

CONSTRUIRE LE COURBE 2015

Séminaire de l'École des Ponts ParisTech - départements GCC & GMM
C. Douthe, M. Bagnéris, L. du Peloux, R. Mesnil
7 - 11 septembre 2015



PROJET

JÖRMUNGAND

PHASE

PROJET

EQUIPE

Ugo LESPRIIT

Pierre HASSOLD

Maureen TRICARD

Arnaud MICHON

Ayoub BEN KHALIFA

Hanadi ETTROUDI

Ingrid BERTIN

Jean SOUVIRON

Joffrey BLUTHE

Marc VANDERWEYEN

Nicolas MEUNIER

JÖRMUNGAND

photo



JÖRMUNGAND

notice architecturale

CONCEPT

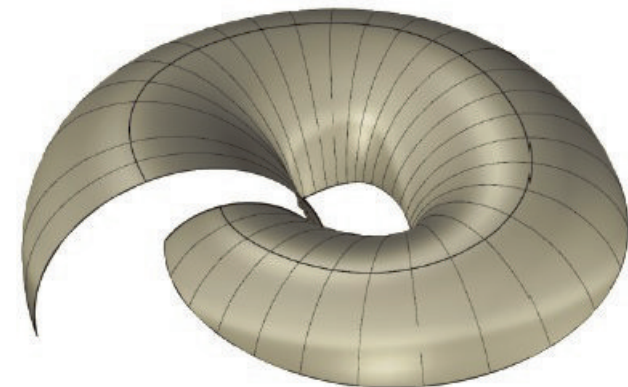
L'idée d'une forme infinie nous a conduit à imaginer un gridshell dont la structure revient sur elle-même formant une spirale. On pourrait y voir une analogie avec le mythe scandinave du serpent monde Jörmungand qui se mord la queue.

PROGRAMME

Afin de casser l'effet tunnel que peut produire les surfaces canales, nous avons choisi d'enrouler la structure autour d'elle-même afin de produire un effet d'optique lors du parcours. La table peut se positionner à différents endroits.

STRUCTURE

La forme de la structure est générée par une parabole parcourant une courbe directrice. La variation décroissante de chaque cercle permet de représenter l'effet décrit en concept. L'utilisation d'une parabole comme courbe de profil amène une grande hauteur au milieu de la structure, mais des efforts importants au niveau des appuis.



JÖRMUNGAND

english part

CONCEPT

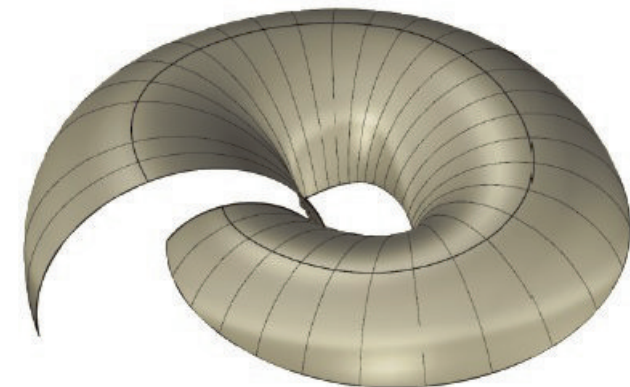
The first idea for the project was to recreate an impression of infinity from a spiralling structure that ended inside of itself. The whole concept was inspired from the picture of a snake that bites its own tale, existing in different mythologies under the name of Ouroboros or Jörmungand, hence the name of our project.

PROGRAMME

There were only two restrictions for the project: to build a rigid gridshell out of blocks made of polystyrene and that the structure could have a table placed inside. The rigid gridshell had to be based upon a canal surfaces, which are surfaces constructed from a profile curve extruded along a guide curve. It allows various kinds of design, but most of those give a strong tunnel impression, which we wanted to avoid. In order to do that, we combined the spiralling concept with the canal surface by decreasing the dimensions of the profile line gradually until it came back inside of itself. Once discredited, the structure was composed of arches of decreasing size, and we erased part of the arches to ultimately break the tunnel impression and create room for placing the table and move inside the structure.

STRUCTURE

The profile curve is a semi-ellipse with the semi-major axis aligned along the vertical direction. We used a guide curve in the form of a spiral arranged in a way that the surface obtained from the profile curve of decreasing dimension fits inside of the entrance. We only keep the external part of the arches complete, removing the internal part everywhere except on two places which give stability to the structure against the weight of the cantilevered parts. The whole structure is discretized in voussoirs made of 4 plate of polystyrene assembled with screws and tape for rigidity, and the voussoirs are assembled together.



JÖRMUNGAND

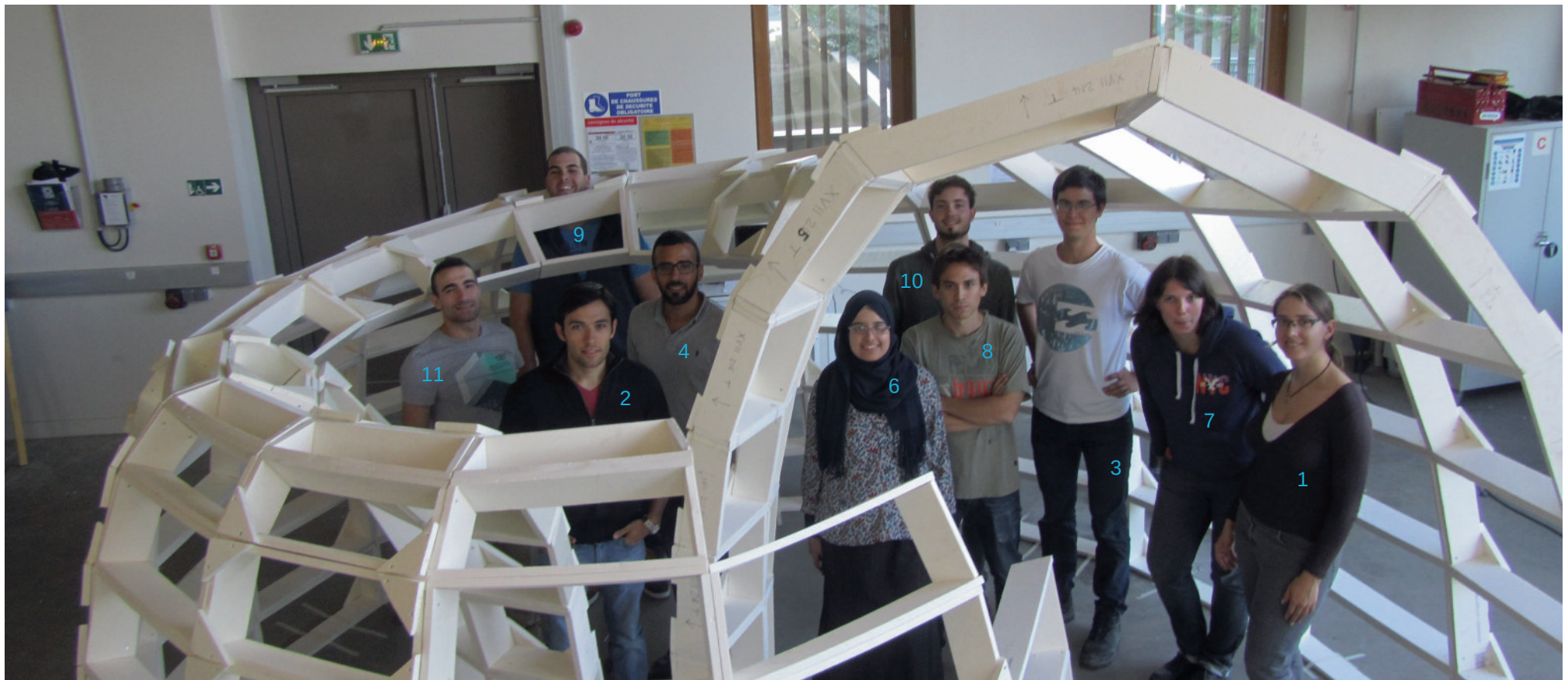
équipe

BUREAU D'ETUDES

- 1 Maureen TRICARD - responsable mise en plan
- 2 Joffrey BLUTHE - responsable calculs
- 3 Arnaud MICHON - responsable géométrie
- 4 Ayoub BEN KHALIFA - responsable conception des détails
- 5 Jean SOUVIRON - projeteur

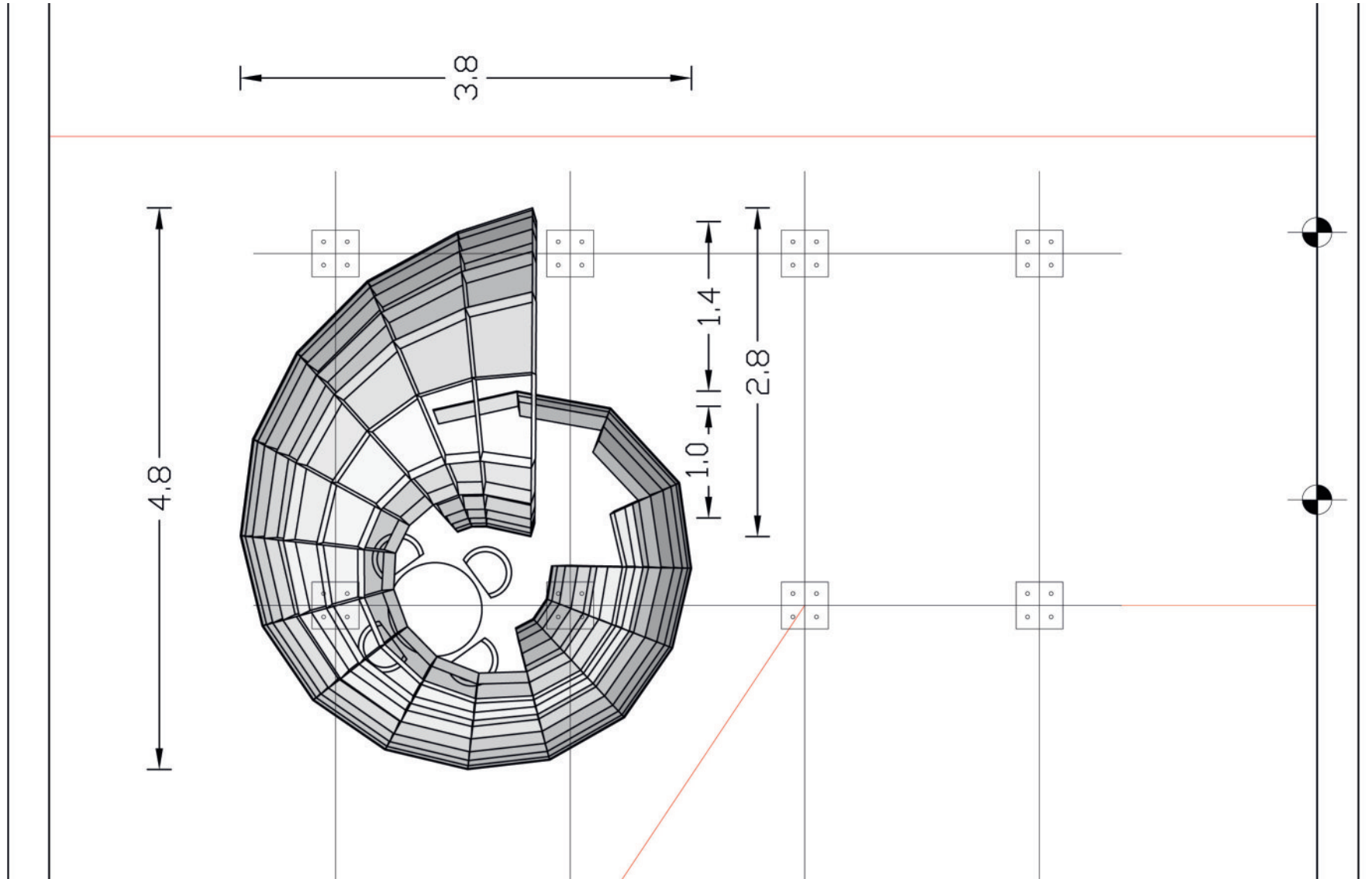
CHANTIER

- 6 Hanadi ETTROUDI - responsable coordination BE
- 7 Ingrid BERTIN - responsable logistique, contrôle fabrication
- 8 Ugo ESPRIT - responsable détails
- 9 Pierre HASSOLD - responsable méthode
- 10 Nicolas MEUNIER - compagnon
- 11 Marc VANDERWEYEN - compagnon



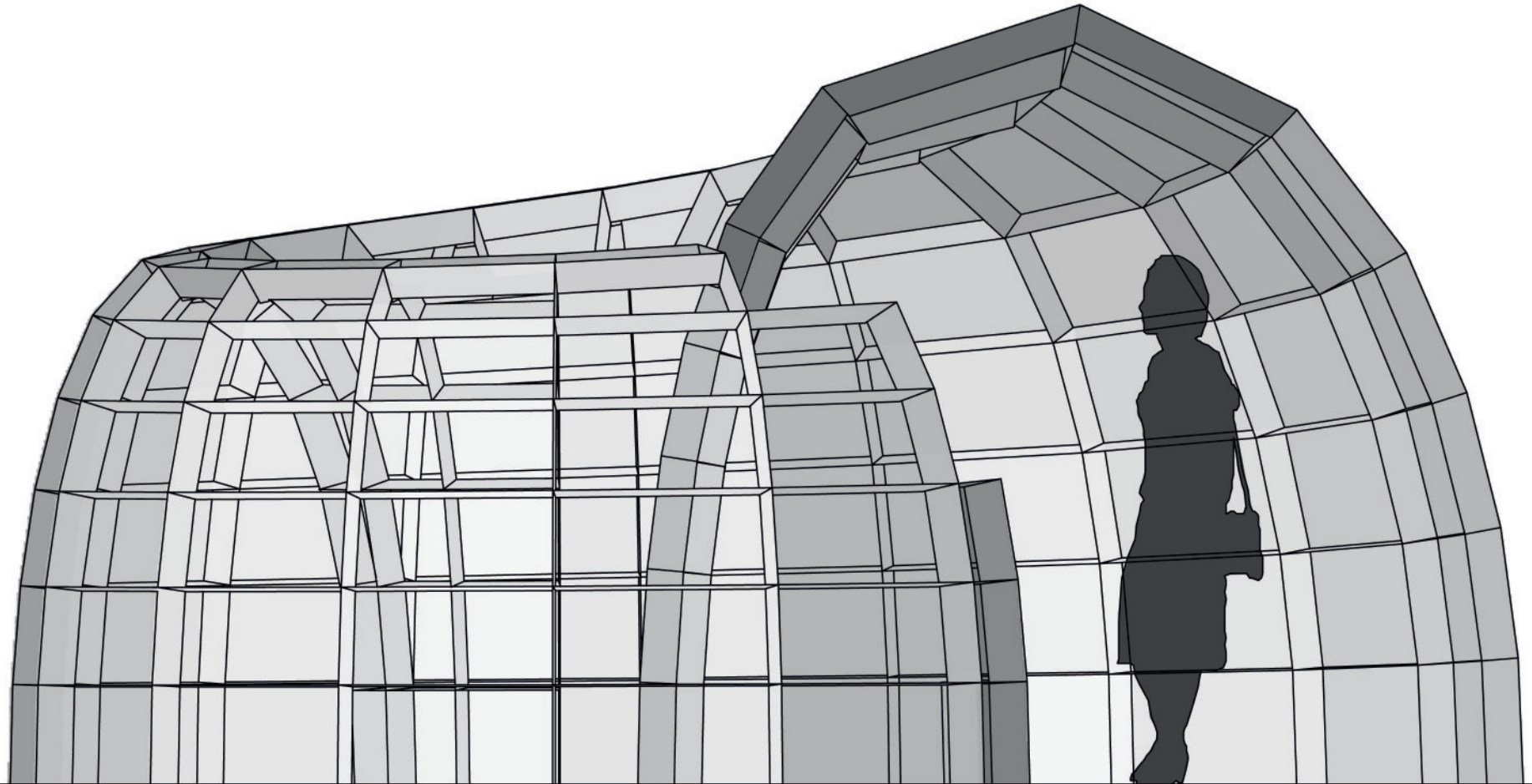
JÖRMUNGAND

vue en plan



JÖRMUNGAND

vue en élévation

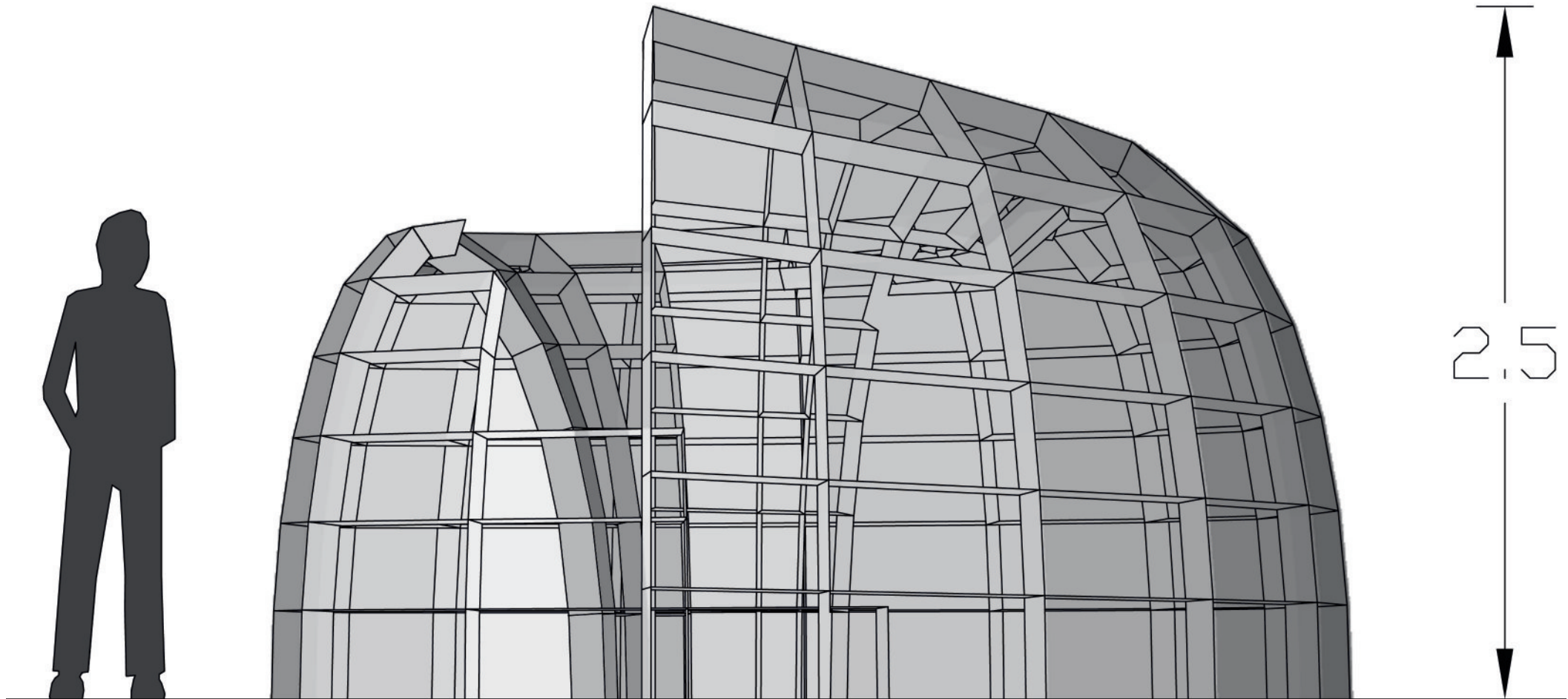


← 1.0 →

Échelle 1:20

JÖRMUNGAND

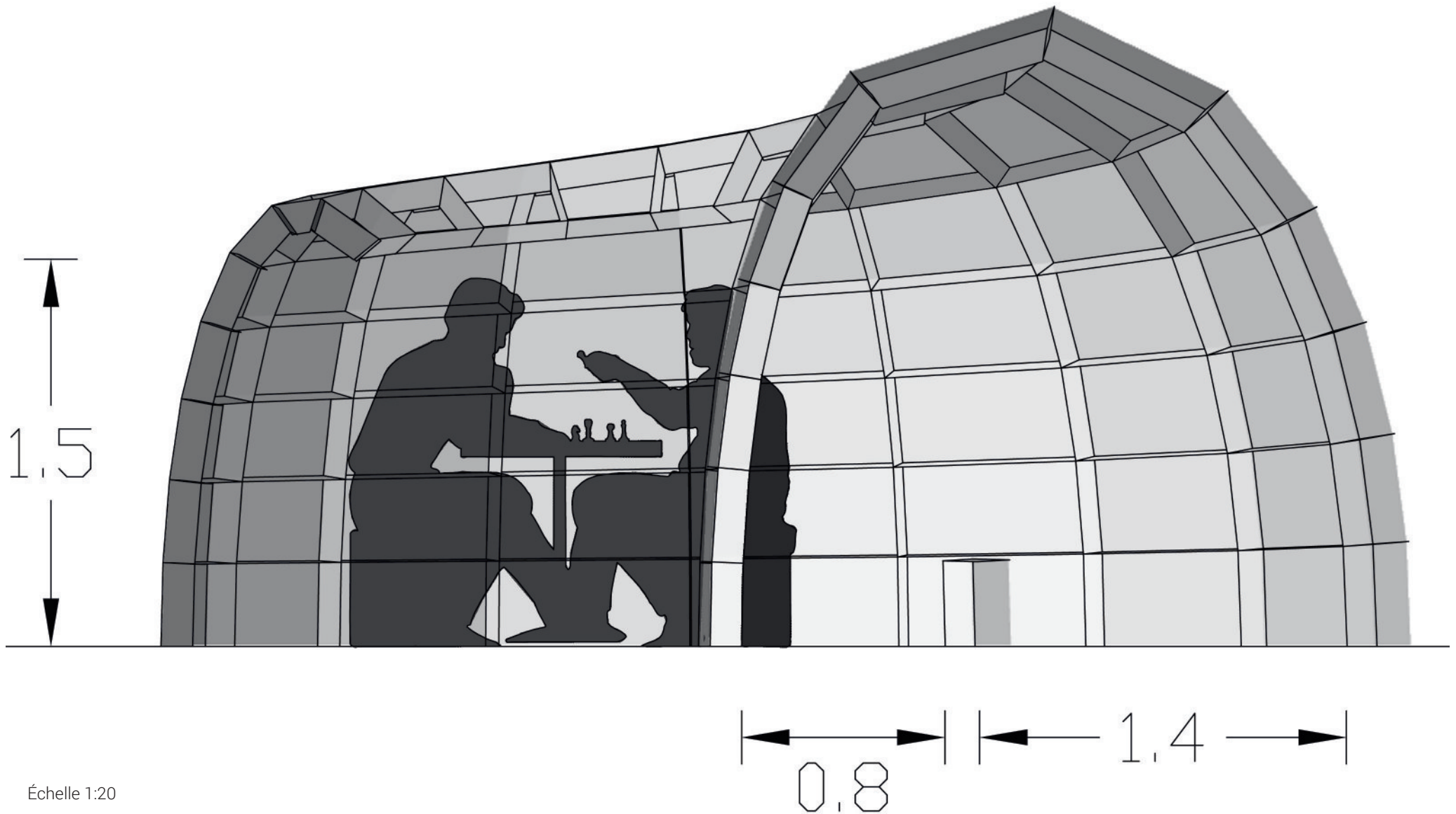
vue en élévation



Échelle 1:20

JÖRMUNGAND

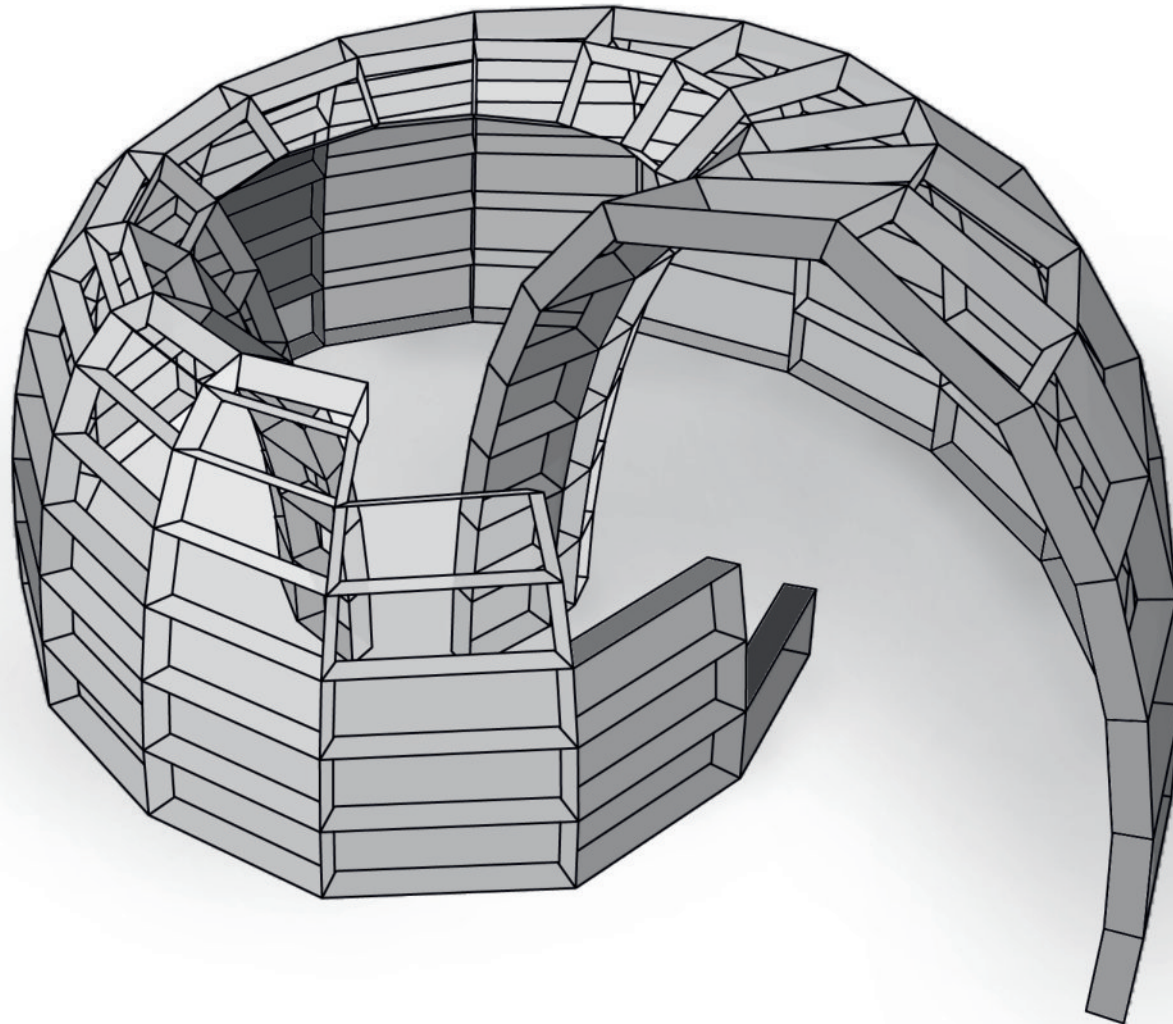
vue en coupe



Échelle 1:20

JÖRMUNGAND

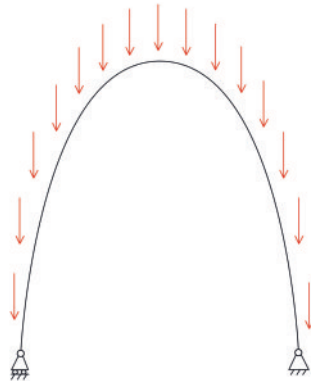
axonométrie



JÖRMUNGAND

note de calcul

Schéma statique



Afin de maximiser nos chances de succès, nous avons réalisé une étude numérique de notre structure pour déterminer ses zones critiques et prévoir de les renforcer avec du scotch armé. Cela nous a de plus permis d'avoir une idée de la déformation de notre structure sous son propre poids et d'évaluer les déplacements maximum que l'on s'attend à observer.

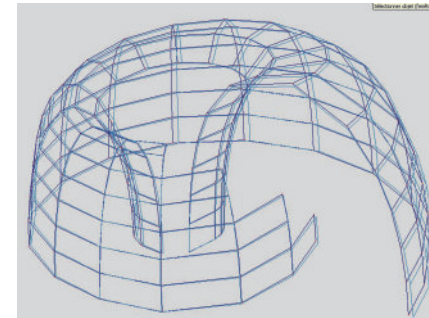
MODÉLISATION

Nous avons donc importé notre structure dans le logiciel RoboBAT et nous avons appliqué son poids propre à la structure. Le matériau appliqué était un béton pour simplifier l'utilisation du logiciel, et les conditions aux limites étaient des appuis simples. Celles-ci étant insuffisantes pour garantir la stabilité de la structure qui était ainsi libre de glisser, nous avons rajouté une rotule à un nœud et un appui simple horizontal à un autre nœud.

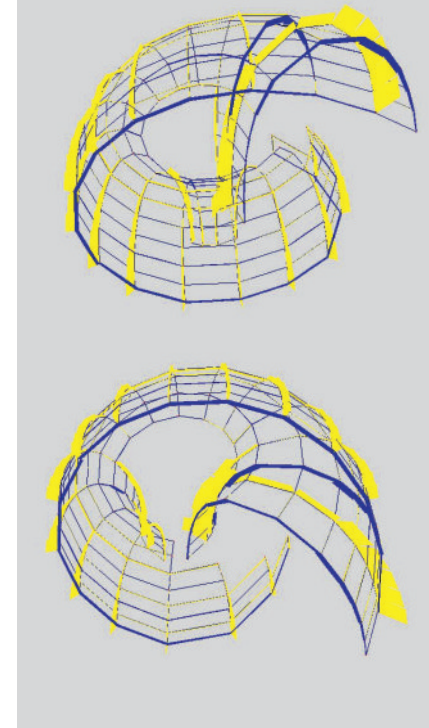
CONTRAINTES PRÉDOMINANTES

L'analyse des résultats a montré que les moments les plus importants étaient des moments de flexion dans le sens de la hauteur de la poutre en polystyrène sur l'extrados de la partie en appui simple sur le sol, et des moments de flexion dans le même sens au milieu des arches les plus grandes. Les premiers correspondent à une tendance de la structure en spirale à vouloir s'ouvrir, et les seconds à un affaissement de la structure sous son poids propre (voir déformée). D'autre part, des efforts normaux ont été logiquement prévus dans les poutres verticales au niveau de la base de la structure, puisque celles-ci sont comprimées par le poids de l'ensemble.

Déformée de la structure sous poids propre



Efforts normaux



DÉPLACEMENTS

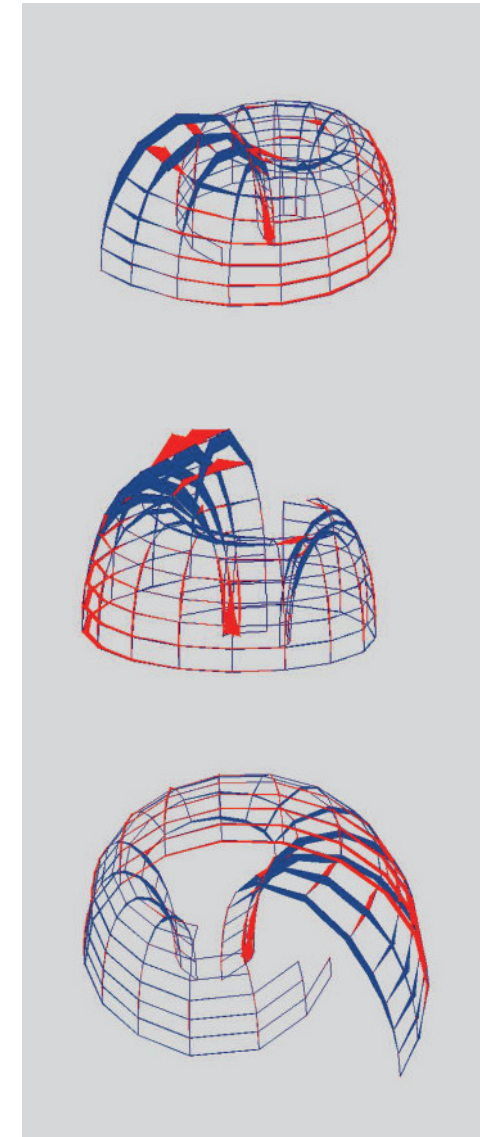
Le matériau de la simulation n'étant pas le bon, nous avons tenté d'obtenir les déplacements maximaux en rapportant le résultat numérique au bon rapport raideur/densité. En effet, le problème étant linéaire, il suffirait de multiplier le déplacement obtenu par le rapport des densités et de diviser par le rapport des modules d'Young. Nous avons donc mesuré le module d'Young du polystyrène par un essai de flexion de poutre console avec des masses connues, et nous avons obtenu 13 MPa. La densité du polystyrène est de 1.05. Quant au béton, nous prenons les valeurs de 2.3 pour la densité et 30 GPa pour le module d'Young, il devrait ainsi y avoir un rapport 1000 entre les déplacements

Au vu des valeurs numériques les déplacements calculés sont absurdes (90cm de flèche pour la plus grande arche). C'est pourquoi nous n'avons conservé de notre étude que des valeurs relatives et non absolues, c'est-à-dire que ce qui nous intéressait était uniquement la localisation des zones de fortes contraintes.

	UX (cm)	UY (cm)	UZ (cm)	RX (Rad)	RY (Rad)	RZ (Rad)
MAX	0.3976	0.2443	0.0	0.001	0.001	0.000
Noeud	84	183	3	5	58	3
Cas	1	1	1	1	1	1
MIN	-0.0354	-0.1833	-0.0939	-0.000	-0.001	-0.001
Noeud	105	26	15	60	184	26
Cas	1	1	1	1	1	1

Déplacements maximaux

Moments de flexion



JÖRMUNGAND

notice technique

POINTS CLEFS

- Transformation de la parabole pour donner un effet spirale
- Grands blocs à l'extérieur
- Petits blocs à l'intérieur
- Courbure positive à l'extérieur, courbure négative à l'intérieur.

MÉTHODES

Nous avons mis en place l'exportation et découpe des différentes planches afin de reconstituer les cubes. Nous avons réfléchi à plusieurs façons de contreventer notre réalisation, problématique importante pour cette typologie de structure.

CONTREVENTEMENT

Parmi les différentes possibilités évoquées: panneaux pleins, éléments qui bloquent 3 cotés, triangulation d'une ou plusieurs lignes de blocs... nous avons finalement limité notre contreventement à des équerres sur les 4 angles des blocs des arches impaires, ce qui permettait de stabiliser suffisamment l'ensemble tout en limitant l'impact visuel. Cela crée aussi un effet "écailles" qui accentue le concept du serpent qui se mord la queue.

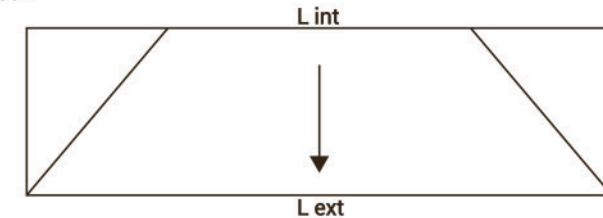
MATERIEL

- Plaques de mousse
- Visseuse et vis
- Stylos et règles
- De la bonne volonté

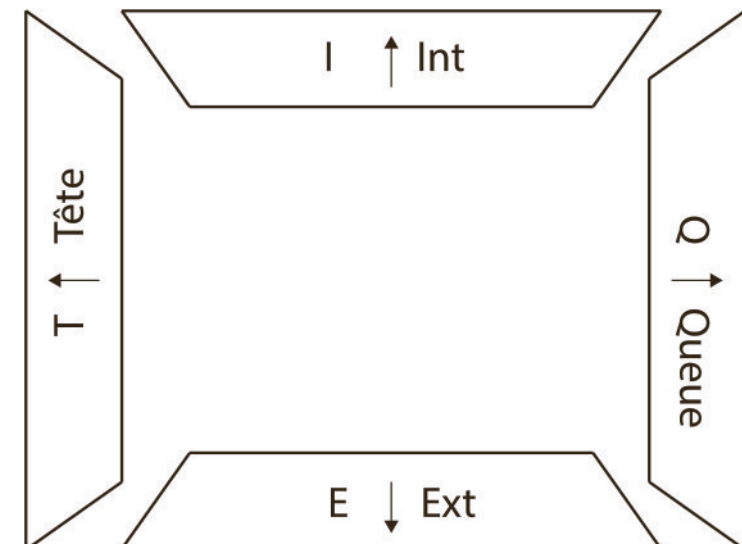
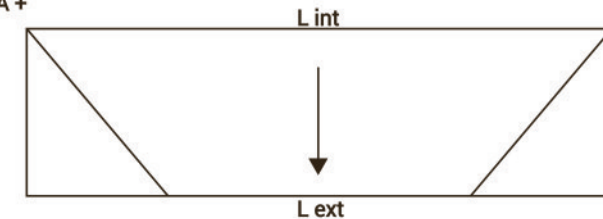
ORGANISATION

- 1 superviseur
- Atelier dessin de la géométrie des éléments
- Atelier découpe
- Atelier montage / assemblage / vissage
- 1 contrôle qualité

DELTA -

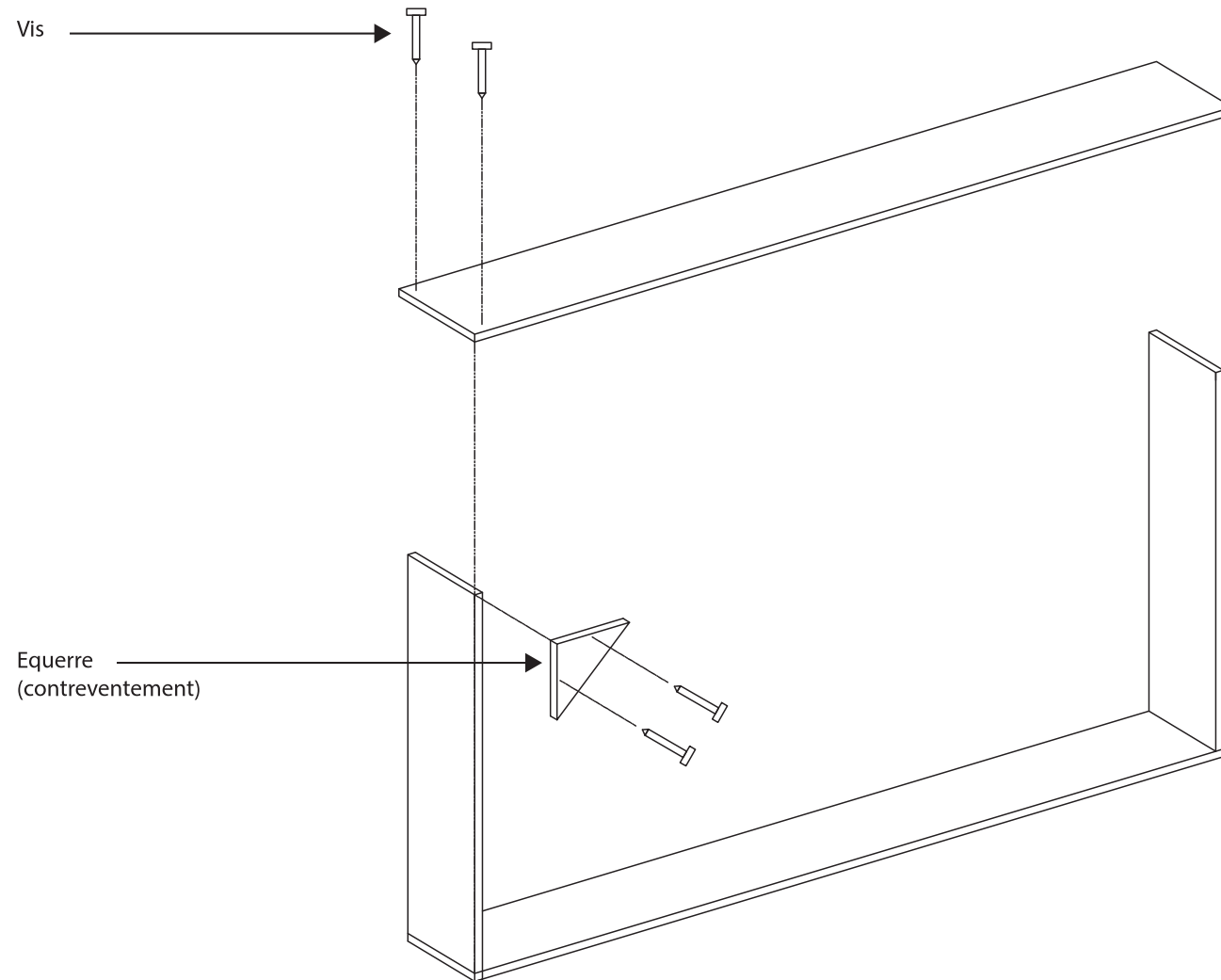


DELTA +



JÖRMUNGAND

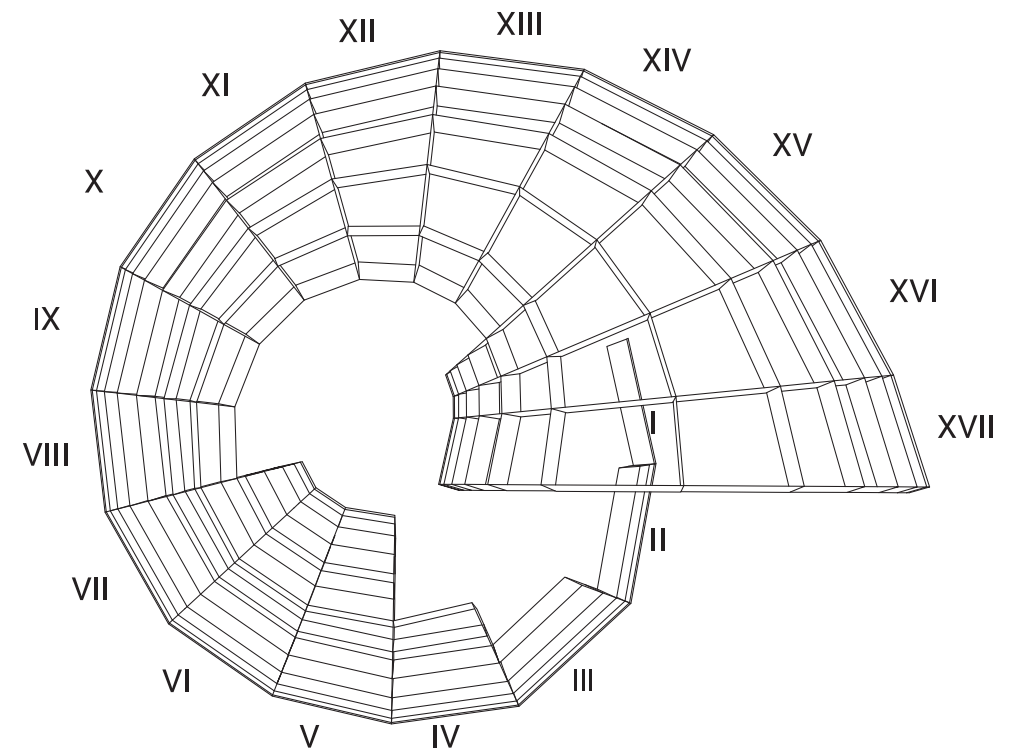
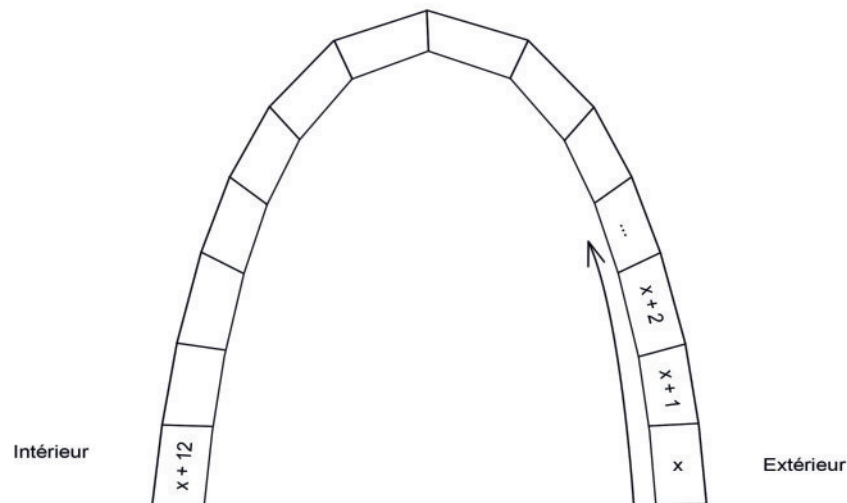
détail



ORGANISATION

Nous avons commencé par pré découper l'ensemble des panneaux en bandes de 12 cm afin de faciliter le travail à venir. Au démarrage, une équipe de cinq personnes se chargeait de dessiner les modules avec les longueurs issues du fichier conception. Une personne était chargée de la découpe de ces modules. Deux personnes s'occupaient d'assembler les modules et une personne était chargée du contreventement. La logistique était assurée par une personne, assistée du chef de projet afin de valider les blocs et leurs emplacements.

En phase de montage deux équipes de 3 personnes se chargeaient d'assembler les blocs entre eux, à la manière du montage d'un mur en brique. Deux personnes devaient apporter et positionner les blocs aux endroits adéquats afin d'optimiser cette phase de montage. Au moment d'assembler les parties hautes des arches entre elles, cinq à six personnes étaient mobilisées afin de tenir la structure, la visser à l'existant et s'assurer des positions et des possibles problèmes des éléments structuraux.



Numérotation des arches

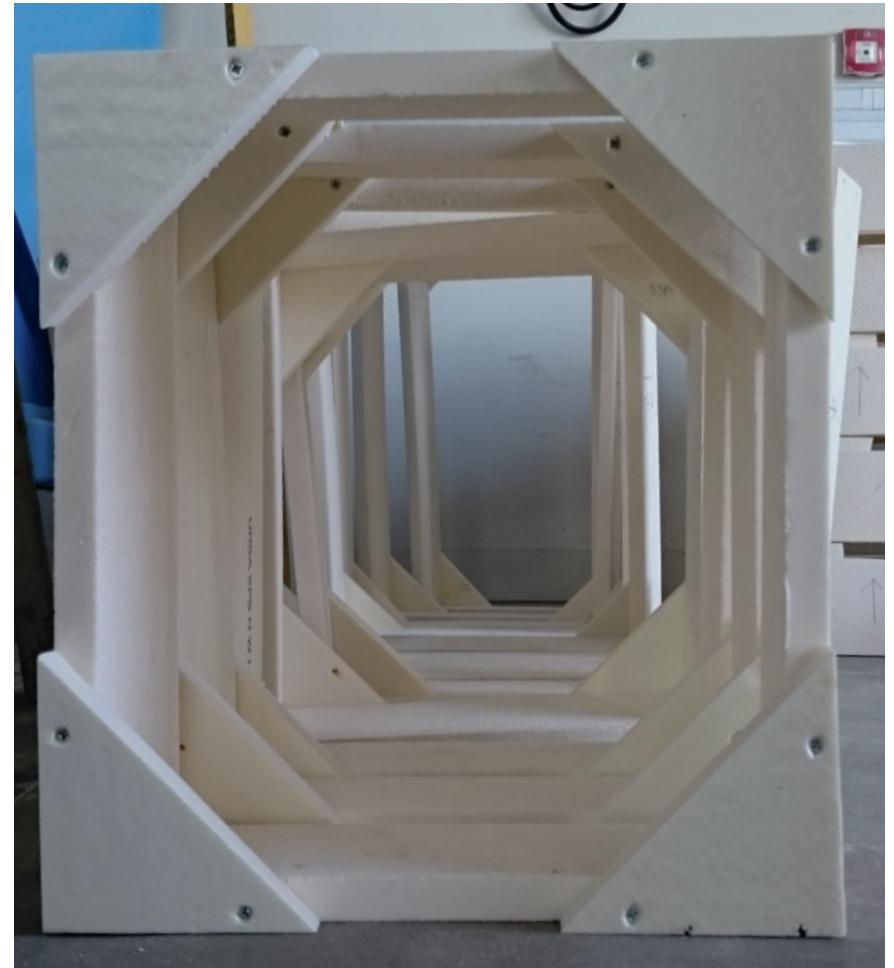
AMÉLIORATION DE LA CONSTRUCTION

Nous aurions pu améliorer la construction de la structure de plusieurs façons. La première source d'erreur dans la structure venait de la discrétisation de la courbure en voussoirs d'angles durs, qui de part les imprécisions inévitables de dessin et de découpe ne permet pas de combiner les éléments parfaitement comme dans la conception. Une manière de régler ce soucis aurait été de biseauter les angles des voussoirs au cas par cas pour prendre en compte ces difficultés et minimiser les espaces entre les éléments lorsqu'on les assemble.

Nous avons également rencontré des problèmes lors de la construction sur les éléments en clef de voute soumis à une forte traction sur les vis intérieures, qui n'ont pas toujours résisté et ont nécessité des retouches ou l'ajout de scotch armé par endroits. Il aurait été possible d'éviter cela en utilisant de la colle à bois sur ces éléments pour renforcer leur assemblage et éviter l'arrachement lorsque les arches sont placées.

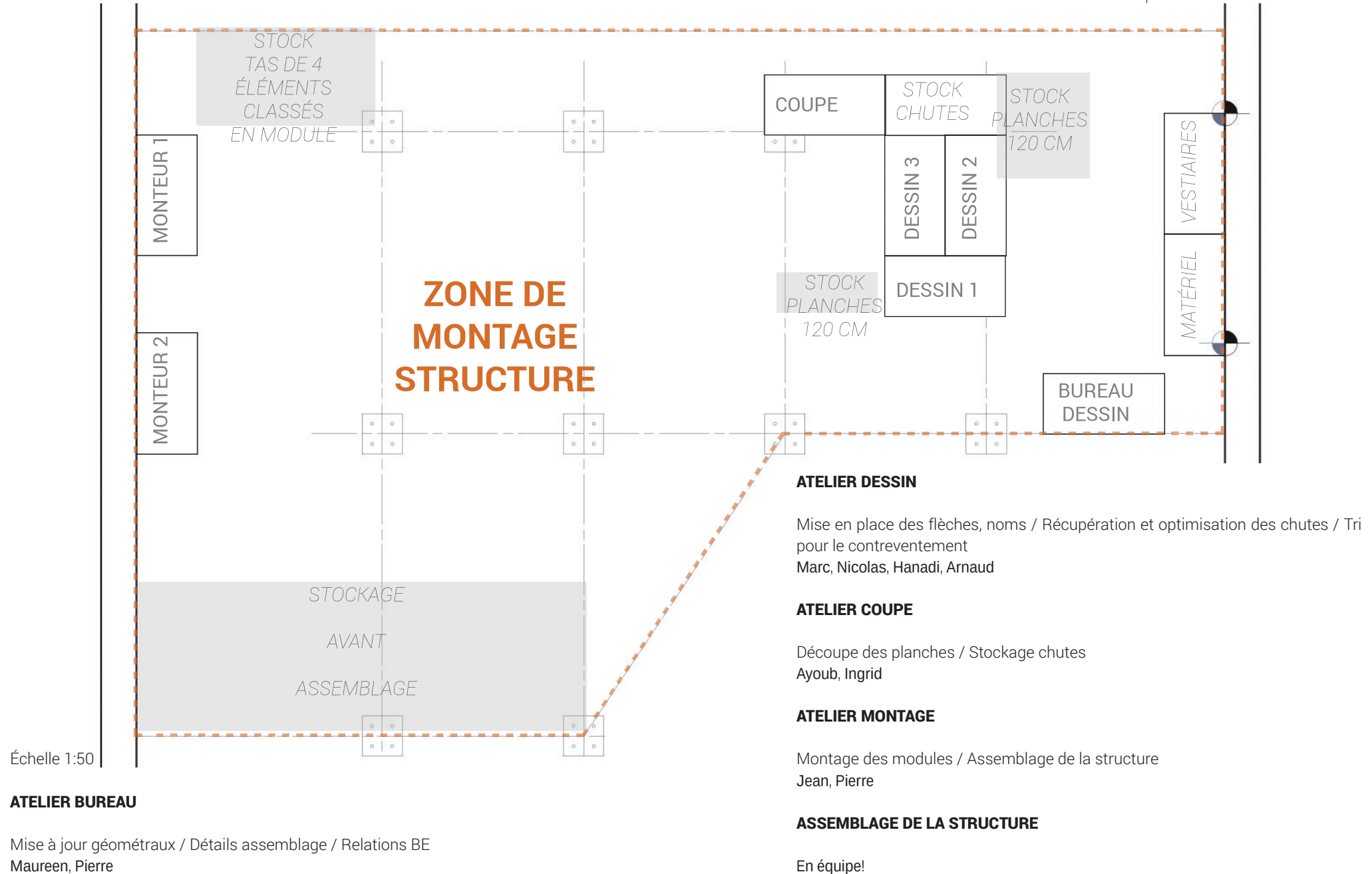
Le polystyrène n'étant pas très rigide, la structure lorsqu'elle est assemblée comme nous l'avons fait (en construisant les premiers niveaux de voussoirs du mur extérieur sur toute la structure) peut prendre plusieurs formes et pas nécessairement celle prévue par conception. Nous avons noté un certain nombre de repères au sol pour reproduire au mieux les distances et la forme géométrique prévue mais il aurait été plus efficace de construire une rive en OSB pour contraindre la structure à adopter le contour exact et minimiser les fragilités introduites par ces imprécisions à la construction.

Finalement, au niveau de la logistique de chantier, nous aurions pu optimiser l'utilisation des chûtes sur le Grasshopper pour permettre d'économiser un maximum de matériau. Le temps nécessaire aurait par contre été considérable et l'économie de matière pas grandement supérieure puisque nous avons réutilisé au maximum les chûtes à vue d'œil.

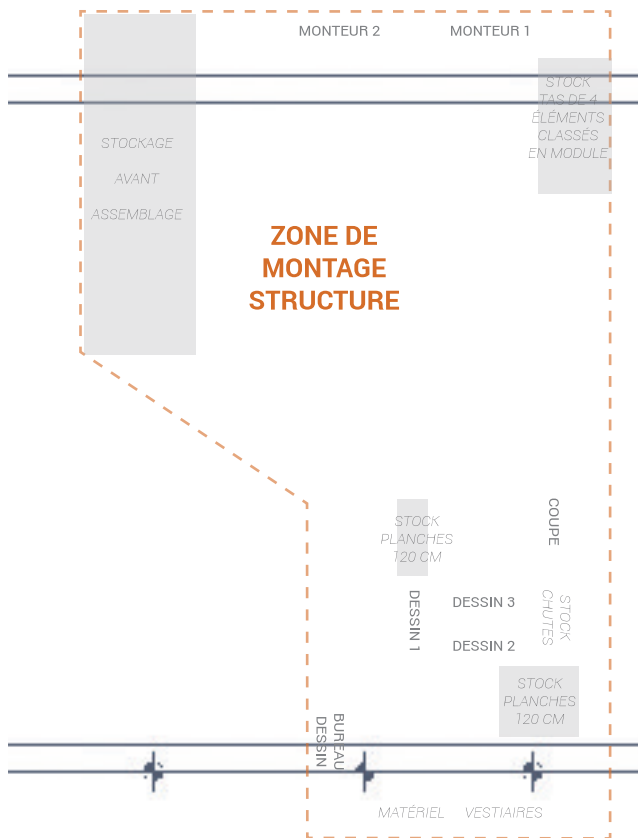


JÖRMUNGAND

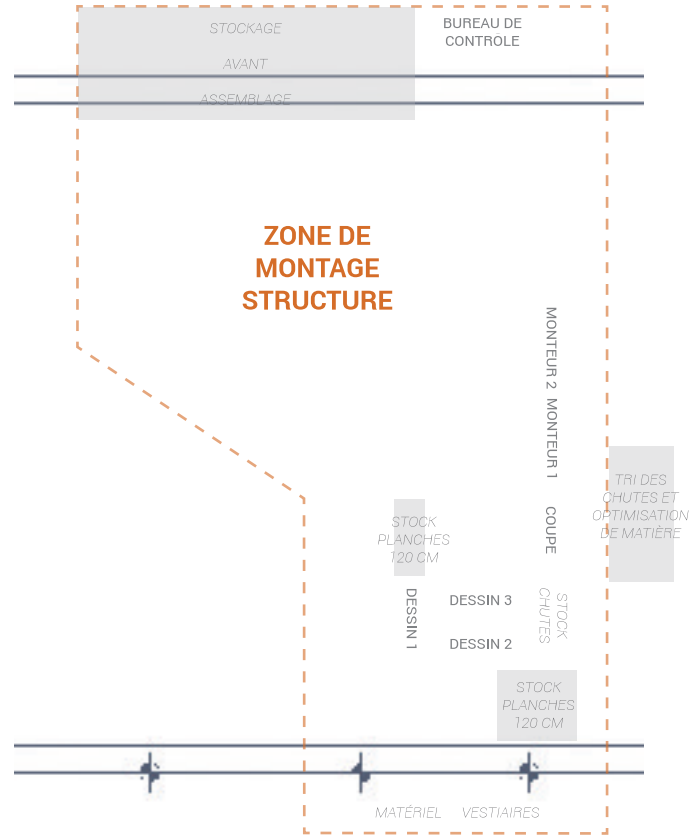
plans de chantier



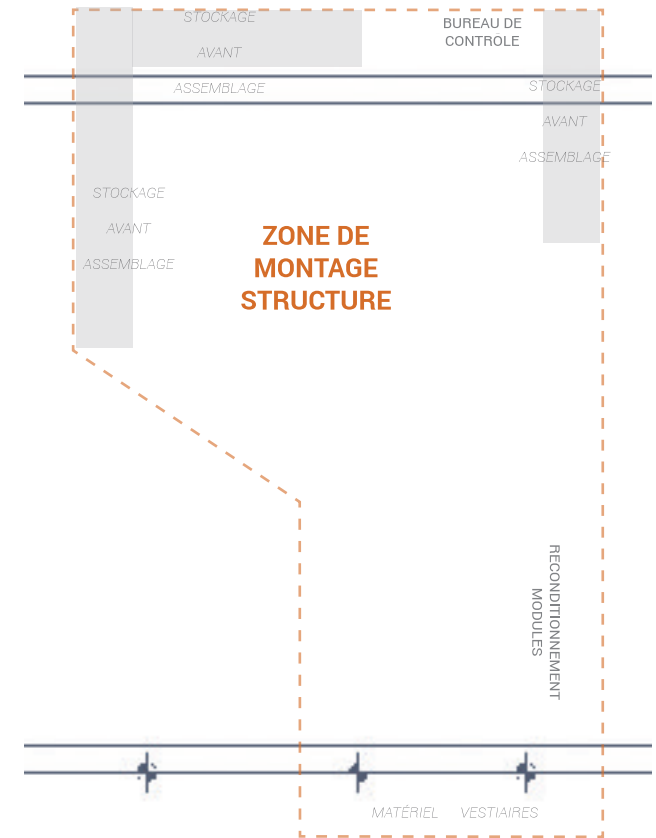
PHASE 1



PHASE 2



PHASE 3



JÖRMUNGAND

photos du montage

- 1 Projet, dessin des plans d'exécution
- 2 Découpe des planches
- 3 Organisation atelier
- 4 Atelier dessin
- 5 Assemblage de la structure
- 6 Atelier assemblage des modules
- 7 Gestion du stockage
- 8 Atelier découpe

1
2

3
4
5

6
7
8

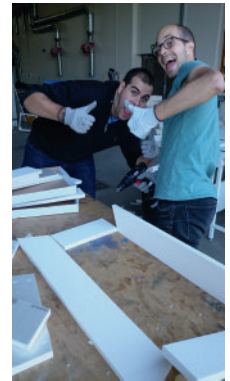


Photo du montage du
projet gridshell rigide
CLC 2015

JÖRMUNGAND

photos du montage

- 1 Dessin des traits de coupe
- 2 Stockage des modules
- 3 Mise en place de la base
- 4 Assemblage niveau par niveau
- 5 Pose de l'arche
- 6 Fixation des arches
- 7 Préparation des arches en parallèle
- 8 Finition de la structure assemblée

1
2



Photo du montage du
projet gridshell rigide
CLC 2015