



**Elaboration d'un modèle paramétrique  
d'assemblages bois pour le calcul des structures  
non standard.**



## Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui ont pris un peu de leur temps pour contribuer à la conduite de ce travail, par leurs conseils, leur aide ou leurs corrections.

Je remercie particulièrement :

Monsieur Giles DUCHANOIS, directeur de stage, qui s'est beaucoup investi pour que cette expérience soit des plus positives et des plus enrichissantes, sans hésiter à empiéter sur son temps personnel.

Monsieur Jean-Claude BIGNON, professeur et responsable de ce master, qui grâce à son investissement, ses conseils et ses précieuses références, a contribué à l'orientation et à l'avancement de ce travail.

Shaghayegh SHADKOU qui s'est toujours montrée disponible pour partager ses recommandations et ses observations.

David DAVALOS avec qui j'ai collaboré et partagé mon bureau dans la bonne humeur

Tous les membres du CRAI pour leur accueil chaleureux dans leurs locaux.



# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Problématique</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Etat de l'art</b> .....	<b>11</b>
1.	Les travaux pédagogiques .....	11
1.	1. IBOIS Lausanne .....	11
2.	2. Université technique de Munich .....	12
2.	Travaux de recherche .....	13
1.	1. Université de Bath .....	13
2.	2. Massachussetts Institute of Technology .....	14
3.	Les réalisations majeures .....	15
1.	1. Centre Pompidou Metz .....	15
2.	2. Parasol urbain Séville.....	16
4.	Les travaux de référence .....	17
1.	1. Classification des assemblages.....	17
2.	2. Ouvrage sur le thème des assemblages .....	18
5.	Regard critique et orientation du travail.....	19
<b>4</b>	<b>Notion d'assemblage</b> .....	<b>20</b>
1.	Un assemblage ?.....	20
1.	1. Définition .....	20
2.	2. Notion d'élément parent et d'élément fils .....	20
2.	Cinématique et assemblages.....	21
1.	1. Principe.....	21
2.	2. Notion d'hyperstatisme et d'isostatisme .....	22
3.	3. Les liaisons usuelles utilisées en mécanique.....	23
3.	Autres variables mécaniques .....	25
1.	1. Principe.....	25
2.	2. Le Jeu .....	25
3.	3. La raideur.....	26
4.	4. Comportement du glissement d'assemblage.....	27
5.	5. Le rendement .....	28
4.	Particularité des assemblages bois .....	29

1.	Glissement d'assemblage .....	29
2.	Rendement .....	29
5.	Vérification de la stabilité.....	29
1.	Principe.....	29
2.	Méthode des éléments finis.....	30
<b>5</b>	<b>Paramétrisation des assemblages bois .....</b>	<b>31</b>
1.	Structure du modèle .....	31
1.	Principe.....	31
2.	Classe de liaison.....	32
3.	Famille technologique .....	33
4.	Les Liaisons .....	35
2.	Méthode de paramétrisation des assemblages .....	37
1.	Principe.....	37
2.	Cinématique .....	38
3.	Mécanique.....	41
4.	Morphologie et technologie.....	45
5.	Mise en forme du modèle .....	47
<b>6</b>	<b>Programmation.....</b>	<b>49</b>
1.	Stratégie .....	49
1.	Principe.....	49
2.	Outils .....	50
2.	Codage de l'information.....	51
1.	Principe.....	51
2.	Cas particuliers .....	52
3.	Base de données .....	53
1.	Structure de la base de données.....	53
2.	Fonctionnement .....	54
4.	Grasshopper .....	55
1.	Le modèle géométrique .....	55
2.	Préparation du modèle géométrique.....	57
3.	Procédures.....	57
5.	Pré –traitement .....	60
1.	L'outil.....	60
2.	Procédures.....	60
6.	RDM6.....	63

1.	Ouverture du fichier .....	63
2.	Calcul et résultats .....	63
<b>7</b>	<b>Expérimentation .....</b>	<b>65</b>
1.	Les projets .....	65
1.	La vague .....	65
2.	Yeoju Golf club .....	66
2.	Paramétrisation des assemblages .....	67
1.	La vague .....	67
2.	Yeoju Golf club .....	68
3.	Géométrie et affectation des assemblages .....	69
1.	La vague .....	69
2.	Yeoju Golf club .....	70
4.	Post-traitement et calculs sur RDM6 .....	71
1.	La vague .....	71
2.	Yeoju Golf club .....	73
<b>8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>75</b>
1.	Objectifs atteints .....	75
1.	La méthode de paramétrisation .....	75
2.	La programmation .....	75
2.	Travail à poursuivre .....	76
1.	Paramétrisation des assemblages .....	76
2.	Base de données .....	76
3.	Post traitement .....	76
4.	Représentation .....	76
3.	Les limites .....	77
1.	Les outils .....	77
2.	Les connections entre logiciel .....	77
4.	Les perspectives .....	77
1.	Conception paramétrique .....	77
2.	Optimisation .....	77
<b>9</b>	<b>Glossaire .....</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>Table des illustrations .....</b>	<b>81</b>
<b>11</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>85</b>

1. Livres.....	85
2. Articles.....	85
3. Cours.....	86
4. Site web.....	86
<b>12 Annexes .....</b>	<b>87</b>
1. Schéma conceptuel général .....	87
2. Détail des résultats de l'analyse structurelle de la vague .....	89
1. Détail des résultats de l'analyse structurelle du golf club de Yeosu avec encastrement.....	91
2. Détail des résultats de l'analyse structurelle du golf club de Yeosu avec pivot en Z .....	93

# Introduction

## I

Ce travail se situe dans le cadre du stage de recherche du master design global « Architecture Modélisation et Environnement » effectué au laboratoire du CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie) à Nancy.

Un des axes de recherche de ce laboratoire concerne la « simulation de la construction des bâtiments ». A l'intérieur de cet axe, ce travail se place au sein d'un champ de recherche portant sur « l'élaboration de modèles et d'outils d'aide à la conception architecturale ». Plus précisément, l'étude porte sur la création d'un **modèle paramétrique d'assemblages bois pour le calcul des structures non standard**<sub>1</sub>.

Cette étude s'insère dans la thèse de Shaghayegh Shadkou portant sur la mise au point d'un « modèle paramétrique pour la conception des structures bois non standard ». Le stage s'est déroulé sur une durée de cinq mois et les avancées et les résultats obtenus à l'issue de ce travail sont consignés dans ce rapport.

Dans un premier temps une présentation du contexte de l'étude permettra de mieux cerner les enjeux en termes de conception de géométrie non standard et permettra de mieux situer la problématique au sein des grands axes de recherche et de développement actuels.

Une explication des principales notions mécaniques et calculatoires des structures et des assemblages permettra de mieux comprendre l'intérêt et l'objet de ce travail. Cette partie définira les principaux concepts et les grandes variables qui seront employés dans la suite de l'étude.

Il sera alors possible de présenter et de décrire le modèle paramétrique proposé pour répondre aux attentes liées au calcul des structures non standard dans le contexte posé par le cadre d'étude. Ce modèle est le centre de ce travail et cette partie sera développée de manière approfondie.

Il sera ensuite fait état du développement informatique nécessaire pour constituer le support de ce modèle et permettre de l'exploiter. Cette partie présentera donc les outils et les précautions d'utilisation du protocole informatique élaboré.

Afin de montrer le fonctionnement du modèle et de son support informatique, une expérimentation sur deux réalisations architecturales permettra de mettre à l'épreuve le travail de développement effectué.

Pour conclure, un résumé des objectifs atteints et des limites de l'étude permettra de rendre compte du travail restant à accomplir et dégagera les perspectives qui s'ouvrent en termes de conception à l'aide de modèle paramétrique.

## Problématique

### 2

Avec l'émergence des outils numériques, de nouvelles formes dites « non standard » deviennent accessibles aux architectes et aux designers. Aujourd'hui, la performance des modeleurs 3d offrent la possibilité de générer et de visualiser facilement des formes complexes qui, hier encore, auraient nécessité un grand effort intellectuel. Si ce vocabulaire formel est aujourd'hui à la portée des concepteurs d'espace, des plasticiens et des architectes, il constitue un réel challenge pour ceux qui travaillent à sa matérialisation. Cette question de la réalisation à coûts non excessifs, dans une durée qui approche celle des projets « standards » et qui ne nécessite pas un déploiement de moyen hors du commun est au centre des réflexions. En effet ce sont les avancées dans ces domaines qui permettent une diffusion voir une démocratisation de ces procédés de conception, générateurs du langage et des espaces de l'architecture du XXI ème siècle.

Mais les géométries non standard bouleversent la manière dont on approche la conception. Dans ce type de projet, les considérations techniques et les choix constructifs doivent être pris en compte en parallèle du design des espaces et de la recherche de la forme. Avec les nouveaux outils de représentation et de modélisation 3D paramétrique, il est plus facile de régler et de faire évoluer un projet. Cependant, bien qu'ils soient d'une grande souplesse et faciles à manier pour générer une géométrie, l'intégration de module de calculs n'en n'est qu'à ses balbutiements. De plus, le calcul structurel et l'analyse statique des ossatures non standards obligent l'utilisation d'outils mathématiques avancés. A cause de la complexité de la géométrie, les méthodes graphiques seraient trop imprécises et trop difficile à utiliser.

Ces méthodes de calculs nécessitent de posséder des informations précises sur la géométrie et sa cinématique. C'est-à-dire qu'en plus d'avoir besoin de savoir quelle forme a l'édifice et de quelle nature sont ses éléments structuraux il faut aussi connaître ses liaisons. Bien que le choix des assemblages soit souvent laissé aux ingénieurs dans les structures standards, leur impact est très important sur tout type d'ossature. Dans les projets non standards, Ils peuvent avoir de grosses conséquences sur la morphologie et le coût du projet.

Ce travail vise donc à dégager les informations les plus utiles au calcul des ossatures à travers les assemblages afin de mieux les prendre en compte dans le processus de conception. Pour cela, l'étude se limitera à la construction dans le domaine du bois afin d'éviter qu'elle ne se disperse sur un champ de recherche trop vaste. Elle doit donc aboutir à **l'élaboration d'un modèle paramétrique d'assemblages bois pour le calcul des structures non standard.**

# Etat de l'art

3

## Les travaux pédagogiques

3.1

3.1.1

IBOIS lausanne

**IBOIS laboratoire des constructions bois de l'école polytechnique de Lausanne, Suisse :**  
**« étude de structures historiques exceptionnelles » 2009** sur la Multihalle Mannheim de *Frei Otto* par les étudiants *V.Lucas, L.Meyer, S.potier, P.Ho, S.Feller, L.Lopez, J-B Luyet, M.Delmenico* et *R.Thiébaud*

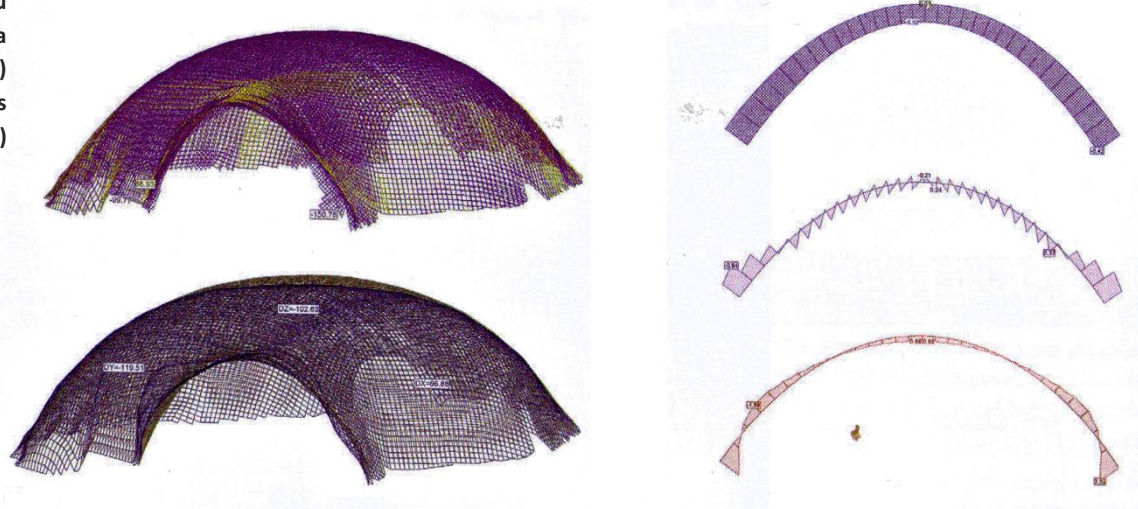
Dans le cadre d'un atelier pédagogique composé d'étudiants en architecture et en génie civil, l'exercice propose de revisiter un bâtiment emblématique de l'œuvre de *Frei Otto* 40 ans après sa construction. Les étudiants devaient utiliser l'outil informatique afin de produire un modèle permettant de redessiner et de pré-dimensionner la structure.

Ce bâtiment est constitué d'une nappe de plusieurs couches de petites sections de bois. Sa modélisation a été réalisée à l'aide de la projection d'une grille<sub>11</sub> sur une surface afin de produire une géométrie en trois dimensions. Cette géométrie a été calculée par les étudiants ingénieurs à l'aide d'outils mathématiques basés sur la méthode des éléments finis.

Les étudiants ont donc du reformuler les hypothèses structurelles pour aboutir à un modèle informatique permettant de recalculer la structure. Ils ont pu ensuite comparer leurs résultats avec la réalisation construite et se sont rendu compte que les sections prévues étaient bien plus grandes que celles employées en réalité.

Néanmoins leur travail a permis de mieux saisir les enjeux et les variables qui entrent en ligne de compte dans le calcul de ce type de structure ainsi que l'apport que peut constituer l'outil informatique dans le contexte de la conception de géométries non standards. Malgré les différences de résultats obtenus il est important de rappeler que ce travail s'est déroulé sur une durée de quatre semaines seulement.

Figure 1 vue du modèle de la structure (gauche) et visualisation des efforts (droite)



**Université technique de Munich, Allemagne : « Escaping the model scale » (Au delà de l'échelle du modèle) 2010.** Stephan Kaufmann, Gerhard Schubert, Frank Petzold .

Partant du constat que beaucoup de réalisations conçues à partir de logiciels de modélisation paramétrique aboutissent à des œuvres élaborées selon des critères formels, les enseignants de la TU de Munich ont décidé de lancer un nouveau programme d'étude. Leur but est de former leurs étudiants pour utiliser le potentiel de l'outil informatique afin de concevoir des systèmes constructifs en accord avec un concept architectural. Pour eux, la clé de l'invention réside dans les assemblages. Leur influence sur la morphologie, la stabilité, la préfabrication et le montage est source de solution.

L'enseignement mis en place vise à aborder le projet d'une manière globale en prenant en compte les assemblages et les détails constructifs très tôt dans la conception. Après une série de cours et d'exercices sur la chaîne de transmission de l'information entre logiciel CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing) et fichiers de pilotage de machines à commandes numériques, les étudiants avaient à réaliser plusieurs maquettes de projets permettant de restituer leurs connaissances tout juste acquises. L'une d'entre elles, la « Wave 0.18 » a été sélectionnée pour être construite à l'échelle 1 :1. Cette structure se présente comme un maillage orthogonal ondulant et se déformant pour s'appuyer au sol.

L'équipe d'étudiants et d'enseignants devait relever le défi de mettre en application le contenu de leur cours pour la réalisation de cet objet de 20x10x5m dans des délais très serrés. Pour cela, la première étape consista à élaborer un modèle paramétrique de la structure permettant de faire varier la grille d'arc, le matériau, les sections des profils et les assemblages pour optimiser le poids, la réalisation et la rigidité de l'ossature. Une fois le modèle réglé, ses informations ont permis de constituer les fichiers nécessaires au pilotage des machines et en cinq jours, la structure a pu être découpée dans des grands panneaux de contreplaqué en pin. Le montage des différents éléments usinés n'a pris que huit heures permettant de relever le challenge avec une équipe de cinq personnes.

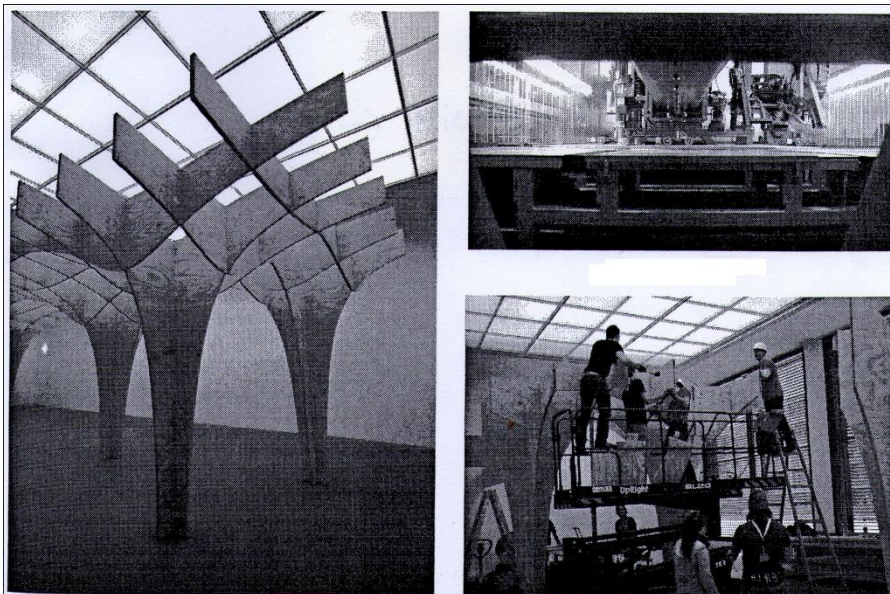


Figure 2 vue de la structure "Wave 0.18" (gauche) et vue du montage (droite)



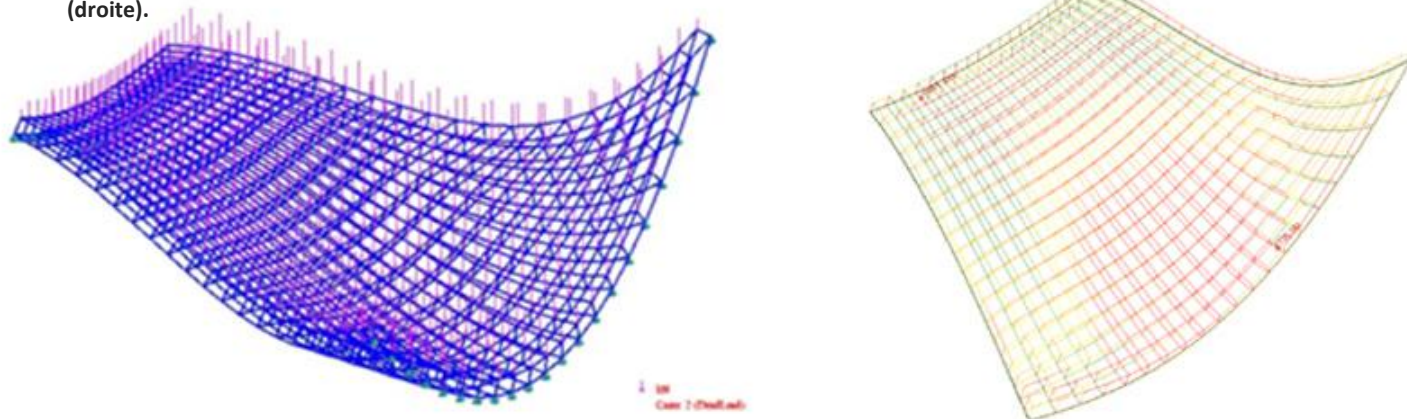
Université de Bath, Grande-Bretagne : Analyse structurelle interactive par GEORGIU Odysseas 2011

Dans une problématique assez proche de celle que l'on a choisie de développer dans cette étude, c'est-à-dire l'aide à la conception de forme non standard, Georgiou Odysseas de l'université de Bath tente de mettre au point des outils permettant d'intégrer l'étude structurelle à la génération de la géométrie.

Dans le contexte actuel de rapprochement entre architectes et ingénieurs dans la collaboration autour de la conception des formes non standard, ce travail vise à créer des outils permettant un partage plus facile des données. Le problème soulevé ici est que le manque de liens dans le partage des données entre modeleurs 3D et processeurs de calcul est à l'image du manque de liens entre architectes et ingénieurs. Pour palier à ce vide, ce travail propose d'établir une connexion interactive entre un outil de génération de géométrie et un outil de calcul structure. Cet échange de données doit permettre une visualisation dynamique de l'impact des déformations géométriques sur le stress de la structure.

Le modèle élaboré utilise des surfaces **NURBS<sub>2</sub>** sur lesquelles est projetée une grille. Cette grille servira de support à la modélisation d'une structure tridimensionnelle. Les données géométriques de cette structure alimentent un module de calcul qui réinjecte les résultats dans le modeleur. Ces résultats sont alors traités pour permettre d'être visualisés dans l'environnement de modélisation. Le but de cette manipulation est d'avoir un retour direct des conséquences mécaniques et structurelles qu'entraîne une modification de la géométrie afin de rationaliser et d'optimiser le temps passé à la recherche de la forme.

Figure 3 Analyse structurelle du modèle sur robot (gauche) et visualisation du stress de la structure sur Grasshopper (droite).



### 3.2.2 Massachusetts Institute of Technology

#### MIT, Usa : « Materializing a Design with Plywood » (Construire avec des panneaux de bois)

par Lawrence Sass<sup>1</sup>, Dennis Michaud<sup>2</sup> et Daniel Cardoso Digital Design and Fabrication Group  
Department of Architecture 2005/2007

Dans ce travail Sass Lawrence revisite la conception et la fabrication de forme standard avec une sensibilité plus contemporaine sur l'utilisation des matériaux et des moyens techniques. Habituellement, les structures bois utilisant des panneaux agglomérés ou contre plaqués sont assemblées à l'aide de connecteurs métalliques et de vis et couplés à des éléments en bois massifs pour former les différentes parois d'une ossature. Ces parois sont assemblées à leur tour, pour constituer une charpente. Sass Lawrence remarque que bien souvent, les jonctions entre les différentes parois sont sources de faiblesses et de malfaçons et que la définition des assemblages est laissée à l'ingénieur ou au technicien.

Pour palier à ce problème, il propose un nouveau système constructif avec pour contrainte de n'utiliser que des plaques de bois contre-plaquée sans vis ni connecteur métallique. Pour ce faire, il réinvente un panel d'éléments assemblés par emboîtement et par friction pour former une ossature prise en sandwich dans deux épaisseurs de panneaux. Les différentes pièces de l'ossature sont dessinées à l'aide d'un modèle paramétrique puis usinées grâce à des machines à découpage laser.

Le principal défi que représente cette entreprise réside dans la manière de fabriquer les connections entre les différents éléments. Pour se faire, Sass Lawrence met au point trois types d'assemblages (figure 4 ci-dessous). Le premier est un assemblage d'angle semblable à une queue d'aronde (illustration a). Le deuxième est une variante permettant de lier deux parois orthogonales (illustration b). Le dernier, le « dog bone », permet de lier deux panneaux dans le même plan grâce à un connecteur ressemblant en plan à un os et découpé dans une plaque de contre plaquée (illustration c).

Bien que ce système constructif présente encore quelques difficultés à s'adapter à des géométries plus complexes, ce travail ouvre la voie à de nombreuses variantes. Avec le perfectionnement des outils et des modèles, ce système peu permettre la conception de projets plus ambitieux et plus rapides.

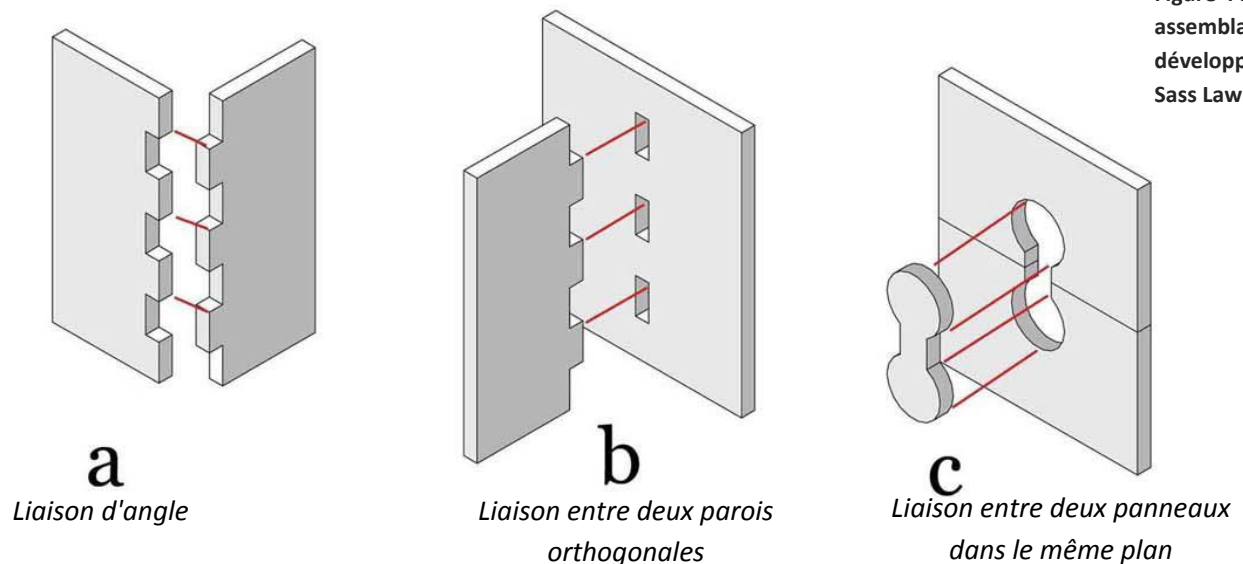


Figure 4 Les trois assemblages développés par Sass Lawrence

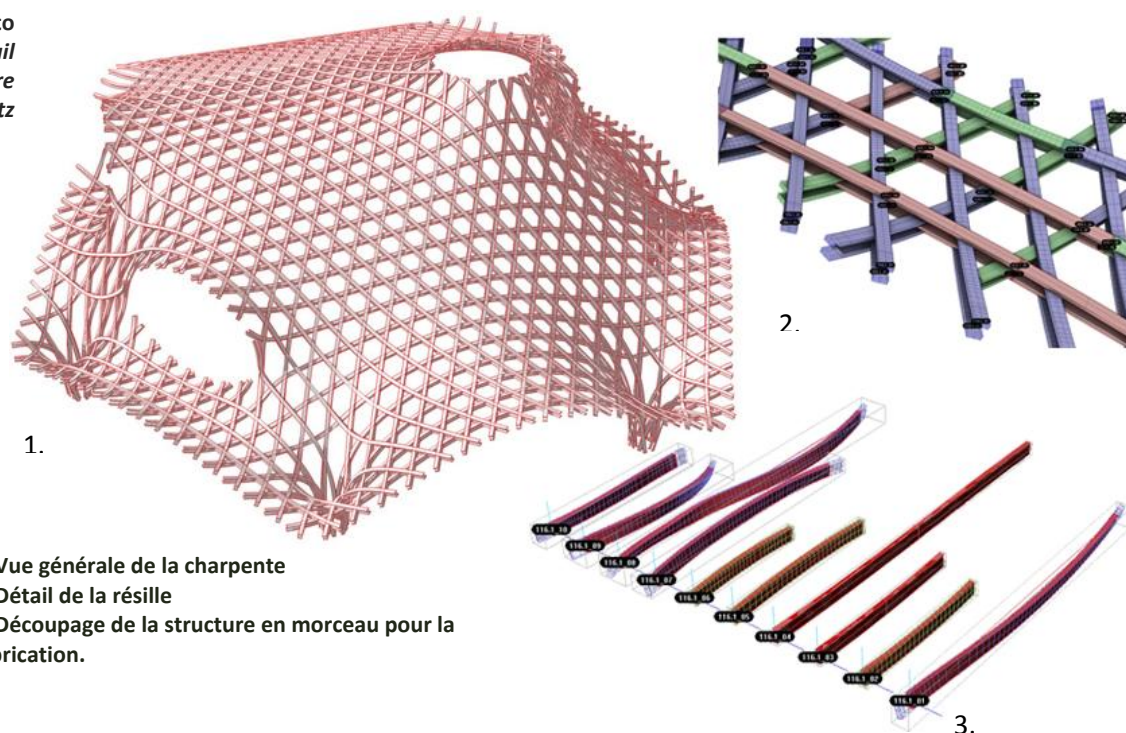
Conçu par l'architecte Shigeru Ban et inauguré en 2010, le centre Pompidou Metz s'impose comme une des plus grandes réalisations intégrant une structure bois non standard. Sa couverture se compose d'une résille de profils bois qui se croisent suivant trois directions afin de constituer une nappe. Ce maillage se déforme selon des points d'attrance pour s'appuyer au sol et ménager des ouvertures.

La conception de la charpente a nécessité la collaboration de plusieurs bureaux d'étude en ingénierie et en Conception Assistée par Ordinateur (CAD) pour élaborer un modèle qui a permis le calcul et le dimensionnement de la structure ainsi que sa fabrication. L'entreprise « Design To Production », spécialiste dans les solutions informatiques pour l'architecture et le design non standard s'est chargée de la programmation.

Bien que l'entreprise souhaite rester discrète sur les détails du processus qu'elle a mis au point pour relever ce défi, les documents qu'elle a produits retracent les grandes étapes de modélisation. Afin de générer un modèle géométrique précis, les axes des profils ont été projetés sur une surface similaire à celle que forme actuellement la toile. Ces profils ont pu être **extrudés** le long de leur axe permettant ainsi de dessiner toute la géométrie du modèle. Cette géométrie a servi aux ingénieurs pour effectuer les calculs structurels avec les assemblages choisis. Lorsque les calculs ont fixé les différents paramètres de la structure, la géométrie finale a pu être découpée. Ces morceaux ont été classés et traités pour programmer les fichiers nécessaires à piloter des machines à commandes numériques avant d'entamer la fabrication.

Le support informatique développé ici a permis d'élaborer et d'enrichir un modèle en information afin de valider chaque étape du processus de conception, de l'analyse structurelle à la fabrication.

Figure 5 design to production travail CAD pour le centre Pompidou Metz



1. Vue générale de la charpente
2. Détail de la résille
3. Découpage de la structure en morceau pour la fabrication.



## 3.3.2

## Parasol urbain Séville



Figure 6 vue aérienne de la structure (gauche) et vue depuis la Plaza de la Encarnacion (droite)

Conçu par Jürgen Mayer, la construction des 11 000m<sup>2</sup> du parasol urbain de Séville s'est terminée en avril 2011. Le projet se constitue d'une sorte de « nuage » réalisé avec un maillage quadrillé de panneaux de bois se prolongeant par endroit jusqu'au sol en formant d'immenses piliers.

Afin de recréer cette géométrie très organique de la charpente, des panneaux de Kerto ont été découpés selon le profil de la géométrie du « nuage » et assemblés de manière à former des caissons. Une fois la structure montée, ces panneaux de Kerto restituent la forme organique voulue en matérialisant ses différents plans de section selon deux directions orthogonales. Chaque plan est séparé du suivant par une distance constante. La densité générale du maillage permet donc d'approcher la forme voulue.

Les assemblages de la charpente sont réalisés avec des connecteurs en acier collés dans l'épaisseur des panneaux de bois. Ces liaisons permettent des assemblages très rigides mais demande des ajustements de grande précision.

Les ingénieurs et l'équipe d'architectes ont réussi à relever le défi de la conception et de la fabrication de cette immense structure en montrant que les projets employant des formes non standards peuvent atteindre l'échelle urbaine.

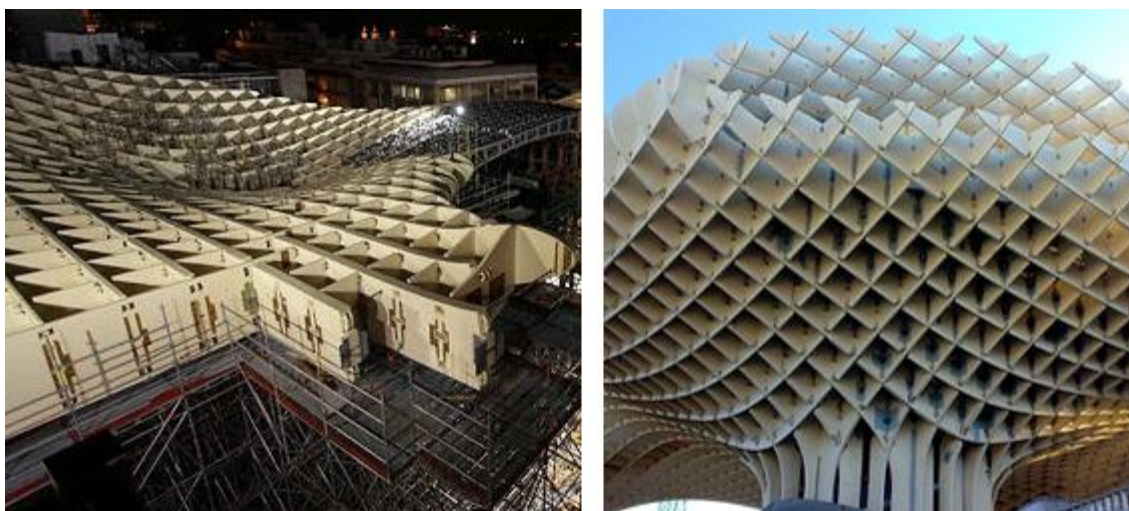


Figure 7 Vue des assemblages lors du montage (gauche) et vue de leur rendu fini (droite)

## 3.4

D'autres travaux publiés sur d'autres supports traitent plus précisément du thème des assemblages. Des cours et des ouvrages spécifiques existent et constituent une bibliothèque d'information permettant de rassembler un maximum de données sur la morphologie, la technologie et les caractéristiques mécaniques de divers assemblages, illustrés par des exemples. Les différents travaux exposés ici sont de précieuses sources d'informations qui permettent d'en connaître plus sur ce sujet.

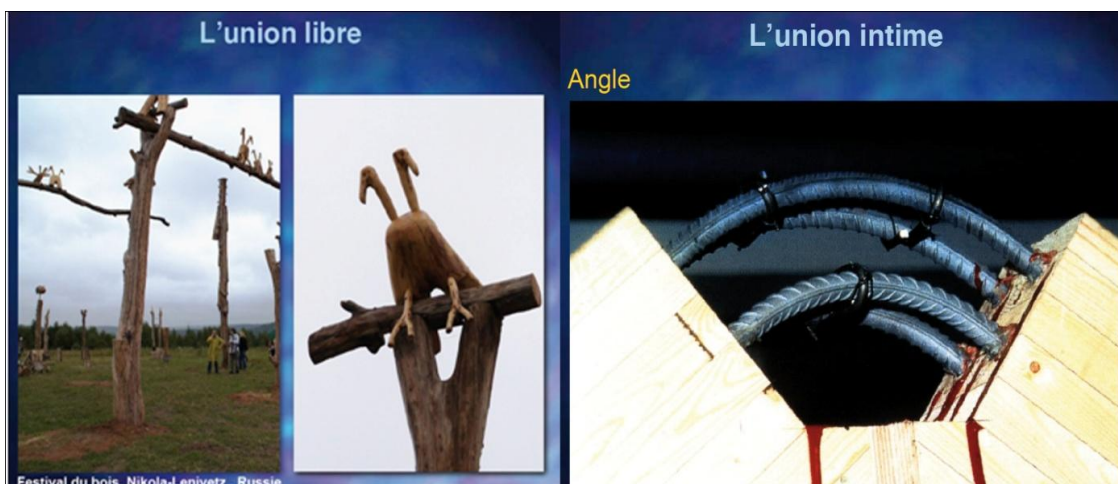
## 3.4.1

## Classification des assemblages

Dans un but pédagogique, une classification des principaux moyens techniques permettant de réaliser des assemblages bois a déjà été entamée par Jean-Claude Bignon. Cette classification est établie sur des critères morphologiques et technologiques. Elle distingue des grandes familles d'assemblages répertoriées selon l'importance des contraintes qui permettent de réaliser la liaison. Ces contraintes sont imagées grâce à une métaphore filée renvoyant aux liens sociaux assurant la cohésion dans les relations entre individus. Jean Claude Bignon distingue donc avec une note d'humour plusieurs classes d'assemblages allant de la liaison frivole au mariage soutenu.

En sa qualité d'inventaire très vaste, ce travail servira de source d'images et de vocabulaire pour l'étude de la paramétrisation des assemblages.

Figure 8 extrait de classification des assemblages "Etre ensemble" Jean-Claude Bignon



**1.4.2 Ouvrage sur le thème des assemblages**

Afin de compléter les sources et d'élargir les exemples de morphologie de liaisons différentes, d'autres ouvrages sur le thème des assemblages bois viennent compléter la classification présentées précédemment. Les deux livres présentés ont été les plus utilisés parmi les autres références figurant dans la bibliographie

Le livre «*Traversée de la décoration en bois et spécifications* » \*traduction du japonais par google traduction de Tiger Sept Sumiyoshi et Shogo Matsui est un inventaire des différentes morphologies de liaison traditionnelle bois dans la construction au japon. Bien que la barrière de la langue ne permet pas de connaître toute la profondeur de cet ouvrage, ses illustrations fournissent de précieuses informations quant aux possibilités et aux performances des techniques employées.

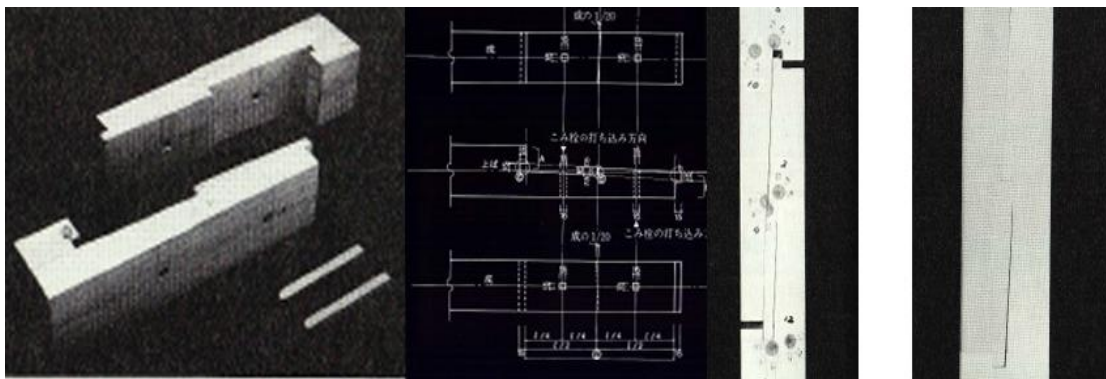


Figure 9 Extrait du livre "traversée de la décoration en bois et spécifications"

Un autre ouvrage permet d'étoffer davantage le tour d'horizon des solutions constructives qu'offre le matériau bois. Le recueil «*Les structures en bois* » pour l'École d'Ingénieur Civil édité en 1904 en Allemagne contient de nombreuses planches décrivant diverses techniques d'assemblages par contact et par emboîtement employées dans l'architecture traditionnelle des pays saxons. Bien que les techniques aient évoluées depuis le début du XXème siècle, le principe constructif à l'origine de ces liaisons reste le même.

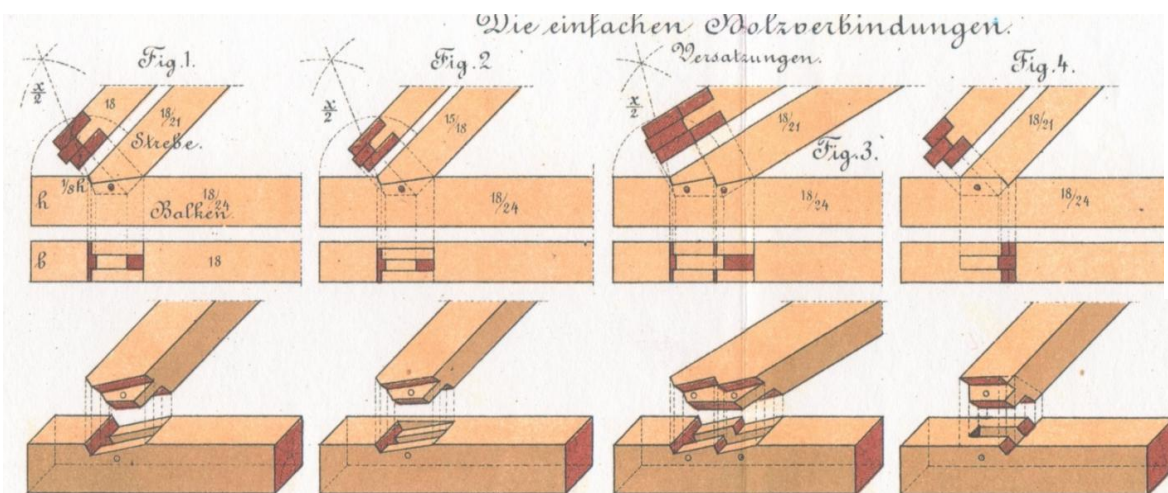


Figure 10 Extrait de l'ouvrage «*Les structures en bois de l'École d'Ingénieur Civil* » Réimpression de l'édition originale. Leipzig, Schäfer, 1904



## Regard critique et orientation du travail

### 3.5

Aujourd'hui les réalisations non standards sont encore très rares. Leur construction représente toujours un important surcoût ainsi que le recours à des technologies et des savoir-faire de pointe par rapport à une construction plus classique. Les exemples architecturaux les plus soignés et les plus remarquables sont souvent des projets phares et monumentaux financés par de grandes villes en quête d'une nouvelle identité ou par de riches mécènes.

Cependant cette forme d'expression architecturale est assez fascinante pour que de nombreuses universités en Suisse, en Angleterre, en Allemagne ou encore aux Etats-Unis soutiennent des travaux de recherche et de développement visant à faciliter leur conception. La grande majorité de ces travaux tentent de développer des outils permettant de mieux générer des géométries complexes et de les intégrer à des environnements de calculs structurels ou d'en extraire les informations relatives à leur fabrication. On remarque que très peu de travaux tentent de considérer les variables mécaniques et cinématiques des structures comme paramètre dans la conception. La plupart du temps, ces considérations n'occupent que peu de place dans les modèles. La définition et le choix des assemblages sont encore très souvent considérés comme relevant du rôle de l'ingénieur ou du technicien. En dépit du grand nombre d'ouvrages et d'informations concernant ce sujet, ces préoccupations interviennent souvent dans une phase plus en aval de vérification, de dimensionnement ou d'exécution.

En s'appuyant sur les inventaires et les classifications des assemblages provenant de la littérature spécifique et des travaux pédagogiques, ce travail vise à combler ce vide. Grâce à la création d'un modèle paramétrique des assemblages, les données et les informations **cinématiques**, essentielles aux calculs structurels seront rassemblées et classées. Le but étant de pouvoir les exploiter pour le calcul des structures non standards afin d'en tenir compte très tôt dans la conception.

Pour cela, cette étude s'intégrera aux recherches de thèse de Shaghayegh Shadkhou qui travaille actuellement sur l'élaboration d'un outil de paramétrisation des structures non standard générées par des grilles d'arcs.

Avant d'entrer plus en détail dans l'élaboration de ce modèle, il est indispensable de présenter les différentes notions mécaniques et les concepts qui seront utilisés par la suite.

## 4

## Notion d'assemblage

## Un assemblage ?

## 4.1

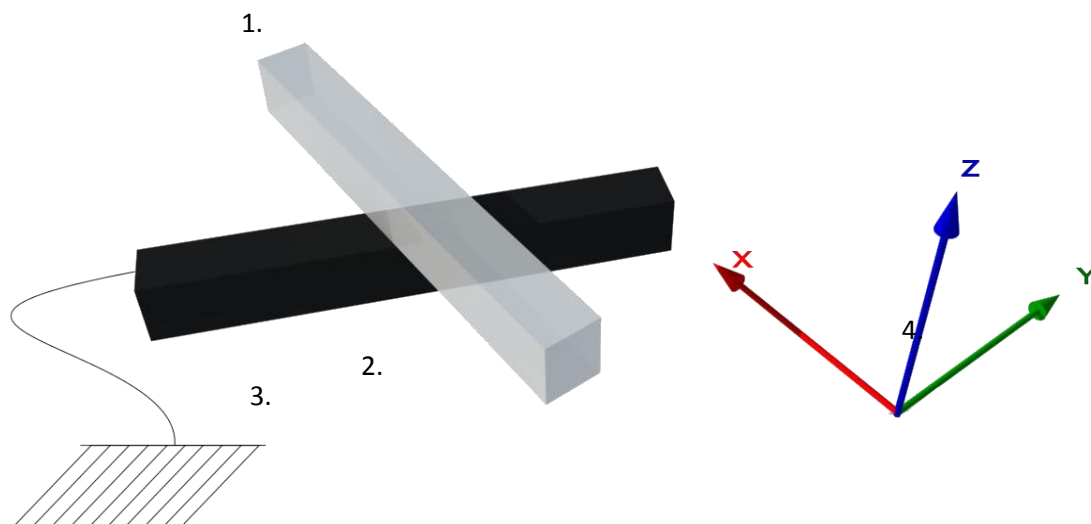
## 4.1.1

## Définition

Pour l'architecte, un assemblage désigne bien souvent le lien qui unit plusieurs éléments entre eux. Il peut à la fois s'agir du moyen technique employé et de la morphologie de la liaison et concerne tous les éléments qui sont unis par un même connecteur. Cette définition manquant de précision, il est nécessaire de requalifier cette notion d'un point de vue plus orienté vers la cinématique et la mécanique.

Nous considérerons donc qu'un assemblage désigne la connexion d'un **élément fils**<sub>5</sub> sur un **élément parent**<sub>6</sub>. La connexion peut se faire à l'aide d'une pièce rapportée, dans ce cas elle doit être dimensionnée en fonction des efforts qu'elle devra transmettre.

Figure 11 Schéma élément parent élément fils



1. élément fils
2. élément parent
3. sol
4. repère

## 4.1.2 Notion d'élément parent et d'élément fils

Lorsqu'on isole une quelconque connexion réunissant  $n$  barres sur un même nœud, on peut considérer que chacune de ces barres viennent se rattacher à une seule autre. On isolera alors ces deux barres dans le système pour analyser leur liaison. En mécanique, lorsque l'on parle d'assemblage, on parle toujours de la connexion de deux éléments entretenant une relation hiérarchique parent/fils.

La hiérarchie parent enfant va induire un sens de montage, l'élément parent est donc le premier élément à être fixé sur l'ossature. Pour certains assemblages, l'ordre de montage est capital et la connexion ne peut être réalisée qu'à condition de respecter cette hiérarchie.



## Cinématique et assemblages

### 4.2

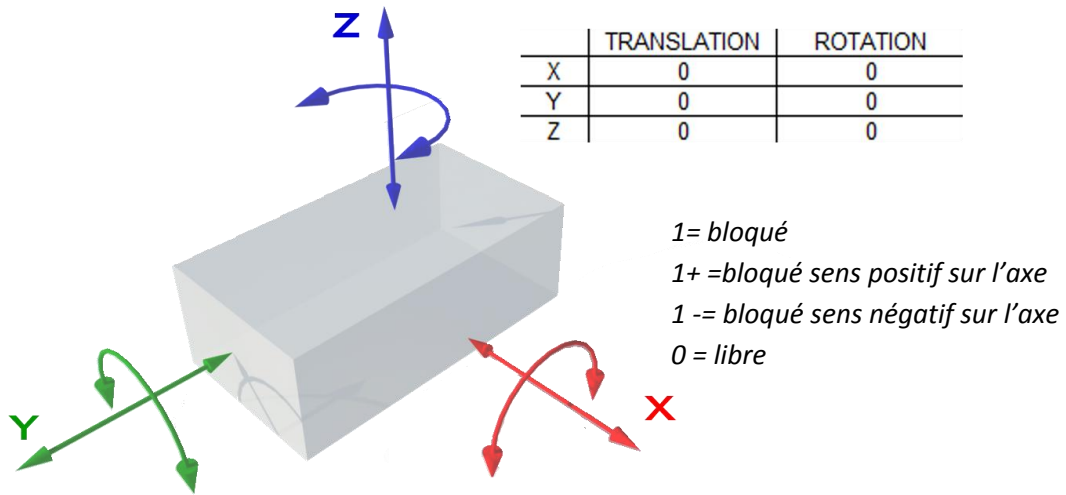
#### 4.2.1

#### Principe

Seuls les assemblages définissent la cinématique d'une ossature et permettent de tester sa stabilité indépendamment du dimensionnement des éléments qui la constituent et des charges qui lui sont appliquées. La moindre force ou le moindre **moment**, suffit à faire s'écrouler une structure instable.

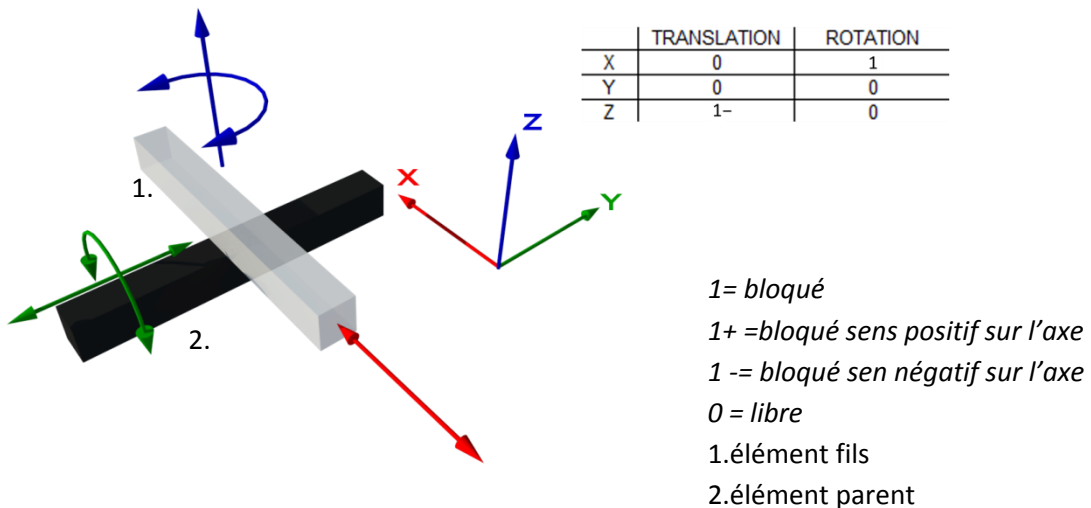
Dans l'espace tout élément possède six mouvements potentiels appelés encore degrés de liberté. Ces degrés de liberté ne peuvent être décrits sans la définition d'un repère qui compte trois axes X, Y, Z le long desquels trois translations sont possibles et autour desquels trois rotations sont possibles. Ces six mouvements peuvent tous s'appliquer dans 2 sens, un positif et un négatif. La cinématique d'un objet peut se résumer sous forme d'un tableau.

Figure 12 Schéma des six mouvements dans l'espace



De la même manière, un assemblage permet ou interdit le mouvement d'un élément fils par rapport à un élément parent. Lorsqu'un mouvement est bloqué, l'assemblage peut transmettre un effort selon la direction et le sens rattaché à ce degré de liberté. On résume la cinématique d'un assemblage sous forme de tableau.

Figure 13 Cinématique d'un assemblage

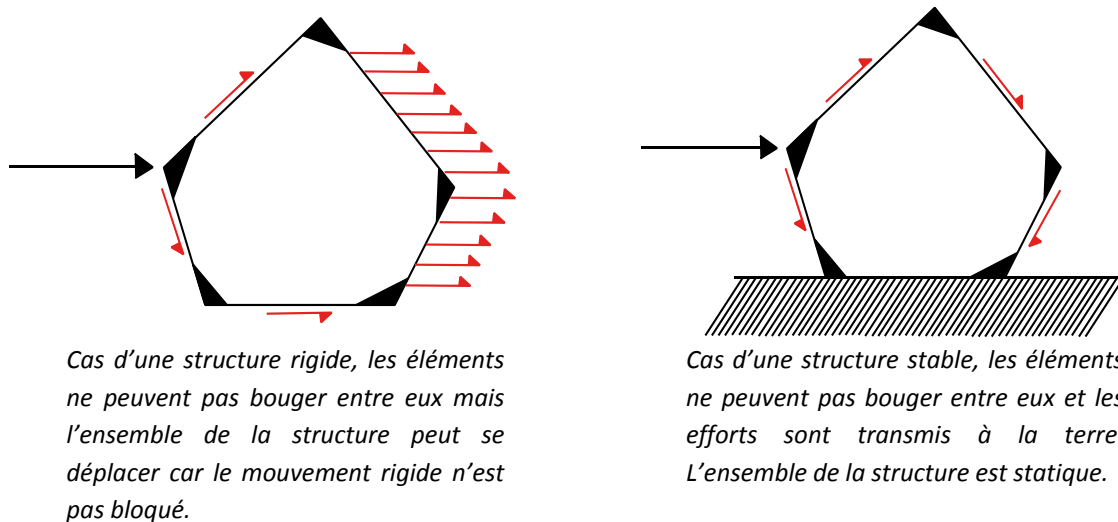


L'assemblage décrit dans cet exemple ne bloque que deux degrés de liberté, la translation Z dans le sens positif et la rotation autour de l'axe X. Il ne peut donc transmettre des efforts que selon ces deux degrés de liberté.

Pour qu'une structure soit rigide il faut que les contraintes supprimant des degrés de liberté dans les assemblages soient suffisantes pour interdire tout mouvement d'éléments par rapport à d'autres.

Mais pour qu'une structure soit stable les assemblages doivent aussi déterminer le rapport que la structure entretient avec la terre, il faut qu'ils bloquent le mouvement rigide, c'est-à-dire qu'ils interdisent tout mouvement de la structure par rapport à sa surface ou ses points d'appuis. En d'autres termes, il faut que tous les efforts qui seront appliqués à la structure puissent être transmis jusqu'à la **terre**.

Figure 14 Cinématique d'une structure



Une structure dont tous les assemblages bloquent tous les degrés de libertés entre les éléments de la structure et le sol, est par définition stable peu importe sa forme.

#### 4.2.2 Notion d'hyperstatisme et d'isostatisme

Dans une structure stable, il existe plusieurs degrés de rigidité. Là encore, seul le choix des assemblages est déterminant.

Lorsque les assemblages bloquent plus de degrés de libertés qu'il n'est nécessaire pour qu'une structure soit stable, on parle d'**hyperstatisme**. Une structure hyperstatique est donc très rigide ce qui interdit les marges d'erreur et peut poser des difficultés lors du montage. Elle peut aussi solliciter d'avantage certaine partie de l'ossature. Dans certains cas l'hyperstatisme peut être voulu car il peut permettre des économies de matière.

Lorsque les assemblages ne bloquent que le nombre de degrés de liberté nécessaires pour qu'une structure soit stable, on parle d'**isostatisme**. Une structure isostatique est plus facile à monter car elle permet de petites marges d'erreur.

### 4.2.3 Liaisons usuelles utilisées en mécanique

Pour décrire les systèmes mécaniques, il existe une nomenclature regroupant 12 liaisons normalisées depuis la liaison nulle qui n'a aucun effet jusqu'à la liaison complète qui solidarise les deux pièces.

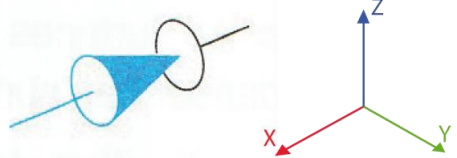
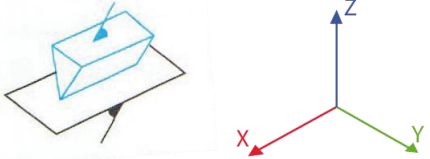
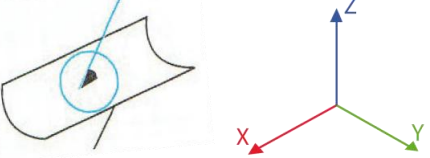
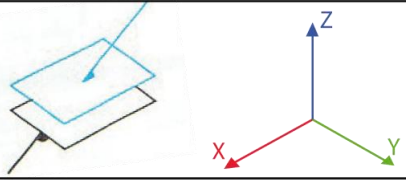
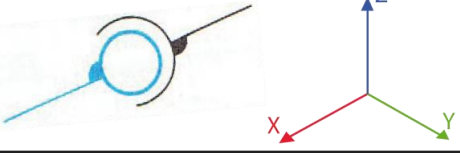
1.	<b>La liaison nulle</b> ne sert seulement à signaler que des éléments sont indépendants.		
		Translation	Rotation
		X	0
		Y	0
		Z	0
2.	<b>La liaison ponctuelle sphère plan</b> est comparable aux liens qui unissent un objet reposant sur un plan dont la surface de contact est si petite qu'elle est assimilable à un point.		
		Translation	Rotation
		X	1-
		Y	0
		Z	0
3.	<b>La liaison linéaire rectiligne</b> est comparable aux liens qui unissent un objet reposant sur un plan dont la surface de contact est très allongée au point qu'elle est assimilable à une ligne.		
		Translation	Rotation
		X	0
		Y	0
		Z	1-
4.	<b>La liaison annulaire</b> est comparable aux liens qui unissent deux objets dont leur surface de contact est assimilable à une ligne décrivant un arc de cercle.		
		Translation	Rotation
		X	0
		Y	1
		Z	1-
5.	<b>L'appui plan</b> est comparable aux liens qui unissent deux objets dont leur surface de contact est assimilable à un plan.		
		Translation	Rotation
		X	0
		Y	0
		Z	1-
6.	<b>La liaison rotule</b> est comparable aux liens qui unissent deux objets dont leur surface de contact est assimilable à une surface sphérique.		
		Translation	Rotation
		X	1
		Y	1
		Z	1

Figure 15 Les 12 liaisons usuelles d'après l'ouvrage memothec

7.	<p><b>La liaison sphérique à doigt est peu utilisée elle sert principalement à décrire la cinématique entre deux éléments reliés par un cardan.</b></p>			
			Translation	Rotation
		X	1	1
		Y	1	0
		Z	1	0
8.	<p><b>Le pivot glissant est comparable aux liens qui uniraient deux tubes cylindriques coulissant l'un dans l'autre.</b></p>			
			Translation	Rotation
		X	0	0
		Y	1	1
		Z	1	1
9.	<p><b>La liaison hélicoïdale est comparable aux liens qui unissent une vis avec son support .</b></p>			
			Translation	Rotation
		X	0	0
		Y	1	1
		Z	1	1
10.	<p><b>La liaison glissière est comparable aux liens qui uniraient deux tubes de section polygonale coulissant l'un dans l'autre.</b></p>			
			Translation	Rotation
		X	0	1
		Y	1	1
		Z	1	1
11.	<p><b>Le pivot est comparable aux liens qui unissent deux objets ne pouvant admettre qu'une rotation autour d'un axe.</b></p>			
			Translation	Rotation
		X	1	0
		Y	1	1
		Z	1	1
12.	<p><b>L'encastrement est comparable aux liens qui unissent deux objets ne pouvant admettre aucun mouvement l'un par rapport à l'autre.</b></p>			
			Translation	Rotation
		X	1	1
		Y	1	1
		Z	1	1

**Autres variables mécaniques**

**4.3**

**4.3.1**

**Principe**

En réalité, il n'existe pas d'assemblage parfait ailleurs qu'à l'intérieur de la matière. Les liaisons idéales mentionnées précédemment sont en réalité dégénérées par un certain nombre de phénomènes. Certaines déformations de la matière aux endroits où les efforts se concentrent, les tolérances et les ajustements d'assemblage peuvent entraîner de légers mouvements.

**4.3.2**

**Le Jeu**

Lorsque deux éléments de structure sont taillés ou usinés, la précision avec laquelle ils seront exécutés dépend beaucoup de l'outil et du savoir-faire. Même dans un processus de fabrication numérique, les pièces ne sont jamais parfaites. Les tolérances de cotes et les ajustements d'assemblage permettent de définir la marge d'erreur acceptable. Lorsque deux objets « imparfaits » sont assemblés, il peut subsister un espace résiduel pouvant provoquer des **glissements d'assemblages**.

Dans certains cas, le jeu est nécessaire pour permettre l'assemblage des différents éléments lors du montage. Un jeu peut donc être toléré, accepté ou calculé et peut s'appliquer à n'importe quels degrés de libertés, translations et rotations comprises à condition qu'elles soient bloquées par l'assemblage. On regroupe les différents jeux d'un assemblage sous forme de tableau similaire au tableau cinématique.

*Pour illustrer la notion de jeu, on prendra l'exemple de cet assemblage pivot glissant avec le détail de la cinématique dans le tableau ci dessous*

Figure 16 Schéma de la notion de jeu

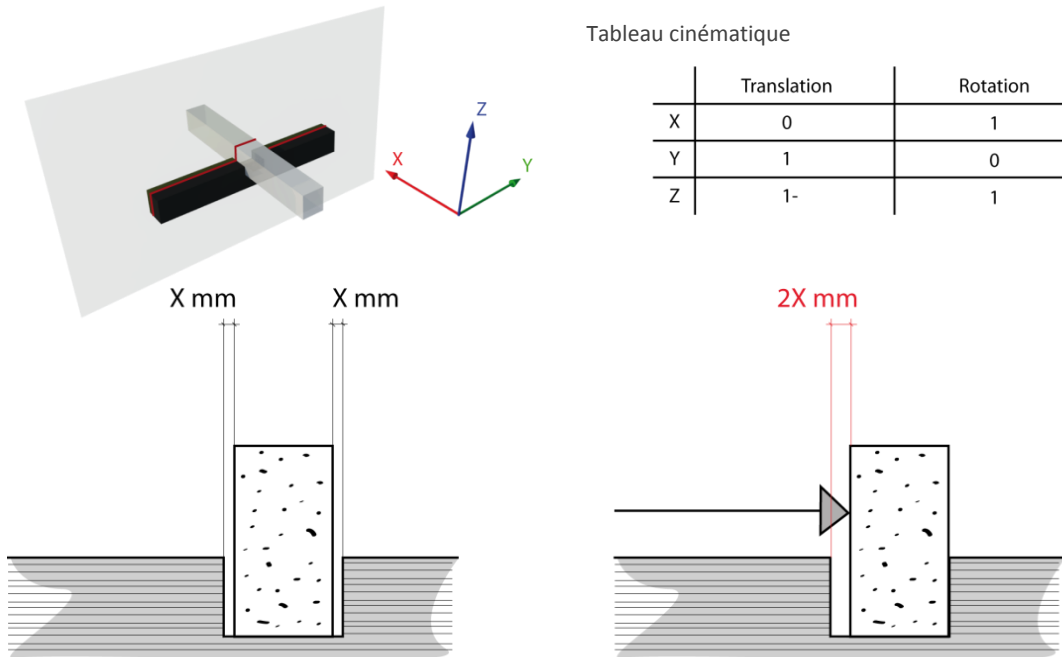


Tableau cinématique

	Translation	Rotation
X	0	1
Y	1	0
Z	1-	1

Tableau des jeux

	Translation	Rotation
X		Xmm
Y	X mm	
Z	0 mm	Xmm

*Sous l'effort, l'élément fils glisse de Xmm. On répertorie ces valeurs dans un tableau.*

Si le jeu est trop important par rapport à la taille de l'assemblage, il peut aller jusqu'à libérer certains degrés de liberté. De même si l'accumulation de glissements d'assemblages devient trop conséquente sur l'ensemble de la structure, la stabilité globale peut être altérée.

### 4.3.3

### La raideur

Tout assemblage est une rupture dans la continuité de la matière. Il est une transition ou une interface entre un agencement de matière présent dans un élément et un autre. Lors de la transmission d'effort, la morphologie de la liaison peut provoquer une concentration des contraintes sur une surface restreinte. Le matériau peut être localement plus sollicité, entraînant une déformation. Cette déformation peut être plus ou moins grande suivant la quantité d'effort et l'élasticité du matériau. Un assemblage peut donc être assimilable à une boîte de ressorts.

Pour illustrer la notion de raideur, on prendra le même exemple que précédemment.

Figure 17 Schéma de la notion de raideur

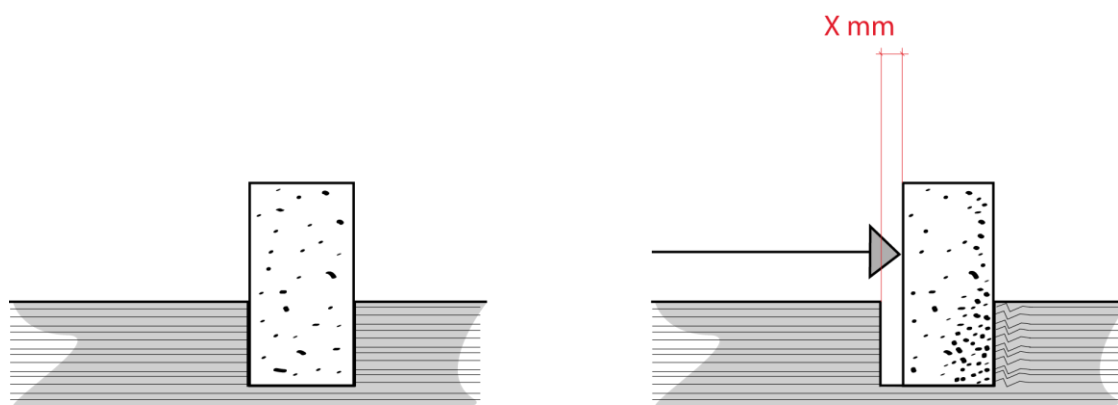


Tableau des jeux

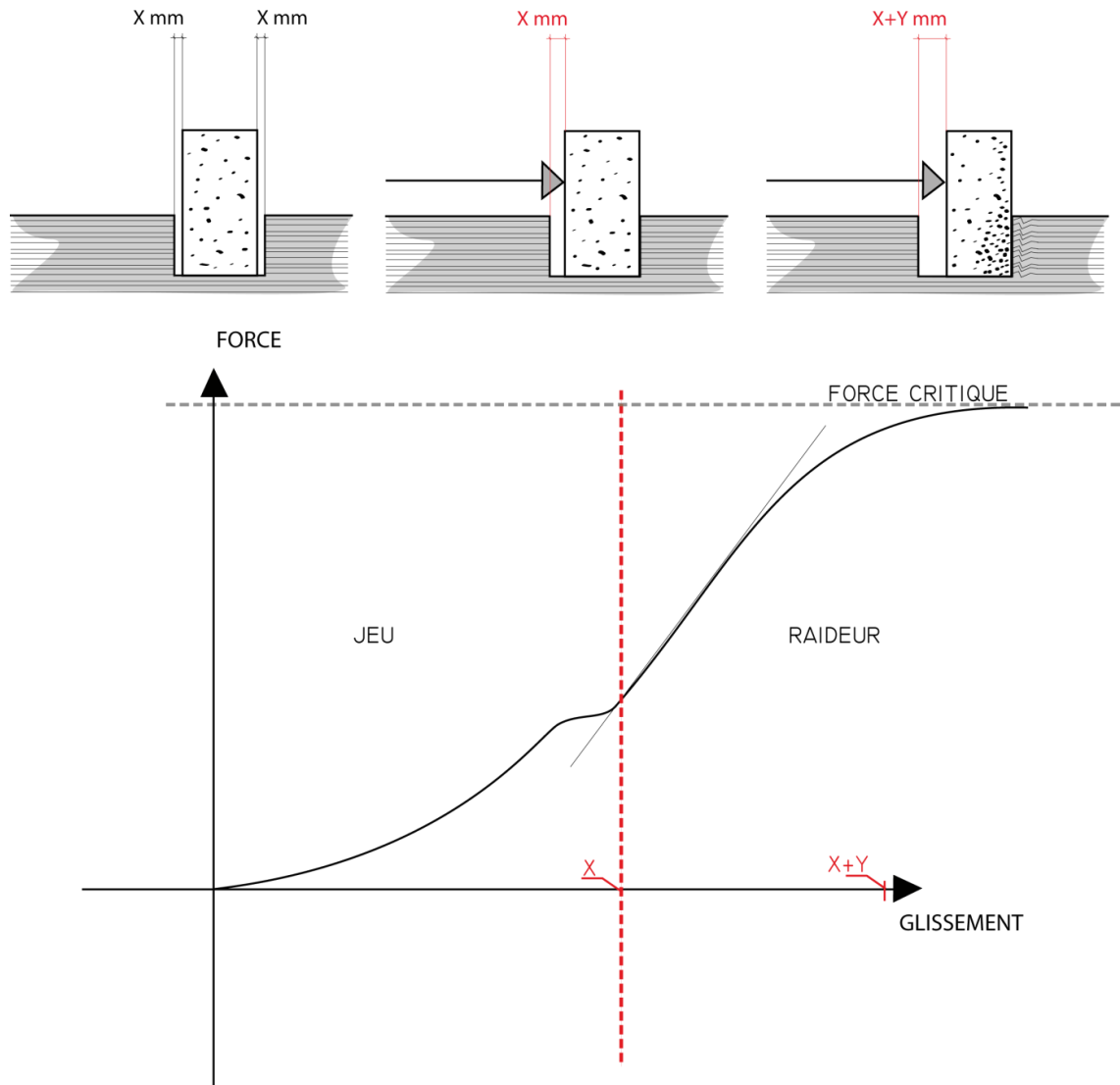
	Translation	Rotation
X		Xmm
Y	X mm	
Z	X mm	Xmm

Comme précédemment pour le jeu, le tassement des matériaux peut induire un glissement d'assemblage pouvant entraîner les mêmes conséquences. La raideur se calcule sur tous les degrés de libertés bloqués, on peut regrouper ces différentes données sous forme de tableau similaire au tableau cinématique.

### 4.3.4 Comportement du glissement d'assemblage

Lorsqu'un assemblage transmet un effort, l'effet du jeu et de la raideur se combine. Pour chaque degré de liberté bloqué, le glissement résultant peut être modélisé sous la forme d'une courbe de ce type.

Figure 18 Loi de comportement du glissement d'assemblage

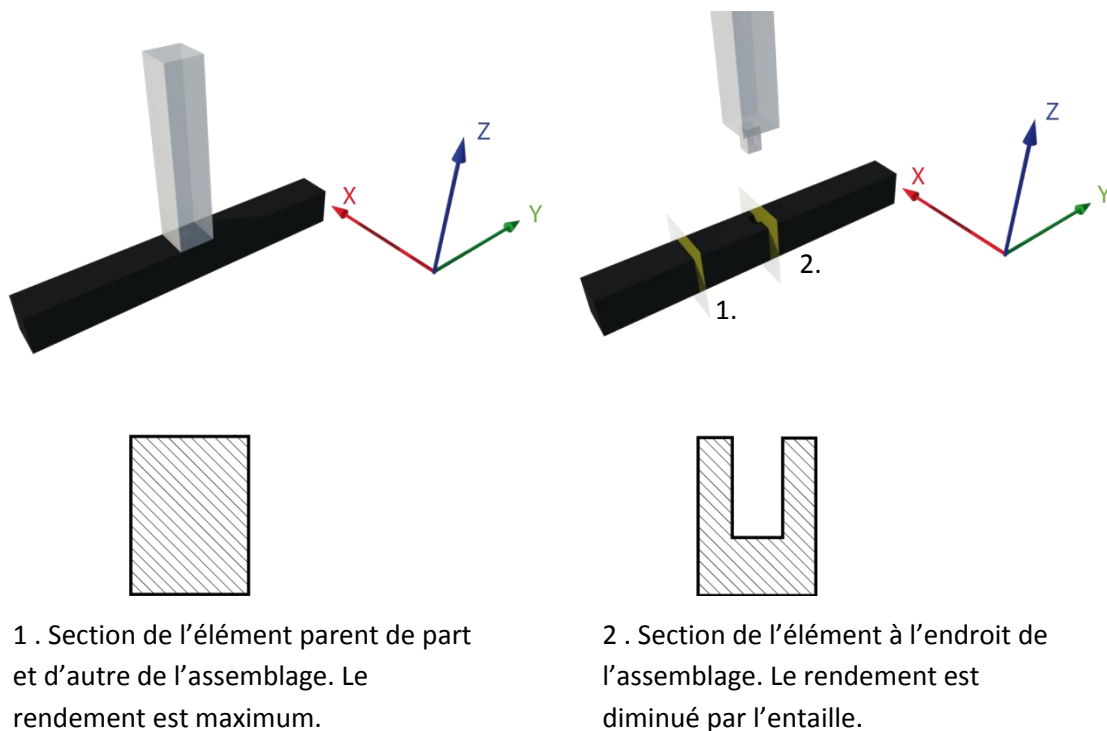


## 4.3.5

## Le rendement

Dans la plupart des cas, assembler deux objets nécessite d'intervenir sur leur structure. Lorsque l'on perce, que l'on entaille ou que l'on découpe une pièce, on l'affaiblit. Ces opérations peuvent modifier localement l'aire ou la forme de la section. Parfois la liaison nécessite l'apport d'une pièce intermédiaire qui va assurer la transmission des efforts à elle seule sur une courte distance. Le rendement d'un assemblage consiste donc à déterminer la quantité d'effort qu'il peut transmettre par rapport à un assemblage parfait, à savoir la continuité de la matière. Là encore, l'analyse du rendement doit se faire sur chaque degré de liberté bloqué et les résultats peuvent être compilés dans un tableau.

Figure 19 Illustration de la notion de rendement



Un affaiblissement comme une entaille diminue la capacité de l'assemblage à transmettre certains efforts.



## Particularité des assemblages bois

### 4.4

#### 4.4.1

#### Glissement d'assemblage

Le bois est un matériau malléable et fibreux, sensible à la chaleur et à l'humidité. Son élasticité est bien supérieure à celle de l'acier ou du béton.

Dans les calculs de structure bois, la raideur peut avoir un impact considérable et ne peut qu'être rarement négligée. De plus le bois n'a pas le même comportement selon l'orientation de ses fibres par rapport à la direction et la nature des efforts.

Beaucoup d'assemblages bois reposent sur l'emboîtement de pièces très complexes qui peuvent nécessiter un jeu pour le montage ou pour absorber d'éventuelle déformation du matériau.

L'accumulation de ces légers mouvements peut vite devenir importante. Dans le calcul des structures bois, il est fréquent de tenir compte des glissements d'assemblage pour obtenir une analyse plus fine de l'ossature, surtout lorsque la déformation globale ne doit pas dépasser une valeur précise.

#### 4.4.2

#### Rendement

De nombreux assemblages bois réside dans l'emboîtement de deux pièces de morphologies plus ou moins complexes. Ces découpes sont conçues pour travailler d'une manière bien précise, leur rendement peut être satisfaisant pour transmettre certains efforts mais médiocre pour d'autres. De plus, plusieurs assemblages successifs sur un même élément peuvent multiplier les points d'affaiblissement.

### 4.5

## Vérification de la stabilité

#### 4.5.1

#### Principe

Il existe de nombreux moyens graphiques simples et rapides pour déterminer si une structure standard est stable ou non et si elle est isostatique ou hyperstatique. Ces méthodes reposent sur l'analyse de l'ossature en deux dimensions sur différents plans de sections.

Pour les structures non standards, une analyse en trois dimensions est indispensable. Il n'existe pas de méthode graphique simple car une structure complexe ne peut pas se décrire comme une somme de cas « standards ».

Afin de vérifier la stabilité et calculer le dimensionnement des structures non standard on utilise un outil mathématique avancé.

## 4.5.2

## Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est un outil de calcul qui repose sur la résolution d'équations. Elle impose une discrétisation de la structure à étudier, c'est-à-dire que chaque élément structural va être analysé en mode filaire. Une poutre ou un poteau va être assimilée à une ou plusieurs **barres**<sub>10</sub> qui débutent et se terminent par un point. Pour chaque point correspondra un assemblage.

Le calcul va être effectué sur chaque barre. Il repose sur une équation qui établit un lien entre potentiel (dans notre cas force et moment), résistance (matrice de rigidité) et flux (déplacement).

Dans notre cas :

$$\{F\} = \{K\} \cdot \{U\}$$

F : force et moment appliqués au six degrés de liberté

$$\begin{pmatrix} \text{Compression traction} & UTorsion \alpha \\ \text{Effort tranchant } V & \text{Flexion } \beta \\ \text{Effort tranchant } W & \text{Flexion } \gamma \end{pmatrix}$$

K : matrice de rigidité appliquée au six degrés de liberté, elle correspond à la cinématique de l'assemblage et peut intégrer un jeu ou une raideur

U : Déplacement sur les 6 degrés de libertés

Si le calcul est possible alors la structure est stable, et inversement si le calcul est impossible, la structure est instable et on peut difficilement localiser le problème. Il faut alors repenser la conception générale de la structure ou changer d'assemblage pour choisir des liaisons plus contraignantes.

## Paramétrisation des assemblages bois

5

### Structure du modèle

5.1

5.1.1

Principe

Depuis la nuit des temps et dans presque toutes les régions du monde le bois sert ou à servit de matériaux de construction. Aujourd'hui des centaines voire des milliers d'assemblages existent. De multiples déclinaisons et variations de liaisons sont employées et développées. Les nouveaux procédés de fabrication et les nouveaux matériaux permettent sans cesse de mettre au point de nouvelles techniques d'assemblage, si bien que toutes les relever est un travail sans fin. Néanmoins, il reste possible de mettre au point un modèle paramétrique qui permet de restituer cette diversité en relevant les variables qui les différencient et qui influent sur le calcul structurel.

Figure 20 Exemple d'assemblages bois



1. Exemple d'assemblage dogon (Mali)
2. Assemblage d'angle chalet forestier
3. Assemblage Space pavillon Londres Angleterre

*Illustration tirées de la classification des assemblages de Jean-Claude Bignon*

Pour mieux cerner le contexte et les conditions dans lesquelles ces assemblages sont utilisés afin de les réemployer ou de les décliner, il est nécessaire d'identifier les grandes familles technologiques et morphologiques de liaisons.

Pour se faire, le modèle se structure en trois niveaux hiérarchiques.

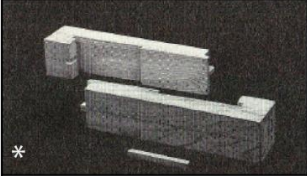

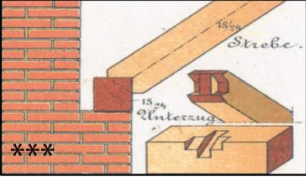
## 5.1.2

## Classe de liaison

La classe de liaison permet de faire un premier classement en situant les liaisons dans leur contexte d'utilisation. Bien qu'au commencement de ce travail la condition de cibler l'étude aux structure bois non standard ait été posée, il reste néanmoins nécessaire pour une structure d'être reliée à la terre. C'est-à-dire de s'encrer sur le sol ou sur une autre ossature qui peut être construite dans un autre matériau. De plus, il reste possible que notre structure bois ait à supporter une autre structure ou une enveloppe réalisée elle aussi dans un autre matériau. Il est donc pertinent de considérer dans ce travail de paramétrisation non seulement les liaisons qui permettent de constituer une ossature exclusivement en bois, mais aussi toutes celles qui permettent la jonction entre le matériau bois et d'autres matériaux. Le critère retenu pour effectuer ce premier classement est donc celui du matériau avec lequel le bois est associé.

On distingue donc trois grandes classes de liaison :

Figure 21 les différentes classes d'assemblages

<p>1. La classe Bois/bois</p>  <p>*</p>	<p>Elle concerne principalement les assemblages entre les éléments constituant la charpente.</p>
<p>2. La classe Bois/acier</p>  <p>**</p>	<p>elle concerne principalement les assemblages entre la charpente bois et une autre structure métallique pouvant constituer une surface d'appui ou avec une enveloppe pouvant être réalisé à partir de profilés métalliques par exemple.</p>
<p>3. La classe Bois/minéral</p>  <p>***</p>	<p>Elle concerne principalement les assemblages qui permettent la jonction entre l'ossature bois et une surface d'appui pouvant être réalisée en béton, en terre ou en maçonnerie.</p>

\*Illustration tirée du livre « Traversée de la décoration en bois et les spécifications » p14

\*\* Photo personnelle du centre Pompidou Metz de Shigeru Ban.

\*\*\* Illustration tirée du livre «Les structures en bois de l'Ecole d'Ingénieur Civil »

### 5.1.3

### Famille technologique

Bien qu'il existe un grand nombre d'assemblages différents, beaucoup sont des variations ou des adaptations qui proviennent d'une même racine. Ces différentes variations sont des adaptations morphologiques, mécaniques et cinématiques qui obéissent à la même logique. Elles ont toutes un ou plusieurs points communs qui permettent de les identifier clairement et de les regrouper à l'intérieur de différentes familles technologiques.

Ce deuxième niveau hiérarchique va permettre de cibler des groupes de liaisons en se basant essentiellement sur des critères technologiques liés à leur fabrication. La technique employée peut avoir une influence sur la cinématique de la liaison, son sens de montage et ses caractéristiques mécaniques. Mais le principal critère qui permet de mettre facilement en évidence ces grandes familles repose sur l'emploi ou non d'une pièce supplémentaire assurant la cohésion entre les éléments structuraux et permettant la transmission des efforts. La nature de cette pièce et sa morphologie vont induire une logique d'assemblage qui lui sera propre.

Chaque classe d'assemblage va donc regrouper une ou plusieurs familles technologiques. Certaines familles peuvent contenir des hybrides qu'il a fallu classer dans le groupe qui exerce le plus d'influence sur sa cinématique.

La classe Bois/bois par exemple va contenir :

*(Voir tableau ci contre « les différentes familles technologiques »)*

*1 Illustration tirée du livre «Les structures en bois de l'Ecole d'Ingénieur Civil »*

*2 et 5 Illustrations tirées de la classification des assemblages de Jean-Claude Bignon*

*3 et 4 Photos personnelles du centre Pompidou Metz de Shigeru Ban.*

1. Les assemblages par contact	<p><i>La cohésion des assemblages par contact reposent sur la gravité ou sur les frottements pour bloquer les mouvements. Une translation au moins n'est jamais interdite dans un sens afin de permettre le montage. Aucun d'entre eux ne nécessite l'ajout d'une pièce rapportée pour réaliser l'assemblage. Les éléments connectés peuvent être simplement en appuis l'un sur l'autre ou s'emboîter selon des lignes de découpes plus ou moins complexes.</i></p>
	
2. Les assemblages par liens souples	<p><i>La cohésion des assemblages par liens souples repose sur l'entrelacement d'un lien autour des objets connectés. Les liens souples peuvent être de diverses natures : fibres tressées végétales ou plastiques, chaîne, câble acier, fil de fer ou encore sertissage avec des bagues en plastique ou en acier. La manière dont le lien fixe les éléments entre eux peut aboutir à diverses morphologies d'assemblage comme la couture, la boucle, ou encore la ligature.</i></p>
	
3. Les assemblages par tige	<p><i>La cohésion des assemblages par tige repose sur l'ajout d'une pièce de petite dimension qui va générer des frottements soit en mettant en compression les deux éléments à assembler, soit en les empêchant de s'éloigner. Les contraintes qu'elle va provoquer vont bloquer certains degrés de liberté. Les tiges peuvent être de diverse nature : tourillon de bois, clous, vis, broche ou encore tige filetée. Le nombre de tige peut déterminer la cinématique de l'assemblage et leur disposition peut influencer sur son rendement.</i></p>
	
4. Les assemblages par Connecteur	<p><i>La cohésion des assemblages par connecteur réside dans l'ajout d'une pièce qui va jouer le rôle d'intermédiaire pour transmettre les efforts d'un élément à l'autre. Les connecteurs peuvent être de diverses natures : platine, gousset, sphère ou équerre réalisé dans divers matériaux comme le bois, l'acier ou encore l'aluminium.</i></p>
	
5. Les assemblages par collage et soudure	<p><i>Leur cohésion est due soit à l'ajout de colle industrielle soit à une soudure qui va échauffer le bois par friction jusqu'à provoquer la fusion des couches superficielles. Les assemblages collés ou soudés fabriquent des liaisons à haut rendement qui sont proches de l'encastrement parfait.</i></p>
	

**Figure 22** Les différentes familles technologiques






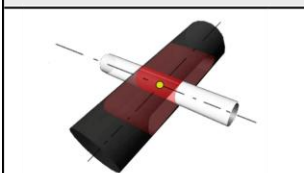


## 5.1.4

## Les liaisons

Chaque famille technologique regroupe donc plusieurs liaisons constituant le dernier niveau hiérarchique. Chaque liaison possède des propriétés concernant sa cinématique, ses capacités mécaniques, sa technologie et sa morphologie.

La famille « **assemblage par contact** » de la classe « **Bois/bois** » par exemple contient treize liaisons :

1. Appui ponctuel	 <p><i>L'appui ponctuel désigne la liaison qui unit un objet dont la surface de contact est si petite qu'elle est assimilable à un point en appui sur un plan.</i></p>
2. Appui Linéaire	 <p><i>L'appui linéaire désigne la liaison qui unit un élément dont la surface de contact est assimilable à une ligne droite en appui sur une surface plane.</i></p>
3. Appui plan	 <p><i>L'appui plan désigne la liaison qui unit un élément dont la surface de contact est assimilable à plan en appui sur une surface plane.</i></p>
4. Enfourchement à contact linéaire	 <p><i>L'enfourchement à contact linéaire désigne la liaison qui unit un élément cylindrique en appui sur un élément en forme de Y de section circulaire dont la surface de contact est assimilable à un arc de cercle ou à deux points.</i></p>
5. Enfourchement à contact surfacique	 <p><i>L'enfourchement à contact surfacique désigne la liaison qui unit un élément de section rectangulaire en appui sur un élément dont la forme épouse une partie de sa géométrie afin que la zone de contact soit assimilable à une surface.</i></p>
6. Emboitement cylindrique Glissant	 <p><i>L'emboitement cylindrique glissant désigne la liaison qui unit un élément cylindrique emboîté dans un élément dont on a percé un trou oblong. La zone de contact est assimilable à deux lignes.</i></p>

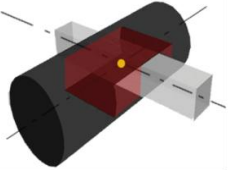



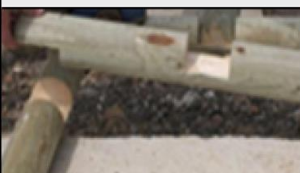
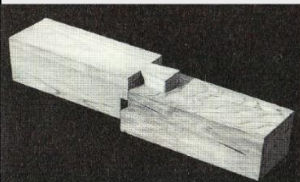
7. Emboitement glissant	
	<p>L'emboitement glissant désigne la liaison qui unit un élément de section rectangulaire emboîté dans un élément dont on a percé un trou oblong. La zone de contact est assimilable à deux surfaces.</p>
8. Emboitement cylindrique	
	<p>L'emboitement cylindrique désigne la liaison qui unit un élément de section circulaire emboîté dans un élément dont on a percé un trou circulaire de même diamètre. La zone de contact est assimilable à une surface non plane.</p>
9. Emboitement	
	<p>L'emboitement désigne la liaison qui unit un élément de section rectangulaire emboîté dans un élément dont on a percé un trou rectangulaire de même dimension. La zone de contact est assimilable à quatre surfaces.</p>
10. Queue d'aronde glissante	
	<p>La queue d'aronde glissante désigne la liaison qui unit deux éléments, un positif et un négatif, dont les lignes de coupes forment un crénelage permettant leur emboitement. La forme de la ligne de découpe permet de libérer une translation et une rotation. La zone de contact est assimilable à plusieurs surfaces planes.</p>
11. Queue d'aronde	
	<p>La queue d'aronde désigne la liaison qui unit deux éléments, un positif et un négatif, dont les lignes de coupes forment un crénelage permettant leur emboitement. La forme de la ligne de découpe permet de bloquer toute les rotations et les translations. La zone de contact est assimilable à plusieurs surfaces planes.</p>
12. Mi-bois	
	<p>Le mi-bois désigne la liaison qui unit deux éléments suivant deux directions différentes à l'aide d'une entaille partielle effectuée dans chacun d'eux. La zone de contact est assimilable à plusieurs surfaces planes.</p>
13.	
	<p>Le tenon-mortaise désignent la liaison qui unit deux éléments de types mâle (tenon) et femelle (mortaise) emboîté l'un dans l'autre. La zone de contact est assimilable à plusieurs surfaces planes.</p>

Figure 23 Les liaisons de la famille des assemblages par contact de la classe



## Méthode de paramétrisation des assemblages

### 5.2

#### 5.2.1

#### Principe

Malgré les différences qui peuvent exister entre les liaisons, il est nécessaire qu'elles soient toutes analysées de la même manière afin de faire ressortir leurs traits caractéristiques. La paramétrisation va dégager trois classes de propriétés permettant de décrire et de modéliser les assemblages afin d'en tirer les informations nécessaires pour optimiser leur utilisation et pour calculer la structure. Ces paramètres ont été choisis en fonction des grandeurs influentes sur la stabilité et sur la technologie.

La cinématique va être la propriété la plus importante et la plus utile pour résoudre les équations de la méthode des éléments finis. Afin de simplifier au maximum le modèle, la cinématique de chaque assemblage va être ramenée à une des douze liaisons usuelles normalisées avec le détail des mouvements possibles sur chaque degré de liberté en tenant compte de leur sens.

Les grandeurs mécaniques telles que la raideur et le jeu seront prises en compte mais ne seront pas développées car elles nécessitent une expertise très poussée. Les données concernant la raideur proviennent de tests et de calculs difficiles à transcrire. Bien que son impact sur le comportement des structures ait été mentionné précédemment, et que la raideur soit reconnue comme une variable mécanique dans le modèle, le manque de données n'a pas permis de la soumettre aux analyses.

Le jeu est une variable qui dépend beaucoup de la technologie employée. Cependant, dans bien des cas, il est possible de le tolérer ou de le maîtriser suivant l'ajustement d'assemblage désiré. On relèvera ici les degrés de liberté où un jeu est possible. Ces décisions interviennent souvent dans une phase plus en aval de la conception pour l'exécution. Cette variable mécanique ne sera pas développée davantage.

Le rendement faisant lui aussi appel à des calculs et à des expertises complexes, il sera simplifié. On relèvera simplement si l'assemblage impose d'intervenir sur la structure de l'élément au risque de l'affaiblir.

Les propriétés qui font appel à la technologie et à la morphologie n'ont pas d'influence directe sur la stabilité mais peuvent être utiles pour le dimensionnement de l'assemblage et pour s'assurer qu'il est compatible avec le contexte dans lequel on compte l'utiliser.

Afin de mieux expliquer la méthode, chaque point sera illustré par deux exemples.

**Le mi-bois** de la famille des **assemblages par contact** de la classe **Bois/bois**, expliqué précédemment et illustré Figure 24 page ci-contre.

**L'enfourchement à contact surfacique** de la famille des **assemblages par contact** de la classe **Bois/bois**, expliqué précédemment et illustré Figure 25 page ci-contre.

Ces deux assemblages sont très proches morphologiquement mais les quelques différences qui les séparent ont une grande influence sur la cinématique. Ces exemples permettent donc d'illustrer clairement l'intérêt de l'analyse.

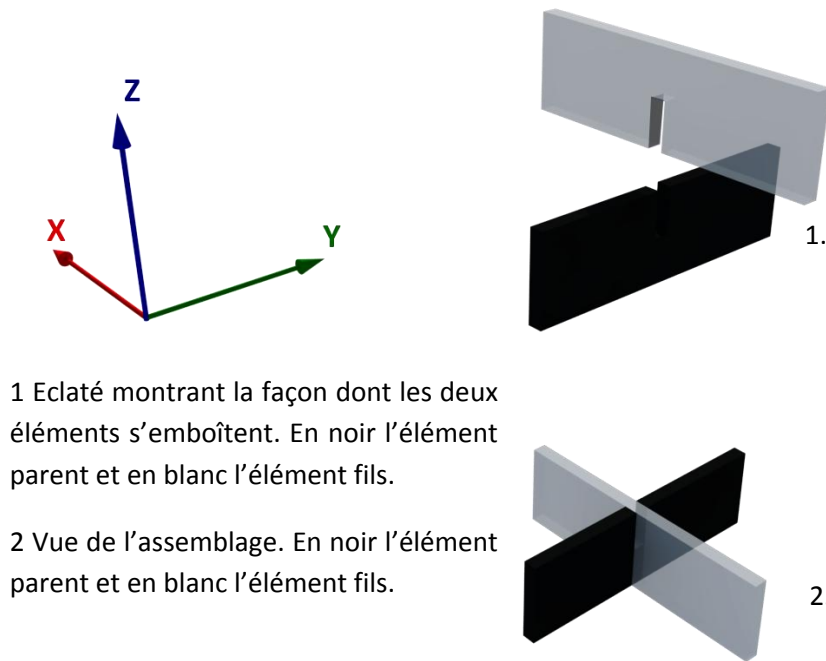


Figure 24 vue éclatée de l'assemblage mi-bois considéré pour l'exemple

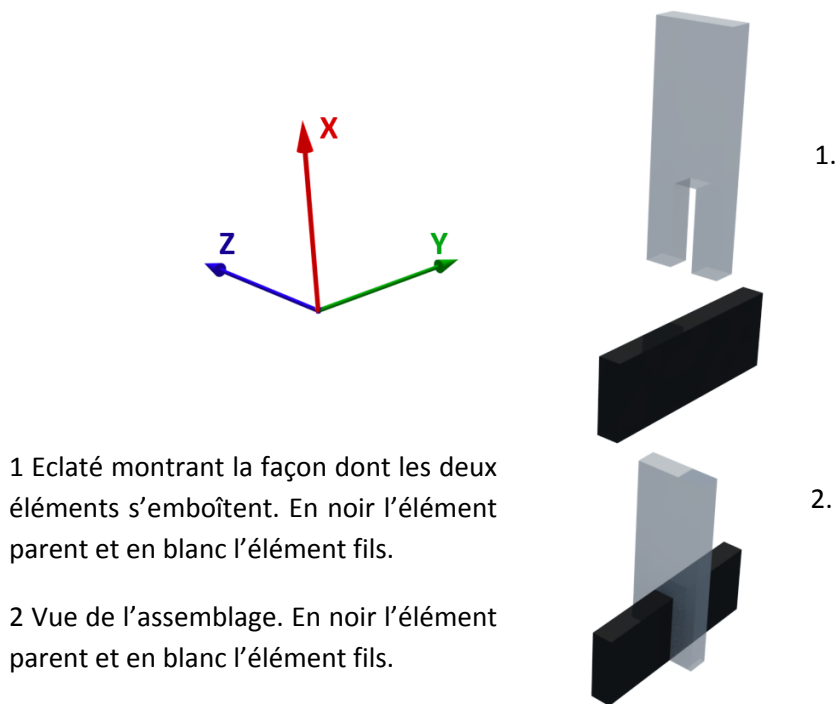


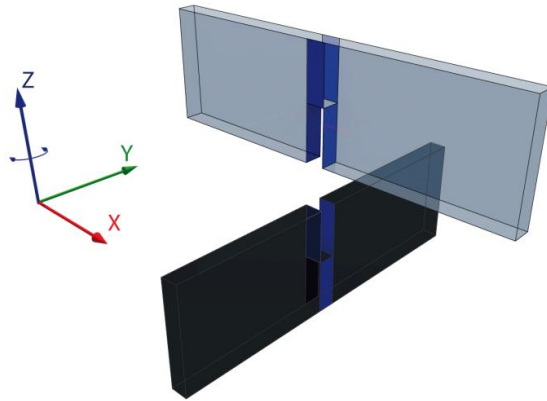
Figure 25 vue éclatée de l'enfourchement considéré pour l'exemple

### 5.2.2

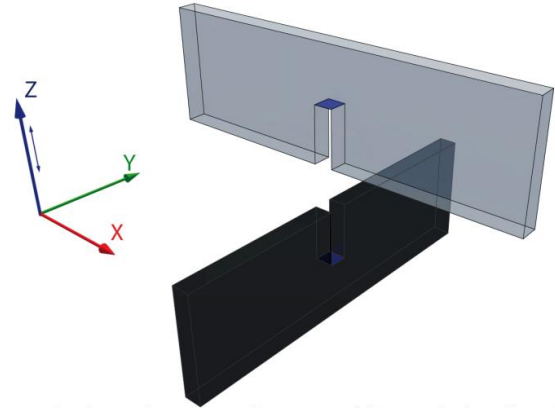
### Cinématique

Pour déterminer la cinématique d'un assemblage, il faut analyser la taille et la forme des surfaces de contact ainsi que les contraintes que d'éventuelles pièces supplémentaires peuvent exercer sur les objets à connecter. L'étude va rendre compte des mouvements de l'élément fils par rapport à l'élément parent que l'assemblage interdit ou permet. Les résultats pour chaque degré de libertés seront reportés dans un tableau. En fonction des mouvements bloqués ils seront associés aux liaisons normalisées.

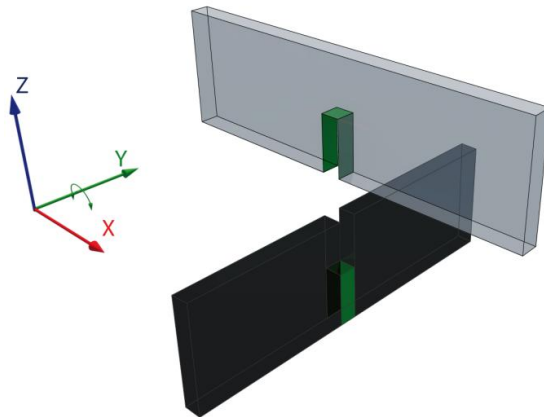
Figure 26 Etude cinématique du mi-bois



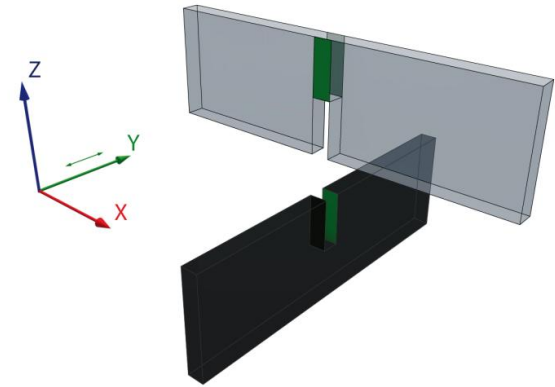
Surfaces de contact s'opposant à la rotation d'axe Z.



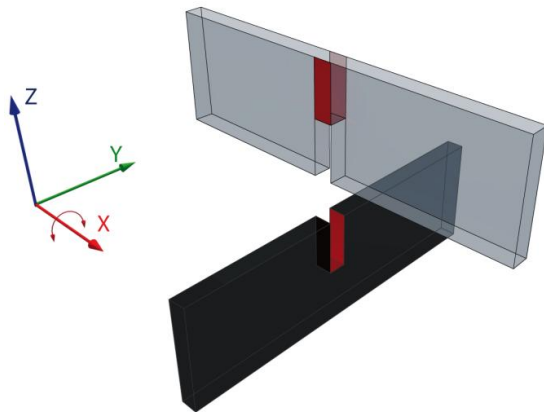
Surfaces de contact s'opposant à la translation d'axe Z dans le sens négatif.



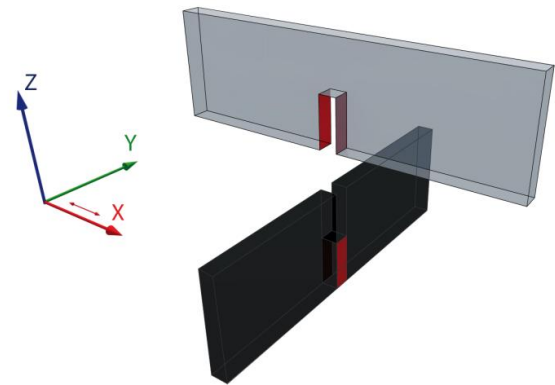
Surfaces de contact s'opposant à la rotation d'axe Y.



Surfaces de contact s'opposant à la translation d'axe Y.



Surfaces de contact s'opposant à la rotation d'axe X.



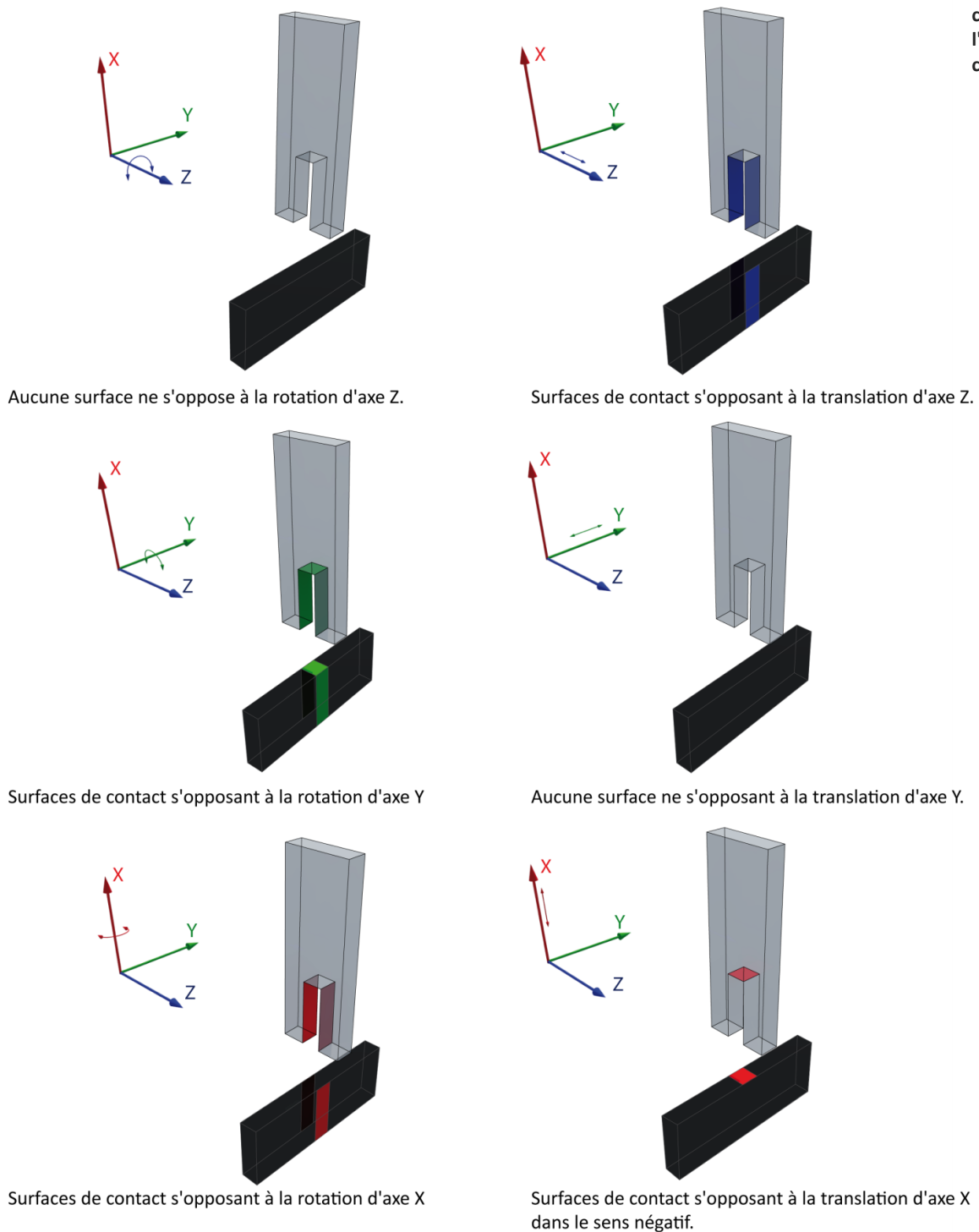
Surfaces de contact s'opposant à la translation d'axe X.

	Rotation	Translation
Z	1	1-
Y	1	1
X	1	1

1= bloqué ; 0 = libre ; 1+ bloqué dans le sens + ; 1 – bloqué dans le sens –.

L'assemblage bloque tout les degrés de libertés dans un sens un moins. Il peut donc être assimilé à un **encastrement**.

Figure 27 Etude cinématique de l'enfourchement à contact surfacique



	Rotation	Translation
Z	0	1
Y	1	0
X	1	1-

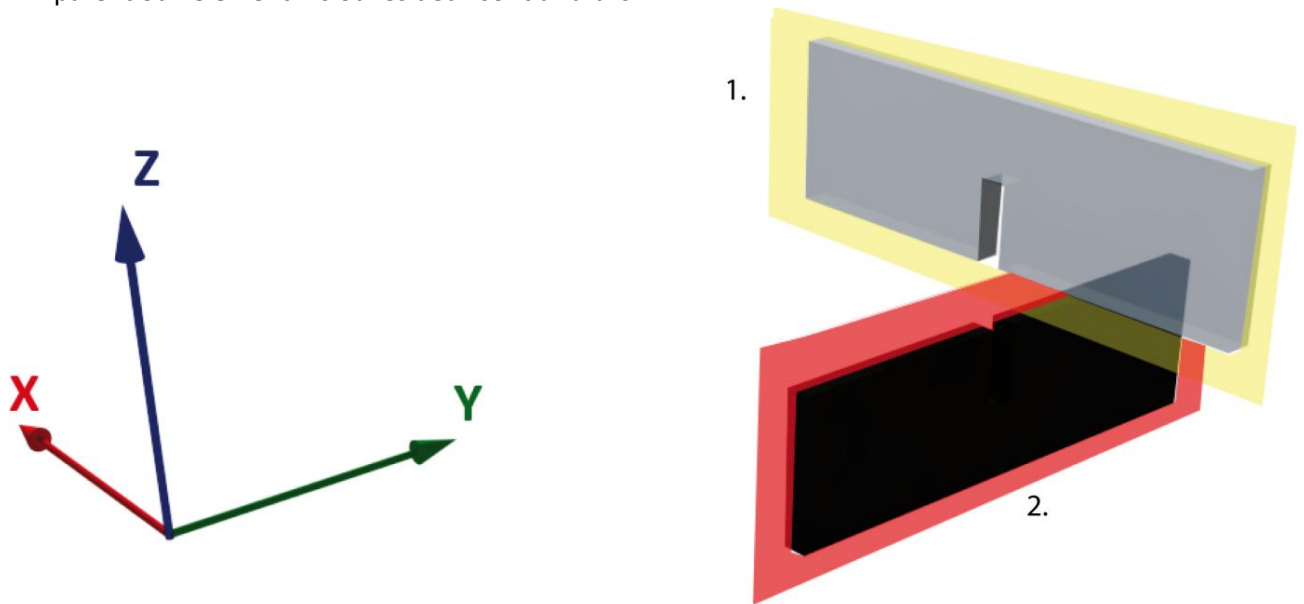
1= bloqué ; 0 = libre ; 1+ bloqué dans le sens + ; 1 – bloqué dans le sens –.

L'assemblage bloque deux rotations d'axe X et Y et deux translations d'axe X et Z. Il peut donc être assimilé à un **pivot glissant**.

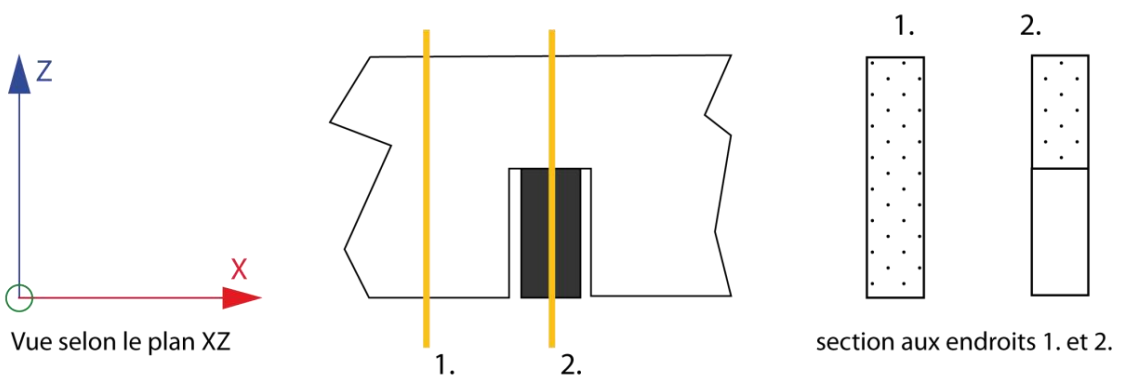
## 5.2.3

## Mécanique

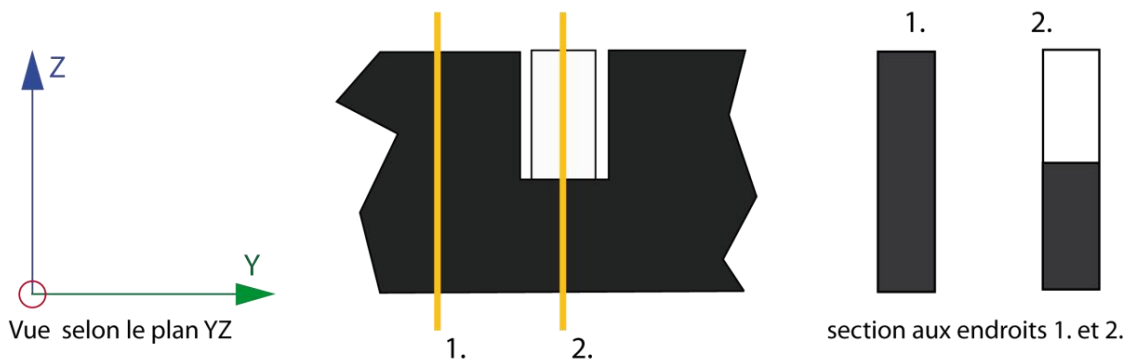
L'analyse s'intéressera au jeu et au rendement. Elle indiquera quels paramètres peuvent induire un jeu et sur quel degré de liberté il agit. Pour le rendement on relèvera si l'élément parent ou l'élément fils ou les deux sont affaiblis.



Etude de l'affaiblissement sur les plans XZ (1.) et YZ (2.)



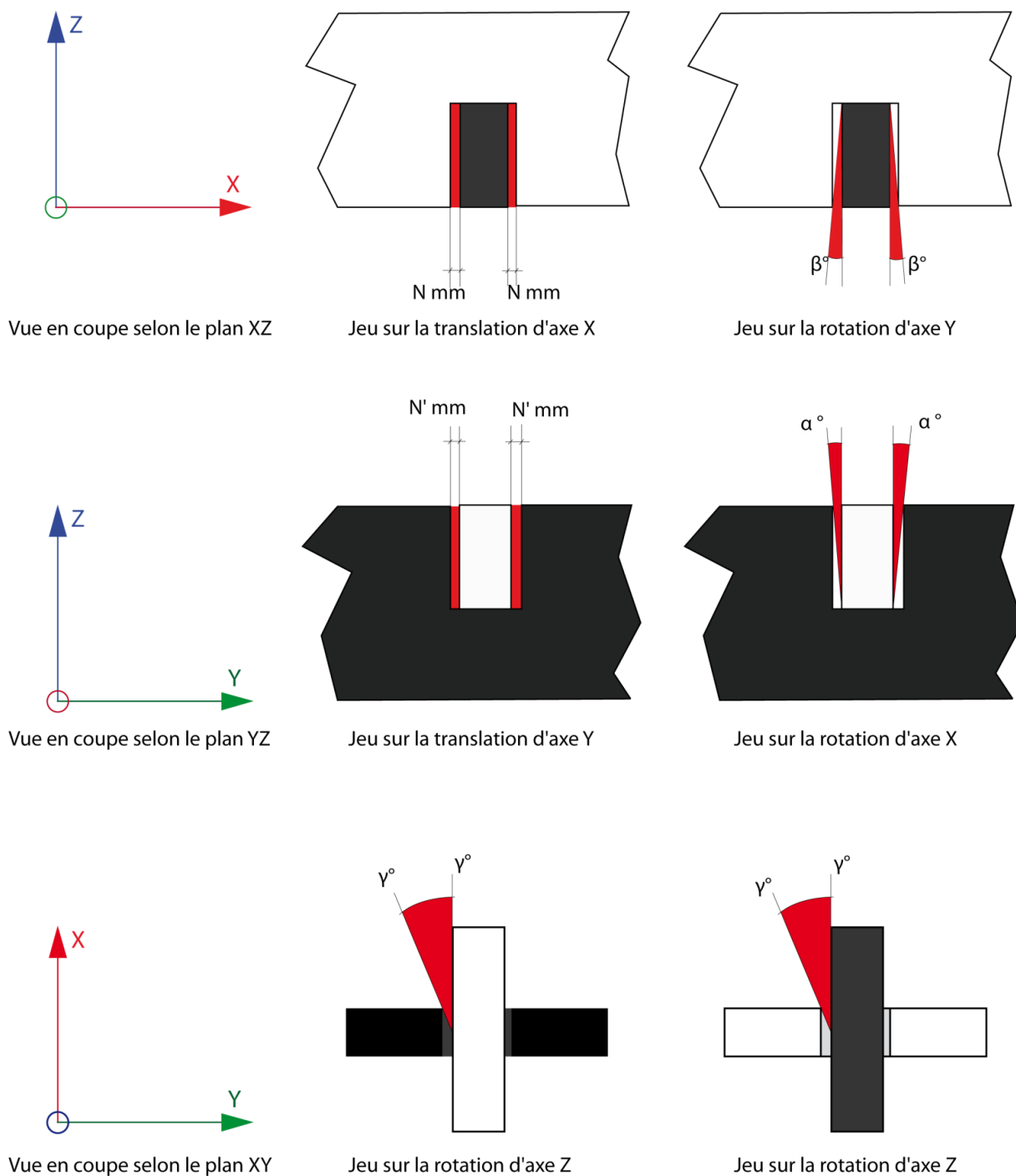
On constate un affaiblissement de près de 50% de la section de l'élément fils



On constate un affaiblissement de près de 50% de la section de l'élément parent

Figure 28 Etude de l'affaiblissement du mi-bois

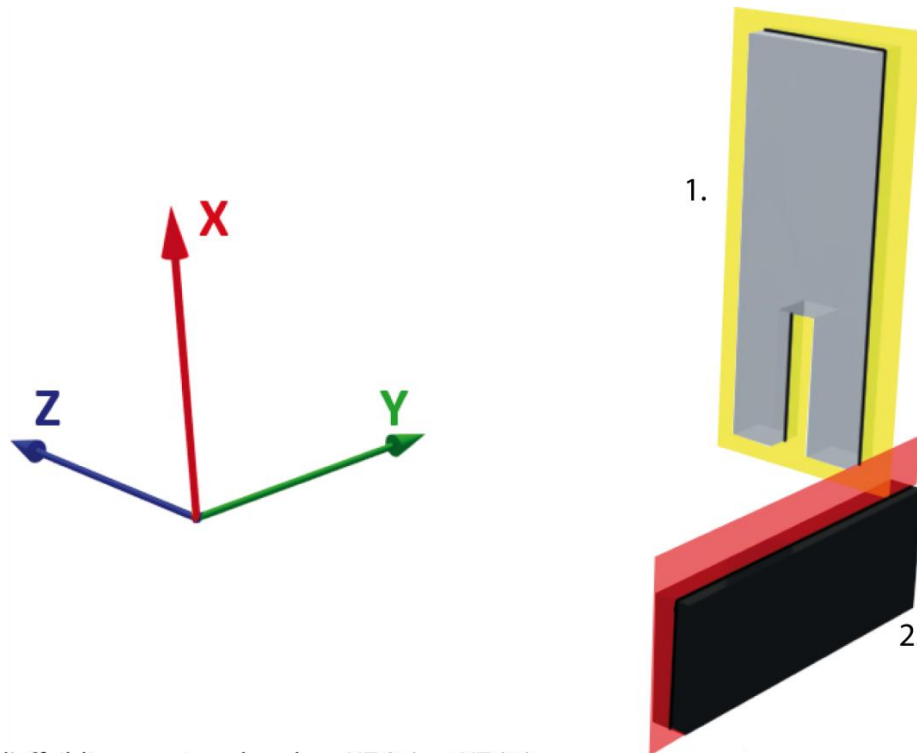
Figure 29 Etude des jeux possibles du mi-bois



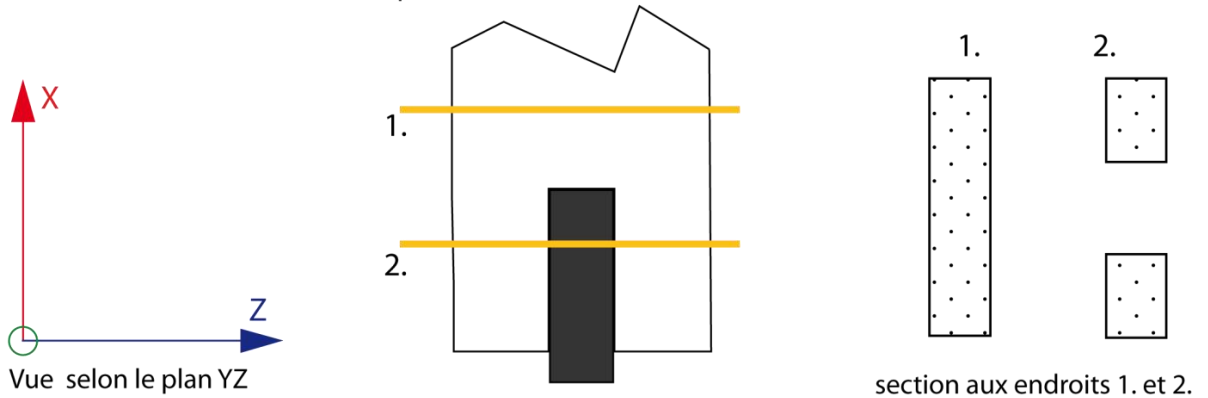
	Rotation	Translation
Z	$\gamma^\circ$	
Y	$\beta^\circ$	$N' \text{ mm}$
X	$\alpha^\circ$	$N \text{ mm}$

Jeu impossible sur la translation d'axe Z car les éléments sont en appuis.

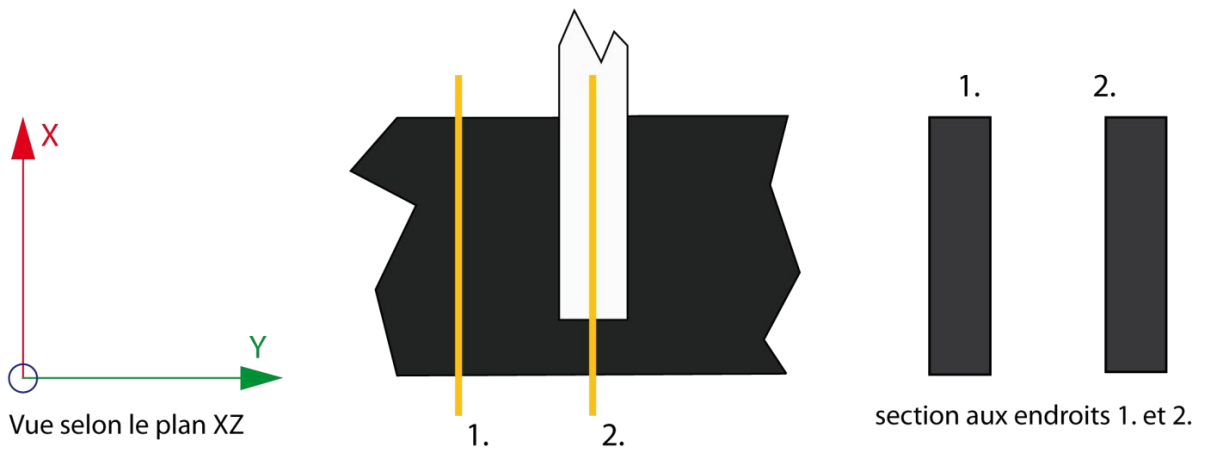
Figure 30 Etude de l'affaiblissement de l'enfourchement à contact surfacique



Etude de l'affaiblissement sur les plans XZ (1.) et YZ (2.)



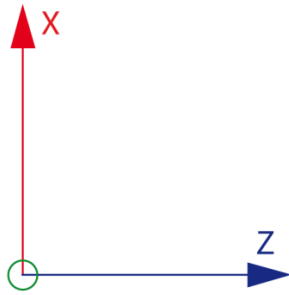
On constate un affaiblissement de près de 33% de la section de l'élément fils.



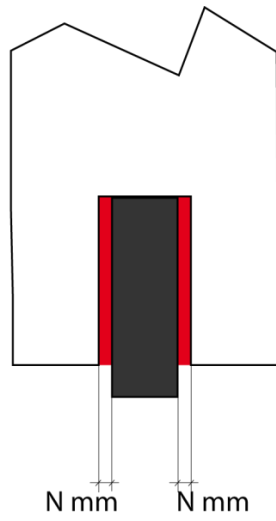
On ne constate aucun affaiblissement de la section de l'élément parent.



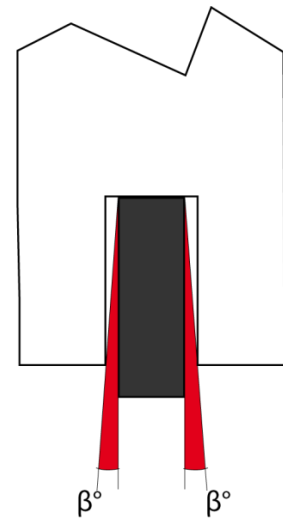
Figure 31 Etude des jeux possible de l'enfourchement à contact surfacique



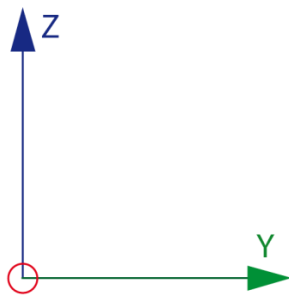
Vue selon le plan YZ



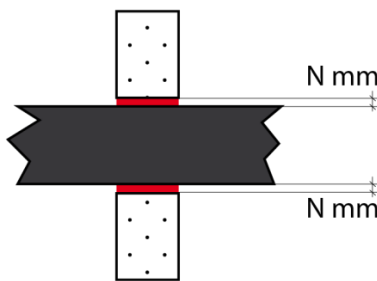
Jeu sur la translation d'axe Z



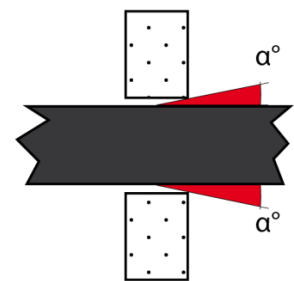
Jeu sur la rotation d'axe Y



Vue selon le plan YZ



Jeu sur la translation d'axe Z



Jeu sur la rotation d'axe X

	Rotation	Translation
Z	mouvement non bloqué	N mm
Y	$\beta^\circ$	mouvement non bloqué
X	$\alpha^\circ$	éléments en appui jeu nul

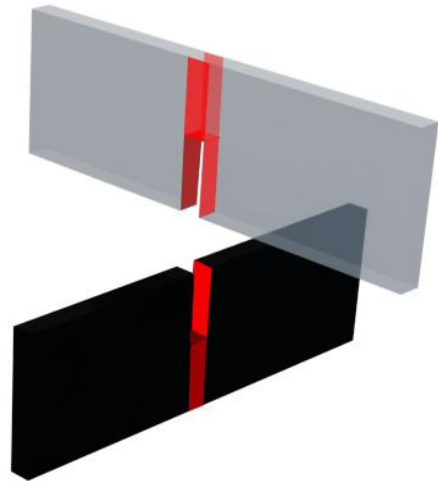
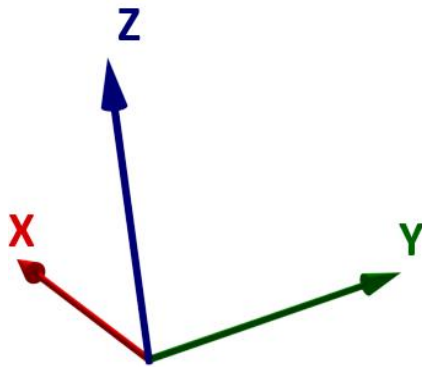
## 5.2.4

## Morphologie et technologie

L'analyse va faire ressortir trois critères : Sur le plan technologique, elle va indiquer si l'assemblage nécessite l'ajout d'une pièce supplémentaire pour pouvoir être réalisé et si oui quelle est sa nature et sa matière possible. Cette variable peut être utile lorsque la conception de la structure est soumise à des contraintes qui interdisent l'usage de certains matériaux ou lorsque les moyens sont restreints.

Sur le plan morphologique, elle va nous renseigner sur la ou les positions possibles de l'assemblage sur l'élément structural. C'est-à-dire si l'assemblage doit se retrouver en bout ou non ou si sa position est indifférente. Elle nous renseignera sur le type de contact entre les éléments, soit ponctuel, linéaire ou surfacique ce qui nous permettra de savoir si les efforts seront concentrés sur une petite surface ou répartis sur une plus grande.

Figure 32 Etude morphologique et technologique du mi-bois



Les différentes zones de contact du mi-bois

Comme l'indique le schéma ci-dessus, l'assemblage « mi-bois » ne nécessite aucune pièce supplémentaire.

La zone de contact est constituée de plusieurs surfaces sollicitées selon les efforts transmis.

Le mi-bois est une liaison qui ne peut pas être réalisée en bout d'élément afin de ne pas fragiliser l'assemblage et faire chuter son rendement.

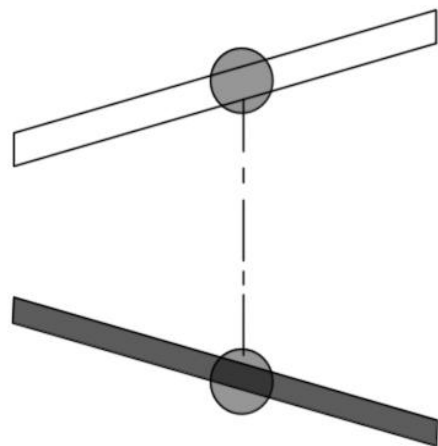
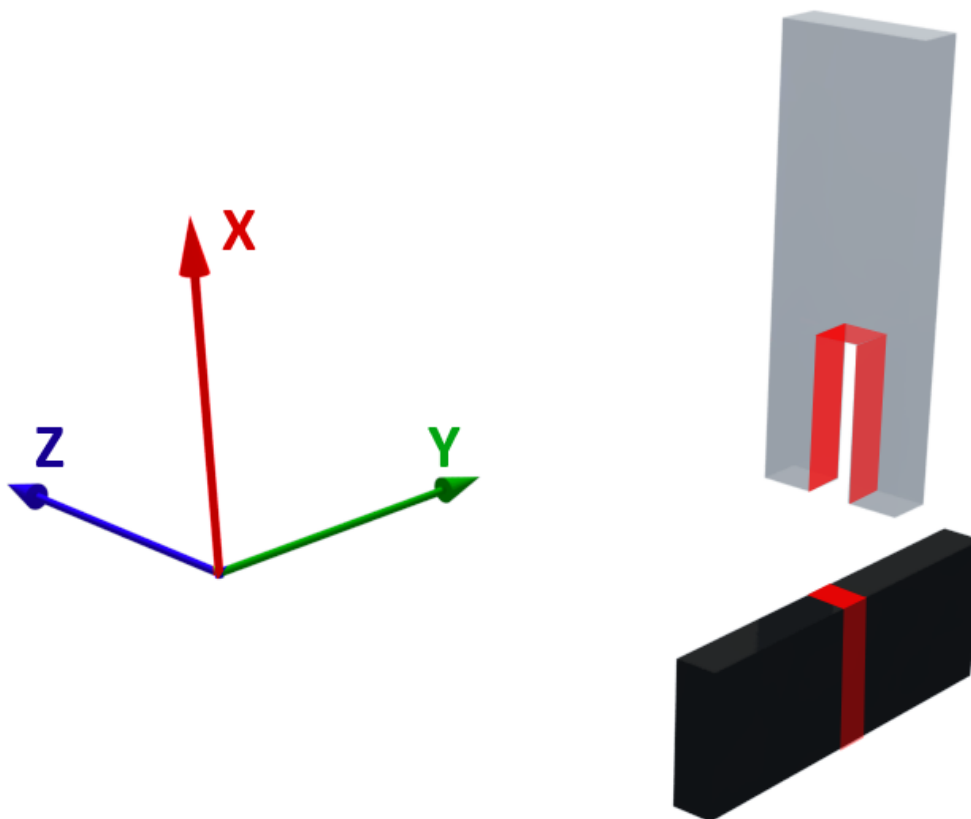


Schéma de la position de la liaison mi-bois

Figure 33 Etude morphologique et technologique de l'enfourchement à contact surfacique

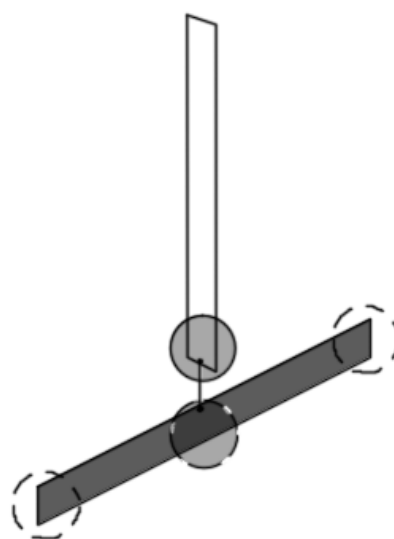


*Les différentes zones de contact de l'enfourchement à contact surfacique*

Comme l'indique le schéma ci-dessus, l'assemblage « enfourchement à contact surfacique » ne nécessite aucune pièce supplémentaire.

La zone de contact est constituée de plusieurs surfaces sollicitées selon les efforts transmis.

L'« enfourchement à contact surfacique » est une liaison qui doit être réalisée en bout d'élément fils. Par contre sa position sur l'élément parent est indifférente.










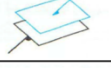






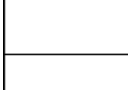




























*Schéma de la position de l'enfourchement à contact surfacique*

## 5.2.4

## Mise en forme du modèle

Pour alimenter le modèle en information, chaque assemblage de chaque famille et de chaque classe est analysé selon le même procédé. Les informations sont consignées sous formes de tableau dont on trouve un extrait ci-dessous.

ASSEMBLAGE BOIS / BOIS							
ASSEMBLAGE PAR CONTACT : APPUIS / EMBOITEMENTS							
CARACTERISTIQUES GENERALES							
Description	Degrés de liberté		Liaison usuelle la moins contraignante possible		Degrés de libertés bloqués		
	Translations	Rotations	Nom	Schéma			
La translation X n'est bloqué que dans un sens maximum	Tx 1-	Rx var.	Liaison ponctuelle sphère plan		Tx 1-		
	Ty var.	Ry var.			Ty 0		
	Tz var.	Rz var.			Tz 0		
	1 minimum	0 minimum			1		
TYPE DE LIAISON POSSIBLE							
Description			Cinématique		Mécanique		
Photo	Schéma	Nom	Degrés de liberté		Liaison usuelle associée	Raideur	Rendement
		Appui ponctuel	Tx 1-	Rx 0	Liaison ponctuelle sphère plan		
			Ty 0	Ry 0			
			Tz 0	Rz 0			
			1	0			
		Appui Linéaire	Tx 1-	Rx 0	Linéaire Rectiligne		
			Ty 0	Ry 1			
			Tz 0	Rz 0			
			1	1			
		Appui plan	Tx 1-	Rx 0	Appui plan		
			Ty 0	Ry 1			
			Tz 0	Rz 1			
			1	2			
		Enfourchement (contact linéaire)	Tx 1-	Rx 0	Annulaire rectiligne		
			Ty 1	Ry 0			
			Tz 0	Rz 0			
			2	0			
		Enfourchement (contact surfacique)	Tx 1-	Rx 1	Liaison pivot glissant		
			Ty 1	Ry 0			
			Tz 0	Rz 1			
			2	2			
		Emboitement cylindrique glissant	Tx 0	Rx 0	Linéaire Rectiligne		
			Ty 0	Ry 1			
			Tz 1	Rz 0			
			2	2			
		Emboitement glissant	Tx 0	Rx 1	Appui plan		
			Ty 0	Ry 1			
			Tz 1	Rz 0			
			2	3			
		Emboitement cylindrique	Tx 0	Rx 0	Liaison pivot glissant		
			Ty 1	Ry 1			
			Tz 1	Rz 1			
			2	2			
		Emboitement	Tx 0	Rx 1	Liaison glissière		
			Ty 1	Ry 1			
			Tz 1	Rz 1			
			2	3			
		Ligne brisée	Tx 1-	Rx 0	Annulaire rectiligne		
			Ty 1-	Ry 0			
			Tz 0	Rz 0			
			2	0			
		Queue d'aronde glissante	Tx 1-	Rx 1	Liaison pivot glissant		
			Ty 1-	Ry 1			
			Tz 1	Rz 0			
			2	2			
		Queue d'aronde	Tx 1-	Rx 1	Encastrement		
			Ty 1	Ry 1			
			Tz 1	Rz 1			
			3	3			
		Mi-bois	Tx 1-	Rx 1	Encastrement		
			Ty 1	Ry 1			
			Tz 1	Rz 1			
			3	3			
		Tenon Mortaise	Tx 1-	Rx 1	Encastrement		
			Ty 1	Ry 1			
			Tz 1	Rz 1			
			3	3			



# Programmation

## Stratégie

### 6.1

#### 6.1.1

#### Principe

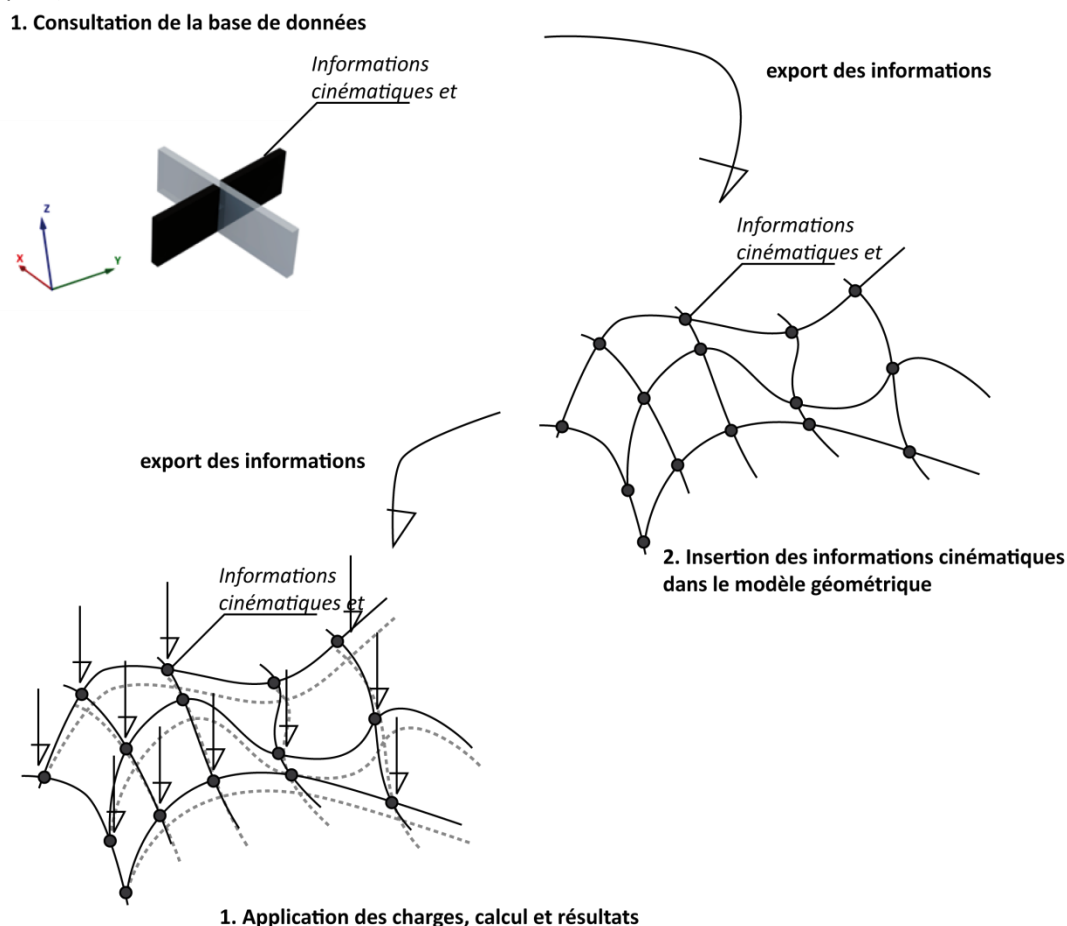
Afin de pouvoir tester la stabilité et dimensionner une structure non standard, il va falloir concevoir le support informatique permettant d'utiliser les données du modèle paramétrique des assemblages pour définir les propriétés cinématiques d'une structure. Ces nouvelles données devront être reconnaissables pour un module de calcul.

Pour utiliser l'information provenant du modèle paramétrique des assemblages, elle doit être mise en forme et exportée dans un format de fichier reconnu par les outils de calcul et de modélisation. L'information doit donc être structurée et éditable afin de pouvoir être exploitée et mise à jour pour s'adapter à d'éventuelles modifications du modèle. Pour pouvoir la consulter, elle a été mise sous la forme d'une base de données. Cette base de données doit permettre de retrouver un assemblage, consulter ses informations rattachées et les exporter vers d'autres logiciels. (Voir Schéma ci-dessous étape 1).

Pour pouvoir être calculée, la géométrie de la structure doit être dessinée dans un modèleur 3D. Chaque liaison recevra les informations cinématiques de la base de données sous forme d'un code. Il sera alors possible d'associer les propriétés mécaniques d'un assemblage à des points définissant des barres localisées dans l'espace. (Voir Schéma ci-dessous étape 2).

Ces nouvelles données provenant du modèleur et héritées en partie de la base seront traitées et mises en forme pour être lues par un outil de calcul. (Voir Schéma ci-dessous étape 3).

Figure 35 Schéma du principe de fonctionnement



## 6.1.2

## Outil

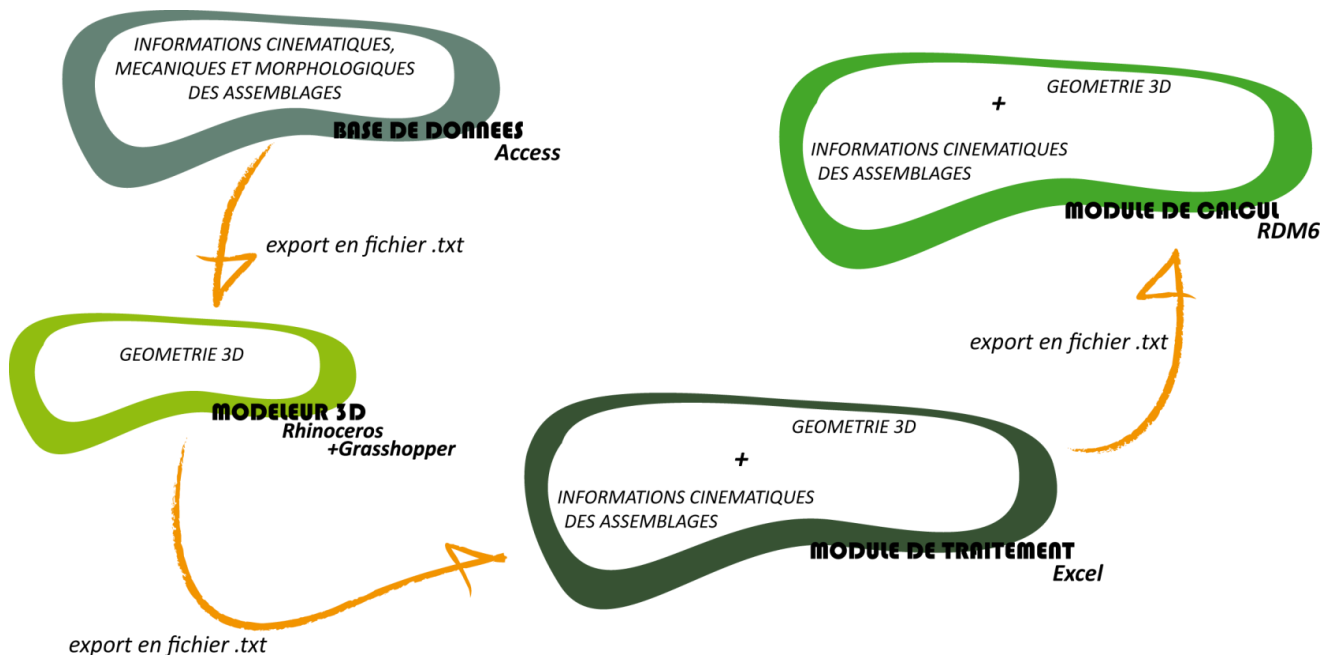
Afin de mener à bien le transit des informations à travers les différentes étapes de modélisation et de calcul, plusieurs outils compatibles entre eux et faciles à maîtriser ont été retenus. Le format de fichier texte (.txt) a permis de réaliser tout les imports et les exports entre les différents environnements.

Les informations concernant la paramétrisation des assemblages ont été recueillies dans la base de données programmée sous Access. Le choix de ce logiciel tient de sa possibilité à exporter des données en .txt et à sa prise en main rapide.

Les fichiers texte sont ensuite importés dans le module de génération de script Grasshopper utilisant le modeleur **NURBS<sub>2</sub>** Rhinocéros. Ces données sont concaténées avec des listes de coordonnées de points correspondant à des assemblages.

Ces nouvelles données sont traitées et mises en forme sur Excel pour correspondre au format d'entrée de fichier de l'environnement de calcul par la méthode des éléments finis RDM6. L'outil RDM6 présente l'avantage d'être facile à programmer en disposant d'un codage de l'information cinématique reposant sur une chaîne de quelques caractères.

Figure 36 Schéma du processus informatique choisi





## Codage de l'information

### 6.2

#### 6.2.1

#### Principe

Toute l'information qui vient de la paramétrisation des assemblages ne peut pas être utilisée brute pour être insérée dans RDM6. En réalité, seulement une partie de cette information va être utile. RDM6 ne tenant pas compte des glissements d'assemblage, seule la cinématique va définir la matrice de rigidité.

RDM6 considère qu'une barre débute et se termine par un point. Chacun de ces points correspond à une connexion entre la barre considérée et sa barre parente ou sa barre fille. Il possède par conséquent une information cinématique qui va définir les mouvements possibles que la barre peut admettre par rapport à l'autre ou aux autres barres connectées à ce même point. Pour chaque barre cette information sera codée en deux chaînes de caractères correspondant chacune à un point et composées de deux lettres. Pour décrire la cinématique de chaque barre, un repère local sera défini prenant l'axe de la barre considérée comme axe X.

<b>RI</b>	<b>RI</b>	<i>Signifie que la barre est encadrée à ses deux extrémités donc qu'aucun mouvement ne lui est permis par rapport à sa barre mère ni par rapport à sa barre fille. Elle pourra donc transmettre tous les efforts.</i>
<b>RO</b>	<b>RO</b>	<i>Signifie que la barre possède une liaison rotule à ses deux extrémités. Toutes les translations sont bloquées mais toutes les rotations sont libres. La barre ne pourra transmettre que des translations.</i>
<b>Ri</b>	<b>PY</b>	<i>Signifie que la barre est encadrée à une de ses extrémités et possède un pivot d'axe Y sur l'autre. La barre ne pourra pas transmettre une rotation.</i>
<b>RI</b>	<b>PZ</b>	<i>Signifie que la barre est encadrée à une de ses extrémités et possède un pivot d'axe Z sur l'autre. La barre ne pourra pas transmettre une rotation.</i>
<b>PY</b>	<b>PZ</b>	<i>Signifie que la barre possède un pivot d'axe Y à une de ses extrémités et possède un pivot d'axe Z sur l'autre. La barre ne pourra pas transmettre deux rotations.</i>
<b>L'encastrement</b>		<i>Bloque tout mouvement par rapport au sol, il est codé par la chaîne de caractère « encastrement ».</i>
<b>La rotule</b>		<i>Bloque toutes les translations et libère toutes les rotations par rapport au sol, elle est codée par la chaîne de caractère « rotule ».</i>
<b>Liaison éditable</b>		<i>Laisse la possibilité de créer n'importe quelle liaison à partir de sa cinématique en libérant les mouvements souhaités.</i>
<b>L'appui élastique</b>		qui remplace un ressort et <b>le mouvement imposé</b> ne seront pas utilisés.

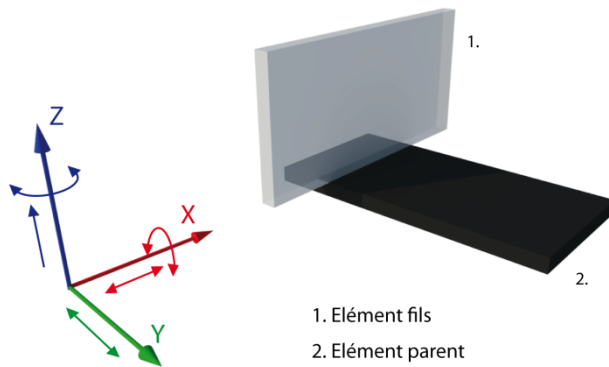
Tous les cas cinématiques répertoriés dans la base de données devront donc comporter leur codage dans un champ supplémentaire afin de pouvoir être exportés. Toutes les informations du modèle ne pourront donc pas être retranscrites grâce à ce code mais elles restent néanmoins importantes. Cette réduction dans l'utilisation du modèle ne dépend que d'une stratégie d'outils informatiques, d'autres logiciels prenant en compte plus de paramètres pourraient avoir besoin de toute l'information répertoriée.

6.2.2

Cas particuliers

Pour retranscrire la diversité des différents cas cinématique dans le codage, il faut utiliser la notion d'élément parent et d'élément fils. Si des liaisons comme l'encastrement (Ri-Ri) trouvent directement leur code, d'autres comme l'appui linéaire rectiligne ne peuvent pas être transcrites aussi simplement. La rotation autour de l'axe X n'étant pas considérée par RDM6 le problème doit être contourné. Cependant pour restituer les translations libérées entre deux barres, il n'existe aucun moyen dans RDM6.

Cas de l'appui linéaire rectiligne (voir définition p. 35).



	Rotation	Translation
Z	0	1-
Y	1	0
X	0	0

Figure 37 Cinématique de l'appui linéaire rectiligne

L'appui linéaire rectiligne libère 2 rotations d'axe X et Z et 2 translations d'axe X et Y selon le repère local de l'élément fils. Les translations n'étant pas prise en compte par RDM6, seules les rotations seront codées et la cinématique de la liaison ne pourra qu'être approchée. La rotation Z sera codée par le sigle PZ pour l'élément fils et la rotation d'axe X sera codées PY sur l'élément parent. On note que la discrétisation filaire va imposer de décomposer l'élément parent et l'élément fils en deux barres chacun. Une cinquième barre servira de connecteur et permettra d'approcher la cinématique de la liaison comme le montre le schéma.

Les liaisons Ri traduisent ici les assemblages internes des éléments discrétisés correspondant à la continuité de la matière.

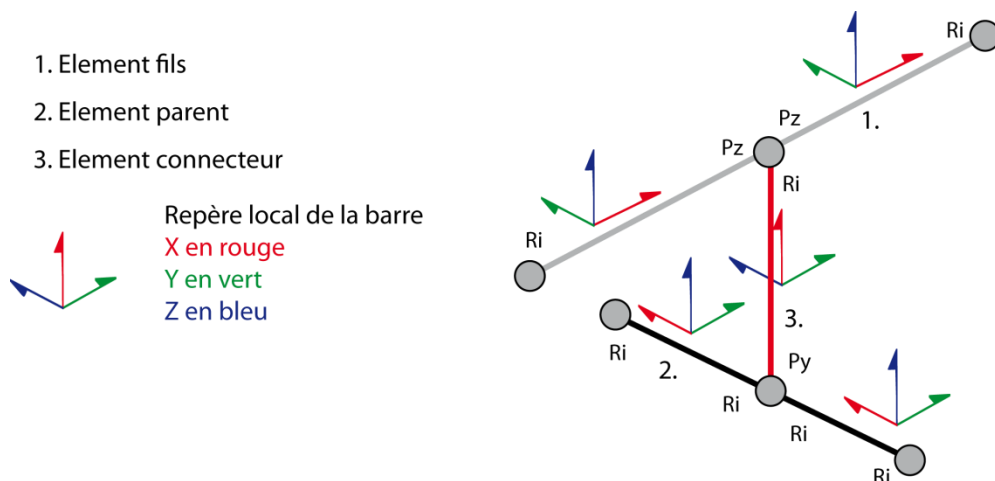
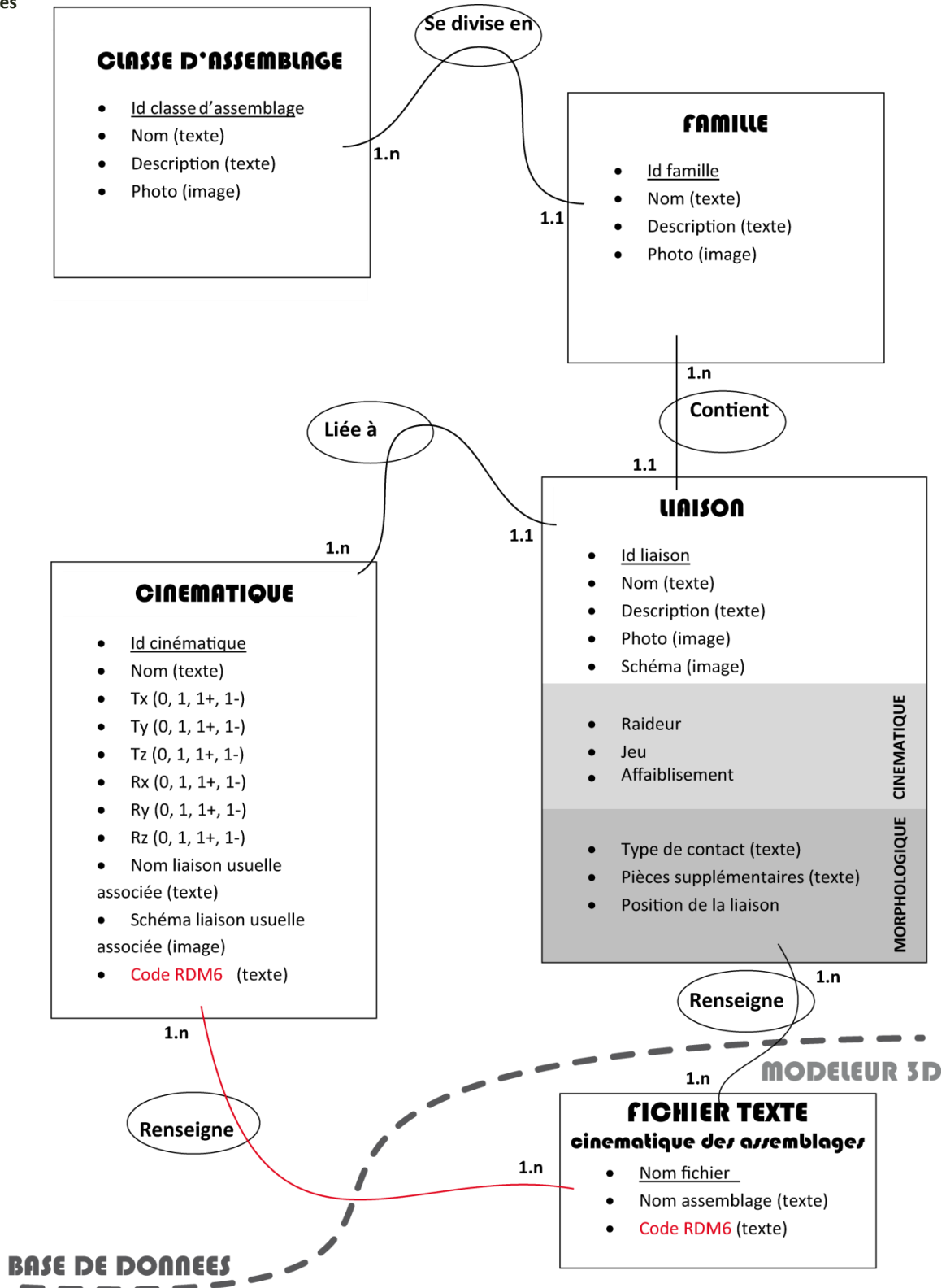


Figure 38 Solution de codage RDM6 pour l'approximation de l'appui linéaire rectiligne

La structure de la base de données respecte la hiérarchie du modèle et son schéma arborescent. Les différentes classes d'assemblages regroupent chacune plusieurs familles technologiques contenant plusieurs liaisons. Les différents cas cinématique étant des éléments redondants, ils constituent une entité à part entière. Le codage pour RDM6 sera une de leurs propriétés.

Figure 39 Schéma conceptuel de la base de données



## 6.3.2

## fonctionnement

La structure de la base de données permet d'être utilisée de deux manières. La première, en effectuant des requêtes à partir d'une famille d'assemblage afin de choisir une liaison pour exporter le fichier texte concernant son code RDM6. La seconde, en procédant en sens inverse et en effectuant une requête pour retrouver une ou plusieurs liaisons à partir d'un schéma cinématique souhaité. Là aussi on exporte son code RDM6 en fichier .txt. Afin de pouvoir être exploité, le fichier texte doit respecter un format précis. Les différentes informations sont stockées sous forme de tableau dans la base de données, mais le fichier texte ne supporte pas ce genre de mise en page. Afin de restituer la structure de l'information les délimitations entre les lignes et les colonnes seront codées. Les lignes restent des lignes distinctes mais les colonnes seront matérialisées par des espaces. L'information utile à savoir le code RDM6 se trouvera toujours espacé du début de la ligne par le même nombre de caractères.

Figure 40 Exemple de l'export d'une requête

## 1. Exemple de requête SQL

```
SELECT liaison.nom_liaison, cinématique.traduction_RDM6_élément_parent,
cinématique.traduction_RDM6_élément_fils, famille.nom_famille
FROM famille INNER JOIN (cinématique INNER JOIN liaison ON cinématique.id_cinématique = liaison.id_cinématique)
ON famille.id_famille = liaison.id_famille
WHERE (((famille.nom_famille)="ASSEMBLAGE PAR CONTACT"));
```

## 2. Affichage du résultat de la requête

nom_liaison	traduction_RDM6_élément_parent	traduction_RDM6_élément_fils	nom_famille
Appui ponctuel	Ro	Ro	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Appui Linéaire	Ro	Pz	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Appui plan	Py	Py	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Enfourchement (contact linéaire)	Ro	Ro	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Enfourchement (contact surfacique)	Pz	Py	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement cylindrique glissant	Ro	Pz	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement glissant	Py	Py	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement cylindrique	Pz	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Queue d'aronde glissante	Pz	Pz	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Queue d'aronde	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Mi-bois	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Tenon Mortaise	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT

## 3. Fichier texte exporté

nom_liaison	traduction_RDM6_élément_parent	traduction_RDM6_élément_fils	nom_famille
Appui ponctuel	Ro	Ro	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Appui Linéaire	Ro	Pz	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Appui plan	Py	Py	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Enfourchement (contact linéaire)	Ro	Ro	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Enfourchement (contact surfacique)	Pz	Py	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement cylindrique glissant	Ro	Pz	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement glissant	Py	Py	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement cylindrique	Pz	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Emboitement	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Queue d'aronde glissante	Pz	Pz	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Queue d'aronde	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Mi-bois	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT
Tenon Mortaise	Ri	Ri	ASSEMBLAGE PAR CONTACT

## 6.4

## 6.4.1

## le modèle géométrique

La génération du modèle géométrique n'est pas le sujet central de ce travail. Néanmoins il est indispensable de connaître sa conception pour comprendre comment les informations concernant les assemblages peuvent y être insérées. Pour cette étude, on utilisera une méthode de génération de géométrie développée dans le cadre de la thèse de Shaghayegh Shadkou et approfondie grâce au travail mené par David Davalos pour son stage recherche du Master AME en 2011.

Le modèle géométrique est constitué d'une grille d'arc issue de la projection d'une grille plane sur une surface NURBS. Chaque direction de la **grille**<sub>11</sub>, appelée aussi **fuseau**<sub>12</sub>, correspond à un ou plusieurs éléments structurels. A chaque point d'intersection entre deux fuseaux correspond un assemblage (point 1., 2., 3. Figure 42 *Schéma du processus de génération du modèle géométrique* ci-contre). Une hiérarchie entre fuseau parent et fuseau fils permet de distinguer de manière générale quel sera l'élément parent et l'élément fils pour chaque assemblage de chaque intersection. Le modèle géométrique tient compte du fait que deux fuseaux peuvent être « décalés », c'est-à-dire qu'ils ne se croisent pas directement (voir schéma) mais par l'intermédiaire d'une barre supplémentaire. Cette barre permet de faire office de connecteur pour restituer des liaisons complexes comme expliqué précédemment (point 4. Figure 42, ci-contre).

Une autre surface définira le sol. A chaque intersection en un arc d'un fuseau et cette surface se trouvera un point correspondant à une liaison avec la terre (point 5 Figure 42 ci-contre).

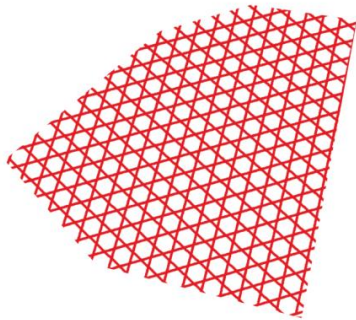
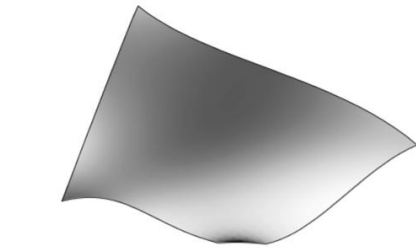
Il pourrait bien évidemment exister d'autre manière de générer une géométrie mais dès le début de l'étude, nous avons décidé d'employer celle-ci.

Dans Grasshopper, toutes les données sont traitées sous forme de liste. Une liste peut posséder un nombre infini de ligne mais une seule colonne. Il existe donc des listes pour chaque fuseau contenant les points de début, de fin et d'intersections de chaque élément. Les points d'intersections peuvent donc se retrouver dans plusieurs listes à la fois car ils appartiennent à plusieurs fuseaux en même temps.

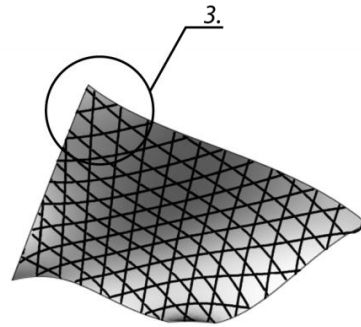
Figure 41 Exemple de liste sur Grasshopper

<i>barres rigides</i>	
	{0;0}
0 Ri	3.224407, 11.053322, 8.137396
1 Ri	3.1875, 11.032014, 8.113752
	{0;1}
0 Ri	3.1875, 11.032014, 8.113752
1 Ri	3.150697, 11.010765, 8.089892
	{0;2}
0 Ri	3.150697, 11.010765, 8.089892
1 Ri	3.113999, 10.989578, 8.065818

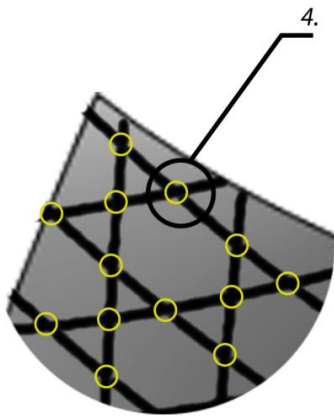
Figure 42 Schéma du processus de génération du modèle géométrique



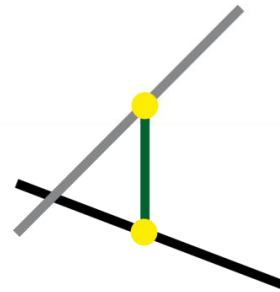
1. Génération d'une grille plane (rouge) et d'une surface de référence (gris).



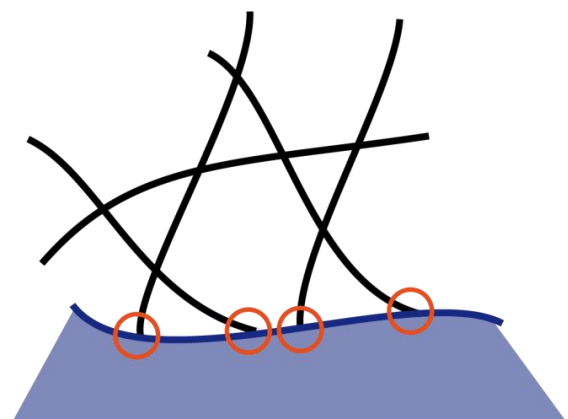
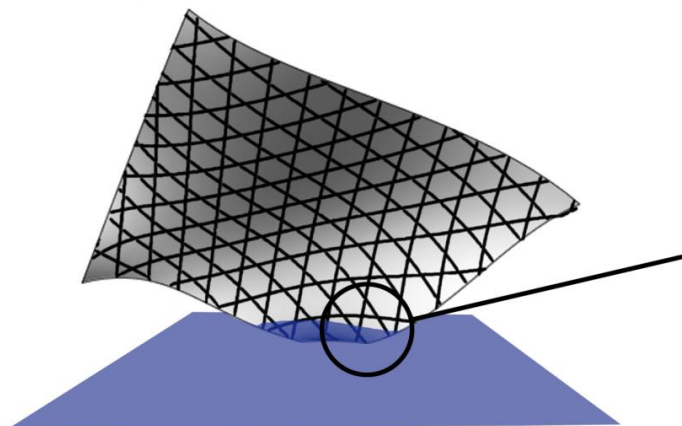
2. Projection de la grille sur la surface de référence



3. Chaque intersection entre les fuseaux permet de localiser un assemblage (jaune).



4. Barre "connecteur" entre les fuseaux (vert).



5. Intersections des arcs des fuseaux avec le sol (bleu) pour localiser les liaisons à la terre (orange).

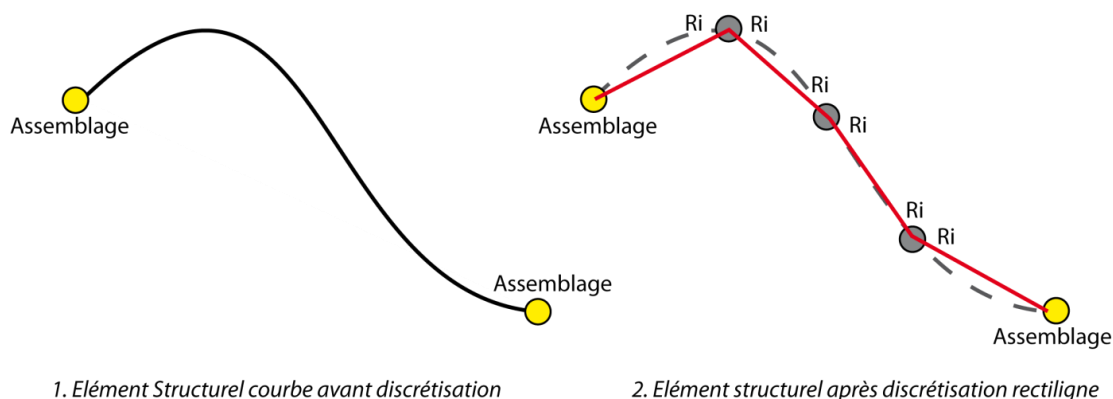


## 6.4.2

## Préparation du modèle géométrique

Comme expliqué précédemment, la méthode des éléments finis impose une discrétisation de la géométrie afin d'approcher chaque courbe par plusieurs segments. La géométrie discrétisée n'est pas une représentation de sa morphologie réelle mais une approximation indispensable pour le calcul. Chaque élément structural courbe devra être découpé en un certain nombre de barres. Ces barres issues de la discrétisation sont en réalité des portions d'éléments continus. Les nœuds qui définissent les portions internes d'un élément se rapportent à des **assemblages parfaits**<sub>13</sub> qui retranscrivent la continuité de la matière. Chaque extrémité de barre en contact avec un de ses points sera donc automatiquement affectée du code Ri pour rigide. Une barre interne aura pour ses deux extrémités un point affecté du code Ri.

Figure 43 Schéma principe de discrétisation



## 6.4.3

## Procédures

Une fois importé dans Grasshopper, les informations de la base de données sont mises sous forme de listes. Quelques scripts permettent d'extraire le code RDM6 afin de le préparer avant de l'insérer dans les données du modèle géométrique (voir Figure 44 page ci contre).

L'affectation des liaisons à la terre se fait exactement de la même manière. Le code est concaténé à une liste regroupant tout les nœuds issus de l'intersection des arcs avec la surface du sol.

Pour affecter un assemblage à un fuseau, il faut concaténer la chaîne de caractère constituant le code RDM6 à la liste des éléments concernés. Si l'on considère par exemple deux fuseaux, l'un étant le fuseau parent, l'autre le fuseau fils. Il faut concaténer le code RDM6 correspondant à l'élément parent avec les point d'intersections du fuseau parent et du fuseau fils présents dans la liste du fuseau parent. De même, il faut concaténer le code RDM6 correspondant à l'élément fils avec les points d'intersections du fuseau parent et du fuseau fils présents dans la liste du fuseau fils. Ainsi l'information cinématique des assemblages se transmettra au point de l'extrémité des barres en contact avec un assemblage.

Pour ne pas brider la créativité, il reste possible d'effectuer des manipulations pour affecter des assemblages différents sur une barre précise à l'intérieur d'un fuseau.

Deux types de données sont exportés en fichier texte : les données permettant de reconstruire la géométrie dans RDM6, constituée de la liste de tous les nœuds du modèle sans doublon et la liste des barres avec le code correspondant à l'assemblage souhaité pour compléter les données de la matrice de rigidité. Lorsque le modèle géométrique est modifié ou que des assemblages sont changés, le fichier texte est automatiquement mis à jour (voir Figure 45 p 59).



Figure 44 Script d'insertion des informations cinématiques des assemblages dans les listes de barres

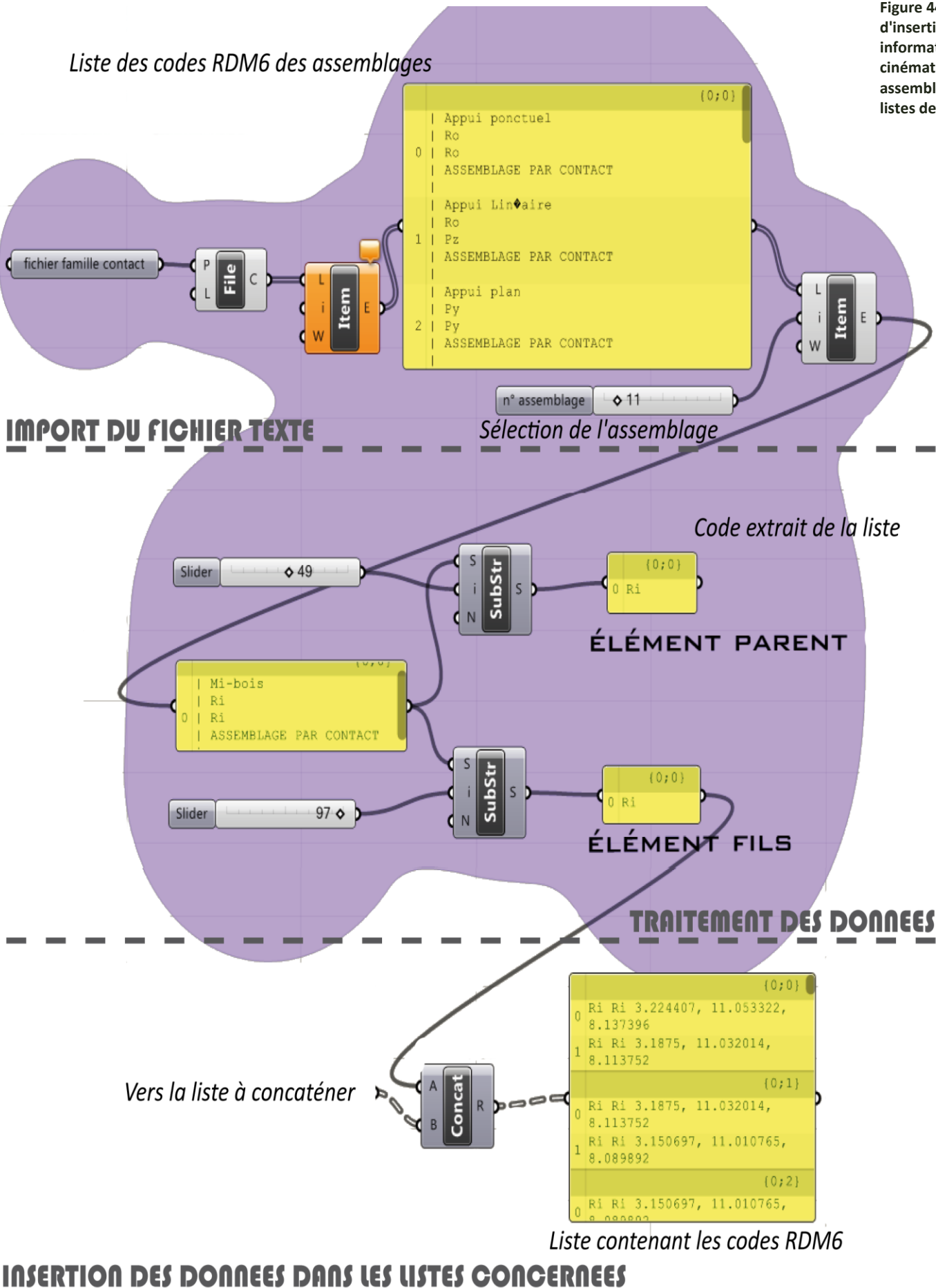
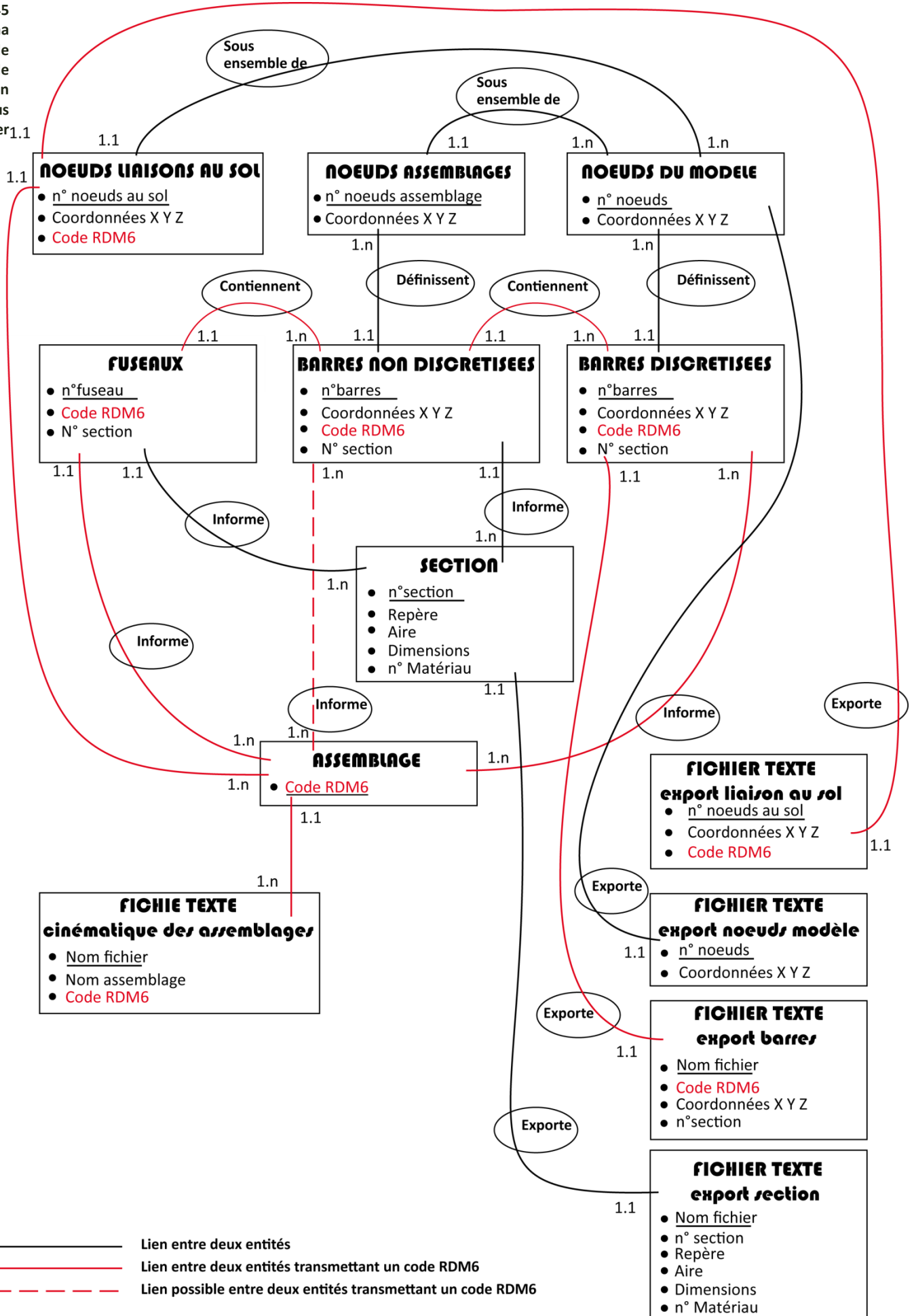


Figure 45  
Schéma  
conceptuel de  
la gestion de  
l'information  
sous  
Grasshopper1.1



Pré -traitement

6.5

6.5.1

L'outil

Les informations dont RDM6 a besoin pour reconstruire la géométrie et procéder au calcul doivent être mises en forme selon un format bien précis. L'outil de pré traitement doit recevoir les informations venant de Grasshopper et les organiser de manière à être reconnues par RDM6. Il s'agit d'une feuille de calcul Excel dans laquelle on importe les différents fichiers texte rattachés aux listes des nœuds, des liaisons au sol et des différentes barres. Les opérations à effectuer ne se font pas automatiquement, mais une fois les formules entrées, on peut traiter très rapidement un grand nombre de points.

6.5.2

Procédures

Afin de classer les informations provenant de plusieurs fichiers texte pour les structurer en un seul, une première étape de traitement et d'organisation est nécessaire. La liste des nœuds de tout le modèle géométrique contenant les coordonnées X, Y, et Z de chaque point est importée brute de Grasshopper. La première tâche consiste à numéroter chaque système de coordonnées pour lui attribuer un identifiant RDM6. Cependant pour la suite du traitement, on utilisera un identifiant provisoire composé des trois coordonnées concaténées en une chaîne de caractère. Cet identifiant ne peut être qu'unique car chaque point occupe une position différente dans l'espace.

Figure 46 Identification provisoire des nœuds du modèle « exemple des points 211 et 212 ».

IMPORT LISTE NŒUDS				
X	Y	Z	XYZ	ID
8.68875200000E+00	1.28225220000E+01	9.28751100000E+00	8.68875212.8225229.287511	211
8.62750300000E+00	1.27871600000E+01	9.28751100000E+00	8.62750312.787169.287511	212
Coordonnées X	Coordonnées Y	Coordonnées Z	Identifiant provisoire	Identifiant RDM6

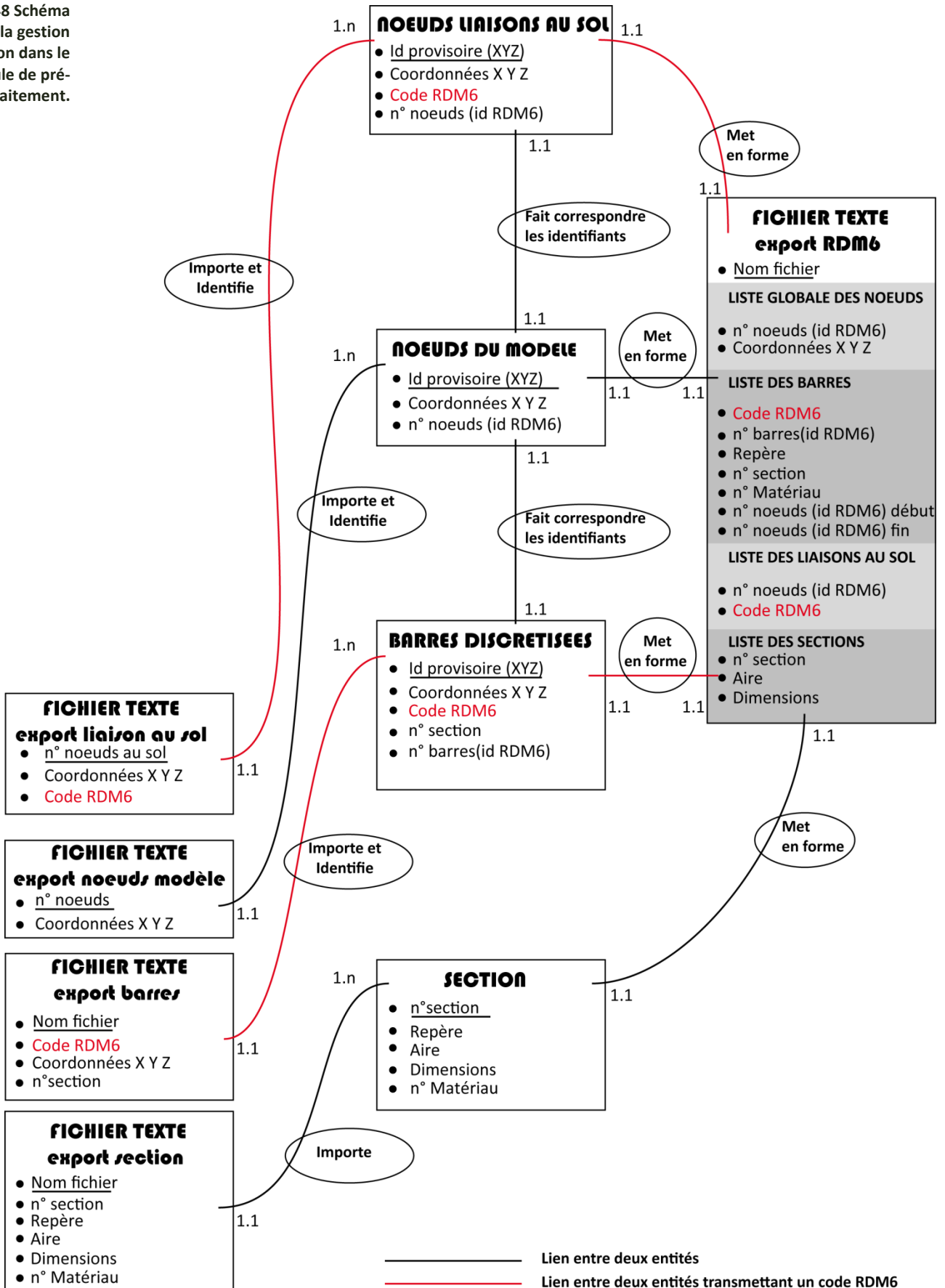
Comme expliqué précédemment, une barre est définie par deux points. Dans Grasshopper chaque barre possède un identifiant, mais il ne peut être réutilisé ici. Une fois importée, la liste des barres contiendra les coordonnées des nœuds de début et de fin ainsi que leur code RDM6. Il va donc falloir numéroter la liste des barres pour leur réattribuer un identifiant. La tâche la plus complexe va être de retrouver l'identifiant RDM6 des nœuds définissant l'extrémité de chaque barre dans la liste globale des nœuds, à l'aide de l'identifiant provisoire. Il est donc possible de faire correspondre les codes RDM6 de chaque barre avec l'identifiant RDM6 des nœuds qui les définissent et leur identifiant propre.

Figure 47 Recherche de l'identifiant RDM6 des nœuds par l'identifiant provisoire.

IMPORT LISTE BARRES INTERNES									
ID BARRE	ESPACE	CODE ASS.		X	Y	XYZ	ID NŒUD		
1		Ri	RiRi	8.688752	12.822522	9.28751	8.68875212.8225229.287511	211	Noeud début
		Ri		8.627503	12.78716	9.28751	8.62750312.787169.287511	212	Noeud fin
							Identifiant provisoire	ID RDM6	

Les informations concernant les repères de profil, le matériau utilisé et la section peuvent facilement être concaténées à la liste des barres. Les liaisons au sol figurent à la fin du format avec l'identifiant des nœuds correspondant et le code cinématique.

Figure 48 Schéma conceptuel de la gestion de l'information dans le module de pré-traitement.



Une fois ces opérations effectuées il ne reste qu'à mettre en forme le fichier RDM6 et paramétrer l'export du fichier texte pour que les délimitations des colonnes soient transcrites en espaces.

Figure 49 Exemple de fichier texte formaté pour RDM6

```

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

```

---

```

$noeuds ( 3222 )
  1  8.68875200000E+00  1.28225220000E+01  9.28751100000E+00
  2  8.62750300000E+00  1.27871600000E+01  9.28751100000E+00
  ID noeud | Coordonnées X | Coordonnées Y | Coordonnées Z
  3221 | 1.89000000000E+01 | 8.18544000000E-01 | 9.28751100000E+00
  3222 | 2.01000000000E+01 | 8.11769000000E-01 | 9.28751100000E+00
  0

```

---

```

Liste des noeuds du modèle

```

---

```

$poutres ( 3457 )
  1  RIRI  1  2  -4.99998657061E-01  8.66026179129E-01  0.00000000000E+00  11  11
  2  RIRI  2  3  -4.99994174917E-01  8.66028766871E-01  0.00000000000E+00  11  11
  3  RIRI  3  4  -4.99998657061E-01  8.66026179129E-01  0.00000000000E+00  11  11
  ID noeud | Code | Noeud | Début et fin | Coordonnées X | Coordonnées Y | Coordonnées Z | Code section | Code matériau
  3457 | RIRI | 2849 3161 | -1.00000000000E+0 | 0.00000000000E+0 | 0.00000000000E+0 | 11 | 11
  0

```

---

```

Liste des barres du modèle

```

---

```

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

```

---

```

Liste des sections du modèle

```

---

```

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

```

---

```

Liste matériaux du modèle

```

---

```

0
$liaisons ( 16 )
encastrement 3165
encastrement 3212
  Code | ID noeud
  cinématique |
  RDM6 |

```

---

```

Liste des liaison au sol

```

## 6.6

## 6.6.1

## Ouverture du fichier

Une fois l'extension .txt changée en .por sur le fichier exporté d'Excel, il est possible de l'ouvrir sur RDM6. La géométrie est reconstruite, toutes les liaisons y compris les liaisons au sol sont définies et les sections et les matériaux sont appliqués à chaque barre. Pour lancer un calcul il ne reste qu'à appliquer les charges sur la structure.

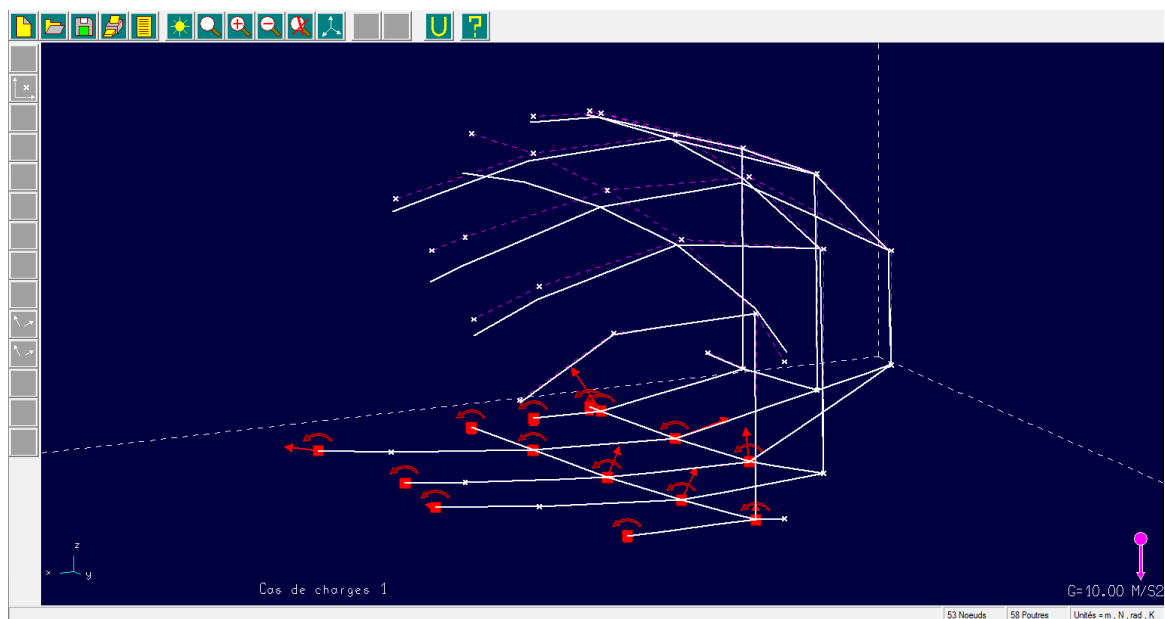
## 6.6.2

## Calcul et résultats

Si la structure est stable le calcul est possible et les résultats sont enregistrés dans un fichier texte. Si en revanche le calcul est impossible, la structure n'est pas stable et il n'est pas possible de localiser le problème. Il faut donc repasser en phase de conception ou changer d'assemblage.

Les résultats permettent notamment de vérifier la déformation de la structure et de connaître les efforts maximums transmis. On peut ensuite dimensionner les assemblages en conséquence.

Figure 50 Exemple de visualisation des déformations d'une structure dans l'environnement



```

+-----+
| Déplacements nodaux [ m, rad ] |
+-----+

Noeud  dx   dy   dz   rotx  roty  rotz

  1  2.141E-01 -2.010E-01 -1.134E-01  2.740E-02  9.431E-02 -5.082E-02
  2  4.436E-01 -1.752E-01 -2.620E-02  1.003E-02  3.895E-04 -5.060E-02
.....
 53  3.160E-03  4.245E-02 -5.443E-01  2.074E-02  6.996E-02 -1.473E-03

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

+-----+
| Action(s) de liaison [ N  N.m ] |
+-----+

Noeud 14 - Rx =  60984.4 Ry =  31840.9 Rz =  356187.3
          Mx =  392656.3 My =  74092.0 Mz = -292333.8
.....
Noeud 50 - Rx =   -0.0 Ry =    0.0 Rz =  17114.9
          Mx =   3761.3 My =  11974.1 Mz =    0.0

Somme des actions de liaison :

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

Somme des forces appliquées à la structure :

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

+-----+
| Efforts intérieurs [ N N.m ] |
+-----+

N = Effort normal      (TY , TZ) = Effort tranchant
Mt = Moment de torsion ( MfY , MfZ ) = Moment fléchissant

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

  1  1 -99467.2 -118376.8 -270138.3  -9.2 1230673.0 -466783.0 -4.873E-05
  2 -99443.2 -83071.1 -270138.3  -9.2  -74.6 -7885.6
        118376.8 270138.3      1230673.0 466783.0
.....

 58 52 17029.0 -25013.7  -0.0  0.0  0.0 -48838.0 3.575E-06
  53  0.0  0.0  -0.0  0.0  -0.0  0.0
        25013.7  0.0      0.0 48838.0

```

Figure 51 Exemple d'édition des résultats des calculs effectués sur RDM6



## Expérimentation

7

### les projets

7.1

7.1.1

La vague

La vague était un des projets réalisés dans l'atelier « Conception et Fabrication Digitale » mené dans le cadre du Master AME de cette année. Il s'agit d'une structure bois dont la morphologie a été légèrement simplifiée pour être compatible avec la logique de génération de géométrie utilisée pour ce travail. L'ossature est composée d'une grille d'arc à deux fuseaux non orthogonaux. Dans le projet d'origine, le deuxième fuseau ne partage pas exactement la même surface de projection que le premier. Pour ne pas modifier trop profondément la programmation effectuée sur Grasshopper, on a choisi de simplifier légèrement le projet. Les arcs dérivent tous d'une forme de C de dimensions et de proportions variables. La partie inférieure de ces arcs est en contact avec le sol et la partie supérieure est en porte-à-faux. Cette structure assez simple a été conçue sans l'aide du modèle développé. On a donc déjà pu estimer sa stabilité de manière empirique au moment de sa conception grâce à une maquette. Néanmoins pour tester le modèle, on suivra le processus dans son intégralité et ce projet fera office de cobaye.

Figure 53 Image de synthèse de la structure

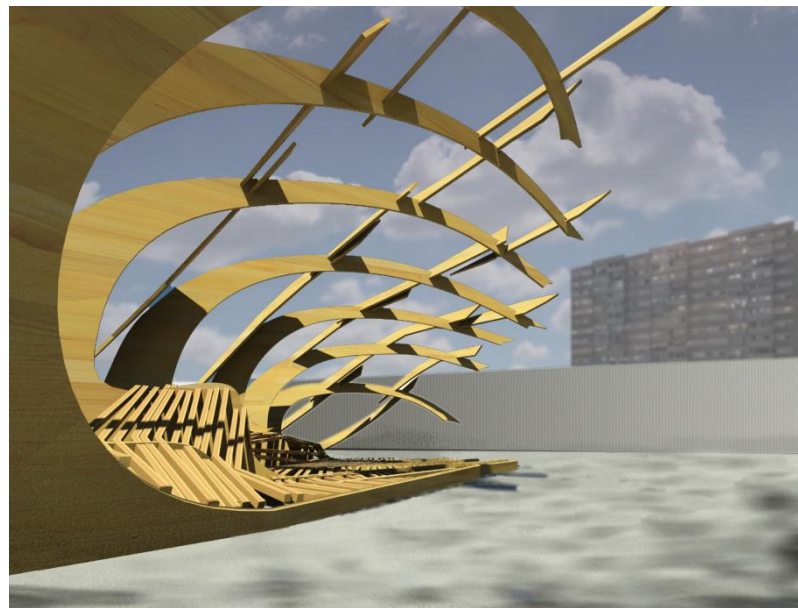
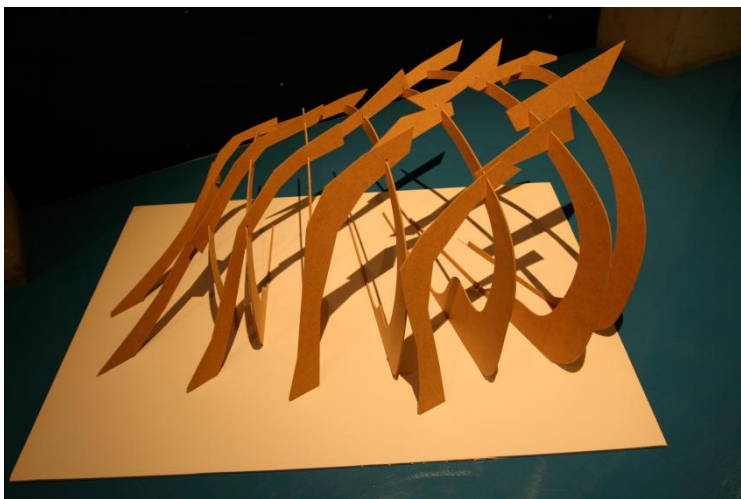


Figure 52 Photo de la maquette



## 7.1.2

## Yeoju Golf club

Le club de golf de Yeoju en Corée du sud a été construit en 2008 par Shigeru Ban. Il s'agit là aussi d'une structure bois mais sa morphologie peut plus facilement se modéliser suivant la logique de génération de la géométrie choisie pour ce travail. La structure bois réalisée ici reprend le motif de la charpente du centre Pompidou de Metz avec trois fuseaux qui ne sont pas concourants en un même point. Cette résille fabrique une nappe qui se déforme selon des points d'attraction pour s'encren sur des piliers en bois. Bien que non standard, la forme de la charpente constituée d'une répétition de module parabololoïde est plus régulière qu'à Metz. Afin de tester le modèle, on choisi de ne considérer que le calcul de quatre modules de la résille, les piliers constituant la terre.

Figure 54 Module parabololoïde de la structure du Yeoju golf club illustration design to production

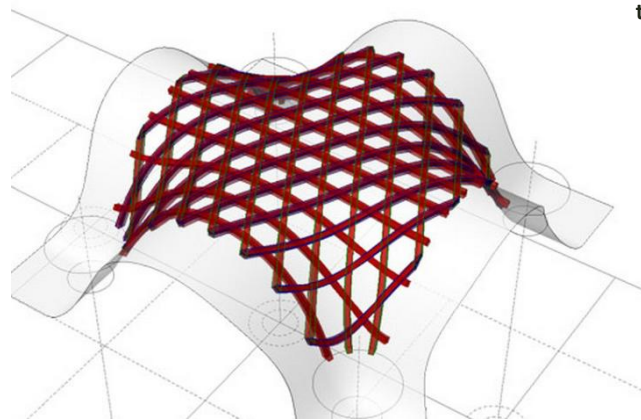


Figure 56 Vue de la structure illustration <http://www.core.for-m-ula.com/2011/03/10/shigeru-ban-nine-bridges/>

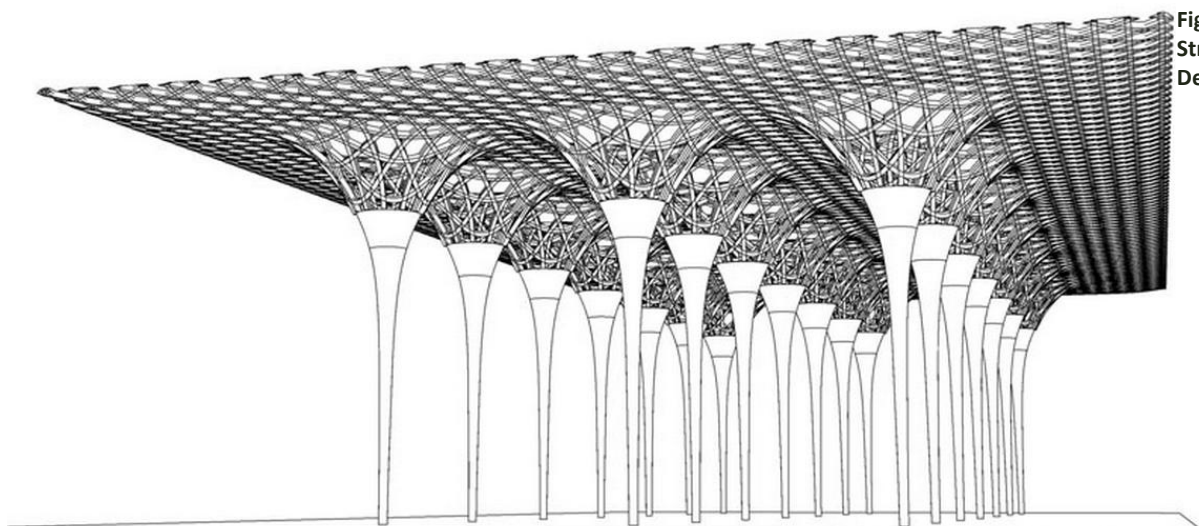


Figure 55 Vue de la Structure illustration Design to production

## Paramétrisation des assemblages

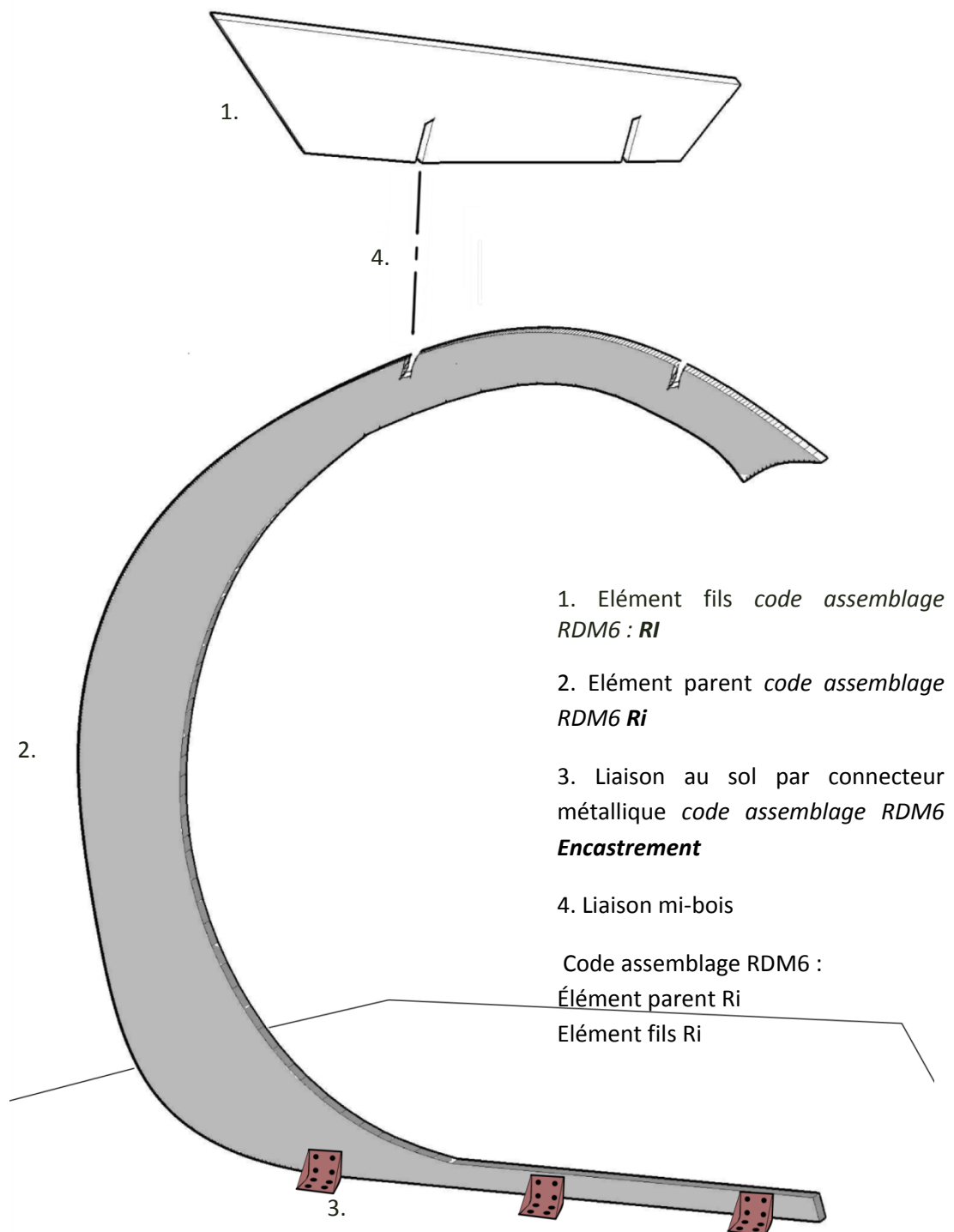
### 7.2

#### 7.2.1

#### La vague

Sur la vague, tous les assemblages entre les éléments de la charpente sont des mi-bois. Les liaisons au sol sont des encastrements réalisés grâce à des connecteurs métalliques. Comme indiqué dans le modèle, tous les assemblages bloquent tous les degrés de liberté, la structure est par définition stable. Le code RDM6 correspondant aux liaisons de la charpente sera donc « Ri » pour les éléments parents et fils et « encastrement » pour les liaisons au sol.

Figure 57 Les différents assemblages de la vague





## 7.2.2

## Yeoju Golf club

Dans le projet de Shigeru Ban, Les assemblages des éléments constituant la charpente de chaque module sont des mi-bois renforcés par des tiges métalliques ne possédant pas de jeu. Les modules sont assemblés entre eux par des connecteurs métalliques situés à l'intérieur des profils bois. La résille est elle aussi reliée aux piliers par des connecteurs situés à l'intérieur des profils bois mais de morphologie différente. Ces assemblages permettent des encastremements à haut rendement, sur l'ensemble de l'ossature. Là aussi, comme le prévoit le modèle, le code RDM6 correspondant aux liaisons de la charpente sera « Ri » pour les éléments parents et fils appliqués aux assemblages mi bois et connecteurs. Les liaisons au sol porteront le code « encastrement ».



Figure 58 Photo des assemblages du golf club de Yeoju, illustration [http://www.detail.de/rw\\_6\\_Plus\\_Galerie\\_Ein\\_HoleFoto\\_4097\\_VolIbild.htm](http://www.detail.de/rw_6_Plus_Galerie_Ein_HoleFoto_4097_VolIbild.htm)

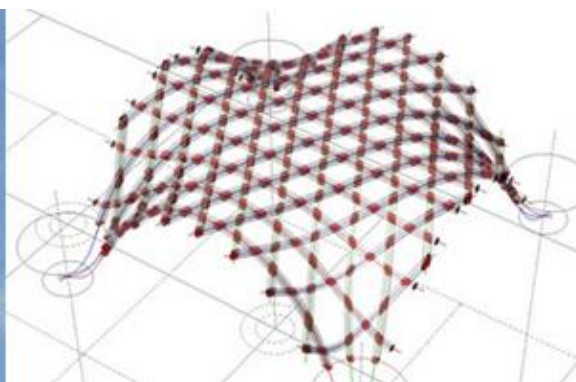


Figure 59 Montage (gauche) et localisation des assemblages (droite) illustration : design to production

## Géométrie et affectation des assemblages

### 7.3

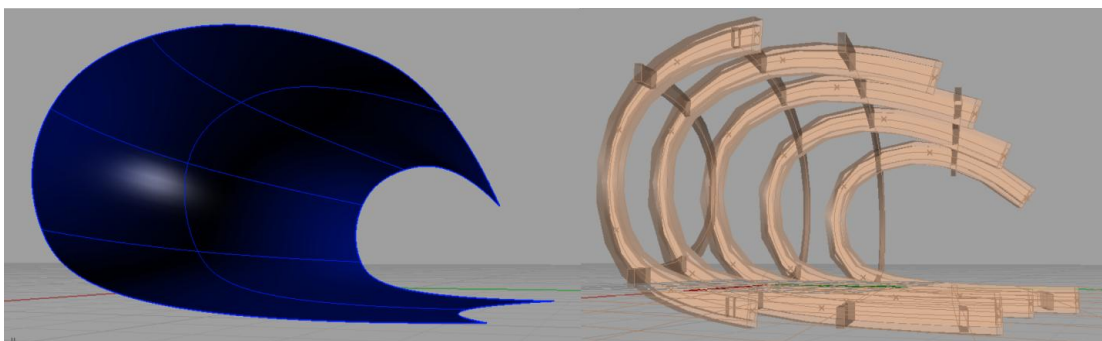
#### 7.3.1

#### la vague

Là encore, bien que la génération de la géométrie ne soit pas l'objet de ce travail, elle constitue néanmoins une étape cruciale dans le processus de programmation. Sans elle il est impossible de fournir les données nécessaires au calcul.

La surface de projection de la vague se modélise très facilement. Mais étant donné qu'elle se replie sur elle-même, il faut prendre des précautions lors de la projection des fuseaux sur la surface.

Figure 60 Surface de projection (gauche) et géométrie de la structure (droite)



La structure de la vague est de petite taille et ne comporte qu'un petit nombre d'assemblage. Les listes comportant les différentes barres ne sont pas longues et ne comprennent en moyenne qu'une centaine de lignes.

Après la discrétisation chaque fuseau possède plusieurs listes : la liste des barres internes, automatiquement affecté du code « RI RI » et deux listes des barres recevant un assemblage sur une de ses extrémités et un assemblage parfait sur l'autre.

Les informations cinématiques des assemblages sont importées dans Grasshopper suivant le procédé expliqué précédemment. Les codes « RI » concernant les assemblages entre les fuseaux sont concaténées aux listes des barres recevant un assemblage mi-bois en prenant en compte la hiérarchie parent-enfant. Les codes « encastrement » sont eux aussi concaténés aux listes des liaisons au sol.

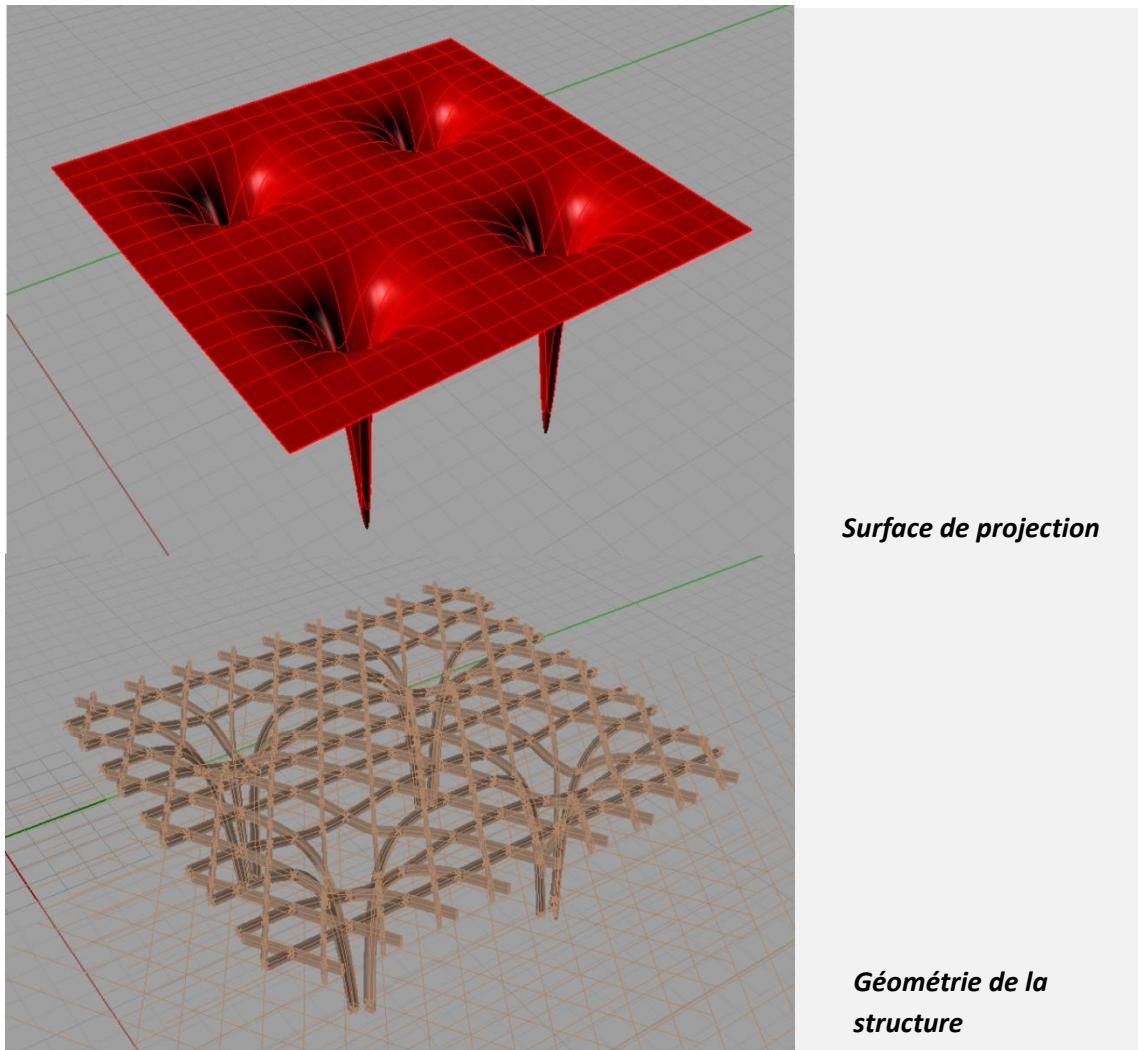
Ces données sont prêtes à être exportées en fichiers texte ainsi que celles concernant les listes de tous les nœuds du modèle et les données sur la section et le matériau.

**7.3.2****Yeoju Golf club**

Ce projet plus complexe, est bien plus grand que la modeste structure de la vague. Sa géométrie n'est pas d'une grande difficulté à modéliser mais sa taille et ses trois fuseaux vont générer beaucoup plus de données. Les listes sont très longues et si une erreur s'y glisse il devient problématique de la repérer.

Comme précédemment la première tâche consiste à projeter la géométrie. Le fait qu'elle comporte plusieurs perforations ne représente aucun problème.

Figure 61 Génération de la géométrie du golf club de Yeoju



De la même manière que celle employée pour la vague, la géométrie est discrétisée. Chaque fuseau possède alors les mêmes listes que précédemment : la liste des barres internes, automatiquement affectée du code « RI RI » et deux listes des barres recevant un assemblage sur une de ses extrémités et un assemblage parfait sur l'autre.

Là encore les informations cinématiques importées sur Grasshopper sont concaténées à leurs listes correspondantes. Tous les assemblages étant des encastresments, toutes les barres sont affectées des codes « RI RI ». Les liaisons au sol étant elles aussi des encastresments, elles sont codées par les caractères « encastrement ».

A leur tour, toutes les données sont exportées en fichier texte.

## Post-traitement et calculs sur RDM6

### 7.4

#### 7.4.1

#### La vague

Comme l'explique la procédure d'utilisation de l'outil de post-traitement, les données provenant de Grasshopper sont importées sur Excel.

La liste des nœuds de tout le modèle doit être la première à être traitée. Tous les nœuds sont numérotés, servant d'identifiant RDM6, et un identifiant provisoire à partir de leurs coordonnées leur est affecté.

La liste des barres peut alors être elle aussi numérotée. Les coordonnées des points de ses deux extrémités sont remplacés par l'identifiant RDM6 correspondant via l'identifiant provisoire.

Une partie du fichier RDM6 de sortie peut alors être mis en forme. Il ne restera qu'à lui ajouter les informations sur le profil, la section, les matériaux et les liaisons au sol. Pour ce faire il n'y a pas de manipulation particulière à effectuer, il faut seulement veiller à respecter le format.

Le fichier peut alors être exporté en s'assurant que les délimitations des colonnes seront transformées en espace.

Une fois le fichier ouvert sur RDM6, la géométrie est reconstruite, les assemblages et les sections sont affectés à chaque barre (voir Figure 63 page suivante).

Avant de procéder au calcul il faut affecter un scénario de charge à la structure. La vague étant conçue comme un simple objet plastique elle n'est soumise qu'à son poids propre. Cependant on peut lui ajouter une charge uniformément répartie en guise de coefficient de sécurité. Il est aussi possible de lui appliquer des charges horizontales afin de simuler l'impact du vent mais la modélisation des charges n'est pas l'objet de ce travail. On ne s'en tiendra qu'au poids propre.

Il est maintenant possible de procéder au calcul et comme prévu la structure est stable, aucun problème n'a empêché l'analyse statique. On peut alors observer la déformation de la structure et visualiser les efforts auxquels elle est soumise. Il est assez aisé de localiser les zones où les efforts sont maximums afin de les dimensionner en conséquence. Les résultats peuvent alors être exportés en fichier texte pour être traités et interprétés (voir « Détail des résultats de l'analyse structurelle de la vague » en annexe p 89). Bien que la structure soit stable, on remarque qu'elle n'est pas dimensionnée pour recevoir de tels efforts. Il est alors possible de revenir en phase conception pour modifier certains paramètres mais il faudra ensuite reprendre tout le processus afin de recommencer une nouvelle simulation jusqu'à obtenir les résultats souhaités.



Figure 63 Ouverture de la vague dans RDM6

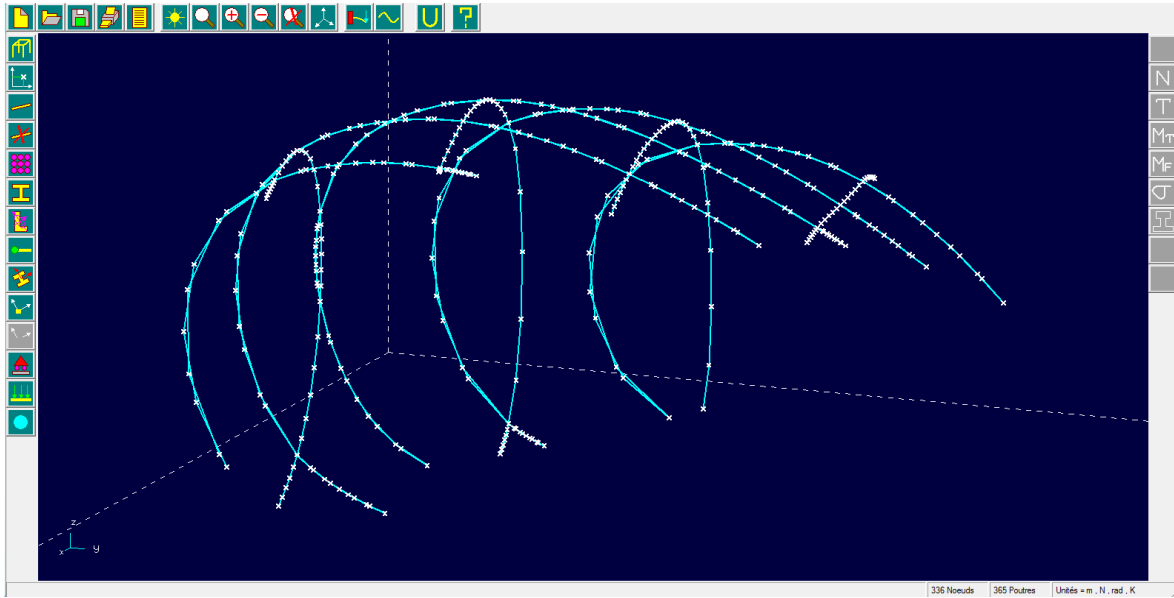
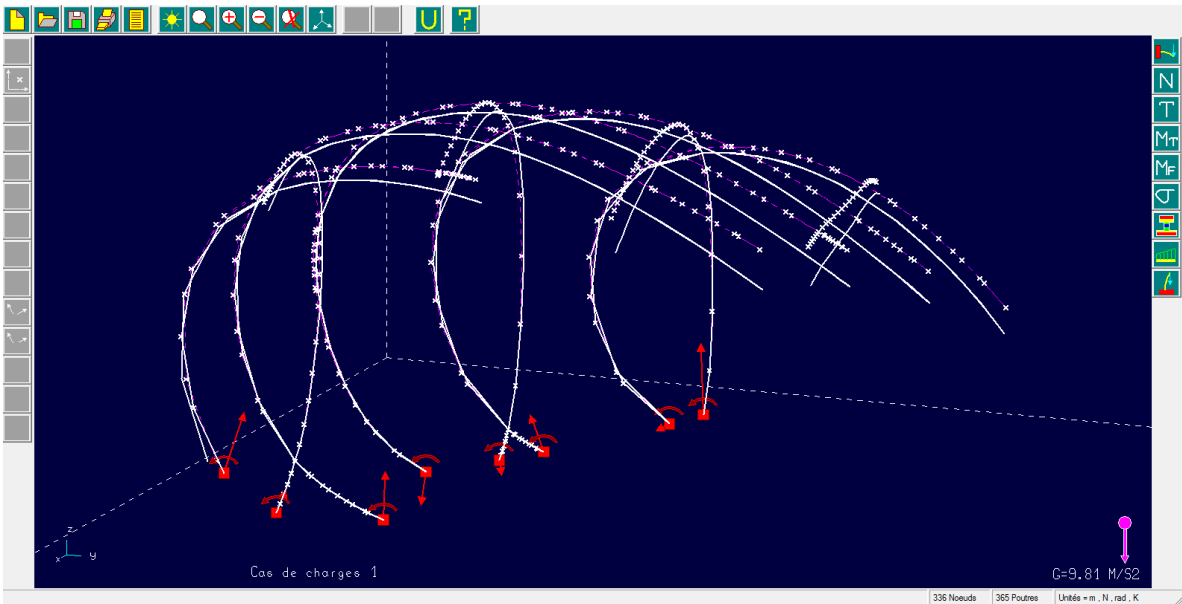


Figure 62 Visualisation de la déformation de la vague dans RDM6



### 7.4.2

Bien que le volume de données concernant cette structure soit beaucoup plus important que celui de la vague, les manipulations sont exactement les mêmes. Elles sont effectuées dans le même ordre et le temps nécessaire est à peu de chose près le même.

Là aussi, la liste des nœuds de tout le modèle est la première à être traitée.

La liste des barres peut alors être elle aussi numérotée. Le fait qu'il y ait trois fuseaux ne change rien à cette manipulation.

Une partie du fichier RDM6 de sortie est alors prêt à être mis en forme. Il ne restera là aussi qu'à lui ajouter les informations sur le profil, la section, les matériaux et les liaisons au sol.

Le fichier peut alors être exporté.

Comme dans le cas de la vague, à l'ouverture, le fichier contient toutes les informations excepté les charges.

Avant de procéder au calcul il faut là aussi affecter un scénario de charge à la structure. Cette charpente est conçue pour soutenir une toiture légère. On peut alors lui ajouter une charge forfaitaire uniformément répartie en plus de son poids propre. Comme dans le cas de la vague on ne va pas tenter de simuler l'impact du vent car ce paramètre est très compliqué à prendre en compte et peut à lui seul faire l'objet d'un stage.

Là aussi les calculs démontrent la stabilité de la structure. On peut alors obtenir les mêmes observations et les mêmes comptes-rendus de calcul que dans le cas de la vague (voir « Détail des résultats de l'analyse structurelle du golf club de Yeoju avec encastrement » en annexe p 91).

Afin de tester le retour en phase conception, on a décidé de dégénérer les assemblages de cette structure en remplaçant les encastresments de la charpente par des pivots d'axe Z pouvant être réalisés par des assemblages par tiges métalliques par exemple. On choisit aussi de remplacer les encastresments au sol par des rotules. Cette nouvelle structure n'existe pas en réalité et cette manipulation ne sert qu'à tester le modèle pour montrer ses capacités.

On répète toutes les étapes du processus avec les nouvelles données jusqu'à l'ouverture du fichier sur RDM6. Le même scénario de charge que précédemment lui est appliqué.

Dans ce cas aussi les calculs sont possibles, la structure est donc stable. En revanche on constate que les déformations sont beaucoup plus importantes à charges et à sections égales ce qui permet d'illustrer l'importance des assemblages non seulement dans la stabilité de la structure mais aussi dans l'optimisation de la matière vague (voir « Détail des résultats de l'analyse structurelle du golf club de Yeoju avec pivot en Z » en annexe p 93).

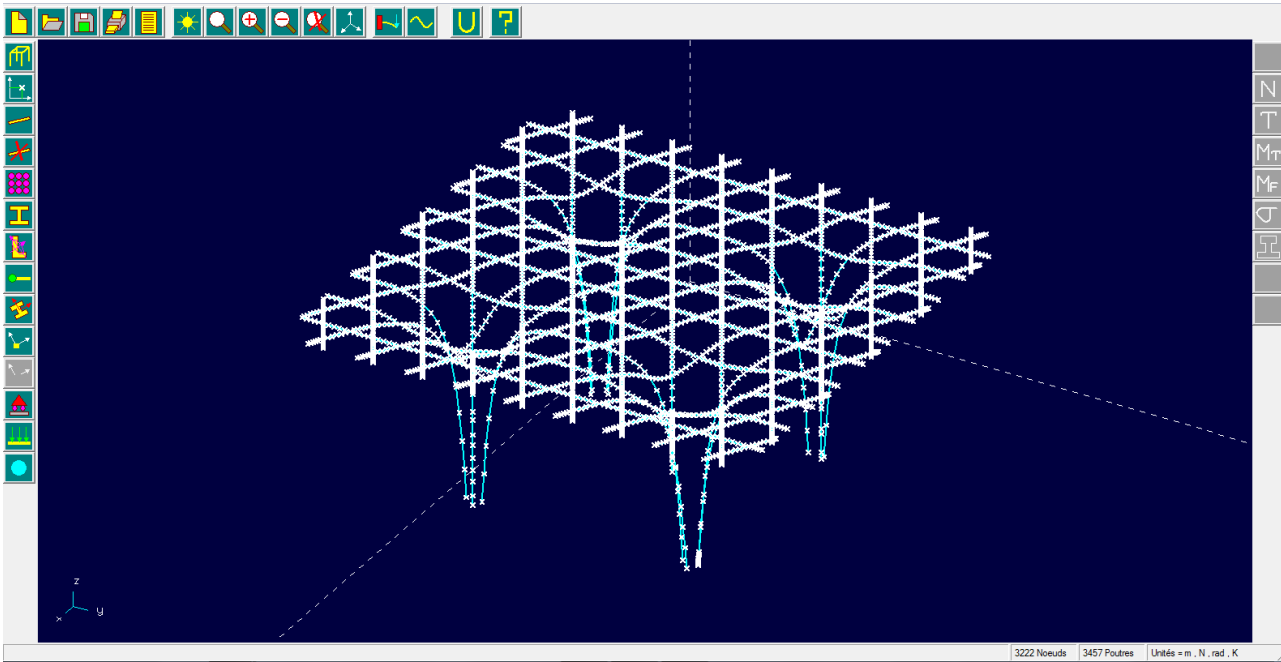


Figure 66 Ouverture du Golf club de Yeosu dans RDM6

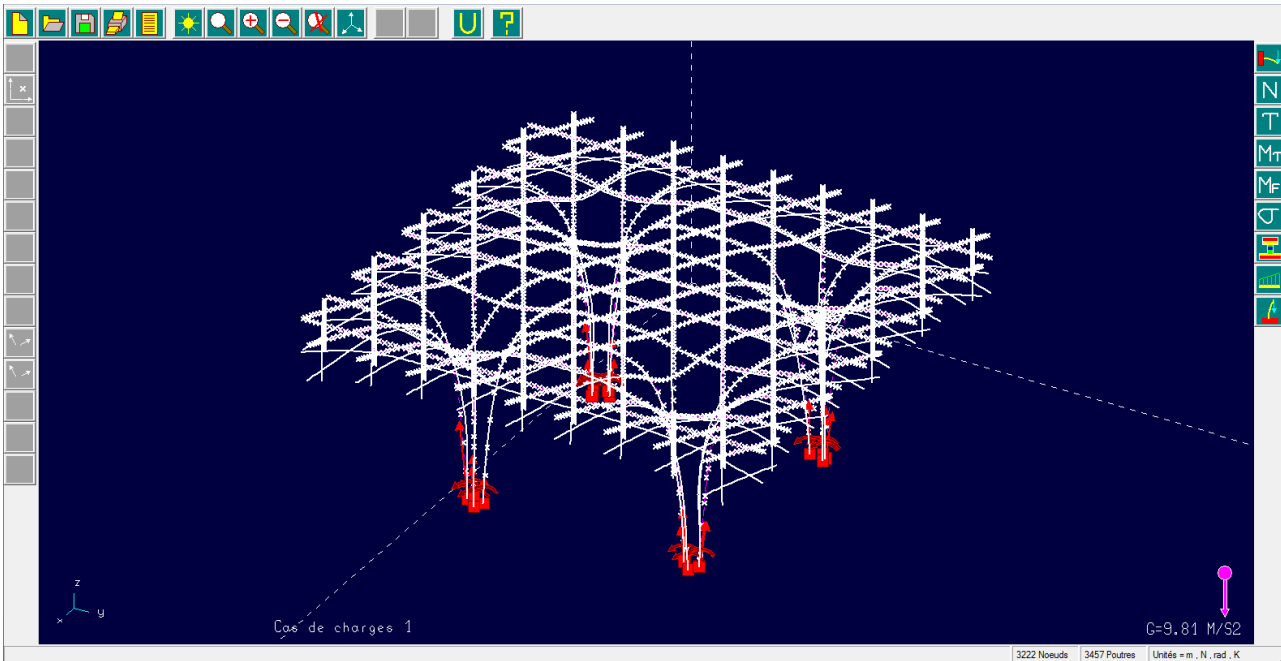
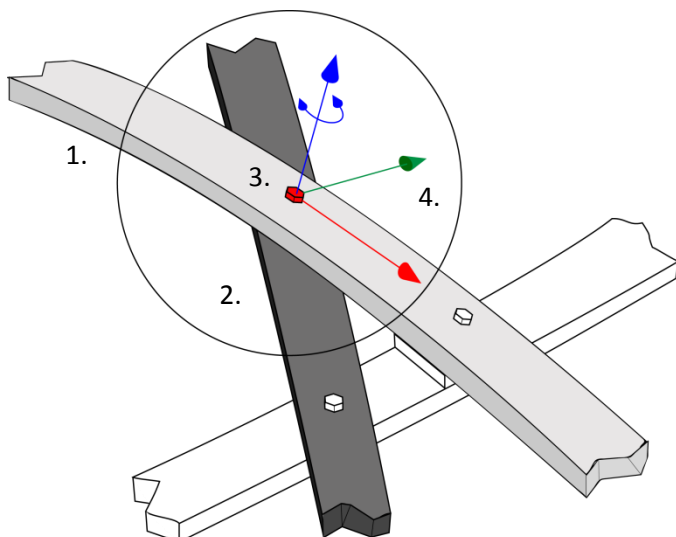


Figure 65 Visualisation de la déformation de la structure du golf club de Yeosu



- Figure 64 Schéma de la dégénération des assemblages du golf club de Yeosu
1. Élément fils
  2. Élément parent
  3. Liaison pivot par tige
  4. Repère local : seul la rotation autour de l'axe Z est possible

## Conclusion

**8**

### Objectifs atteints

**8.1****8.1.1**

#### La méthode de paramétrisation

La paramétrisation des assemblages visait à réunir toutes les variables concernant les assemblages intervenant dans le calcul des structures. Elle devait avant tout permettre de faire ressortir les traits caractéristiques des liaisons afin de pouvoir choisir l'assemblage le mieux adaptés à un contexte donné. De ce fait, le modèle paramétrique devait fournir les informations nécessaires pour simuler le comportement d'une ossature utilisant les assemblages qu'il décrit.

Malgré un manque d'informations précises concernant le comportement mécanique réel des projets « cobayes » ainsi que les dimensions exactes des sections, les expérimentations ont prouvé que ce modèle permet bien d'alimenter un module de calcul avec les bonnes informations car les résultats obtenus corroborent avec les valeurs attendues.

**8.1.2**

#### La programmation

La programmation était la partie du travail qui a consommé le plus de temps et d'effort. Sans elle, il aurait été impossible de fabriquer le support nécessaire pour faire fonctionner et exploiter le modèle. Le fait que le processus aboutisse à un fichier que RDM6 peut ouvrir et que ce fichier contienne toutes les informations voulues, à savoir géométrie et assemblages, est la preuve de la réussite du travail. Aucune information n'a été perdue au cours des multiples imports et exports et aucun projet testé n'a posé de problème particulier.

Il est vrai que le travail de programmation n'est encore pas parfait et que beaucoup de manipulation pourrait être automatisée mais il reste néanmoins une bonne base sur laquelle on peut continuer un travail d'optimisation et d'amélioration.

## Travail à poursuivre

### 8.2

#### 8.2.1

#### Paramétrisation des assemblages

Comme il est dit au début du chapitre concernant la paramétrisation des assemblages, ce travail est long et très consommateur de temps. A l'heure actuelle, seuls les assemblages par contact et les assemblages par liens souples de la classe bois/bois sont paramétrés dans le modèle. Pour avoir une bibliothèque plus étendue il faudrait au moins que tous les assemblages de la classe Bois/bois soient paramétrés. De plus un certain nombre de grandeurs n'ont pas été approfondies à cause du manque de temps et d'information. La présence de ce flou d'information a été tolérée dans la mesure où RDM6 ne les prenait pas en compte mais si on désire travailler avec un outil plus précis, il faudra éclaircir cette zone d'ombre.

#### 8.2.2

#### Base de données

Bien que la base de données regroupe toutes les informations actuellement relevées, sa consultation reste assez peu pratique à cause du manque de réelle interface.

Ce problème pourrait être contourné si on tente de l'incorporer à Grasshopper sous forme de Cluster. Bien que dans ce cas elle ne puisse pas non plus bénéficier d'une interface, cela pourrait éviter un export en fichier texte. Il serait alors plus facile de modifier les assemblages d'une structure de manière quasi instantanée.

#### 8.2.3

#### Post traitement

Comme la base de données, l'outil de post traitement ne possède pas de réelle interface. Son utilisation nécessite beaucoup de manipulations qui pourraient être automatisées. Il serait même possible de l'intégrer dans Grasshopper via un script Visual Basic. Cela éviterait de passer par un export en fichier texte et permettrait une mise à jour instantanée des fichiers en cas de modification.

#### 8.2.4

#### Représentation

L'objet géométrique que Grasshopper permet de modéliser sur rhinocéros n'est en réalité constitué que d'une géométrie filaire superposée au volume de la géométrie des profils. Les assemblages restent invisibles et n'existent que dans le calcul. Il serait intéressant de travailler sur la modélisation 3D paramétriques des assemblages dans un but de précision de représentation mais surtout pour articuler ce travail avec la fabrication digitale. Ces données supplémentaires pourraient permettre de constituer les fichiers dont une machine à commande numérique à besoin pour fabriquer non seulement les assemblages mais aussi les éléments structuraux.

## les limites

### 8.3

#### 8.3.1

#### les outils

Comme on l'a observé, RDM6 ne prend pas en compte les glissements d'assemblage qui peuvent avoir une importance capitale dans la construction bois. Il est donc envisageable que ce travail puisse être approfondi en utilisant d'autres outils plus précis permettant de considérer ces grandeurs. Il faudrait cependant repenser une grande partie de la programmation qui serait alors obsolète pour alimenter les modules de calculs de cette manière.

#### 8.3.2

#### les connections entre logiciel

Bien que réaliser la programmation de la base de données et du module de post-traitement directement sur Grasshopper permettrait d'éviter deux exports de fichiers, il reste encore inévitable d'exporter les données à la sortie de Grasshopper. Cet export est le plus problématique car d'autres modules de calculs plus perfectionnés que RDM6 ne reconnaissent pas forcément le format de fichier texte. Karamba, un autre outil de calcul par la méthode des éléments existe sur Grasshopper mais il ne permet pas d'affecter d'autres assemblages que des encastremets aux liaisons entre les éléments de l'ossature, ce qui rend par définition, toutes les structures stables.

## les perspectives

### 8.4

#### 8.4.1

#### Conception paramétrique

Ce travail montre qu'il est possible d'intégrer la définition des assemblages très en amont dans la conception. L'impact qu'ils peuvent avoir influence grandement les choix structuraux, morphologiques et technologiques sur les structures et principalement sur les structures non standards. Les géométries complexes, en plus de participer au vocabulaire architectural du XXI<sup>ème</sup> siècle permettent d'intégrer de nouvelles problématiques d'optimisation et de rentabilisation de la matière ainsi que de fabrication numériques. Pour faciliter leur réalisation, la conception paramétrique s'impose comme l'outil le plus efficace. Dans ce contexte, les assemblages peuvent être considérés comme une variable supplémentaire dans la conception paramétrique des structures.

#### 8.4.2

#### Optimisation

Quelque soit l'axe d'optimisation de la structure choisi, usage de la matière, poids propre, montage ou préfabrication, la définition des assemblages a nécessairement une répercussion sur ces domaines. L'expérimentation menée sur le golf club de Yeosu montre que les décisions prises concernant la cinématique de la structure ne pouvaient se détacher d'une logique structurelle. Ici l'hyperstatisme était voulu pour diminuer la section des profils mais impose une grande rigueur dans la réalisation. Le choix des assemblages reste donc crucial. Il serait donc intéressant dans une logique d'optimisation de pouvoir mener rapidement un grand nombre de simulations avec des scénarios cinématiques différents pour mieux comprendre et maîtriser leur impact.





**1 Structure ou géométrie non standard** : Structure dont les formes, courbes ou rectilignes, peuvent difficilement être décrites avec des moyens de représentation standard en géométral, souvent à cause de l'absence d'orthogonalité.

**2 NURBS** : Non Uniform Rational Basis Spline. Les NURBS permettent la représentation exacte de courbes et de surfaces complexe comme des arcs d'ellipse, des courbes de Bézier ou des paraboloides et sont basées sur des équations.

**3 Extruder** : En informatique, action d'étirer un point, une ligne ou une surface selon un vecteur ou le long d'une courbe afin de passer d'un objet à n dimensions à un objet à n+1 dimensions. Par exemple, l'extrusion d'un point donne une ligne ou une courbe, l'extrusion d'une ligne donne une surface et l'extrusion d'une surface donne un volume.

**4 Cinématique** : Partie de la mécanique étudiant le mouvement des corps dans l'espace. La cinématique d'un objet décrit ses mouvements possibles selon un repère.

**5 Élément fils** : dans un assemblage, élément de structure de hiérarchie inférieure se fixant à un autre élément de hiérarchie supérieure.

**6 Élément parent** : dans un assemblage, élément de hiérarchie supérieure, qui est le plus relié à la « terre », recevant un autre élément de hiérarchie inférieure.

**7 Moment** : Le moment de force est l'aptitude d'une force à faire tourner un objet ou un système autour d'un point donné, que l'on nomme pivot.

**8 Terre** : terme de sens similaire à celui utilisé dans le jargon de l'électronique, la terre est l'endroit où sont conduites les charges et sert de points d'appuis à la structure. La terre peut désigner le sol mais aussi une autre structure dans le même ou dans un autre matériau comme une longrine de béton ou un sous bassement.

**9 Glissement d'assemblage** : sur certains degrés de libertés bloqués dans un assemblage, un mouvement résiduel peut néanmoins exister. Il peut être dû à des imprécisions ou être accepté pour faciliter le montage, mais parfois il provient de légères déformations de la matière.

**10 Barre** : Dans les représentations filaires, une barre est une ligne droite qui débute et se termine par un point aussi appelé nœud. Elle correspond à l'extrusion d'un point selon un vecteur.

**11 Grille** : Une grille est un réseau de ligne sécante ou non. Ces lignes peuvent suivre une ou plusieurs direction appelées fuseaux. Lorsqu'une grille s'organise suivant un ou plusieurs fuseaux, espacés du même pas, on parle de grille régulière.

**12 Fuseau** : Ensemble des lignes d'une grille suivant la même direction.

**13 Assemblage parfait** : Un assemblage parfait désigne un assemblage assimilable à une continuité de matière et qui, par conséquent, transmet tous les efforts avec un rendement maximum.



## Table des illustrations

10

Figure 1 vue du modèle de la structure (gauche) et visualisation des efforts (droite).....	11
Illustrations <i>timber project: nouvelle formes d'architecture en bois</i> Yves Weinand PPUR 2010 p48	
Figure 2 vue de la structure "Wave 0.18" (gauche) et vue du montage (droite) .....	12
illustrations KAUFMANN Stefan, SCHUBERT Gerhard, PETZOLD Frank: "Escaping the model's scale" <u>SIGRADI 2010</u> p 33	
Figure 3 Analyse structurel du modèle sur robot (gauche) et visualisation du stress de la structure sur Grasshopper (droite). .....	13
Illustrations GEORGIOU Odysseas : "Interactive Structural Analysis" <u>CAAD futures2011</u> _ p. 834	
Figure 4 Les trois assemblages développés par Sass Lawrence.....	14
Illustration SASS Lawrence "Materializing a Design with Plywood » 25th eCAADe Conference Proceeding 2007 p 633	
Figure 5 design to production <i>travail CAD pour le centre Pompidou Metz</i> .....	15
Illustration Design to production : <a href="http://www.designtoproduction.ch/content/view/75/54/">http://www.designtoproduction.ch/content/view/75/54/</a>	
Figure 6 vue aérienne de la structure (gauche) et vue depuis la Plaza de la Encarnacion (droite) .....	16
Illustration tirées du site <a href="http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html">http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html</a>	
Figure 7 Vue des assemblages lors du montage (gauche) et vue de leur rendu fini (droite) ...	16
Illustration tirées du site <a href="http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html">http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html</a>	
Figure 8 extrait de classification des assemblages "Etre ensemble" Jean-Claude Bignon .....	17
Figure 9 Extrait du livre "traversée de la décoration en bois et spécifications" .....	18
illustrations <u>Traversée de la décoration en bois et les spécifications</u> (traduction Google) SUMIYOSHI Tiger Sept et MATSUI Shogo Kajima Institut Publishing Co., 1989 p16-18	
Figure 10 Extrait de l'ouvrage « <i>Les structures en bois de l'École d'Ingénieur Civil</i> » Réimpression de l'édition originale. Leipzig, Schäfer, 1904.....	18
Figure 11 Schéma élément parent élément fils .....	20
Figure 12 Schéma des six mouvements dans l'espace .....	21
Figure 13 Cinématique d'un assemblage .....	21
Figure 14 Cinématique d'une structure .....	22
Figure 15 Les 12 liaisons usuelles d'après l'ouvrage <i>memothec</i> .....	24
Figure 16 Schéma de la notion de jeu .....	25

Figure 17 Schéma de la notion de raideur .....	26
Figure 18 Loi de comportement du glissement d'assemblage .....	27
Figure 19 Illustration de la notion de rendement .....	28
Figure 20 Exemple d'assemblages bois .....	31
Figure 21 les différentes classes d'assemblages .....	32
Figure 22 Les différentes familles technologiques.....	34
Figure 23 Les liaisons de la famille des assemblages par contact de la classe bois/bois .....	36
Figure 24 vue éclatée de l'assemblage mi-bois considéré pour l'exemple.....	38
Figure 25 vue éclatée de l'enfourchement considéré pour l'exemple .....	38
Figure 26 Etude cinématique du mi-bois .....	39
Figure 27 Etude cinématique de l'enfourchement à contact surfacique .....	40
Figure 28 Etude de l'affaiblissement du mi-bois.....	41
Figure 29 Etude des jeux possibles du mi-bois .....	42
Figure 30 Etude de l'affaiblissement de l'enfourchement à contact surfacique .....	43
Figure 31 Etude des jeux possible de l'enfourchement à contact surfacique .....	44
Figure 32 Etude morphologique et technologique du mi-bois.....	45
Figure 33 Etude morphologique et technologique de l'enfourchement à contact surfacique	46
Figure 34 Extrait du tableau « modèle d'assemblages paramétriques » Classe bois/bois famille d'assemblage par contact .....	48
Figure 35 Schéma du principe de fonctionnement.....	49
Figure 36 Schéma du processus informatique choisi.....	50
Figure 37 Cinématique de l'appui linéaire rectiligne .....	52
Figure 38 Solution de codage RDM6 pour l'approximation de l'appui linéaire rectiligne.....	52
Figure 39 Schéma conceptuel de la base de données .....	53
Figure 40 Exemple de l'export d'une requête.....	54
Figure 41 Exemple de liste sur Grasshopper.....	55
Figure 42 Schéma du processus de génération du modèle géométrique .....	56
Figure 43 Schéma principe de discrétisation .....	57

Figure 44 Script d'insertion des informations cinématiques des assemblages dans les listes de barres .....	58
Figure 45 Schéma conceptuel de la gestion de l'information sous Grasshopper .....	59
Figure 46 Identification provisoire des nœuds du modèle « exemple des points 211 et 212 ». .....	60
Figure 47 Recherche de l'identifiant RDM6 des nœuds par l'identifiant provisoire.....	60
Figure 48 Schéma conceptuel de la gestion de l'information dans le module de pré-traitement. ....	61
Figure 49 Exemple de fichier texte formaté pour RDM6 .....	62
Figure 50 Exemple de visualisation des déformations d'une structure dans l'environnement RDM6 .....	63
Figure 51 Exemple d'édition des résultats des calculs effectués sur RDM6 .....	64
Figure 52 Photo de la maquette .....	65
Figure 53 Image de synthèse .....	65
Figure 54 Module paraboïde de la structure du Yeosu golf club illustration design to production.....	66
Figure 55 Vue de la Structure illustration Design to production .....	66
Figure 56 Vue de la structure illustration <a href="http://www.core.form-ula.com/2011/03/10/shigeru-ban-nine-bridges/">http://www.core.form-ula.com/2011/03/10/shigeru-ban-nine-bridges/</a> .....	66
Figure 57 Les différents assemblages de la vague .....	67
Figure 58 Photo des assemblages du golf club de Yeosu, illustration <a href="http://www.detail.de/rw_6_Plus_Galerie_En_HoleFoto_4097_Vollbild.htm">http://www.detail.de/rw_6_Plus_Galerie_En_HoleFoto_4097_Vollbild.htm</a> .....	68
Figure 59 Montage (gauche) et localisation des assemblages (droite)illustration : design to production..... <a href="http://www.designtoproduction.ch/content/view/74/49/">http://www.designtoproduction.ch/content/view/74/49/</a>	68
Figure 60 Surface de projection (gauche) et géométrie de la structure (droite).....	69
Figure 61 Génération de la géométrie du golf club de Yeosu .....	70
Figure 62 Visualisation de la déformation de la vague dans RDM6 .....	72
Figure 63 Ouverture de la vague dans RDM6 .....	72
Figure 64 Schéma de la dégénération des assemblages du golf club de Yeosu .....	74
Figure 65 Visualisation de la déformation de la structure du golf club de Yeosu .....	74

Figure 66 Ouverture du Golf club de Yeosu dans RDM6 .....	74
Figure 67 Schéma conceptuel global du modèle .....	88
Figure 68 Visualisation de la déformation de la vague dans RDM6 .....	89
Figure 69 Visualisation du moment fléchissant dans RDM6.....	89
Figure 70 Visualisation de la déformation de la structure du Yeosu golf club avec encastrement dans RDM6.....	91
Figure 71 Visualisation des efforts normaux maximum de la structure du Yeosu golf club avec encastrement dans RDM6.....	91
Figure 72 Visualisation de la déformation de la structure du Yeosu golf club avec pivot Z dans RDM6 .....	93
Figure 73 Visualisation des efforts normaux maximum de la structure du Yeosu golf club avec pivot Z dans RDM6 .....	93

## Bibliographie



### livres

**WEINAND Yves** : « Timber project: nouvelles formes d'architecture en bois » \_ PPUR (presses polytechniques et universitaires romandes), Lausanne \_ 2010 \_ 127 pages.

**SUMIYOSHI Tiger Sept et MATSUI Shogo** : « 木造の継手と仕口 » « Traversée de la décoration en bois et les spécifications » (traduction Google) \_ Kajima Institut Publishing Co., 1989 \_ 124 pages.

**STADE Franz** : « Die Holzkonstruktionen Die Schule des Bautechnikers » « Les structures en bois de l'Ecole d'ingénieur civil » \_ réimpression Verlag 1989 de l'édition originale Schäfer Leipzig 1904 \_ 372 pages.

**LE GOVIC Claude** : « Les Assemblages dans la construction en bois » \_ Paris : CTBA, 1995 \_ 130 pages.

**GERNER Manfred** : « Les Assemblages des ossatures et charpentes en bois : construction, entretien, restauration » \_ Paris : Eyrolles, 1995 \_ 190 pages.

**ZWERGER Klaus** : « Wood and wood joints : building traditions of Europe and Japan » \_ Basel : Birkhäuser, 1997 \_ 278 pages.

**BROCHARD François-Xavier** : « Les Procédés d'assemblages dans la charpente en bois » \_ Paris : CTBA, 1978 \_ 53 pages



### Articles

**GEORGIU Odysseas** : « Interactive Structural Analysis » CAAD futures: Proceedings of the 14th international conference on Computer Aided Architectural Design held July 2011 at the University of Liège, Belgium \_ Edited By Pierre Leclercq Ann Heylighen Genevieve Martin \_ 2011 \_ p. 834

**KAUFMANN Stefan, SCHUBERT Gerhard, PETZOLD Frank** : « Escaping the model's scale » SIGRADI 2010\_14 Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Grafica Digital \_ 17, 18 y 19 de noviembre 2010 \_ Bogota Colombia.

**SASS Lawrence, MICHAUD Dennis et CARDOSO Daniel** : « Materializing a Design with Plywood » Predicting the Future \_ 25th eCAADe Conference Proceedings \_ Frankfurt am Main Germany 26-29 September 2007, pp. 629-636



## 11.3

## Cours

**BIGNON Jean-Claude** : Cours vidéo projetés sur la technologie et la morphologie des assemblages

« Etre ensemble » 24 janvier 2011 115 slides.

« Mise en forme » 23 février 2011 229 slides.

**DUCHANOIS Gilles** : « Assemblages et contreventement » \_ cours vidéo projeté pour l'ENSTIB 2010 60 slides.

## 11.4

## site web

**Design to production:**

Centre Pompidou Metz (architecte : Shigeru Ban) :

<http://www.designtoproduction.ch/content/view/75/54/> visité le 12/08/2011

Yeoju golf club 11/09/2011(architecte: Shigeru Ban):

<http://www.designtoproduction.ch/content/view/74/49/> visité le 12/08/2011

**Detail.de :**

Assemblage du Yeoju Golf Club de Shigeru Ban :

[http://www.detail.de/rw\\_6\\_Plus\\_Galerie\\_En\\_HoleFoto\\_4097\\_Vollbild.htm](http://www.detail.de/rw_6_Plus_Galerie_En_HoleFoto_4097_Vollbild.htm) visité le 12/08/2011

**Jurgen MAYER architecte :**

<http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html> visité le 13/08/2011

**Yeoju golf club Shigeru ban :**

<http://www.core.form-ula.com/2011/03/10/shigeru-ban-nine-bridges/> visité le 13/08/2011

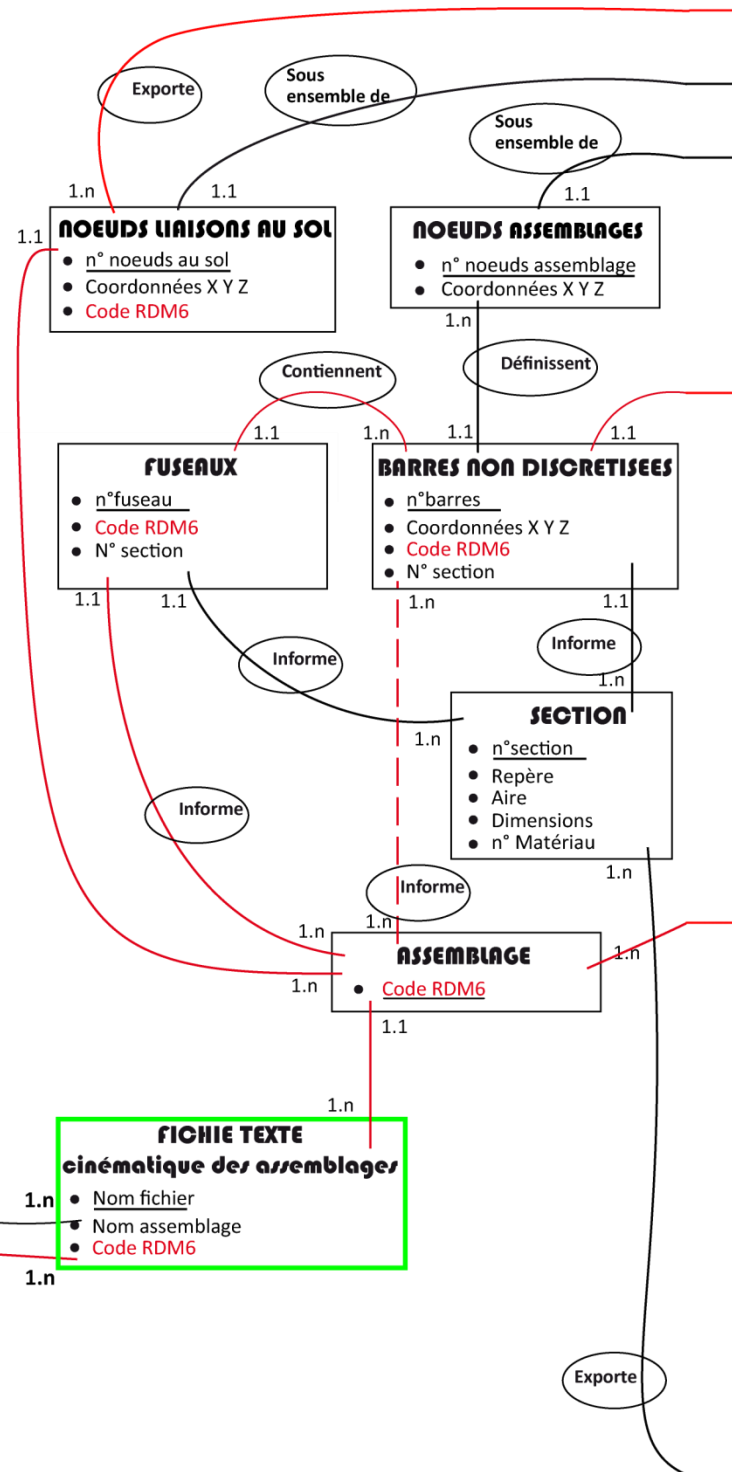
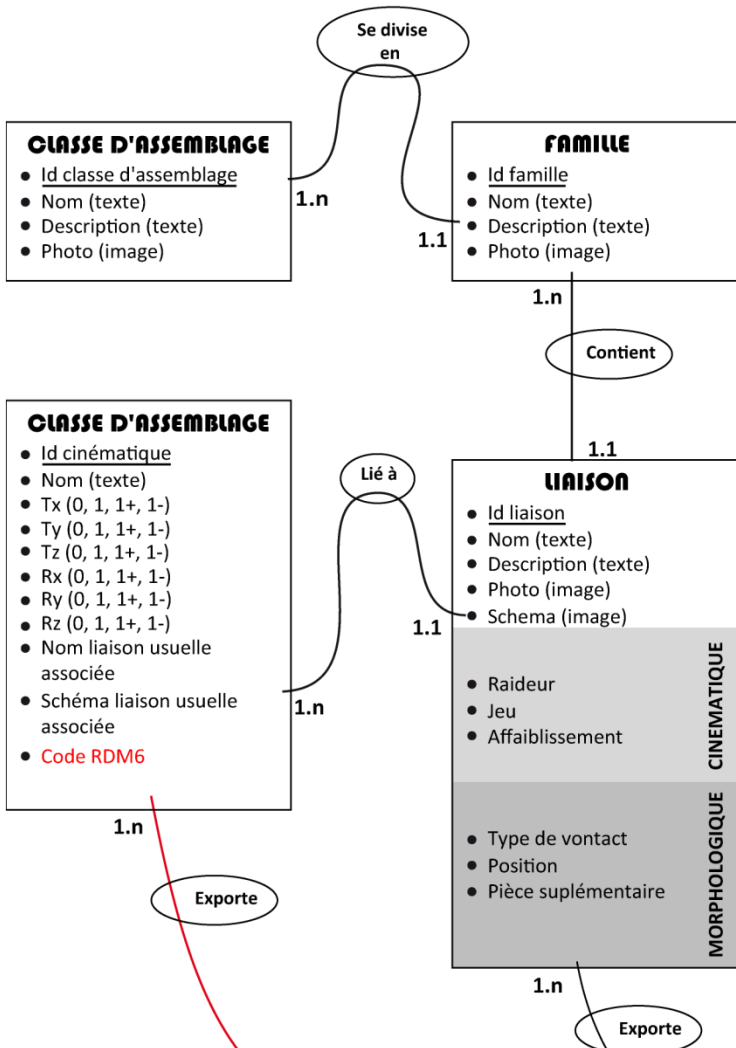
12

Schéma conceptuel général

12.1

BASE DE DONNEES

GRASSHOPPER



- Lien entre deux entités
- Lien entre deux entités transmettant un code RDM6
- - - Lien possible entre deux entités transmettant un code RDM6
- Fichier texte permettant de lier les différents environnements
- Fichier texte d'entrée pour RDM6

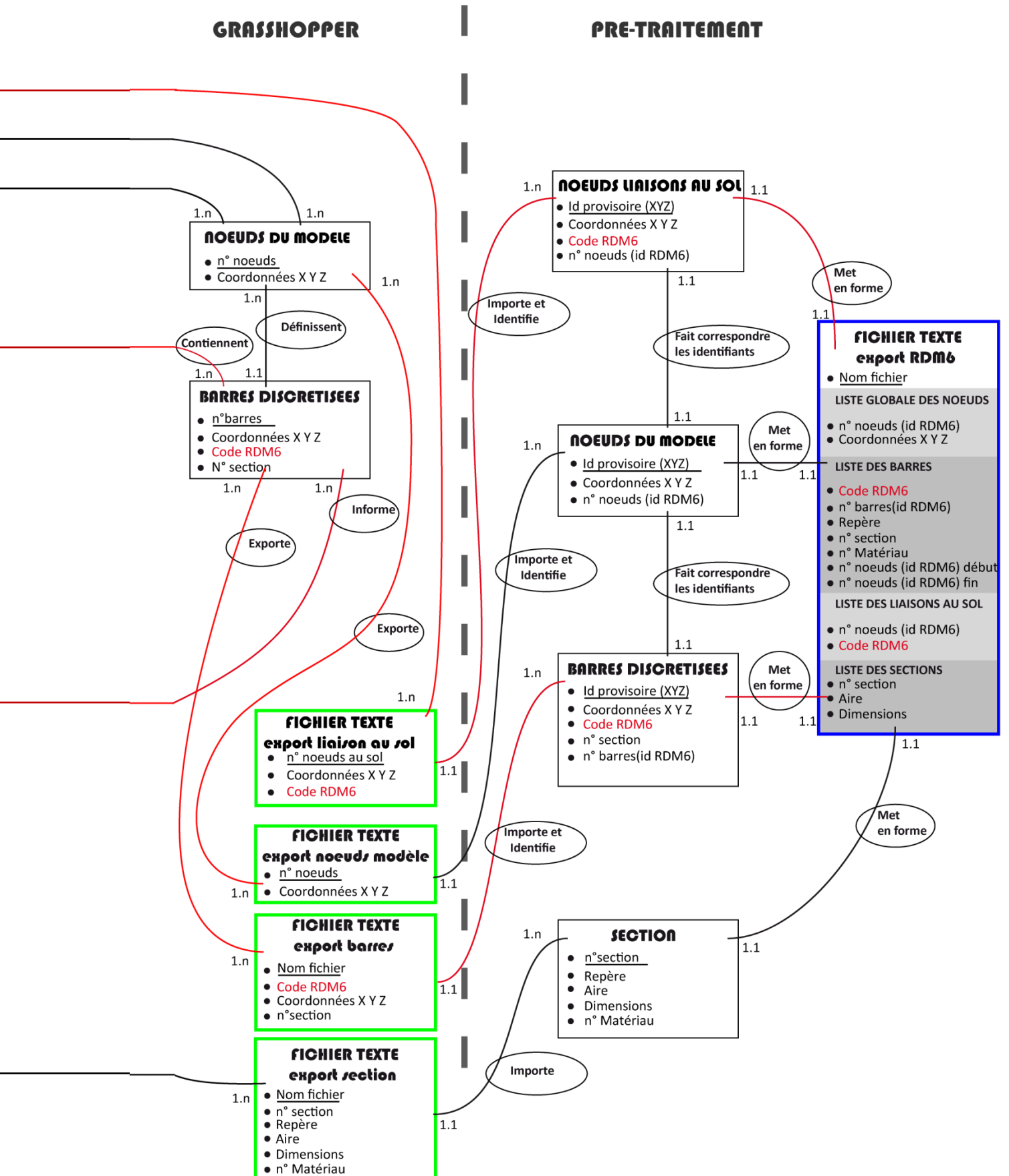


Figure 67 Schéma conceptuel global du modèle

## Détail des résultats de l'analyse structurelle de la vague

### 12.1

Figure 68 Visualisation de la déformation de la vague dans RDM6

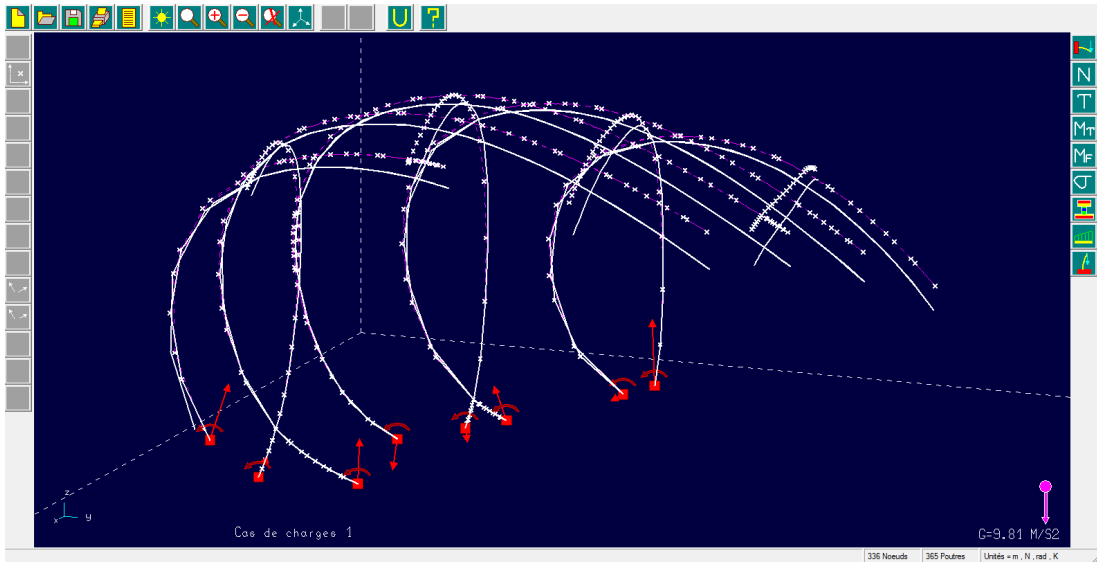
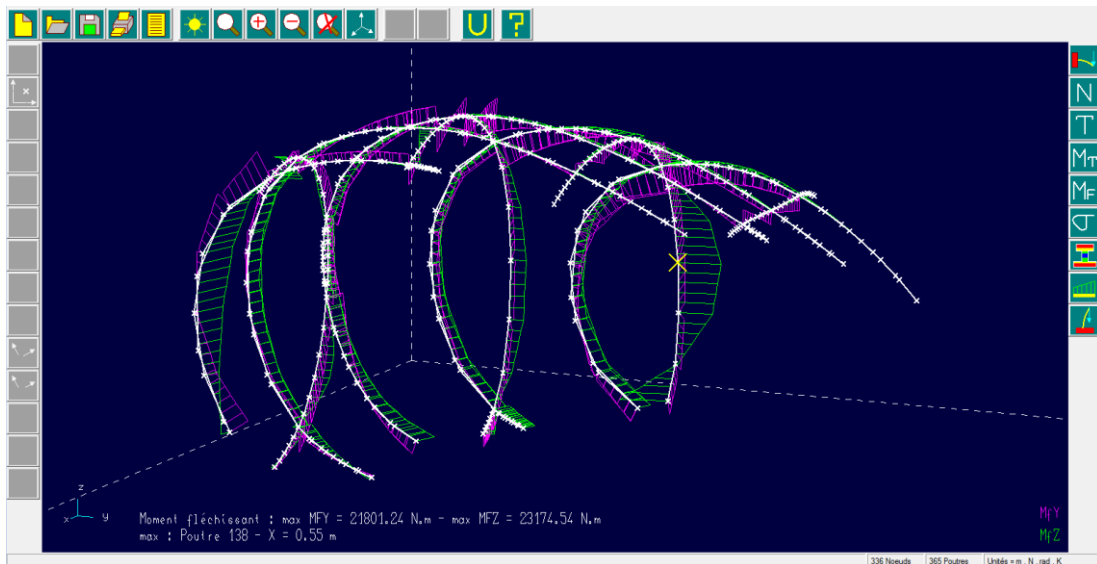


Figure 69 Visualisation du moment fléchissant dans RDM6



**Détail des résultats des calculs**

+-----+  
 | Déplacements nodaux [ m, rad ] |  
 +-----+

Déplacement maximal sur x = 1.0100E-02 m [ Noeud 193 ]  
 Déplacement maximal sur y = 1.8642E-02 m [ Noeud 159 ]  
 Déplacement maximal sur z = 7.0031E-02 m [ Noeud 331 ]  
 Déplacement maximal = 7.1178E-02 m [ Noeud 331 ]

Somme des forces appliquées à la structure :

$F_x = -2.33001754168072E-0004$  N  
 $F_y = -8.21236273623072E-0004$  N  
 $F_z = -7.33000924810767E-0005$  N

+-----+  
 | Efforts intérieurs [ N N.m ] |  
 +-----+

N = Effort normal            ( TY , TZ ) = Effort tranchant  
 Mt = Moment de torsion        ( MfY , MfZ ) = Moment fléchissant

Poutres les plus sollicitées

N° barre	ELE	ori ext	No Ne	TYo	TZo	Mto	MfYo	MfZo	dL(m)
				TYe	TZe	Mte	MfYe	MfZe	
				TYmax	TZmax		MfYmax	MfZmax	
<b>138</b> 05	172	-46183.6	8182.1	-1.6	601.5	18616.5	-16365.5	-2.160E-	
	173	-45653.6	8225.7	-1.6	601.5	18615.6	-20903.4		
			8225.7	1.6		18616.5	20903.4		
<b>271</b> 06	326	-17260.0	-44709.0	1.5	16294.0	-9027.1	-23174.5	-7.975E-	
	171	-16953.6	-44280.1	1.5	16294.0	-9026.2	1219.9		
			44709.0	1.5		9027.1	23174.5		

## 12.1

### Détail des résultats de l'analyse structurelle du golf club de Yeosu avec encastrement

Figure 70 Visualisation de la déformation de la structure du Yeosu golf club avec encastrement dans RDM6

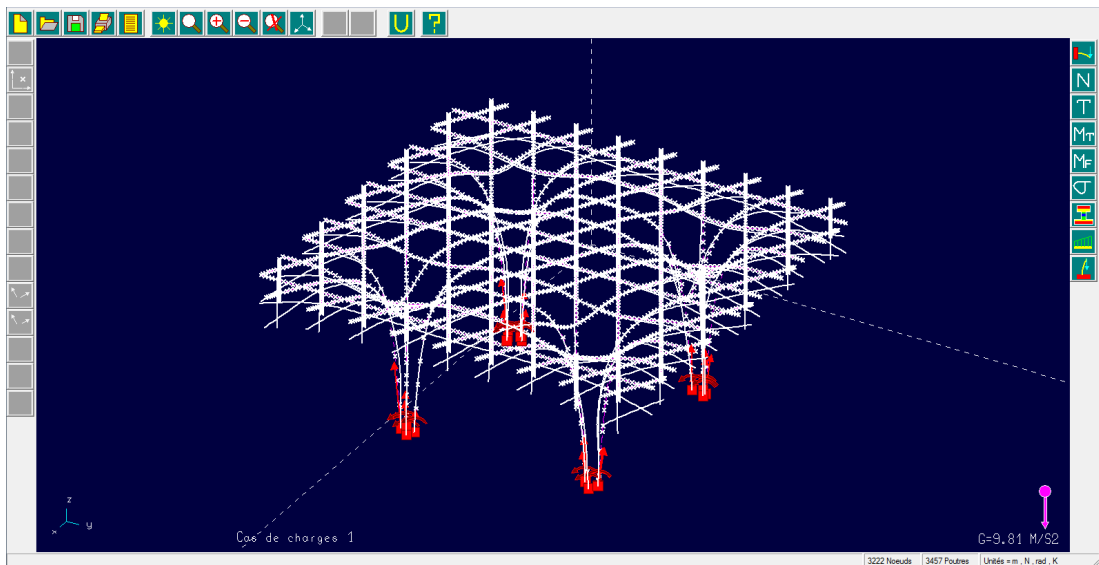
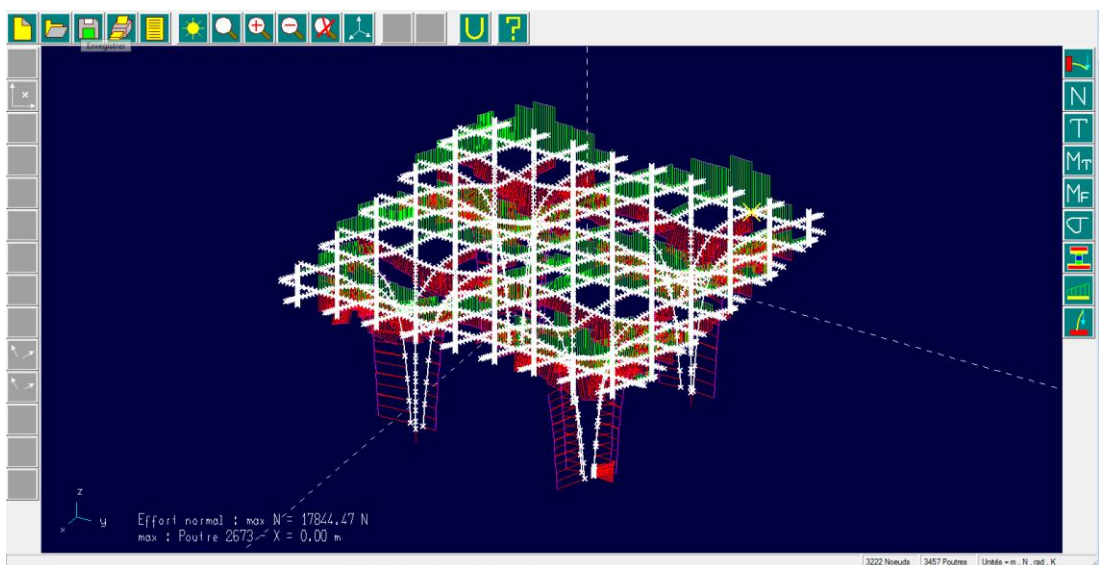


Figure 71 Visualisation des efforts normaux maximum de la structure du Yeosu golf club avec encastrement dans RDM6



**Détail des résultats des calculs**

+-----+

| Déplacements nodaux [ m, rad ] |

+-----+

Déplacement maximal sur x = 1.0100E-02 m [ Noeud 193 ]

Déplacement maximal sur y = 1.8642E-02 m [ Noeud 159 ]

Déplacement maximal sur z = 7.0031E-02 m [ Noeud 331 ]

Déplacement maximal = 7.1178E-02 m [ Noeud 331 ]

Somme des forces appliquées à la structure :

Fx = 1.32846480482840E-0008 N

Fy = 1.01677755992568E-0007 N

Fz = 2.33606988331303E-0006 N

+-----+

| Efforts intérieurs [ N N.m ] |

+-----+

N = Effort normal ( TY , TZ ) = Effort tranchant

Mt = Moment de torsion ( MfY , MfZ ) = Moment fléchissant

Poutres les plus sollicitées

N° barre	ELE	ori ext	No Ne	TYo	TZo	Mto	MfYo	MfZo	dL(m)
				TYe	TZe	Mte	MfYe	MfZe	
				TYmax	TZmax		MfYmax	MfZmax	
<b>2317</b> 06		2925	-5577.6	-5516.7	-920.2	-164.6	251.2	-664.8	-2.198E-
		376	-5594.0	-5494.2	-920.2	-164.6	144.7	-27.8	
				5516.7	920.2		251.2	664.8	
<b>2630</b> 06		3148	-3122.1	1167.7	-736.5	-259.3	26.1	260.0	-2.699E-
		1941	-3165.7	1209.8	-736.5	-259.3	-159.8	-40.0	
				1209.8	736.5		159.8	260.0	
<b>2673</b> 06		3110	17844.5	-334.2	-126.6	-45.3	498.2	-370.4	9.111E-
		2142	17844.5	-298.2	-126.6	-45.3	479.2	-322.9	
				334.2	126.6		498.2	370.4	
<b>2846</b> 06		3159	14418.8	-115.0	-3216.6	99.9	1562.3	-298.9	7.362E-
		2834	14418.5	-78.9	-3216.6	99.9	1079.4	-284.4	
				115.0	3216.6		1562.3	298.9	
<b>3190</b> 06		1705	-4969.3	5091.3	237.5	164.9	58.7	-305.3	-2.534E-
		3123	-4942.4	5115.4	237.5	164.9	94.4	-1072.5	
				5115.4	237.5		94.4	1072.5	



## 12.2

## Détail des résultats de l'analyse structurelle du golf club de Yeoju avec pivot Z dans

Figure 72 Visualisation de la déformation de la structure du Yeoju golf club avec pivot Z dans RDM6

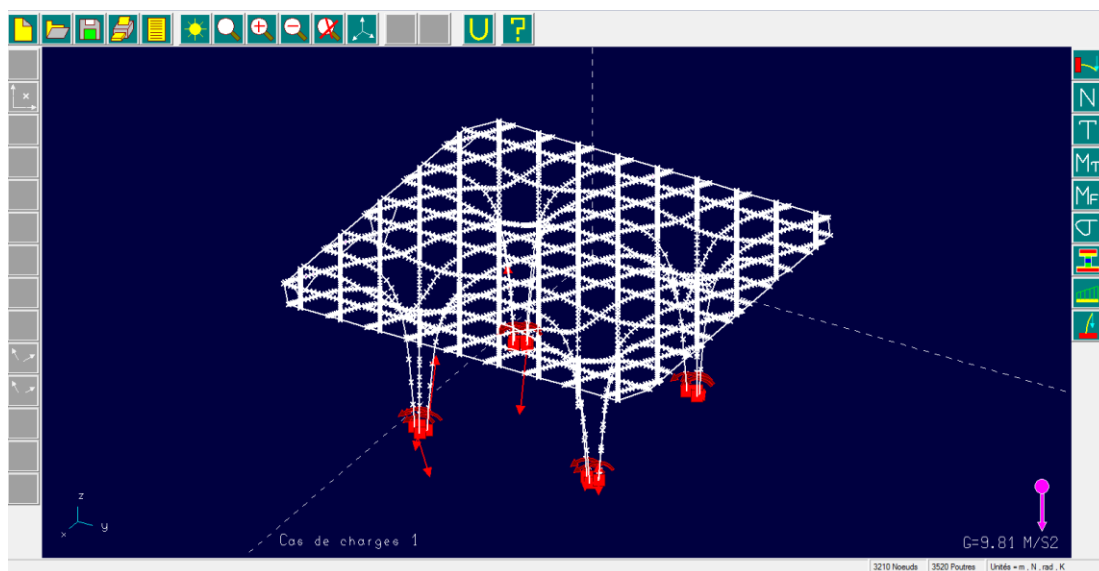
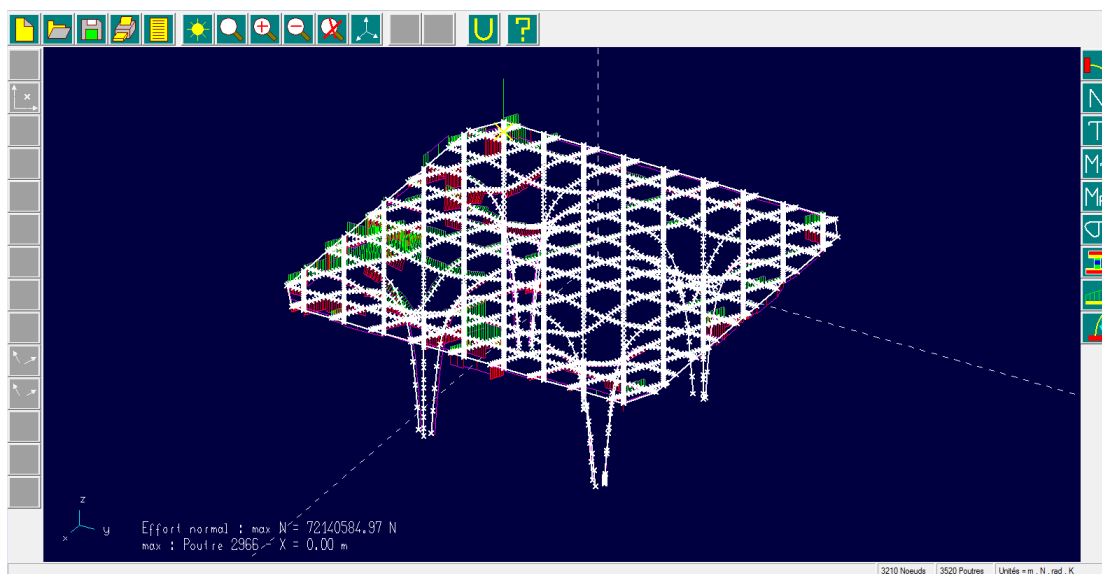


Figure 73 Visualisation des efforts normaux maximum de la structure du Yeoju golf club avec pivot Z dans RDM6



Détail des résultats des calculs

+-----+  
 | Déplacements nodaux [ m, rad ] |  
 +-----+

Déplacement maximal sur x = 4.6815E+01 m [ Noeud 633 ]

Déplacement maximal sur y = 3.0935E+01 m [ Noeud 633 ]

Déplacement maximal sur z = 2.4631E+07 m [ Noeud 925 ]

Déplacement maximal = 2.4631E+07 m [ Noeud 925 ]

Somme des forces appliquées à la structure :

Fx = -2.01457344228402E-0002 N

Fy = -8.01737424626481E-0003 N

Fz = -2.72750471019419E+0002 N

+-----+  
 | Efforts intérieurs [ N N.m ] |  
 +-----+

N = Effort normal ( TY , TZ ) = Effort tranchant

Mt = Moment de torsion ( MfY , MfZ ) = Moment fléchissant

Poutres les plus sollicitées

ELE	ori	No	TYo	TZo	Mto	MfYo	MfZo	
dL(m)								
N° barre	ext	Ne	TYe	TZe	Mte	MfYe	MfZe	
			TYmax	TZmax		MfYmax	MfZmax	
<b>744</b>	929	34813632.5	28208.0	2231349.7	17174214.9	-3264015.0	3580.8	1.481E-
02								
	930	34813632.5	28238.1	2231349.7	17174214.9	-2984887.6	50.2	
			28238.1	2231349.7		3264015.0	3580.8	
<b>2650</b>	2966	-3094624.8	1271.8	-52936301.8	477381.9	15272766.5	163.5	-1.337E-
03								
	2080	-3094624.8	1302.3	-52936301.8	477381.9	8548955.3	0.0	
			1302.3	52936301.8		15272766.5	163.5	
<b>2966</b>	635	72140585.0	11296.5	6800890.4	34743.2	-1741594.3	-0.0	2.597E-
02								
	2965	72140585.0	11322.0	6800890.4	34743.2	-1021737.4	-1197.1	
			11322.0	6800890.4		1741594.3	1197.1	
<b>3027</b>	940	40859431	1594195	-36245290.3	14428299.7	-17750796.2	-0.0	1.752E-
02								
	3026	40859433	1594225	-36245290.3	14428299.7	-22320657.2	-201000.4	
			1594225	36245290.3		22320657.2	201000.4	
<b>3028</b>	945	31807740	1495809	-32719022	8879336.9	-19016187.9	-0.0	1.173E-
02								
	3027	31807744	1495835	-32719022.5	8879336.9	-22563758.9	-162185.0	
			1495835	32719022.5		22563758.9	162185.0	