



Vice-Versa

CONSTRUIRE UNE ARCHE 2018

Séminaire de l'École des Ponts ParisTech - départements GCC

ENSEIGNANTS

M. Brocato, O. Baverel.

GROUPE

Caline Abou Chedid : ingénieure en double diplôme aux Ponts.

Julien Pringuet : ingénieur en double cursus ingénieur-architecte.

Mateo Nicolas : ingénieur en double cursus ingénieur-architecte.

Theo Mondot : élève à l'école d'architecture en double cursus architecte-ingénieur.

Thomas Schwindenhammer : élève à l'école d'architecture en double cursus architecte-ingénieur.

Abstract

Bottom-up

The Bottom Up project is a product of the association of two structural concepts: the thousand-years-old idea of the masonry arch and the very millennial idea of tensegrity. The last one relies on the linking of rigid elements experiencing only compression, using cables to carry the tension. In the Bottom Up concept, the rigid elements are two arches made from several arch-stones: both arches, one being reversed and the other standing, experience the same load from the tensegrity, the only difference being the direction of their weight: this weight being weaker than the tension in the cables, both arches have roughly the same function. The main difficulty we experienced was realisation, as we had to adapt our sketch to the technology available – wire, polystyrene, screws and duct tape.

It was thus necessary to combine two approaches: the scientific one to draw the shape of the arch using our engineering knowledge and a technical approach to conceive smart ways to assemble and reinforce the structure at key positions – for example, to avoid the tearing of polystyrene at the end of the wires, or to adjust the length of such wires. We had the opportunity to use our different backgrounds, as architecture students, used to the realisation of bold models, and engineering students. The realisation of Bottom Up allowed us to test the modalities of the transition between theory and the application, during the short duration of a week; so short we had to move on both fronts at times – we had to start building the arches without knowing precisely where the wires were going to be attached. The structure was surprisingly easy to build and stable after realisation: we were able to move it around – with caution – and tighten the wires with the required strength. To sum it up, Bottom Up is a funny structure displaying both the concepts of masonry arch and tensegrity.

Recherche

Démarche

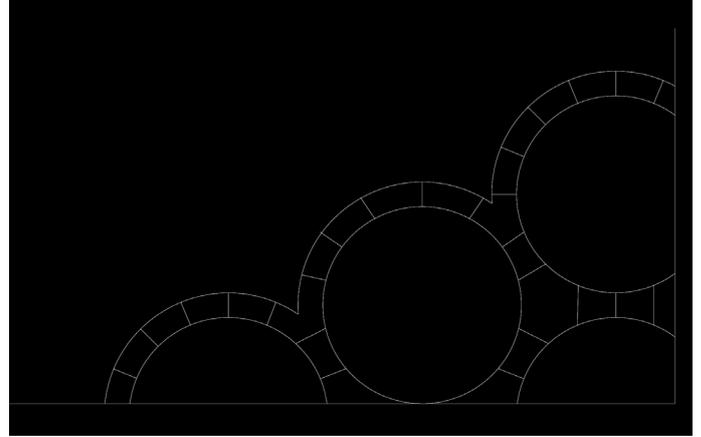
Après une séance de recherche en solitaire, qui avait pour but de faire germer des premières intentions vierges de tout a priori, nous avons chacun présenté nos idées et en avons, dans un premier temps, retenu trois. Nous nous sommes ensuite imposé de n'en garder que deux. Nous avons alors formé un groupe de deux et un groupe de trois, dont chacun développait une hypothèse afin d'en explorer les avantages, les inconvénients et la faisabilité.

Le choix d'un unique projet ne fut pas aisé, et a nécessité un long débat. En effet, les deux propositions nous semblaient pertinentes et nous tenaient à cœur, chacune faisant appel à des problématiques et des enjeux singuliers, parfois antagonistes. Après avoir pesé le pour et le contre de chaque proposition, nous avons décidé d'opter pour le projet le plus complexe, bien qu'il présente un plus grand risque en terme d'exécution. Il nous semble visuellement plus fort, et la simplicité du concept rend le projet plus lisible.

Nous souhaitons donc vous faire part dans ce rapport de ces deux propositions : nous commencerons par présenter brièvement celle qui n'a pas été retenue, puis nous détaillerons celle que nous avons réalisé.

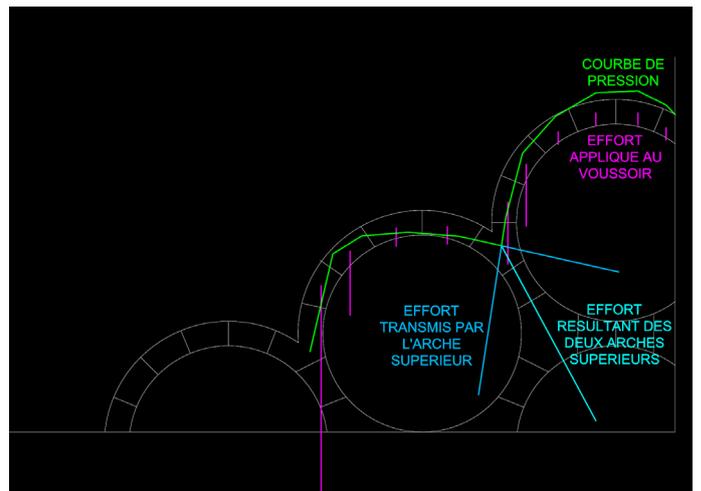
Recherche

Hypothèse des Arches en trompe-l'oeil



La première hypothèse consiste en un réseau d'arches dont l'enjeu est de réinterpréter le système funiculaire qu'on associe traditionnellement aux cathédrales et églises gothiques.

Pour rappel, un ensemble d'arches dirige les charges vers le sol, et la composante horizontale résultant des poussées est minorée par les pinacles (charges ponctuelles) et des contreforts (butées). Ici, ces charges ponctuelles sont cachées dans les voussoirs, et les zones surchargées prennent l'aspect contre-intuitif d'un vide. De cette manière, la lecture du funiculaire est perturbée par les déviations ponctuelles de la courbe de pression, ce qui permet l'expression d'un vocabulaire très sculptural quand à la forme générale.



Il s'agit donc de dessiner une géométrie relativement libre, et de déterminer l'emplacement et le poids des pinacles afin d'adapter la courbe de pression à la forme désirée. Nous procédons donc par itération pour ajuster ces charges, car chaque modification d'une courbe de pression induit un chargement et donc une modification de l'ensemble du fonctionnement du système.

En considérant des voussoirs à quatre faces de 50×20×2 cm et nécessitant l'emploi de 12 vis, on trouve en première approximation un poids de 257g par voussoir. La démarche itérative de statique graphique entreprise consiste à considérer chaque voussoir comme une charge ponctuelle de valeur 1. Notre travail nous a permis de dimensionner des pinacles d'un poids de valeur 5, soit un peu plus d'un kilo, ce qui est réalisable.

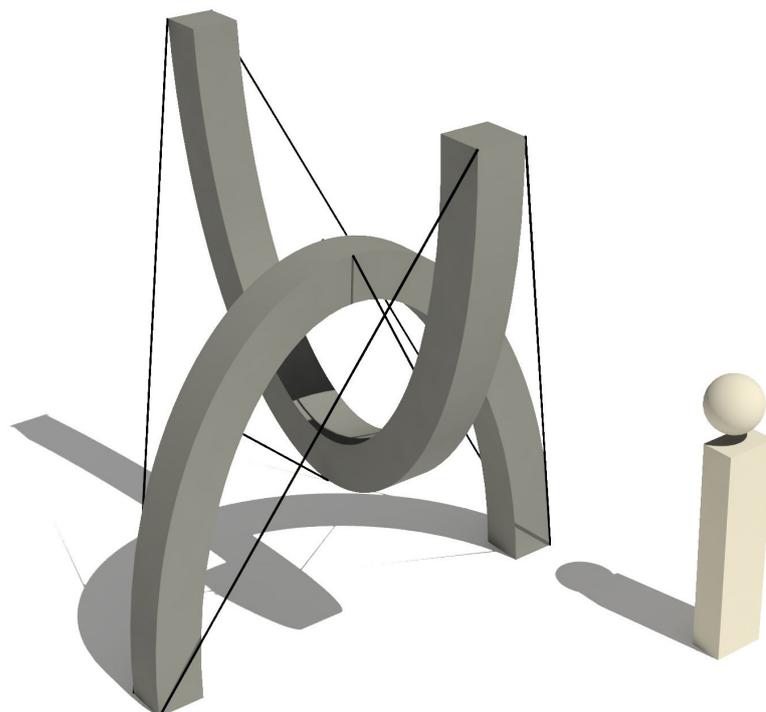
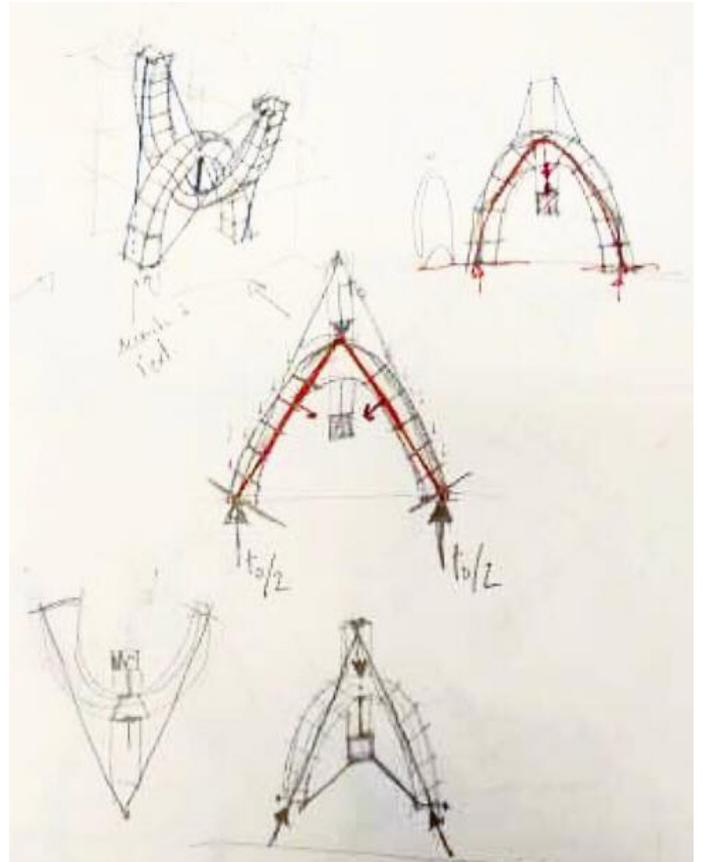
Recherche

Hypothèse du *Simplex*

La solution du simplex est moins traditionnelle quant à son apparence : une arche posée au sol soutient une autre arche retournée à 180° et pivotée à 90°. Les deux arches travaillent ensemble grâce à un réseau de câbles qui génère une compression dont l'intensité est impossible sous le seul poids propre des voussoirs en polystyrène.

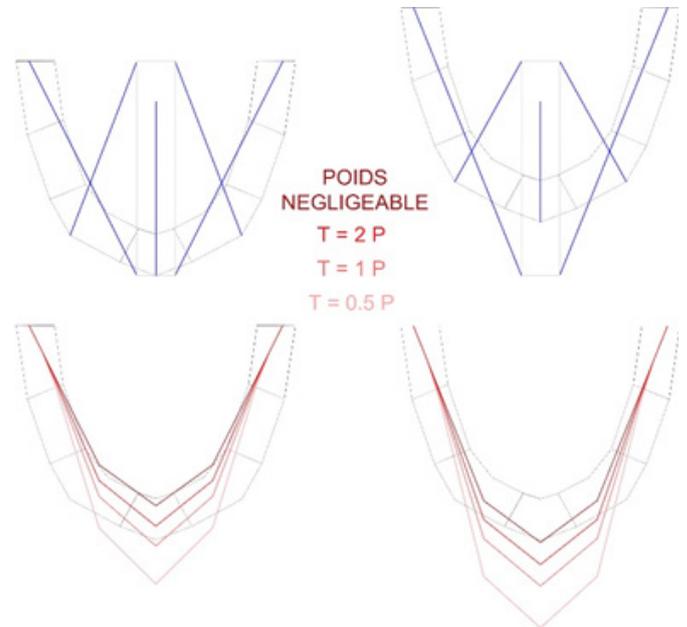
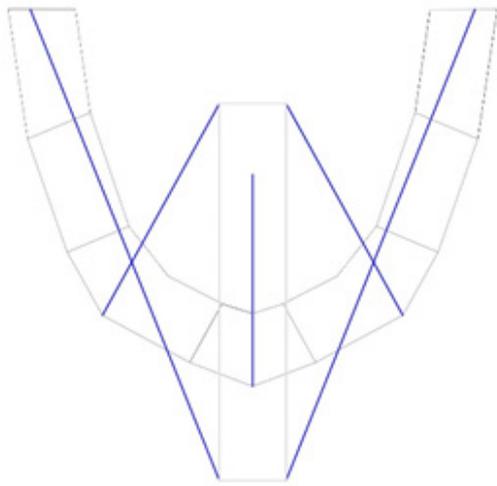
Cette précontrainte permet, de par le poids négligeable du matériau, de faire fonctionner les deux arches comme si la gravité était une contrainte négligeable, car les forces générées par les câbles qui entrent en jeu dans le système sont beaucoup plus déterminantes dans la définition de l'équilibre global.

Ce système nous permet d'utiliser deux arches similaires malgré leur position antagoniste dans l'espace. Cette proposition nécessite cependant la mise en tension d'un réseau de câbles indépendants, procédé complexe au vu du matériel dont nous disposons.



Conception

Fonctionnement de l'arche suspendue

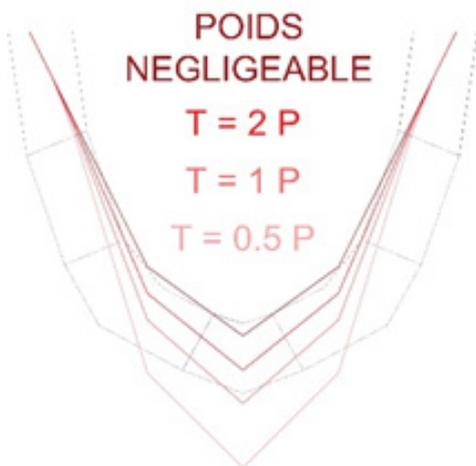


Le câble reliant les pieds impose la tangente à l'origine du funiculaire.

Un autre paramètre réglable est l'écart entre les sommets des deux arches.

En écartant les deux sommets, on incline davantage le câble reliant les pieds et on permet ainsi une meilleure reprise de la poussée de l'arche inversée. Cela se traduit par un funiculaire moins allongé et permet d'avoir à appliquer une tension inférieure dans les câbles.

On opte donc pour une solution avec les sommets au niveau des pieds de l'autre arche afin d'incliner autant que possible les câbles extérieurs. On minimise ainsi les effets de forte précontrainte, qui sont compliqué à gérer et qui risquent d'endommager les matériaux.

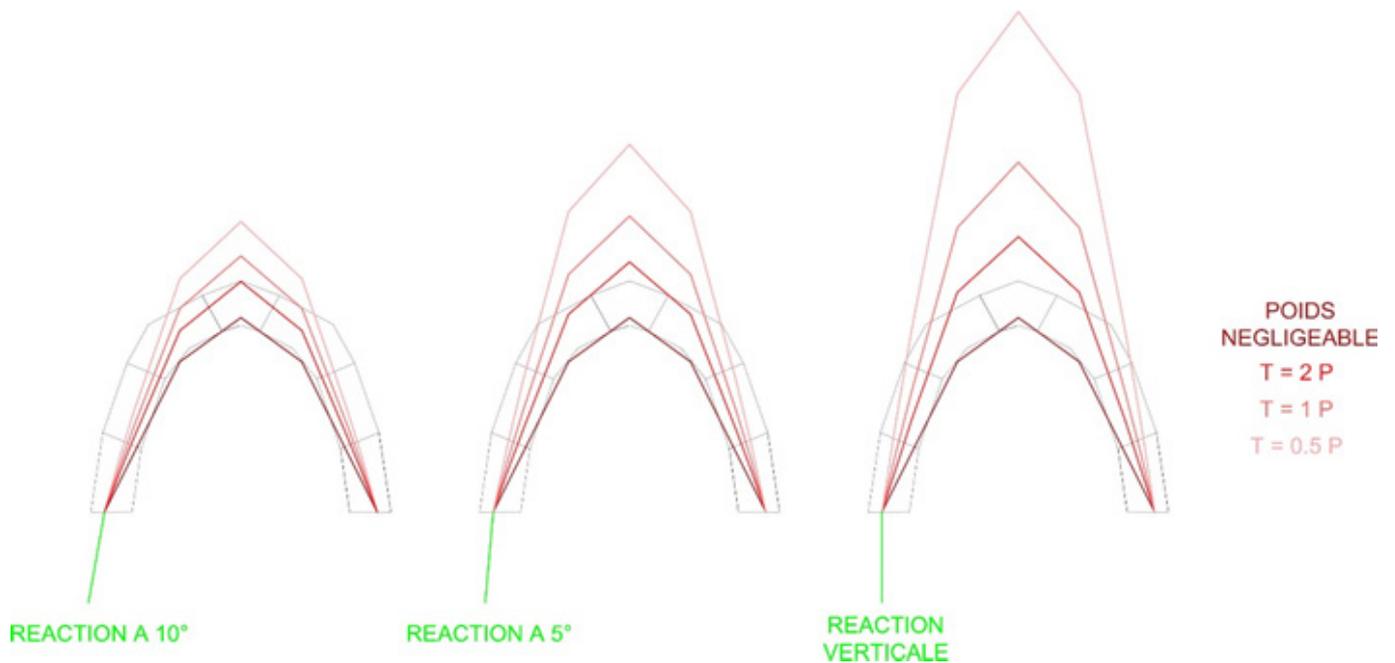


On trace ci-dessus les courbes de pression correspondant à une géométrie donnée pour différentes valeurs de tension dans ces câbles. On compare cette tension au poids P d'une arche.

On s'aperçoit ainsi que la tension imposée au câble minimise l'influence de la gravité et permet ainsi de « redresser le funiculaire ».

Conception

Fonctionnement de l'arche inférieure



L'arche à l'endroit présente une courbe de pression plus traditionnelle. La difficulté pour cette arche est la prise en compte de la gravité qui se transmet intégralement à cette dernière en plus de la précontrainte induite par les câbles.

Ainsi, la tangente au funiculaire au niveau des pieds est imposée par la somme de la précontrainte et de la réaction du sol (reprenant la charge gravitaire et la poussée).

On peut donc chercher à contrôler la poussée à partir de la tension du câble. Pour une poussée fixée (soit un angle de la réaction aux appuis fixée), on trace les différentes courbes des pression.

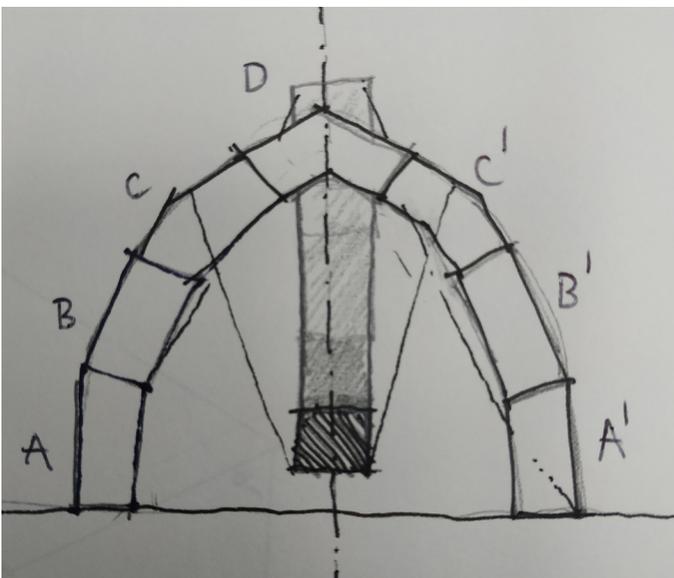
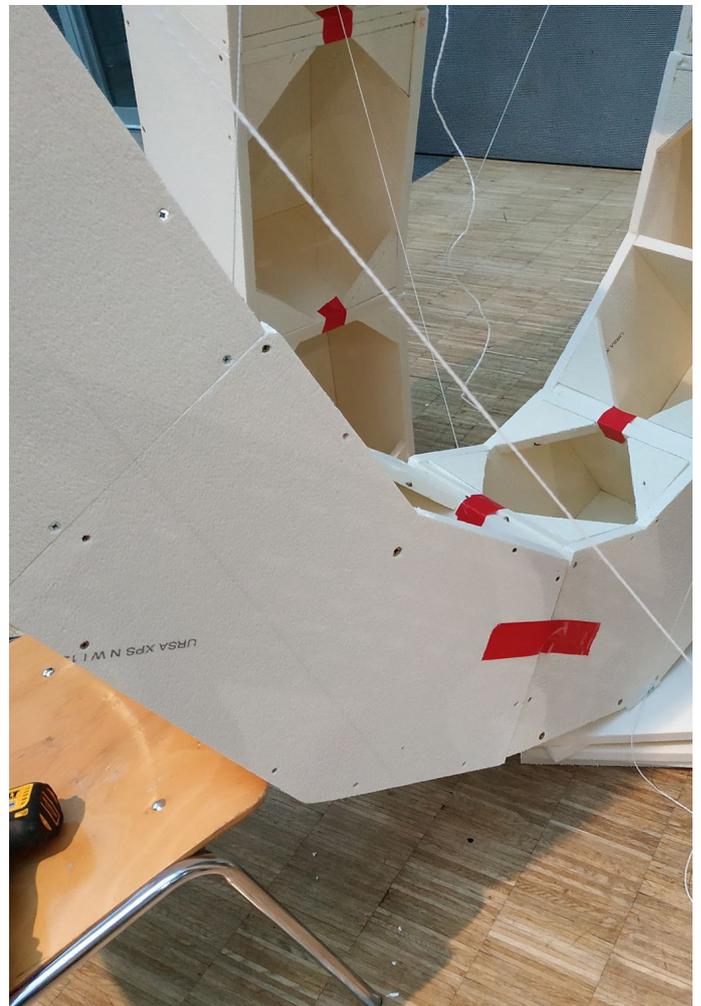
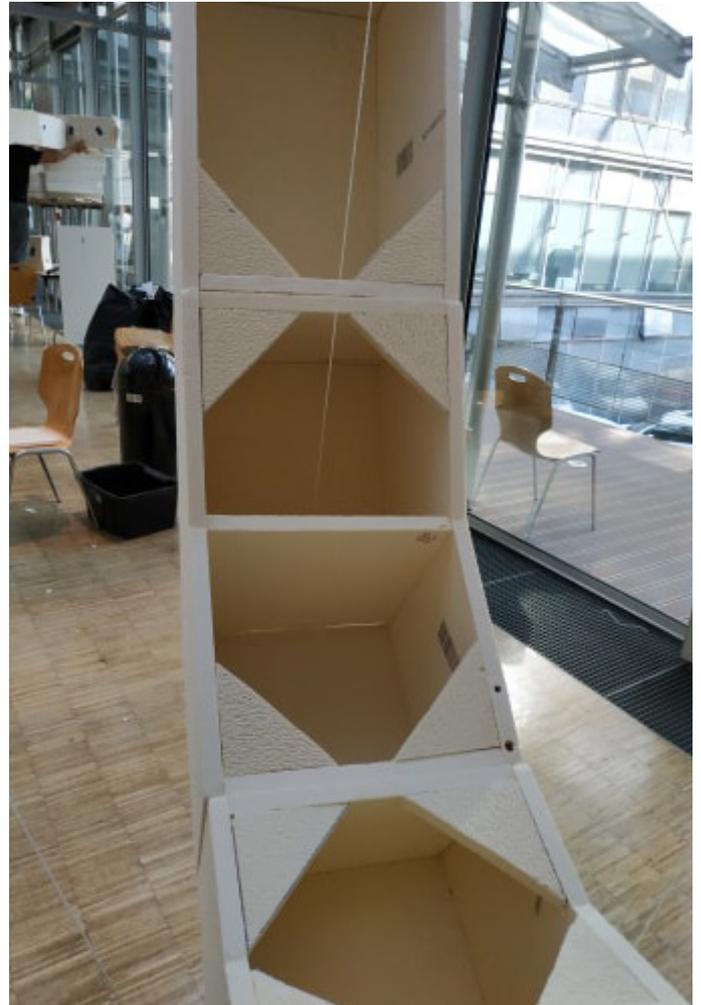
On observe que plus la poussée est importante, plus la courbe de pression est inclinée. Ainsi, le sol permet d'équilibrer plus facilement l'arche inférieure. Une fois que la tension équilibre l'arche supérieure, la poussée suffit à équilibrer l'ensemble du système. On peut ensuite se fixer comme contrainte d'obtenir un équilibre sans poussée, le sol ne reprenant que la composante gravitaire. Il faut alors imposer une tension supérieure, afin que le câble reprenne l'intégralité de la composante horizontale (plus importante dans l'arche inférieure). Après réalisation, on a pu vérifier que notre arche était suffisamment précontrainte et qu'un équilibre sans poussée était possible. Il n'a donc pas été nécessaire de mettre en place des poids ou des butées au sol.

Montage Claveaux et assemblage

La structure est composée de deux arches discréditées en sept voussoirs. Il nous semblait plus intéressant d'utiliser des voussoirs rectangulaires pour accentuer la massivité de l'arche (qui contraste avec sa légèreté) et rendre plus aisée la rectification des découpes en cas d'imperfection. Nous avons utilisé une largeur en pied de 30cm afin d'assurer une bonne surface de contact au sol et ainsi une stabilité accrue de l'ensemble. Rappelons que le basculement est une problématique majeure, car cette structure n'a que deux appuis au sol.

Les deux arches ont été assemblées au sol : les claveaux sont solidarisés entre eux par des morceaux de ruban adhésif avant d'être positionnées.

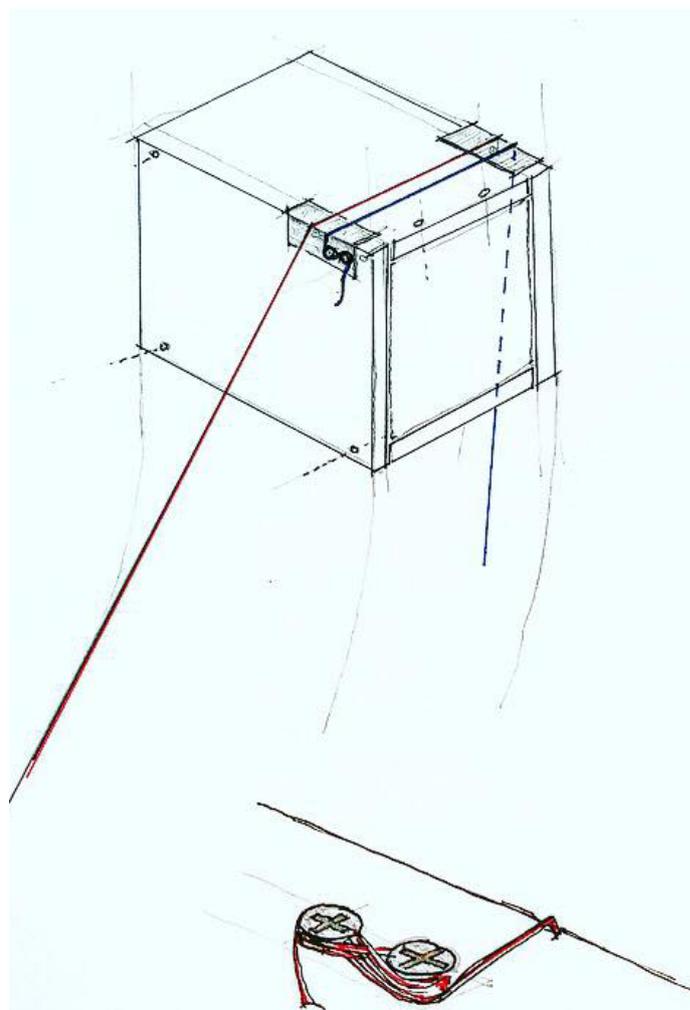
Les arches sont positionnées dans l'espace, puis stabilisées par trois appuis (deux chaises et une cale en polystyrène). Il s'agit de les régler très précisément à l'aide de câbles temporaires, afin que les problématiques de stabilité globale (notamment de basculement/renversement) soient minorées.



Montage Système d'accroche des câbles

Il s'agit de s'adapter à la limite technologique imposée par l'exercice. La pré-contrainte des arches est faite à l'aide de cordes en nylon fixées aux angles des claveaux. Il a fallu être en mesure de contrôler la tension des câbles (donc leur longueur), tout en s'assurant que les accroches n'arrachent pas le polystyrène, très fragile.

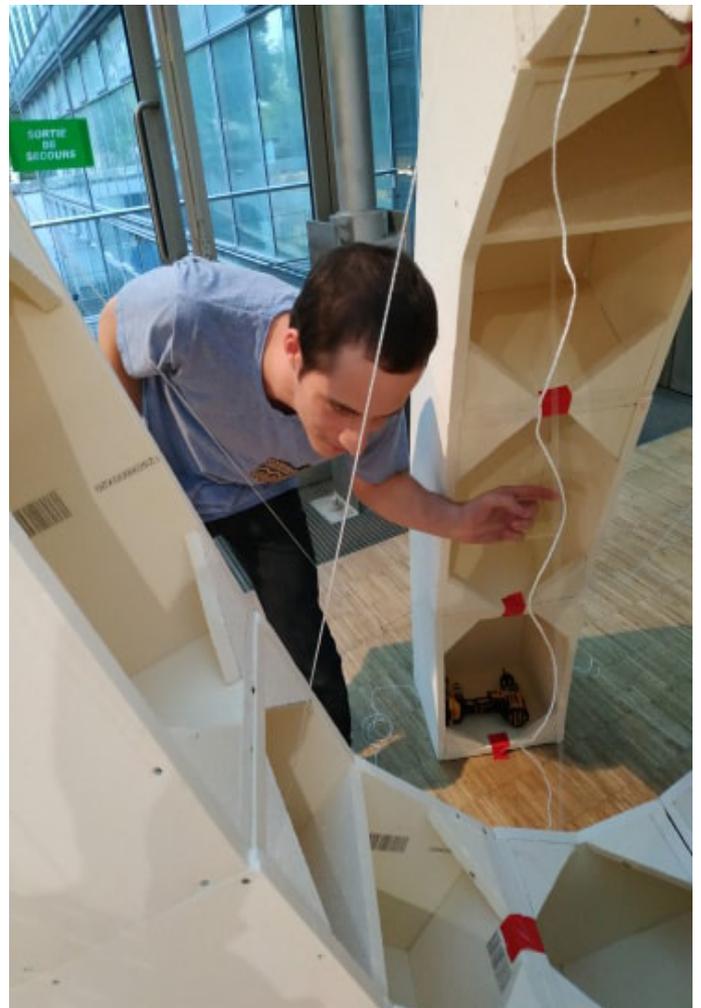
La première mesure a été de faire passer les cordes autour (ou au dessus, selon sa position) du claveau avant de l'accrocher à une face, plutôt que le fixer directement dans l'axe du tirant. Par conséquent, ce dernier arrive sur le système de serrage perpendiculairement, plutôt que parallèlement, ce qui risquerait un arrachement des vis.



La fixation de la corde et le système de réglage sont identiques : ils consistent en deux émergences de vis côte-à-côte autour desquelles les cordes s'enroulent en 8. Ainsi, les frottements suffisent à fixer la longueur tout en permettant une modification simplifiée par l'absence de nœud. Enfin, les angles par lesquels passent les cordes ont été taillés d'une encoche puis renforcé au ruban adhésif.

Montage Précontrainte de la structure

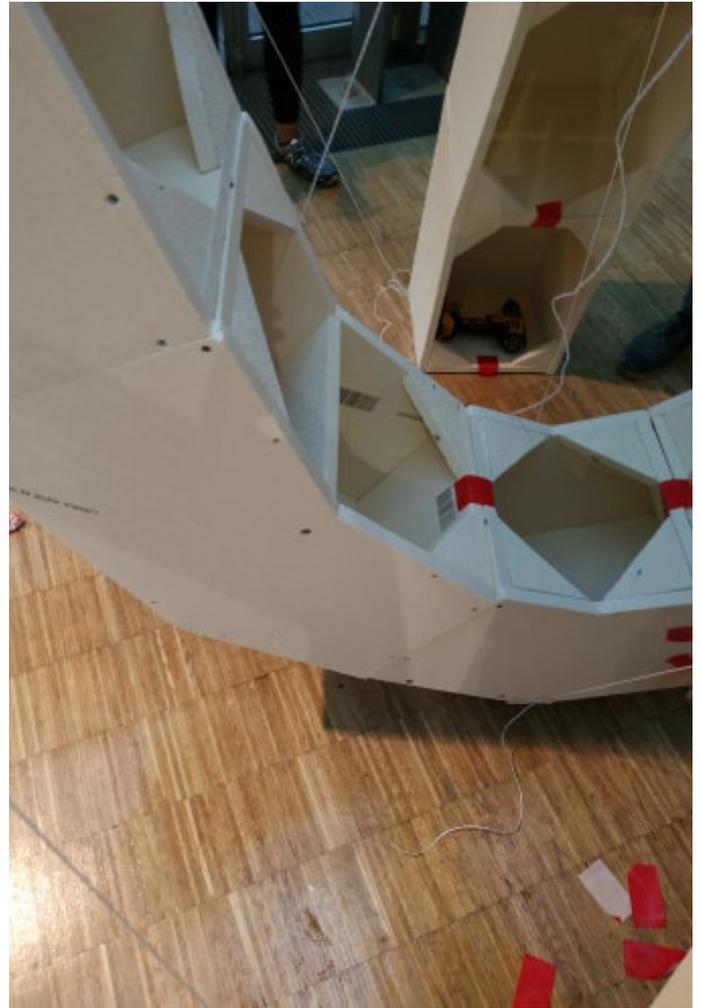
Les câbles sont mis en tension successivement. Le point le plus délicat, et probablement le plus incertain, a été l'absence de moyen fiable de contrôler la tension des câbles. Etant donné que nous n'avions que des moyens technologiques très limités, nous avons utilisé une méthode empirique : l'ouïe. En faisant vibrer les cordes, nous pouvions avoir une idée assez précise des ajustements à réaliser, tout en ayant cinq avis simultanés. Ainsi, en mettant en corrélation la réponse de la structure, et l'approche théorique, nous avons pu réagir de façon adéquate.



Montage

Retrait des renforts en scotch

Lorsque l'équilibre fut atteint sans aucun appui temporaire, nous avons enlevé les renforts en ruban adhésif petit à petit, en réalisant à chaque fois les ajustements nécessaires (positionnement des arches ou tension des câbles). On sait qu'un scotch est nécessaire au maintien des claveaux lorsqu'il est tendu. Ainsi, chaque voussoir est ajusté, en partant de la clé de voûte, puis les scotchs sont retirés précautionneusement. Les imperfections dues à la réalisation génèrent parfois des rotules, tout l'enjeu étant de limiter leur impact et leur nombre. On sait qu'on peut se permettre trois rotules par arche. Après avoir retiré tous les morceaux de scotch, on remarque que l'arche inférieure en a deux au niveau de la clé de voûte, l'autre n'en a aucune.





Pistes d'amélioration

Gravité et tension infinie

Comme expliqué précédemment, le poids propre de la structure a une influence notable sur la courbe de pression. Plus la contrainte dans le câble est importante, plus cette influence est faible. Avec une tension infinie au sein des câbles – soit un poids entièrement négligeable – le funiculaire est le même dans les deux arches et aucune orientation n'est privilégiée.

En pratique, le poids est non négligeable et la tentative de retournement de la structure a conduit à sa rupture. Les efforts transverses induits par la gravité ont trop déplacé le funiculaire et ont rompu l'équilibre. Une tension plus grande aurait permis d'écraser cette variation et autoriserait une rotation libre de l'ensemble.

