l'élément de ressource.

Le modèle 3D de l'élément de ressource peut être orienté dans l'espace selon une infinité de positions. Le concepteur choisit un certain nombre d'angles de rotation prélevés à intervalles réguliers dans l'intervalle $[0^\circ ; 360^\circ]$. La série d'angles ainsi obtenue est appliquée à des rotations de l'élément de ressource selon chacun des trois axes du repère avec pour point fixe un des points de l'élément de ressource de manière à obtenir le maximum de configurations possibles.

Chacune des configurations possibles pour l'élément de ressource est ensuite disposée en chacun des points de destination déterminés sur la surface de référence. Une configuration de l'élément de ressource disposée en un point de destination de la surface de référence constitue une position possible. Jusque-là, rien ne permet de juger de la pertinence de la position obtenue, celle-ci étant évaluée par la suite. Il s'agit dans un premier temps uniquement de produire une population de positions. Le nombre d'individus de cette population est déterminé par le concepteur. On comprend aisément qu'en dessous d'un certain nombre d'individus, la probabilité pour trouver des positions intéressantes diminue fortement. A l'opposé, une population très nombreuse permet d'affiner le positionnement mais alourdit le flux d'informations à traiter.

Cette démarche décrite pour le positionnement sur la surface de référence peut être appliquée à des points de destination définis sur les éléments de ressource déjà placés, on parlera dans ce cas là de points d'ancrage. Ces points constituent sur le plan structurel des nœuds de liaison entre deux éléments de la ressource. Le positionnement de l'élément de ressource peut également être réalisé avec un couple de points de destination (points d'ancrage) par position déterminée sur les éléments de ressource déjà placés.

La démarche varie quelque peu dans ce dernier cas. Chacun des deux points de destination du couple reçoit un point de l'élément de ressource. Les deux points de destination créent un axe de rotation

autour duquel on génère un ensemble de positions possibles. La population de positions possibles est alors constituée de l'ensemble des positions générées par chaque couple de points de destination. Le couple de points de destination permet d'imposer la liaison entre deux éléments déjà placés par un troisième. Dans le cas où les deux éléments déjà positionnés sont liés l'un à l'autre, les lier chacun à un troisième élément commun permet d'obtenir un triangle rigide constitué de ces trois éléments.

Seront développées par la suite les deux façons de générer la population de positions possibles: à partir d'un unique point de destination ou à partir d'un couple de points de destination. Selon la façon de faire employée pour le positionnement de chaque élément de ressource, le mode de distribution de la ressource sur la surface de référence diffère.

Voici trois modes de distribution de la ressource :

- Chaque élément est positionné de manière optimale par rapport à la surface de référence à partir de points de destination situés sur la surface de référence. La liaison entre les éléments n'intervient donc pas dans ce mode de placement.
- Le premier élément est positionné comme indiqué au point précédent puis chaque élément suivant est positionné de manière optimale par rapport à la surface de référence cette fois-ci à partir de points d'ancrage localisés sur une ressource déjà en place. La structure se développe dans ce cas avec une liaison entre le nouvel élément de ressource et ceux déjà en place. Tous les éléments de structure sont donc liés à au moins un autre élément dans ce mode de distribution.
- Les deux premiers éléments sont placés comme indiqué au point précédent. Le troisième élément est positionné de manière optimale par rapport à un couple de points d'ancrage localisés sur les deux éléments de ressource déjà en place. Pour les ressources suivantes, elle sont disposées alternativement comme la seconde ou comme la troisième. Dans ce mode de positionnement, les éléments de ressource successifs sont positionnés alternativement avec un ou deux points d'ancrage sur les éléments déjà en place. Cette méthode n'assure toutefois pas une triangulation étant donné l'évolution de la structure dans les trois dimensions.

3.2.3. L'évaluation de la pertinence d'une position par rapport à différents critères

L'évaluation de la pertinence d'une position est effectuée par rapport aux deux critères présentés précédemment : le critère de forme (lui-même subdivisé en deux sous-critères qui sont l'appartenance à la surface et la proximité avec la surface de référence) et le critère de densité.

Premièrement, les positions dans lesquelles une partie de l'élément de ressource est hors de la surface de référence sont éliminées. Pour cela, un champ d'appartenance à la surface de référence sera défini par la suite. Ce premier critère permet d'effectuer un tri binaire dans la liste des positions possibles.

Ensuite, la densité de répartition des éléments de ressource est contrôlée lors de la mise en place de chaque élément de ressource sur la nappe. L'évaluation du critère de densité est réalisée par un processus de captation de points. On considère un champ d'influence autour de l'élément de ressource et on répartit uniformément sur la surface de référence une grande quantité de points. Selon la position dans laquelle l'élément de ressource est disposé, le nombre de points captés par son champ d'influence varie. Ainsi, les positions avantageuses du point de vue de la répartition uniforme de la ressource sont identifiables par le grand nombre de points captés. Les positions ne permettant pas de capter des points correspondent à des positions dans lesquelles la ressource recouvre de manière trop importante d'autres éléments de ressource déjà placés. Dans ce cas, la position n'est pas retenue.

La figure suivante illustre une situation où deux premiers éléments de ressource ont été disposés sur la surface de référence et l'on cherche à placer le troisième. Deux positions possibles sont présentées, la première ne permettant pas de capter des points ne sera pas retenue par l'algorithme contrairement à la seconde position qui permet de capter un grand nombre de points.

Une nouvelle liste de positions est créée avec l'ensemble des positions captant au moins un point. Si cette liste est vide, c'est que la surface de référence est recouverte d'une quantité d'éléments de ressource suffisante selon la densité définie par le concepteur. L'algorithme arrête à partir de ce moment là de générer la structure. Dans le cas où la liste n'est pas vide, elle est classée selon le nombre de points captés puis un certain pourcentage des positions captant le plus de points est retenu pour être soumis au critère suivant : le critère de proximité avec la surface de référence.

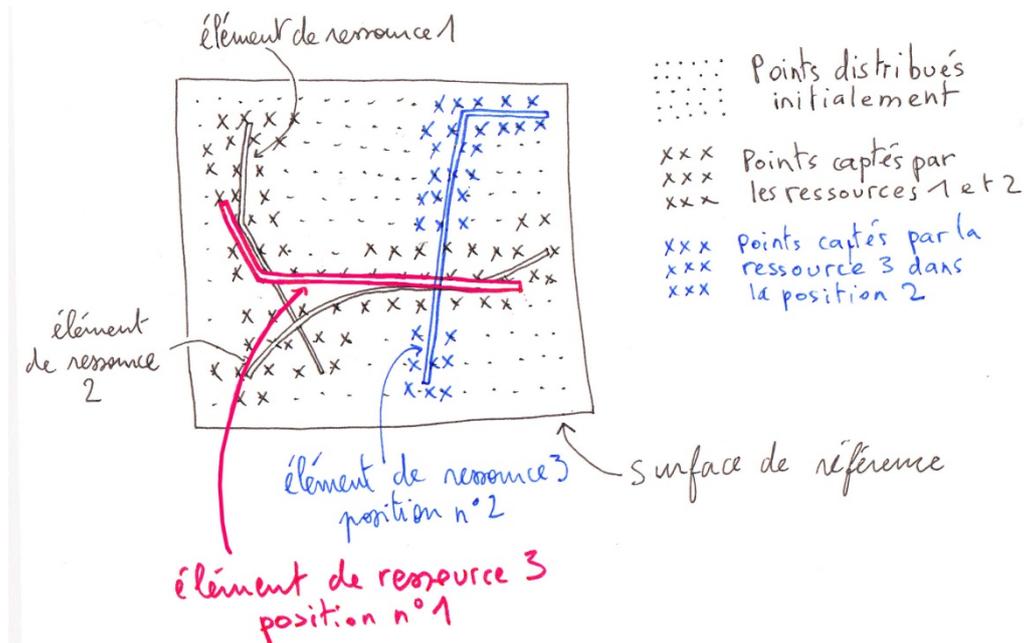


Figure 28 : Schéma de principe du critère de densité

Parmi les positions retenues par le critère précédent qui permettent l'expansion de la structure, on recherche maintenant celle optimisée selon le critère de proximité avec la surface de référence. La variable d'évaluation est obtenue de la façon suivante : on projette des points de la fibre médiane de l'élément de ressource sur la surface de référence puis on somme les distances entre chaque point et son projeté. Une somme faible correspond à une position qui épouse la surface de référence.

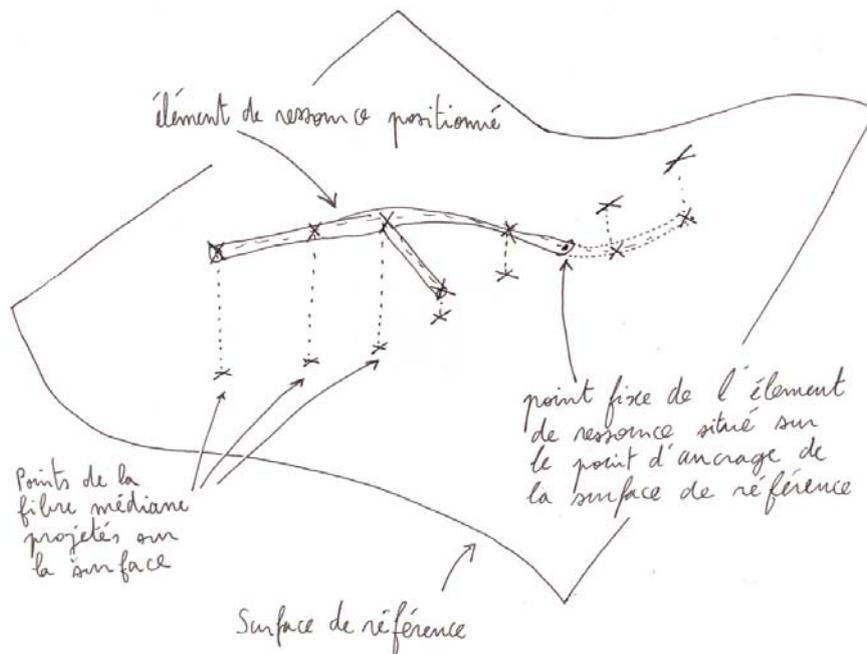


Figure 29 : schéma de principe sur l'évaluation du critère de proximité avec la surface de référence

Maintenant que les grands principes de l'algorithme ont été présentés, nous allons traiter de sa programmation dans l'environnement Grasshopper.

3.3. Programmation sous Rhinoceros/Grasshopper

La présentation de la programmation de l'algorithme commence par un point sur la structure générale adoptée et les différentes possibilités qu'elle offre. Ensuite sont détaillées les deux procédures de positionnement et d'évaluation. Enfin sont présentés quelques exemples de structures pouvant être obtenues.

Je profite du propos introductif pour définir une notion qui sera employée par la suite :

- *La densité de découpage* : afin d'obtenir des découpes donnant des portions d'une taille toujours équivalente quelle que soit la longueur de l'objet découpé, on introduit dans l'algorithme un paramètre de densité de découpage qui multiplié à la longueur de l'objet donne le nombre de portions à créer sur l'objet. Ainsi, un élément de ressource de 2m de long est découpé en deux fois plus de portions qu'un élément de 1m de long, le nombre de portions par unité de longueur est à déterminer par le concepteur. Ce paramètre peut être différent selon les opérations de découpage dont il s'agit (les découpes d'un élément pour obtenir des points fixes ou pour évaluer sa proximité avec la surface de référence peuvent être différents).

3.3.1. Structure générale de l'algorithme de génération

L'algorithme se construit comme la juxtaposition d'opérations consistant chacune à placer un élément de ressource. L'opération de placement se divise systématiquement en deux sous-opérations : la génération d'une population de positions et la sélection de la position optimale parmi cette population. Le concepteur possède la liberté d'organiser la succession de ces opérations comme il l'entend, chaque organisation traduisant des méthodes de mise en œuvre de la ressource différentes.

Par exemple, un concepteur qui souhaite imposer quatre points d'appui organise l'algorithme de la façon suivante :

- Les quatre premières ressources sont disposées non pas librement sur toute la surface de référence mais en quatre points d'ancrage avec le sol précisés par le concepteur.
- Les ressources suivantes sont disposées sur la surface de référence avec un ou deux points d'ancrage sur les ressources déjà positionnées.

Une autre possibilité consiste à définir différentes zones de densité sur la surface de référence pour organiser la répartition de la ressource. Enfin, les trois opérations : de positionnement libre sur la surface de référence, de positionnement avec un point d'ancrage sur un élément déjà positionné ou de positionnement avec un couple de points d'ancrage sur des éléments déjà positionnés, peuvent être appliquées par phases pour répondre à des intentions spéciales. La taille des éléments de ressource fournis à l'algorithme influe aussi sur le résultat obtenu.

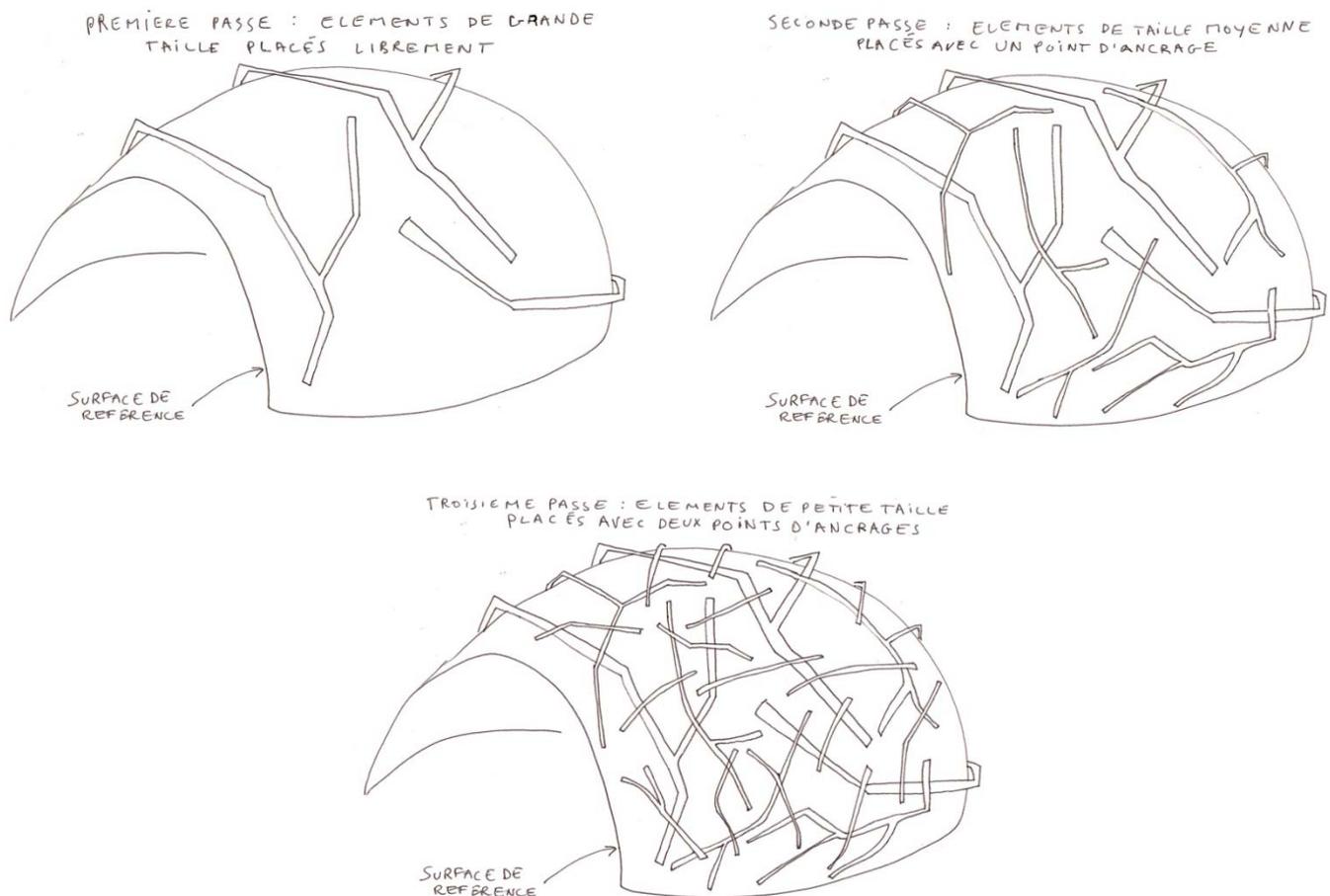


Figure 30 : schéma d'une organisation possible de l'algorithme

La figure précédente illustre un algorithme possible qui consiste en trois phases successives :

- Premièrement, placer de grands éléments de ressource librement sur la surface de référence, ce qui permet de placer au mieux des éléments de ressource contraignants. On part du principe que les éléments les plus grands sont les plus compliqués à placer, ce sont donc les premiers à placer.
- Deuxièmement, placer des ressources de taille moyenne avec un point d'ancrage sur les ressources précédemment placées

- Troisièmement, placer des ressources de petite taille avec deux points d'ancrages sur les ressources déjà positionnées. Ces dernières ressources viennent rigidifier la structure globale tout en adoptant des positions satisfaisantes selon le critère de forme du fait de leur petite taille.

L'algorithme ayant été présenté dans ses grandes lignes, je vais maintenant détailler les opérations de génération et de sélection des positions.

3.3.2. Processus de génération des positions

3.3.2.1. Cas d'un point de destination unique par élément de ressource

Le processus de génération des positions peut être schématiquement divisé en deux parties : la recherche des points de destination d'une part et l'orientation de l'élément de ressource dans différentes directions d'autre part.

Les points de destination sont des points disposés au niveau de la structure en cours d'élaboration, ils sont amenés à recevoir l'élément de ressource dans différentes positions. Ils peuvent être définis de différentes façons : sur la surface de référence ou sur des éléments de ressource déjà positionnés (auquel cas ils sont appelés point d'ancrage). Ils sont regroupés dans une liste. Notons p le nombre de points de destination.

La fibre médiane de l'élément de ressource à positionner est divisée selon la densité de découpage déterminée par le concepteur. Notons n le nombre de points résultant de ce découpage. Chaque point ainsi créé devient l'origine d'un repère local. L'élément de ressource est mis en rotation autour des trois axes de ce repère avec l'origine comme point fixe. On génère par ces rotations un nombre q de positions différentes ayant toutes un point en commun : l'origine du repère local. Nommons *bouquet* l'ensemble des q positions issues du même point fixe. Des *bouquets* de positions sont générés autour de chaque point fixe issu du découpage de la ressource. Il y a donc n *bouquets* de q positions pour un élément, soit nq positions.

L'objet virtuel qui représente l'élément de ressource est modélisé dans le même repère que la surface que l'on cherche à approcher. Un opérateur de Grasshopper permet de translater les objets dans ce repère global. Les *bouquets* sont déplacés sur la surface de référence tels que le point fixe et le point d'ancrage soient confondus. Chaque *bouquet* est placé sur tous les points d'ancrage répertoriés. Ainsi, chaque point d'ancrage se trouve affecté de n bouquets de q positions possibles pour l'élément de ressource. On obtient finalement une population de pnq positions possibles pour l'élément de ressource.

3.3.2.2. Cas d'un couple de points d'ancrage pour le même élément de ressource

Dans le cas où l'on souhaite que la ressource soit disposée sur la structure avec deux points d'ancrage sur deux éléments déjà positionnés, la démarche diffère de celle présentée au point précédent.

Les points d'ancrage possibles sur la ressource sont obtenus en découpant l'ensemble des fibres médianes d'éléments déjà positionnés selon la densité de découpage déterminée par le concepteur. Parallèlement la ressource est découpée selon sa fibre médiane principale uniquement. Seuls les second et avant-dernier points de ce découpage sont retenus. La distance entre ces deux points est notée d .

Les couples de points d'ancrage dont la distance d_a qui les sépare est inférieure à d sont retenus puis cette liste est ordonnée selon la distance entre les deux points du couple. Seulement un certain pourcentage des premiers couples de la liste est retenu pour la suite de l'algorithme. Ces couples de points d'ancrage permettent de générer des axes ancrés de rotation autour desquels sera générée la population de positions possibles.

Pour chaque axe ancré de rotation retenu, la démarche est la suivante : on recherche les points de la ressource à positionner se trouvant à la distance d_a des deux points fixes retenus puis l'on crée un axe fixe de rotation entre chaque point fixe et son point associé se trouvant à la distance d_a . On obtient ainsi deux axes fixes de rotation sur l'élément de ressource.

L'étape suivante consiste à placer l'élément de ressource sur la structure de façon à ce que l'axe fixe de rotation soit confondu avec l'axe ancré de rotation. L'opération est ensuite répétée pour chaque axe ancré de rotation. Finalement, les éléments de ressource positionnés autour de chaque axe sont mis en rotation pour générer la population des positions possibles.

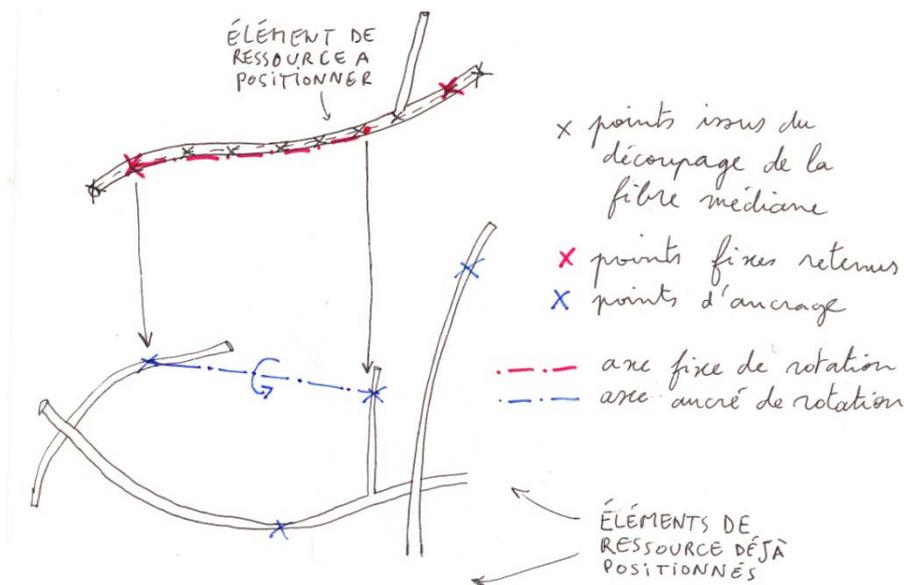


Figure 31 : placement d'un élément de ressource tel que les axes fixes et ancrés soient confondus

3.3.3. Processus de sélection d'une position

Le processus de sélection de la position optimale pour un éléments de ressource est divisé en trois tests successifs : le test d'appartenance à la surface de référence, le test de densité par rapport aux éléments de ressource déjà positionnés et enfin le test de proximité avec la surface de référence.

3.3.3.1. Le test d'appartenance à la surface de référence

Ce premier test permet d'éliminer les positions dans lesquelles l'éléments de ressource est pour partie disposé hors du champ défini par le concepteur. Ce champ est constitué de l'ensemble des points qui peuvent être projetés normalement sur la surface de référence. Ce test nécessite seulement les fibres médianes de la ressource positionnée : la fibre médiane principale et les fibres médianes des ramifications éventuelles.

Ce test est subdivisé en six tests identiques traitant chacune des fibres médianes. Dans le cas d'un élément de ressource ne possédant en plus de sa fibre médiane principale qu'une seule ramification, seulement les deux premiers tests sont actifs.

Le test d'appartenance pour une fibre médiane dont la position est figée par rapport à la surface de référence est constitué de la manière suivante :

- La fibre médiane est découpée en un nombre de portions dépendant de la densité de découpage définie par le concepteur. Une densité de découpage élevée permet de s'assurer qu'il ne se trouve pas une partie de la ressource hors du champ mais augmente le flux d'informations traité par l'algorithme. Il convient donc de ne pas placer la sensibilité de dépassement du champ trop haute pour ne pas ralentir le programme.
- Les points issus de ce découpage sont projetés sur la surface de référence. Les points se trouvant hors du champ défini précédemment sont projetés sur le bord de la surface.
- Un test booléen vérifie pour chaque point i produit par découpage si $\left| \frac{\vec{P_{ip}P_i}}{P_{ip}P_i} \cdot \vec{n} \right| = 1$ (cf. figure suivante).

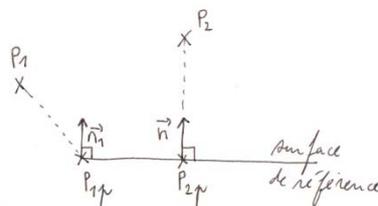


Figure 32 : Schéma de deux points projetés sur la surface de référence

- Si la somme des résultats donnés par le booléen est différente du nombre de points produits par le découpage, la fibre médiane est considérée hors champ.

Les tests des différentes fibres sont réalisés en série, la liste des positions est soumise tout d'abord au test d'appartenance de sa fibre médiane, une nouvelle liste est créée en ne conservant de l'ancienne seulement les positions dans lesquelles la fibre médiane principale appartient au champ de la surface de référence.

3.3.3.2. Le test de densité

La première opération de ce test consiste à répartir uniformément sur la surface de référence une certaine quantité de points. Le test de densité consiste à comptabiliser dans une position donnée, le nombre de points se trouvant au plus à une certaine distance de l'élément de ressource : ces points seront dit *captés* par l'élément de ressource. La distance au-dessous de laquelle le point est capté est prise proportionnelle à la surface de la section de l'élément de ressource. Le test est subdivisé selon les portions élémentaires de l'élément de ressource. Les cinq portions élémentaires principales éventuelles sont traitées ensemble, puis les cinq portions élémentaires ramifiées sont traitées l'une après l'autre par un test identique.

Je présente tout d'abord la partie du test qui se répète pour chaque portion élémentaire :

- La fibre médiane de la portion élémentaire est projetée sur la surface de référence.
- L'aire de la section de cette portion élémentaire est retrouvée à partir du volume extrudé que comporte le modèle 3D de l'élément de ressource.
- L'aire est multipliée par un coefficient à déterminer par le concepteur pour obtenir une distance d_c au-dessous de laquelle les points sont captés.
- Tous les points qui n'ont pas encore été captés, soit par les ressources précédemment mises en place, soit par les portions élémentaires précédemment testées du même élément de ressource, sont projetés sur la fibre médiane projetée de la portion élémentaire.

- Les distances obtenues entre chaque point de la surface de référence et son projeté sont comparées à la distance d_c . Les points pour lesquels la distance est inférieure à d_c sont *captés*.

Pour les portions élémentaires principales, la difficulté découle de la structuration du modèle virtuel 3D de l'élément de ressource. Les fibres médianes des portions élémentaires principales sont jointes l'une à l'autre pour ne constituer qu'une seule ligne courbe. Pour autant, les parties extrudées des portions élémentaires principales restent indépendantes. Il s'agit donc de retrouver le découpage de la fibre médiane principale selon les portions élémentaires qui la constituent.

La fibre médiane d'une portion élémentaire est définie comme le chemin parcouru par le centre de gravité de la section lorsque celle-ci est extrudée. On retrouve donc avec les parties extrudées des portions élémentaires principales les points de la fibre médiane principale correspondant au découpage élémentaire. Ainsi, on peut déterminer pour chaque portion élémentaire retrouvée de fibre médiane principale la distance d_c .

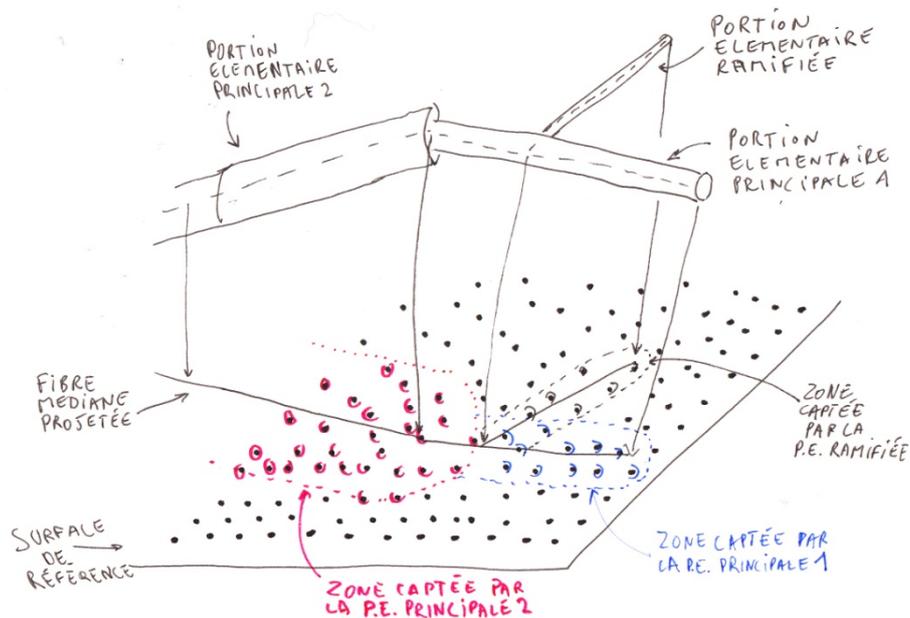


Figure 33 : schéma des points captés par chaque portion de l'élément de ressource

Les résultats du nombre total de points captés par toutes les portions élémentaires de l'élément de ressource dans chaque position permet d'effectuer un classement et de n'en retenir qu'un certain pourcentage qui sera soumis au test suivant. Une fois que la position optimale a été choisie, la liste des points qui n'ont pas été captés par l'élément dans cette position est transmise au test de densité de l'élément de ressource suivant à placer. Ainsi, tant qu'il reste des points à capter, le processus de mise en œuvre de la ressource se poursuit.

3.3.3.3. Le test de proximité avec la surface de référence

Ce dernier test consiste à mesurer pour une position donnée la proximité entre les fibres médianes d'un élément de ressource et la surface de référence. Comme les deux tests précédents, ce test est subdivisé en six tests, cette fois-ci identiques, traitant chacune des fibres médianes de l'élément de ressource. Le test de proximité d'une fibre médiane est constitué de la façon suivante :

- La fibre médiane est divisée selon une certaine densité de découpage.
- Les points obtenus par le découpage sont projetés sur la surface de référence.
- Les distances entre chaque point et son projeté sont sommées.

Les sommes obtenues pour chaque fibre médiane sont finalement sommées et les différentes positions testées sont classées selon le résultat de la somme finale. La position pour laquelle la somme de ces distances est la plus faible correspond à celle dans laquelle la proximité entre l'élément de ressource et la surface de référence est la plus grande. C'est donc la première position qui sera retenue pour la suite de l'algorithme.

3.3.4. Exemple

L'exemple qui est présenté ici est réalisé avec une surface de référence en forme de coque et un stock de ressources qui sont prises toutes identiques pour faciliter le traitement. L'élément de base qui constitue le stock par sa répétition comporte une partie principale arquée à laquelle vient s'ajouter une ramification rectiligne. La ramification est hors du plan générée par la courbure de la partie principale. Le mode d'expansion choisi pour l'algorithme structurel est le suivant : placement libre du premier élément puis placement des autres éléments avec un point d'ancrage sur un des éléments déjà positionnés. Pour faciliter le traitement des données par l'algorithme j'ai imposé moi-même quelques points d'ancrage qui me semblaient judicieux.

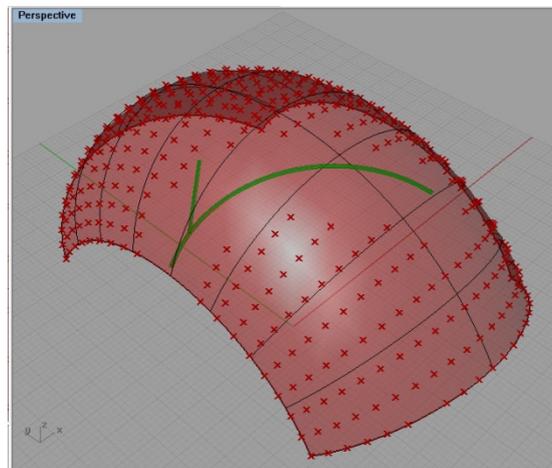


Figure 34 : positionnement du premier élément de ressource sur la surface de référence

Le premier élément de ressource (en vert sur l'illustration) est disposé de manière optimale sur toute la surface de référence. La partie principale de l'élément épouse la courbure de la coque tout en gardant la ramification dans le plan de la surface de référence. On peut observer les points qui n'ont pas été captés par le premier élément et qui vont servir à la répartition des suivants, ce sont les points matérialisés par des croix rouges sur la surface de référence. On remarque sur les figures suivantes que la quantité de points disponibles diminue à chaque fois qu'un élément de ressource est positionné.

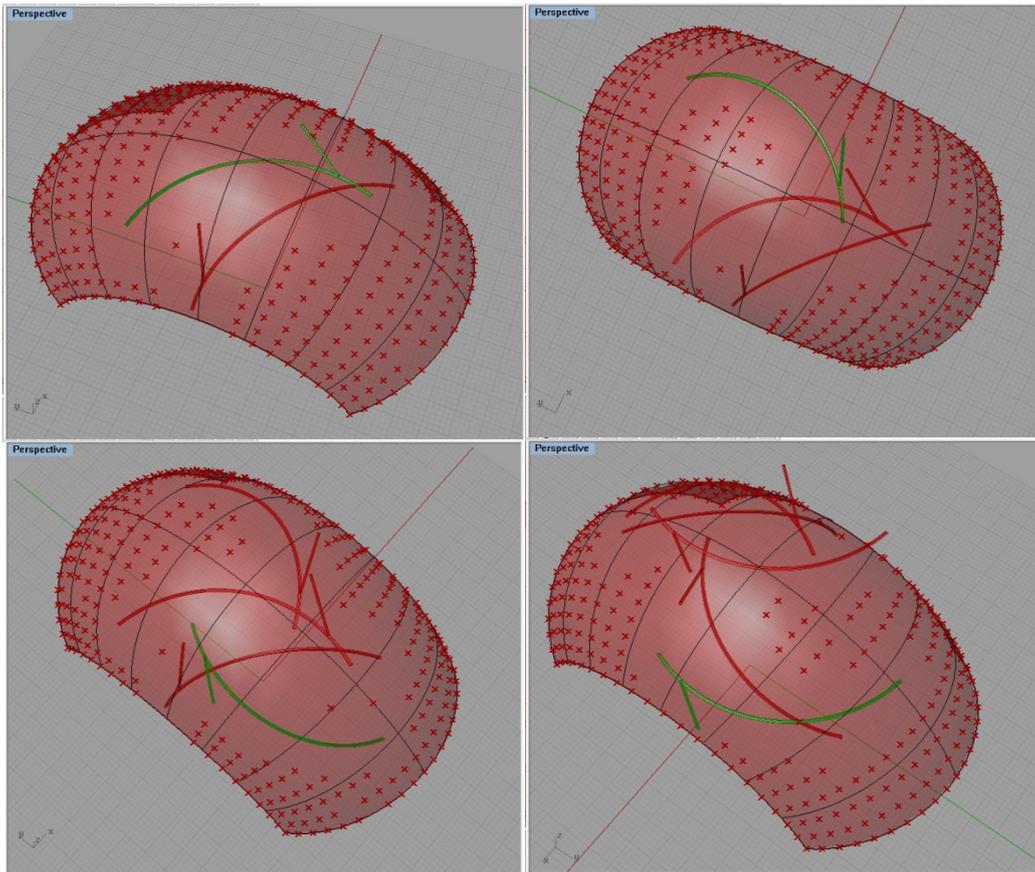


Figure 35 : positionnement des éléments 2, 3, 4 et 5 de la ressource

La figure précédente illustre le positionnement successif des éléments de la ressource. On peut observer leur répartition homogène selon la surface de référence. On obtient ainsi une structure reprenant la forme de coque de la surface de référence.

3.4. Conclusion

La génération de structure fonctionne sur le principe et peut être appliquée à des cas simples mais demande sur le plan informatique encore quelques perfectionnements à apporter pour rendre l'algorithme véritablement fonctionnel. La disposition des ressources sur la surface de référence se déroule correctement mais un point limitant apparaît : une fois les premières ressources disposées, si les points se situant entre deux éléments de ressource sont tous captés, il devient impossible de venir disposer un troisième élément en travers, ancré sur les deux éléments précédents.

Pour répondre à ce problème tout en préservant le système de vérification de la densité par captage de points, plusieurs distributions de points peuvent être réalisées. Les points de la première distribution sont captés comme dans l'exemple précédent. Les points de la deuxième distribution sont captés par les premières ressources avec cette fois-ci une distance de captage beaucoup moins élevée, ainsi, il apparaît des îlots de points entre les éléments de ressource de la première passe. Les points constituant les îlots peuvent alors être captés par les éléments de ressource de la seconde passe.

4. Conclusion

4.1. Bilan

La recherche de formes architecturales non-standards est source de réflexion en termes de techniques de construction. Dès qu'il s'agit d'approcher une forme organique ou quelconque éloignée des standards de la préfabrication, la réalisation qui suit demande la mise en œuvre de procédés constructifs novateurs. La production d'architectures ou du moins d'objets architecturaux détachés de toute matérialité s'est développée avec l'avènement du numérique et les possibilités toujours plus puissantes offertes aux concepteurs en termes de modeleurs 3D. Ce n'est pas sans poser des problèmes de constructibilité lorsque le projet est soumis aux ingénieurs. Lorsque le processus de conception est abordé ainsi de manière séquentielle, il arrive que les études techniques remettent en question la pertinence de certains choix formels. Les raisons peuvent être tout aussi bien de l'ordre du matériau inadapté à la forme que d'ordre financier (coût de production non envisageable pour la fabrication d'une particularité technique). Pour remédier à ce genre de désagrément, une solution consiste à prendre en considération la matière et la structure dès les prémices de la conception formelle.

L'objet des recherches relatées dans ce rapport est d'incorporer la ressource structurelle à l'exploration formelle architecturale et de produire un outil numérique capable d'assister le concepteur dans cette démarche. Je me suis intéressé tout particulièrement à la conception de structures non-standards à partir de ressources bois non-usinées. Le travail réalisé peut être observé selon deux aspects principaux, d'une part sur le plan de l'idée même du renversement de la séquence habituelle dans les procédés de construction, d'autre part sur l'application concrète dans l'élaboration d'un algorithme dans l'environnement Grasshopper.

Pour ce qui est de l'idée, la réflexion menée nous permet d'envisager des modes de construction performants basés sur l'emploi d'éléments en bois irréguliers. La réflexion s'arrête toutefois à la conception de la structure, la question de la peau n'est pas traitée. Le caractère spécifique de ce travail réside dans l'emploi d'éléments irréguliers déjà existants et non créés pour répondre au besoin spécifique de l'ouvrage. Cette démarche vise à générer à partir d'éléments existants la capacité constructive la plus grande, à concevoir en limitant au maximum les opérations industrielles.

Pour ce qui est du développement de l'algorithme générateur de structures dans l'interface Grasshopper, les possibilités offertes par Grasshopper présentent un véritable intérêt en terme d'interactivité et de malléabilité pour l'utilisateur. Cependant, le traitement des informations dans Grasshopper qui se fait de manière linéaire et sous forme de liste rend l'optimisation de l'algorithme difficile et le flux d'informations à traiter lourd pour l'ordinateur. On pourrait envisager de coder l'algorithme dans un langage de programmation (VB, C++...) qui permette de fonctionner avec des boucles récursives une fois que celui-ci serait affiné afin de l'optimiser. Toutefois, cela ne reviendrait-il pas à figer l'algorithme, qui ne serait dès lors plus réutilisable pour tout autre projet qui demande forcément un affinage différent ?

4.2. Perspectives

Les travaux développés précédemment ne traitent pas certains aspects proches du problème comme la démarche de montage de la structure, le calcul au éléments finis des performances mécaniques de la structure ou l'adaptation d'une peau. Ce dernier point a pour but d'éclairer les perspectives envisageables pour la suite.

4.2.1. Fabrication

Une fois la structure constituée virtuellement dans l'environnement du modéleur 3D, il s'agit de fournir les informations qui seront nécessaires à l'assemblage des éléments de la ressource. Les éléments étant existants au préalable de la phase de conception, il faut obtenir en sortie de l'algorithme les repères pour positionner ces éléments les uns par rapport aux autres dans l'espace.

Dans le cas des éléments dont la longueur est grande devant les autres dimension, le placement se limite à la fibre médiane. Pour chaque fibre médiane, l'algorithme fournis les coordonnées linéaires des nœuds créés associées à un numéro de nœud. L'assemblage manuel des ressources est ensuite réalisé en reportant les nœuds sur les ressources puis en les disposants de façon à faire correspondre la numérotation des nœuds.

Pour cela, il faut garder en mémoire dans l'algorithme les points d'ancrage retenus pour former les nœuds de la structure puis les localiser le long de la fibre médiane. La fibre médiane est conçue dans l'algorithme telle que les points de coordonnée linéaire 0 des fibres médianes des parties principale et ramifiées sont le point d'origine de la première portion élémentaire principale et les points d'origine des portions élémentaires ramifiées. Ce paramétrage permet de fournir la distance parcouru sur la fibre médiane entre le point d'origine et le nœud que l'on souhaite localiser.

4.2.2. Calcul aux éléments finis des performances structurales

Le logiciel de calcul de structure RDM6 fonctionne à partir de points localisés dans l'espace. Il génère ensuite des barres entre les points indiqués par l'opérateur selon les caractéristiques de section et de type de liaison renseignées. Le transfert des informations depuis le modèle 3D disponible dans Rhinoceros vers RDM6 est développé en parallèle au CRAI dans les travaux de David Davalos et Nicolas Jacob.

Le travail à réaliser consisterait à programmer l'algorithme pour récupérer en sortie de celui-ci les coordonnées des nœuds de la structure associés au section des barres qui doivent modéliser l'élément de ressource dans RDM6.

4.2.3. L'adaptation d'une peau

La structure peut posséder des points en périphérie susceptibles de supporter une toile tendue. La connaissance précise de part la modélisation 3D des points stratégiques de la structure permet de produire une toile aux dimensions spécifiques de la structure xylo-textile à construire. Une facettisation peut également être envisagée avec des panneaux rigides (contre-plaqué, verre, polycarbonate) mais leur production serait source de pertes de matière étant donné les formes irrégulières qu'ils devraient adopter. La figure suivante présente l'exemple d'une résille recouverte de facettes en verre. Dans ce cas, la production paramétrique de l'ouvrage permet d'y adapter des facettes de dimensions identiques à l'exception de celles se trouvant en bordure.



Figure 36 : Orangerie de Chiddingfold, résille bidirectionnelle recouverte de facettes en verre,
 source : www.carpenteroakandwoodland.com, arch. Peter Hulbert

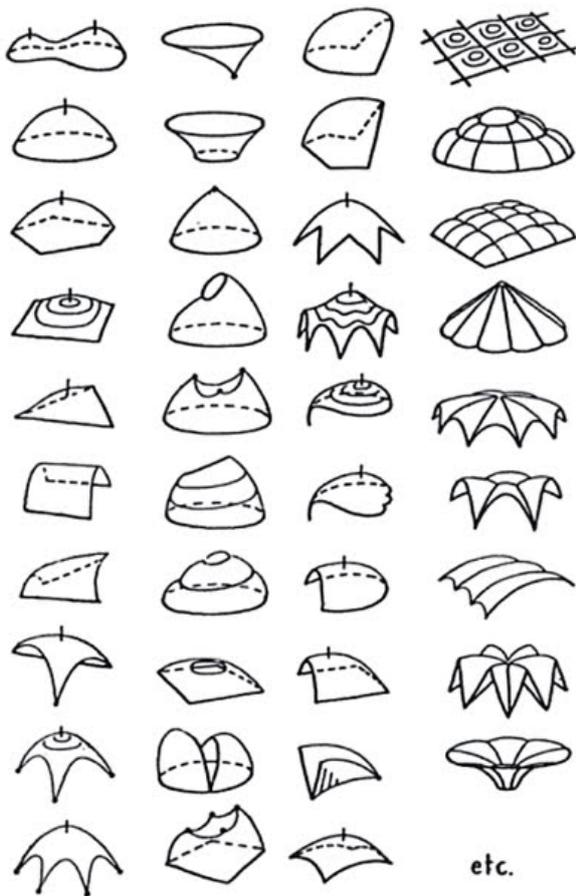


Figure 37 : dessins de Heinz Isler

Finalement, la recherche d'une forme architecturale cohérente et économique sur le plan environnemental doit pouvoir se faire sans sacrifier l'aspect sensible et esthétique inhérent d'une production architecturale intelligente. Les dessins de Heinz Isler viennent clôturer mon propos et rappeler l'étendue des possibles en matière de formes intégrant la réalité mécanique des choses.

Bibliographie

CIBLAC Thierry. Conception paramétrique en fonction d'éléments standard. Application à des systèmes d'éléments de longueur constante. SCAN'10, Marseille, décembre 2010.

MARIN Philippe, BIGNON Jean-Claude, SHADKHOU Shaghayegh, WETZEL Jean-Paul. *From nature to manufacture.* International Symposium File to factory : The design and fabrication of innovative forms in a continuum, Chania, Crete, Greece, 3-4 September 2009.

KOLAVERIC Branko. Computing the Performative in Architecture. Dans Digital Design, Proceedings of the ECAADE 2003 Conference, Graz, Austria, 2003.

SINOQUET H., RIVET P. et GODIN C. Assessment of the three-dimensional architecture of walnut trees using digitising. 1997.

KOTNIK Tony. Algorithmic Architecture. Introduction to the MAS Colloquia 2006/07, EHT Zurich, Swiss.

STANTON Christian. Digitally Mediated Use of Localized Material in Architecture. Sigradi 2010, Bogota, Nov 2010.

GEORGIU Odysseas. Interactive Structural Analysis. CAAD Futures 2011 : Designing Together, ULg, 2011.

NILSSON Fredrik. New technology, new tectonics? On architectural and structural expressions with digital tools. Tectonics Making Meaning.

OXMAN Neri. Material-based design computation : Tiling behavior. ACADIA09, Chicago, oct 2009