

Move Your Bridge 2.0 : Cinématique

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO
Xavier JOURDAIN - Martin PONCELET

Édité le
30/01/2023

école
normale
supérieure
paris-saclay

La formation SAPHIRE, première année en Sciences pour l'Ingénieur à l'ENS Paris-Saclay, intègre un projet à mener sur l'année entière. Pour les étudiants, ce projet permet de :

- Mettre en pratique une partie des enseignements dispensés durant l'année ou dans leur formation précédente ;
- S'initier à la conduite de projets ;
- Acquérir une première expérience en communication.

Chaque année, trois défis bi-disciplinaires sont proposés, et toutes les compétences sont mises en œuvre. Par défi, chaque équipe a le même objectif et part du même point, la gestion du travail est autonome, et le suivi est réalisé par des encadrants communs. En fin d'année, un rassemblement des prototypes est organisé ainsi qu'une « compétition » lorsqu'elle apporte un intérêt.

Trois thèmes de projets ont été proposés :

- SAirIn-IT, conception d'un système d'information sur la qualité de l'air respiré par les usagers d'un espace fermé ;
- Paris-Saclay League RobotCup, réalisation d'un duo de mini-robots footballeurs ;
- Move Your Bridge, conception et réalisation d'un pont mobile éco-responsable, ce défi est l'objet de cette ressource.

L'objectif est de concevoir et réaliser une maquette de pont ferroviaire de 87 m de portée à la fois mobile et éco-responsable. Cette ressource expose les cinématiques conçues ainsi que les difficultés rencontrées lors de la réalisation.

La ressource « Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile » [1] présente le contexte et les grandes étapes de ce projet accompli par les cinq équipes. La ressource « Move Your Bridge 2.0 : Cahier des charges » [2] détaille les informations reçues par les groupes en début de défi. La ressource « Move Your Bridge 2.0 : Modélisation » [3] présente les démarches des études statiques effectuées pour concevoir les maquettes des ponts résistantes à une charge imposée. Les épreuves finales passées par les maquettes se retrouvent dans La vidéo « Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance sur des maquettes de pont mobile » [4].



Figure 1 : Ouverture du pont et passage du train sur une des maquettes lors de l'essai de fonctionnement

1 – Choix de la cinématique

Les cinq groupes ont choisi quatre cinématiques différentes : un groupe a réalisé un pont levant (translation verticale), deux groupes ont conçu un pont basculant à deux tabliers symétriques, un groupe a travaillé un pont basculant à un tablier et enfin le dernier groupe a opté pour un pont tournant verticalement.

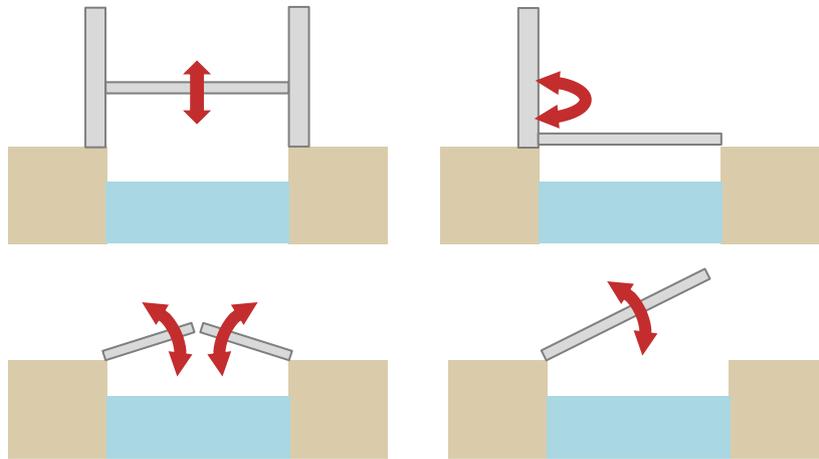


Figure 2 : Schémas des quatre solutions retenues par les cinq groupes

La réalisation technologique des solutions cinématiques devait tenir compte des moyens mis à disposition comme l'utilisation de deux moteurs au maximum, de la contrainte d'éco-conception mais aussi d'une éco-utilisation puisque la mesure de l'énergie d'un cycle ouverture-fermeture du pont lors du passage d'un navire est prise en compte.

2 – Pont levant

Le choix de réalisation de la translation verticale du tablier du pont, inspirée du pont Chaban-Delmas de Bordeaux, par un unique moteur a été fait afin de minimiser l'impact environnemental de construction et d'utilisation du pont.

Des piles sont nécessaires au mouvement de translation du tablier, l'une d'elle abritera le mouvement moteur. Il conviendra alors de transmettre le mouvement moteur en symétrie par un système de poulies (figure 3).

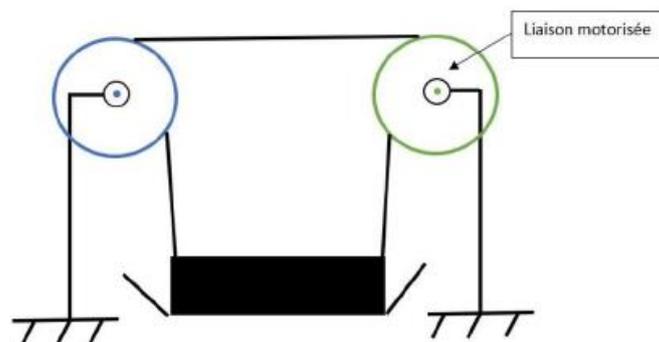


Figure 3 : Schéma de principe du pont levant issu des rapports d'équipe

La liaison de la poulie motrice est conçue pour ne pas générer de porte-à-faux, Le moteur est fixé sur la pile, la poulie de transmission est montée directement sur l'arbre moteur et l'idée serait de guider l'arbre moteur dans la pièce marron (figure 4) afin de limiter les efforts radiaux pour le moteur. Sur l'autre pile du pont, une poulie de renvoi est montée folle (figure 4).

Le pont n'est guidé lors de sa translation d'ouverture ou de fermeture que lors de la fin de mouvement de fermeture afin d'assurer le bon positionnement des rails et leur continuité pour la circulation du train (figure 5).

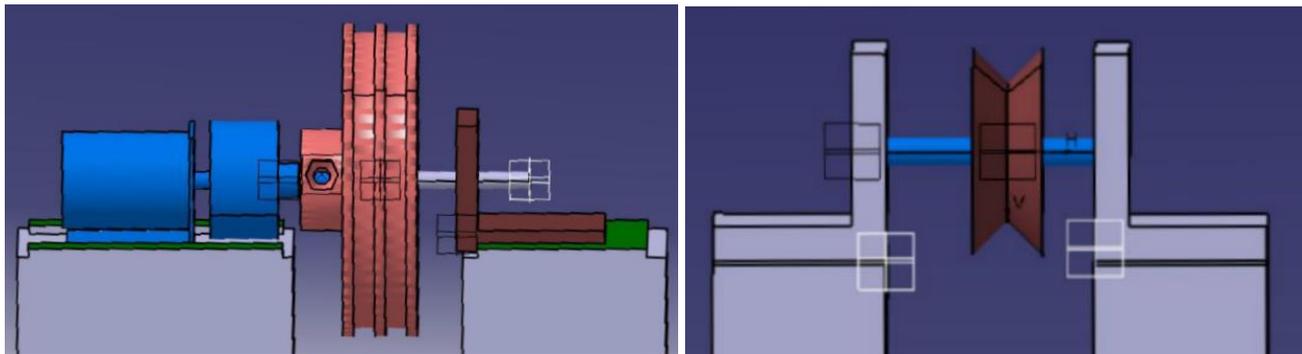


Figure 4 : Liaison poulie motrice et poulie de renvoi

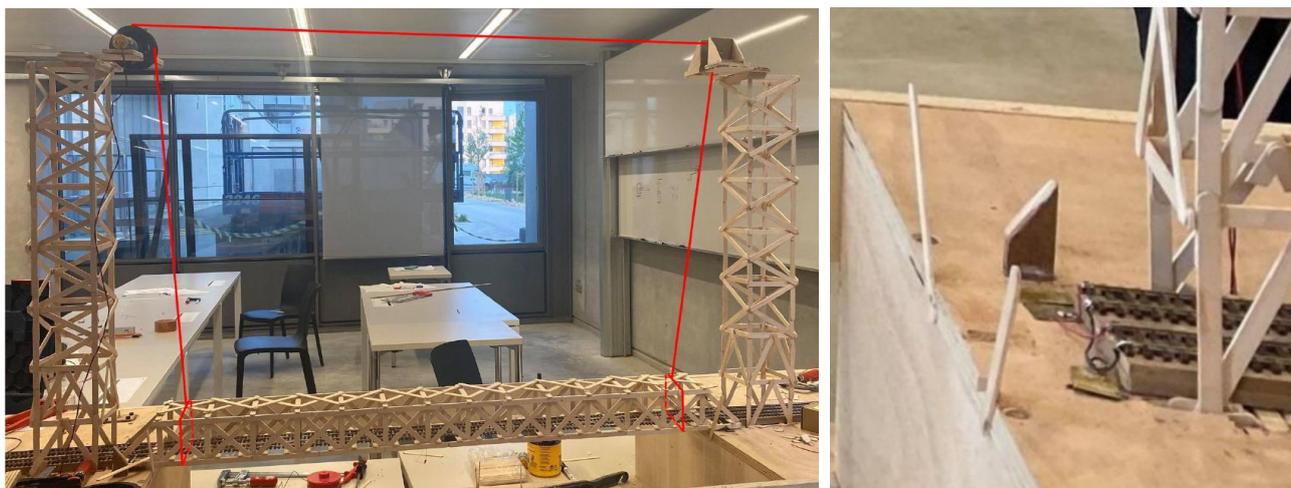


Figure 5 : Visualisation des poulies et du câbles sur la maquette, détail du guidage de fin de fermeture

La poulie motrice a été réalisée par impression 3D [5], un lamage est prévu pour loger un écrou et ainsi ne pas visser dans le plastique d'impression.

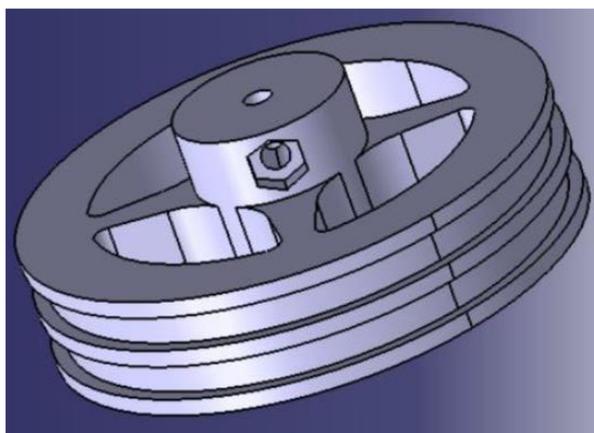


Figure 6 : Modélisation de la poulie motrice sous Catia

3 – Pont basculant à deux tabliers symétriques

Deux architectures différentes ont été choisies pour un même choix d'ouverture/fermeture : avec ou sans piles. Dans les deux cas, deux moteurs sont utilisés actionnant chacun un des deux tabliers.

3.1 - Pont basculant avec piles

Le pont basculant avec présence de piles reprend la cinématique des ponts levis ou encore ou de la Tower Bridge à Londres. Les deux moteurs sont placés en haut des deux piles, les poulies réalisées en bois sont montées encastées en bout d'arbres moteur, les câbles sont reliés au bout des tabliers (figure 7).



Figure 7 : Visualisation des poulies et du câbles sur la maquette, détail du montage moteur/poulie

Les liaisons pivot entre la rive et les tabliers sont des points importants du bon fonctionnement d'ouverture et de fermeture. Le choix a été fait de les réaliser à l'aide bâtonnets collés puis découpés et ponçés afin d'obtenir la forme souhaitée. Ce choix est justifié par la masse plus faible que du bois massif. Les efforts mis en jeu permettent en fait de créer une pivot 'partielle', c'est-à-dire une goulotte dans laquelle le tablier qui a été arrondi vient se poser (figure 8). Le guidage des tabliers, de façon qu'en fin de mouvement de fermeture les deux tabliers assurent la continuité des rails, est réalisé par des cales positionnées sur la rive près des piles.

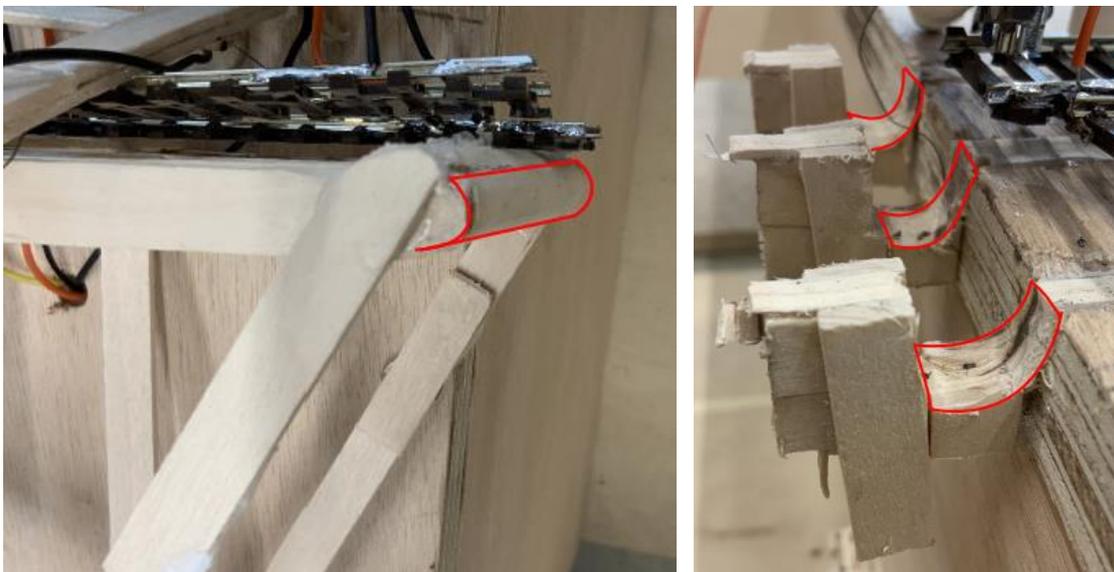


Figure 8 : Réalisation de la liaison tablier/pile, surfaces de contact en rouge

3.2 - Pont basculant sans piles

Le choix est guidé par la volonté d'utiliser une solution avec peu de câble, ce qui devrait également avoir un impact sur le coût carbone. Les tabliers s'articulent sur les rives avec des liaisons pivot, les moteurs sont directement sur les axes de ces liaisons. Les axes des pivots sont réalisés en bois (figure 9).

Un système de contrepoids a été envisagé afin de soulager l'axe de la masse du tablier. Cependant des études ont montré que le poids du tablier se transmettait au niveau des supports liés à la rive (figure 10). Après des essais sur un prototype, les contrepoids ont finalement été abandonnés. Cependant à l'usage, les axes de la maquette définitive se sont fendus dans la section où une goupille était positionnée pour assurer la liaison encastrement avec l'arbre moteur.

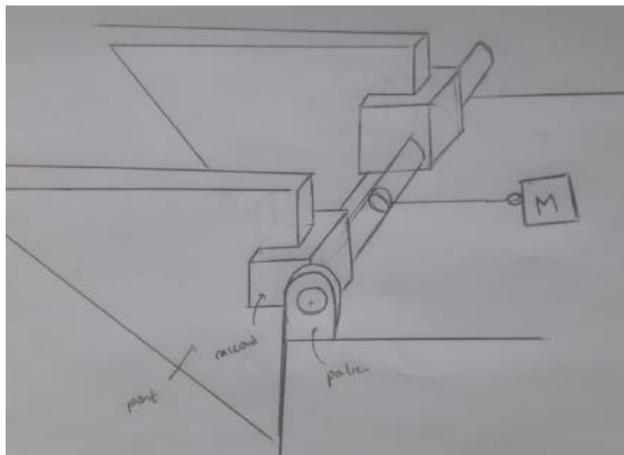


Figure 9 : Esquisse de la solution pour la liaison pivot et réalisation d'un prototype

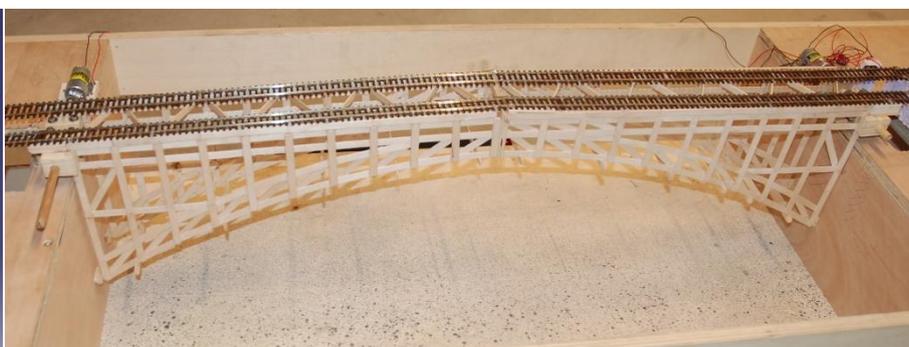
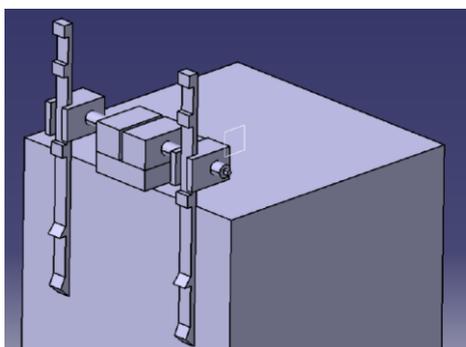


Figure 10 : Détail de liaison, supports encaissant le poids du tablier, et maquette définitive avec les deux liaisons pivot et les deux moteurs.

4 – Pont basculant à un tablier

Le tablier de ce pont basculant est une arche, l'arc permet que les bois travaillent majoritairement en compression dans l'arc et en traction dans les suspentes, ainsi les moments fléchissant et les efforts tranchants sont limités. En contrepartie, l'arc apporte des efforts horizontaux importants au niveau des appuis ; ici le support est suffisamment robuste pour encaisser ces efforts.

Le principe du pont à rotation à un seul tablier implique d'exercer un couple très important afin de lever le pont (masse importante du tablier et centre de gravité à peu près au milieu de la portée et la liaison pivot sur une des rives). Il est strictement impossible de demander un tel couple à un moteur. La consommation du moteur et l'objectif d'écoconception et éco-utilisation donnent des arguments supplémentaires pour l'utilisation d'un contrepoids.

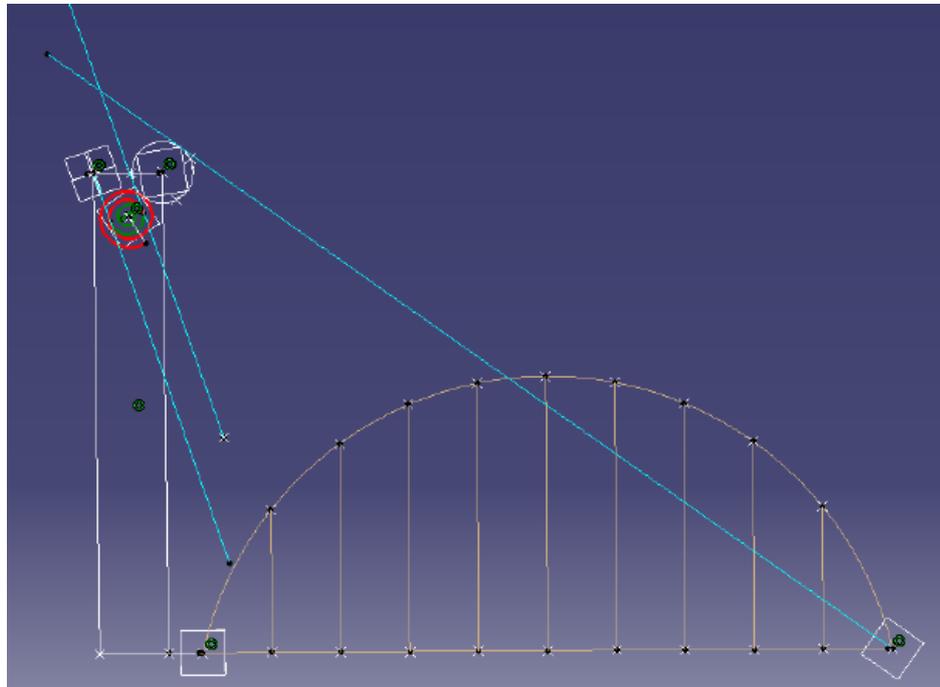
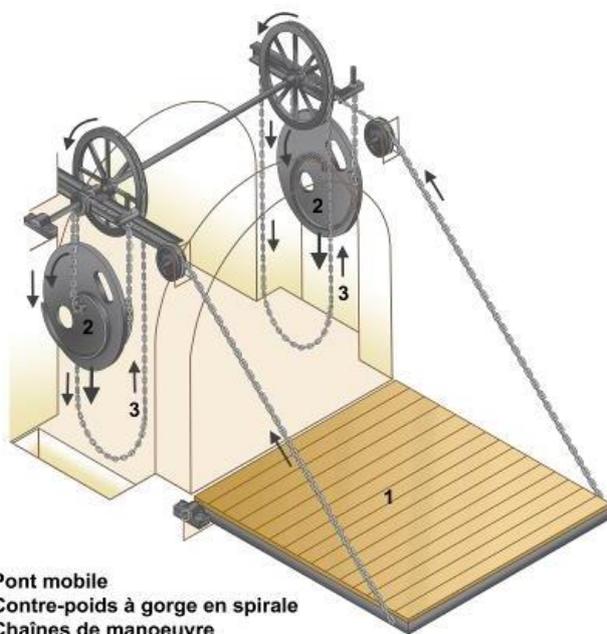


Figure 11 : Cinématique du pont basculant à un tablier modélisée sous Catia

Le contrepoids est choisi selon la technologie à bras de levier variable, à l'image du contrepoids Devèze (figure 12) : le câble de manœuvre du tablier passe sur une poulie (au sommet de la pile pour le pont), puis s'enroule sur une spirale du contrepoids quand le tablier se lève. Le contrepoids contient une deuxième spirale, sur laquelle se déroule un câble auxiliaire fixé à la pile, permettant de maintenir le contrepoids lorsque le tablier se lève. La forme en spirale des enroulements permet d'adapter le couple du contrepoids à celui du pont qui se lève. Ce qui permet de diminuer grandement la consommation du moteur. La difficulté est de calculer la forme exacte des spirales.



- 1 Pont mobile
- 2 Contre-poids à gorge en spirale
- 3 Chaînes de manoeuvre



D'après un plan de Philippe TRUTTMANN
© Couleurs VAUBOURG Cédric



Figure 12 : Schéma du mécanisme du pont-levis système Devèze du fort de Boulémont (Vosges) et détail du système au fort de Sanchey (Vosges), source [6]

En prenant l'hypothèse de frottements négligés, on cherche à obtenir la force, supposée verticale, exercée par le contrepoids sur le câble de traction en fonction de l'angle du tablier par rapport au sol. Il s'agit ensuite d'exprimer les rayons des poulies du contrepoids en fonction de l'angle de rotation du pont. La difficulté réside dans l'expression des rayons des spirales en fonction de l'angle de rotation du contrepoids. Ces expressions correspondent à l'équation des spirales nécessaires à leur conception. Pour ce faire, il est intéressant d'exprimer le lien entre la longueur de câble et le déplacement vertical de contrepoids. L'équation obtenue par ce raisonnement est ensuite implémentée sous Python. L'équation est résolue à l'aide de la méthode d'Euler.

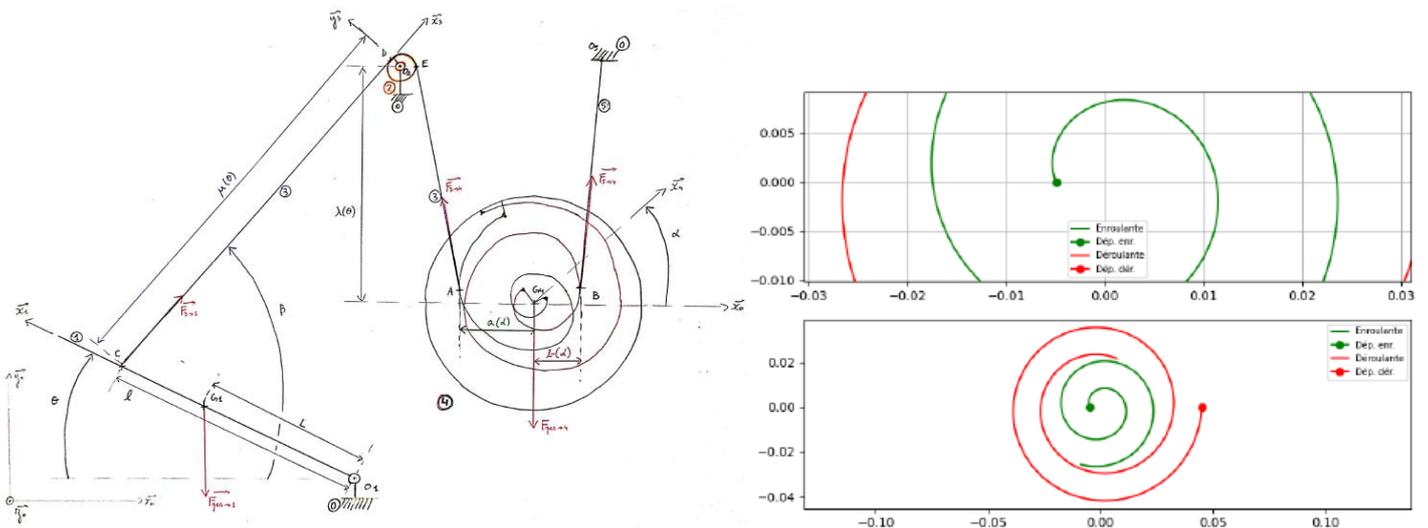


Figure 13 : Bilan des efforts sur le mécanisme de contrepoids et géométrie des spirales sous Python

Les listes des points des spirales ont été exportés sur le logiciel Catia. L'atelier Generative Shape Design a permis de créer les courbes, puis Part design a été utilisé pour former le corps principal et rainurer les gorges des câbles dessus. À partir du modèle Catia (figure 14), les spirales ont été imprimées en 3D (figure 15) puis passées à la vapeur d'acétone pour améliorer l'état des surfaces, et rectifier les gorges à la lime de Genève afin d'assurer un bon roulement des câbles.

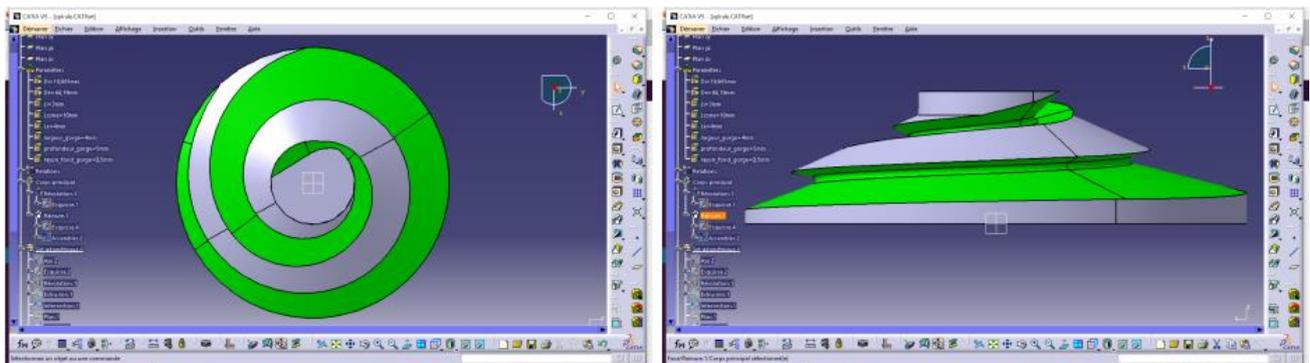


Figure 14 : Modèle sous Catia



Figure 15 : Les contrepoids montés sur l'arbre

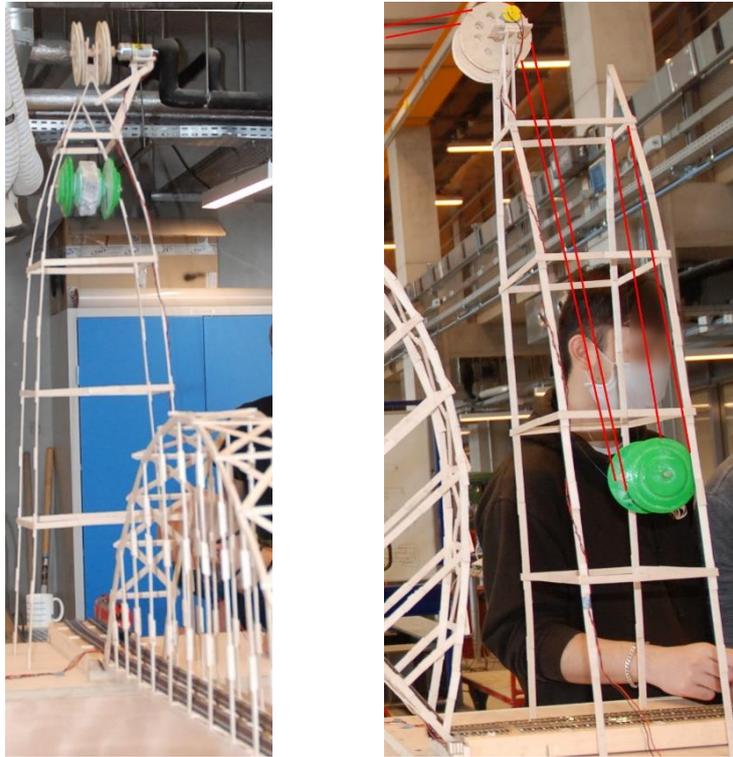


Figure 16 : Contrepoids (bloc de granite entre les deux spirales en plastique) lors du fonctionnement pont fermé (à gauche) et pont ouvert (à droite)

Le moteur est situé en haut de la pile, le mouvement est donné aux deux poulies réalisées en bois. La liaison pivot du tablier avec la berge est réalisée directement par le pont dont l'extrémité est arrondie posée dans un logement de la berge paraffiné pour limiter les frottements.

5 – Pont tournant

Une implantation au fond de la rivière étant impossible, la pile du pont supportant la liaison pivot devait être déportée sur l'une des deux rives, le pont haubané est donc asymétrique.

La liaison pivot a été réalisée à l'aide d'un galet en contre-plaqué bakélinisé fixé à une poulie réceptrice entraînée par une courroie elle-même reliée à une poulie motrice montée sur l'axe moteur (figures 17 et 18). Le galet bakélinisé est en liaison plane avec le bâti sur la rive et les frottements sont réduits par l'ajout d'un film plastique entre les deux. L'axe de la liaison pivot est en métal (en fait un clou).

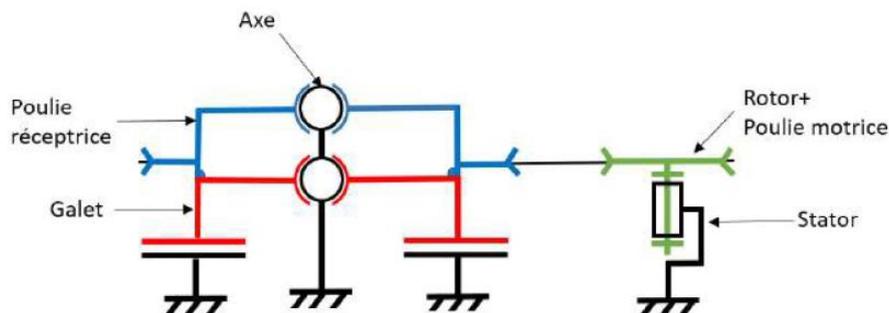


Figure 17 : Schéma cinématique de la liaison pivot rive / tablier

Les haubans faits dans un premier temps avec du câble, ont été, suite à l'essai de la maquette 50 cm [1], réalisés avec des assemblages de bâtonnets. Le coût carbone des câbles a également été un facteur de choix dans ce changement de matériau (réduction de 73% du coût carbone).

La poulie motrice de 5 cm de diamètre réalisée en contre-plaqué est montée serrée sur l'axe moteur. La poulie réceptrice de diamètre beaucoup plus grand, également en contre-plaqué, contient deux rainures sur sa face supérieure, visibles figure 12, afin de recevoir les poutres du tablier. La solution de réaliser ces poulies avec des couches de bâtonnets collés qui auraient ensuite été usinés, a été envisagée puis abandonnée, le séchage des différentes couches croisées voilant le bois.

Lors de la rotation du pont, le bout du tablier s'affaisse, il a fallu prévoir un guidage pour le remettre à hauteur de voie avec la berge (figure 19). À l'arrière de la pile, un système de reprise d'effort est installé afin de bloquer les mouvements verticaux du tablier (figure 20).



Figure 18 : Poulie motrice usinée Figure 19 : Guidage du tablier à la fermeture Figure 20 : Reprise d'effort

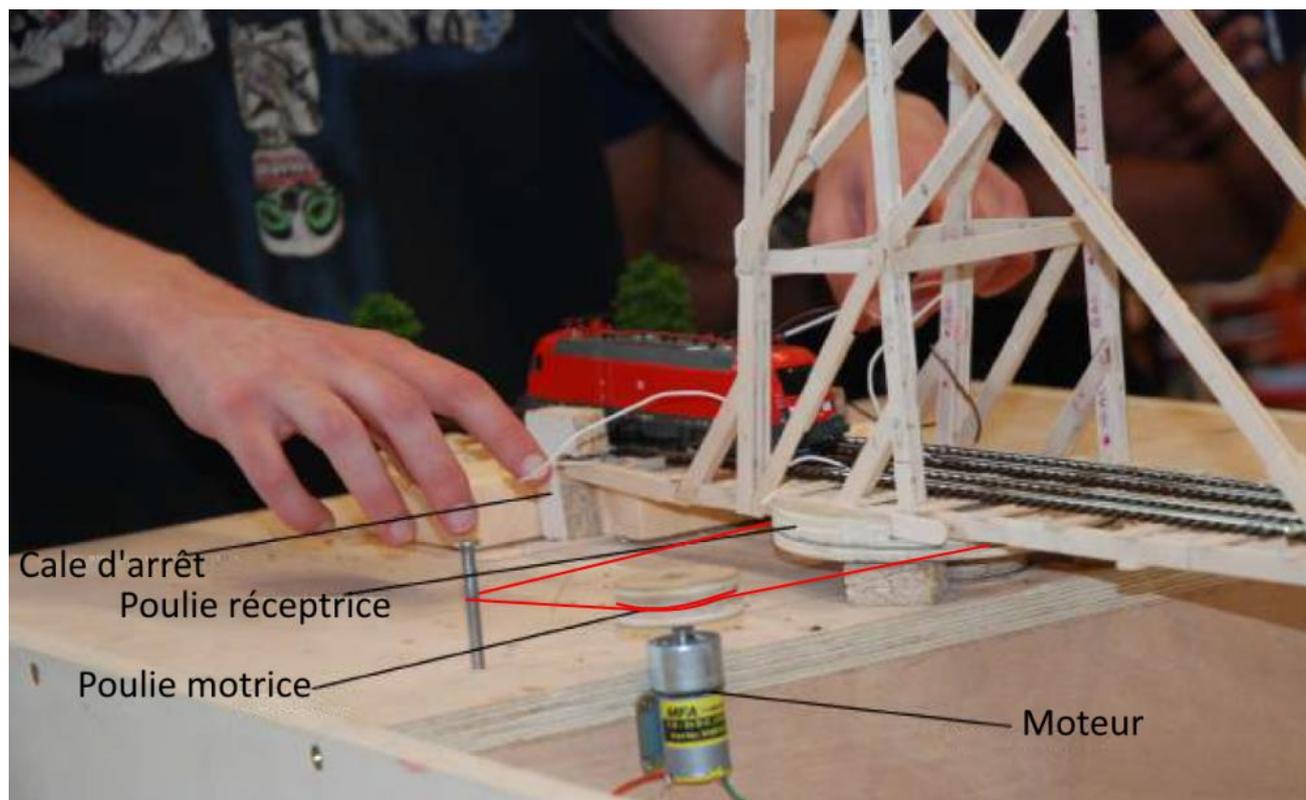


Figure 21 : Le système au complet lors de l'essai de passage du train

6 – Conclusion

Au moment des tests finaux, trois des cinq maquettes ont pu réaliser un cycle 'Ouverture - Tenue en position ouverte 10 secondes - Fermeture', les mesures de consommation énergétique ont pu alors être réalisées (d'environ 9 à 20 mWh). Le pont à poulie en spirale a la consommation minimale.

Ces résultats se retrouvent au paragraphe 8.1 - Première série de tests de la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile* » [1]. La vidéo « *Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance sur des maquettes de pont mobile* » permet de visualiser les trois maquettes en mouvement [4].

Les deux dernières maquettes ont été empêchées de s'ouvrir par des ruptures de pièces liées à la cinématique comme des axes moteurs en bois cisailés à la mise en fonctionnement.

Références :

[1]: Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-concevoir-et-construire-une-maquette-de-pont-mobile

[2]: Move Your Bridge 2.0 : Cahier des charges, C. Desodt, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-cahier-des-charges

[3]: Move Your Bridge 2.0 : Modélisation, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-modelisation

[4]: Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance sur des maquettes de pont mobile, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-test-essais-resistance-sur-des-maquettes-pont-mobile

[5]: Dossier Impression 3D, avril 2020, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/dossier-impression3d

[6]: Le site web de la fortification Séré de Rivières, Julie et Cédric Vaubourg, <http://www.fortiffsere.fr>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>