

PROJET ETUDIANT (GR ROUGE) 2018/2019

Move Your Bridge

Auteurs :

M. BARABINOT YAN
M. BEZOU GASPARD
M. DUBOIS SÉBASTIEN
M. PRUVOT COLIN

Professeurs :

M. ALHAÏC GHAITH
M. JOURDAIN JOURDAIN
M. PONCELET MARTIN
M. SOULIER BRUNO



"Les hommes construisent trop de murs et pas assez de ponts."
Isaac Newton

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier les techniciens du laboratoire de Génie Civil, M.Olivier Rateau et M.Yan-loic Agbahi, qui nous ont aidés à réaliser notre projet en nous autorisant l'accès à la menuiserie et au laboratoire du génie civil ainsi qu'en nous conseillant sur les solutions techniques de fabrication des pièces en bois.

Nous voulons également remercier M. Ghaith Alhaik qui nous a aidé à utiliser la machine de traction-compression universelle et ainsi réaliser nos essais de caractérisation des batonnets de bois.

Nos remerciements vont à M. Bruno Soulier pour nous avoir transmis sa précieuse expertise sur la modélisation numérique du treillis sous le logiciel CATIA ainsi que son précieux avis sur la cinématique.

Nous tenons à remercier M. Martin Poncelet pour nous avoir astucieusement aiguillé sur la cinématique de notre pont mobile tant d'un point de vue théorique que pratique.

Nous remercions M. Xavier Jourdain pour nous avoir fourni les codes CAST3M nécessaires aux simulations, transmis son précieux savoir et son art de penser sur les ponts.

Nous tenions à remercier Hélène Horsin-Molinaro pour son soutien et ses photographies.

Enfin, nous voulons souligner la bonne humeur et l'optimisme qui régnait tout au long de l'année en séance de projet. C'était un réel plaisir de venir en projet tous les vendredis. Tous les encadrants nous ont toujours soutenu sérieusement et aidé avec le sourire et pour cela : merci.

Table des matières

Liste des figures	v
Abstract	vi
Introduction	1
1 Définition du projet et position du problème	2
1 Contraintes du projet et objectifs finaux	2
2 Gabarits fluviaux et ferroviaires	3
2 Solution apportée : Choix d'une cinématique et d'une forme de treillis	4
1 Cinématique choisie	4
2 État de l'art sur la cinématique	5
3 Forme du treillis choisi	7
3 Caractérisation du matériau et des assemblages utiles	9
1 Essais de traction	9
2 Essais de flambement	10
3 Essais sur pont de 50 cm et mode de flambement	11
4 Essais sur les assemblages des tirants	12
4 Conception et réalisation des pièces utiles à la cinématique	14
1 Jonction entre les deux moitiés d'arc	14
2 Pivot sur les berges	15
5 Optimisation du treillis	17
1 Simulation CATIA V5	17
2 simulation CAST3M	18
6 Test final	20
1 Construction du pont et géométrie finale	20
2 présentation du chargement	21
7 Conclusion	22
A Calcul des efforts du vent sur la structure	23
B Gabarits ferroviaires et fluviaux	25
C Système de chargement	26
Bibliographie	27

Table des figures

1	Arc de triomphe de l'Empire Romain	1
1.1	Schéma du support de la maquette	2
2.1	cinématique d'un pont en translation verticale	4
2.2	cinématique du pont choisie	5
2.3	Barmouth Bridge	6
2.4	pont de Hafenbrücke am Rheinauhafen	6
2.5	Pont tournant sur pile	6
2.6	Treillis 2D sous CATIA	8
3.1	Schéma du support de la maquette	9
3.2	$\sigma = f(\varepsilon)$	10
3.3	Essai flambement	11
3.4	Essais en flexion du pont de 50 cm	11
3.5	Flambage à la base de l'arc	12
3.6	essai de cisaillement	12
3.7	essai de traction sur différentes longueurs de collage	13
4.1	Vue 3D - Pièce de jonction	15
4.2	Vue 3D - Section	15
4.3	Schéma des liaisons pivots	15
4.4	Maintien en position	16
4.5	Ensemble des pièces de la liaison pivot	16
4.6	câblage vu de côté	16
4.7	câblage vu de face	16
5.1	Modélisation filaire du pont sous CATIA V5	18
5.2	Récupération des points aux sommets	18
5.3	représentation du mode de déformation critique par simulation CAST3M - PASAPAS sous un déplacement vertical de 5mm au niveau des tirants	19
A.1	Treillis modèle pour la construction de l'arche	23
A.2	Surface projetée issue du treillis	24
A.3	Estimation de la surface équivalente pour chaque mètre d'altitude	24
B.1	Gabarit ferroviaire pour les deux voies à l'échelle 1 :1 et à l'échelle 1 :87	25

TABLE DES FIGURES

B.2 Gabarits fluviaux en ouverture (gauche) et en fermeture (droite) à l'échelle 1 :87 (cm)	25
C.1 Schématisation du système de chargement	26

Abstract

In our context where companies need an intensive competitive spirit due to globalisation, people have to move more and more quickly and change easily of way of transport. To solve this issue, multimodal platforms have been built so that roads and railways can pass each other.

Therefore, our aim here is to design a one hundred and fifty centimeters mobile bridge with wooden sticks in order to enable the junction between a railway track and a waterway. In reality, the size of the bridge is 130,5 m. After choosing a kinematic and a mesh, we are going to determine physics properties of the material to realize simulations so as to devise the bridge as robust as possible. A final stress test will be realized at the end.

Introduction

Un pont est une construction qui permet de franchir une dépression ou un obstacle en passant par-dessus. Le franchissement supporte le passage d'humains et de véhicules dans le cas d'un pont routier, ou d'eau dans le cas d'un aqueduc. Les ponts font partie de la famille des ouvrages d'art et leur construction relève du génie civil.

En Europe, leur évolution technologique a connu deux périodes : la période romaine et la période contemporaine. L'Empire romain, de l'an 27 avant JC à l'an 476 après JC, maîtrisait la construction du pont en arc en plein cintre en pierre. Après la période romaine, le nombre de ponts construits diminue et les constructions deviennent alors des ouvrages d'artisans. Pendant plus de 2 000 ans, la conception des ponts stagne, les artisans de l'époque ne réutilisant que les techniques connues de l'Empire Romain. Puis avec la révolution industrielle, le développement des échanges commerciaux a nécessité le développement des chemins de fer, de routes et de ponts. Parallèlement, les connaissances théoriques ont fait des progrès considérables. La conception des ponts a donc connu un renouveau.



FIGURE 1 – Arc de triomphe de l'Empire Romain

Depuis environ 200 ans, les ponts suspendus de grandes portées et les ponts à haubans ont tous été rendus possibles par l'introduction de l'acier. Les progrès dans le numérique et une meilleur connaissance du comportement des matériaux repoussent les contraintes techniques pour construire les ponts ; et les architectes peuvent aujourd'hui laisser libre cours à leur imagination pour créer des œuvres d'art. Parallèlement à cette évolution, le pont est d'abord perçu sur le plan symbolique dans la littérature et les expressions populaires. Il représente, par exemple, un passage vers l'Au-delà dans la mythologie iranienne ou encore un arc-en-ciel dans la mythologie nordique. Il n'est introduit comme sujet principal dans les arts que tardivement.

Aujourd'hui, face au réchauffement climatique, à la pollution des océans et aux enjeux économiques et sociaux, les Hommes cherchent de nouveaux matériaux écologiques afin de construire des ponts toujours plus esthétiques et solides. Les modes de locomotion les plus rentables énergiquement doivent être privilégiés. Des plate-formes multimodales sont donc construites afin de passer d'un mode de transport à un autre. Une des difficultés rencontrées dans ces lieux est l'enchevêtrement des réseaux maritimes, ferroviaires et routiers. Le recours à des ponts mobiles est alors fréquent. Dans ce contexte, on se propose de construire un pont ferroviaire mobile écologique en bâtonnets de bois au dessus d'une rivière à l'échelle 1/87^e.

Définition du projet et position du problème

1 Constraintes du projet et objectifs finaux

Afin de donner une dimension réaliste au projet, on imagine que le maître d'ouvrage est SNCF Réseau. Celui-ci demande au maître d'oeuvres (notre groupe YSGC Building Workshop) de réaliser un pont ferroviaire mobile écologique à l'échelle 1/87^e d'une portée de 150cm, soit de 130.5m à l'échelle réelle (voir figure 3.1).

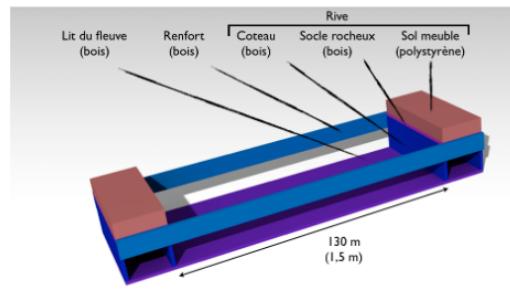


FIGURE 1.1 – Schéma du support de la maquette

Ce pont devra donc remplir le cahier des charges suivant : minimiser la quantité de matériaux nécessaire (pondérée par leur impact environnemental en kg de CO₂ équivalent) ; consommer le moins d'énergie possible lors d'un cycle ouverture/fermeture ; respecter les contraintes géométriques du gabarit ferroviaire et des gabarits fluviaux que nous présenterons dans la suite ; et, survivre au passage des trains de fret.

Lors du test final, l'énergie consommée pour un cycle ouverture/fermeture sera mesurée en vérifiant que la position ouverte (tenue pendant 10 secondes) permet le passage d'un gabarit fourni ; une locomotive tractant un wagon de fret vide franchira successivement les deux voies du tablier pour passer d'une rive à l'autre. Cela permettra de vérifier le respect du gabarit ferroviaire sur chacune des voies, la continuité des voies et la continuité électrique ; 8 wagons de fret seront stationnés simultanément au milieu de l'ouvrage de franchissement, puis chargés uniformément et progressivement jusqu'à rupture. Le pont devra résister à une charge nominale. Celle-ci est de 22,5 tonnes par essieu, avec des wagons à 4 essieux, soit 720 tonnes en tout. La charge nominale à l'échelle de la maquette est donc de 941 N.

Le pont devra donc avoir un fonctionnement efficace pour limiter la consommation d'énergie et ainsi avoir un fonctionnement éco-responsable, posséder une conception optimisée afin de limiter la quantité de matière utilisée et être le plus esthétique possible afin de pouvoir l'implanter dans une ville sans choquer l'opinion publique.

Le maître d'ouvrage, dans un but écologique, nous impose les matériaux suivants : des poutres en bois (bâtonnets de glace), de la colle à bois, du fil de pêche (pour les éventuels câbles), des rails, des fils électriques et deux moteurs. Nous pourrons, après discussions avec l'équipe encadrante du projet, utiliser de l'acier, du bois massif ou encore des pièces imprimées en 3D. Seulement, les bâtonnets de bois doivent rester l'élément principal de construction.

2 Gabarits fluviaux et ferroviaires

Construire un pont en bâtonnets de bois pouvant supporter une centaine de kilogrammes est atypique et fait tout l'intérêt du projet. Aussi dans cette partie, nous définissons les gabarits ferroviaires et fluviaux que le pont devra obligatoirement respecter, autrement le train ne peut passer et le pont ne respecte pas sa fonction principale à savoir franchir une dépression. Les gabarits sont les suivants :

- Gabarit ferroviaire** : Le pont doit permettre le passage de deux trains sur deux voies distinctes. On utilisera des locomotives électriques de modélisme *Piko* alimentées par les rails. L'échelle est également de 1/87^e. Le gabarit du pont est imposé à l'échelle réelle ce qui donne les dimensions de la maquette à respecter (voir annexe B.1)
- Gabarits fluviaux** : Le pont doit également permettre le trafic maritime pour différentes catégories de navires. Elles seront représentées par un gabarit *New Panamax* et un gabarit *Freyinet* qui passeront en phase d'ouverture tandis que seul le gabarit *Freyinet* passera en phase de fermeture (voir annexe B.2).

Nous pouvons résumer le cahier des charges dans le tableau ci-dessous et remarquer que ce projet nécessite de la précision dans les calculs et le collage.

géométrie	
portée	150cm
largeur du tablier	7.77cm
temps de tenue d'ouverture	10s
altitude des rails par rapport au sol	0m
charge nominale supportée	941N
respect des gabarits	
largeur de la voie	3.6cm
hauteur minimale d'ouverture	48.3cm
hauteur minimale au dessus du niveau d'eau	6cm

TABLE 1.1 – Cahier des charges fonctionnelles

Dans une démarche scientifique prévoyante, l'étape suivant la définition du cahier des charges consiste à étudier l'état de l'art afin de s'inspirer des solutions existantes et d'innover. Il est ensuite nécessaire de caractériser le matériau de construction afin de prévoir son comportement au sein de la structure. Puis, nous réaliserons des simulations grâce aux logiciels *CATIA* et *CAST3M* en implantant les propriétés matériau déterminées lors des essais. Enfin, nous décrirons la construction du pont et le test final.

Solution apportée : Choix d'une cinématique et d'une forme de treillis

1 Cinématique choisie

La prise de décision a été effectuée en considérant les contraintes de gabarits, de résistance mécanique au passage de frêt, l'aptitude au passage du train, à l'énergie nécessaire pour commander l'ouverture en prenant en compte le vent. Lors de notre étude préliminaire, en début d'année, nous avions sélectionné les cinématiques de translation verticale et de rotation à axes verticaux, qui étaient les plus à même de répondre à nos exigences. Compte tenu des critères, nous nous sommes orienté vers une stratégie d'ouverture de type pont à axes de rotation verticaux. Voici les avantages et inconvénients de cette stratégie d'ouverture :

- L'énergie d'ouverture est réduite car le poids ne travaille pas au sens mécanique du terme comparé au pont en translation verticale.
- La prise au vent est réduite puisque le pont reste à faible altitude comparé au pont en translation verticale pour lequel le tablier monte à plus de 50cm de hauteur.
- La continuité géométrique des rails est très difficile à assurer à cause de la discontinuité du tablier. Ce problème est similaire pour le pont en translation verticale
- La continuité mécanique du contact est difficile à assurer pour la même raison. Ce n'est pas le cas pour une le cas d'une géométrie en translation verticale qui conserve la continuité du tablier d'un bord à l'autre de la voie fluviale.
- Dans un pont en rotation d'axe vertical, il faut pouvoir reprendre les moments au niveau de l'axe. Cependant, on enlève le problème du guidage du tablier en translation présente de la cinématique à translation verticale.

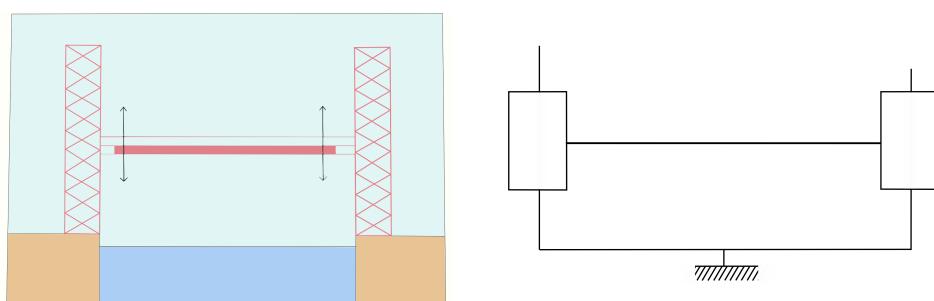


FIGURE 2.1 – cinématique d'un pont en translation verticale

2. ÉTAT DE L'ART SUR LA CINÉMATIQUE

La cinématique de translation verticale a été écartée puisque la phase de levage demande beaucoup d'énergie pour contrer la gravité, ou alors beaucoup de masse liée à un système de contrepoids. Le nombre de bâtonnets augmente également car cette cinématique nécessite des piles pour guider le tablier en translation. Le système mis en place – imposé par l'équipe des technologies électriques- ne possède pas de système de récupération d'énergie, un tel système demandant un plus grand budget.

Nous avons d'abord expérimenté cette cinématique en rotation d'axe vertical en découplant le premier pont de taille 50cm en son milieu (prototype dont nous reparlerons dans la suite). Nous avons constaté qu'il était difficile d'assurer la continuité mécanique, du fait des défauts géométriques dûs au collage et aux bâtonnets. Les défauts d'angles sont les plus problématiques puisque le contact ne s'effectue alors que sur une très faible surface à la jonction entre les deux parties du pont.

Par conséquent, il faut réfléchir à un système de continuité mécanique prenant en compte les défauts afin de transmettre les efforts et minimiser les effets de discontinuité du tablier. Aussi, cette cinématique impose de mettre en place un système de pivots. Il faudra alors trouver un moyen de reprendre les efforts et de motoriser la rotation. Ces dispositifs sont exposés dans la partie 4.

2 État de l'art sur la cinématique

Une fois la cinématique du pont choisie, il est important de se documenter afin de s'inspirer de l'état de l'art et ainsi concevoir un pont unique. La majorité des innovations de nos jours ont été réalisées par ce principe et nous suivons donc cette logique.

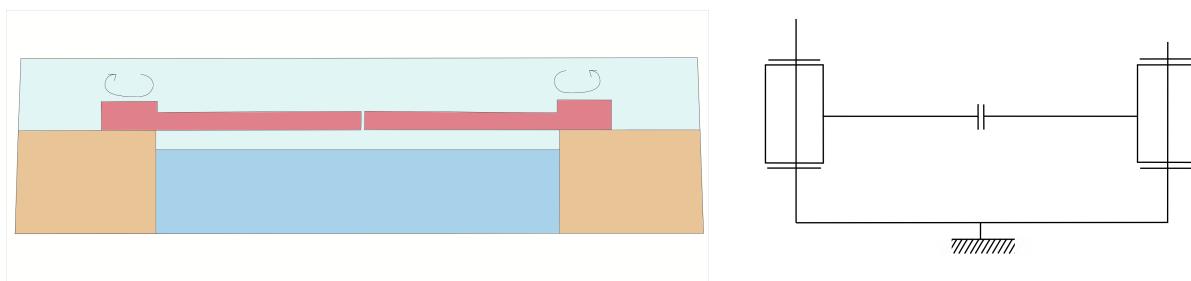


FIGURE 2.2 – cinématique du pont choisi

Il existe plusieurs centaines de ponts tournants dans le monde. Pour la plupart, leur construction date du XX^e siècle mais cette structure continue d'être utilisée pour de nouveaux ouvrages, ce qui justifie notre choix. Ce type de cinématique est à la fois utilisé pour des ponts de faible envergure, comme le pont de [Hafenbrücke am Rheinauhafen](#), dont la travée est de 27m, ou des ponts de longue envergure, comme le pont de [Barmouth Bridge](#), dont l'envergure totale est de 699m bien que la partie mobile ne mesure que 41,5m de long.

CHAPITRE 2. **SOLUTION APPORTÉE : CHOIX D'UNE CINÉMATIQUE ET D'UNE FORME DE TREILLIS**



FIGURE 2.3 – Barmouth Bridge



FIGURE 2.4 – pont de Hafenbrücke am Rheinuahafen

Ces ponts pivotant selon des axes verticaux se répartissent en deux catégories qui sont définies par l'emplacement du pivot dans la structure : soit le pivot est placé au centre du tablier grâce à une pile sur laquelle repose le pont, en plus des berges ; soit le pont est bipartite. Dans ce cas, chaque demi-pont est mû par un pivot placé à l'extrémité et cette cinématique implique souvent un guidage en rotation par rails du demi pont.

Du fait de l'absence de contrepoids comme dans un pont basculant, la construction d'un pont à pivot central est plus simple. Il suffit d'avoir un axe suffisamment rigide pour reprendre les moments fléchissant et suffisamment large afin de faire pivoter le tablier avec un bon bras de levier. Si le chenal est assez large, deux navires peuvent se croiser sans ce toucher lors de son ouverture. D'autre part, lors de la construction de ce type de pont, l'île artificielle créée pour l'axe de rotation permet la fabrication du pont sans nuire au passage des navires. Cependant dans certains cas, le pilier réduit la largeur du chenal et, selon la largeur de celui-ci, peut limiter la circulation à une seule direction, d'où l'utilité de faire un pont bipartite qui supprime la pile centrale. Néanmoins, nous nous retrouvons avec des problèmes similaires au niveau des pivots sur les berges : reprises des moments fléchissant, bras de levier pour faire pivoter la travée, etc.



FIGURE 2.5 – Pont tournant sur pile

3. FORME DU TREILLIS CHOISI

Un avantage de ces ponts en deux parties est qu'il a une prise au vent réduite. En considérant la partie plane du vent seulement, et en rappelant le fait que le vent est moins rapide au niveau du sol (hypothèse d'adhérence et diffusion de la quantité de mouvement de l'air proche du sol), il est clair que les actions mécaniques seront amoindries. Le bras de levier est réduit à quelques mètres, ce qui lui permet de résister facilement. En revanche, il est possible, en fonction de la topologie du territoire, que le vent s'engouffre dans le canal. En phase d'ouverture, il peut apparaître une surface de pression liée au vent en fonction de l'angle du tablier avec le sol. Puisque le tablier mesure souvent au moins 60 mètres, il peut y avoir également des phénomènes de résonance de la structure liée à la flexion du pont et du caractère stochastique du vent. Il faut alors mettre en place une méthode pour réduire ce phénomène. Néanmoins, les actions mécaniques restent beaucoup plus faibles que dans le cas de la cinématique à translation.

Malgré la cinématique du pont, il faut pouvoir assurer la continuité électrique et mécanique des rails pour pouvoir laisser passer et alimenter le train. La continuité électrique peut se faire à l'aide de simples câbles électriques reliés. Puisqu'il s'agit d'une cinématique de rotation, il n'y a pas de difficulté à alimenter les rails par ces fils. Pour ce qui est de la continuité mécanique des rails, il y a un peu plus de travail. En effet, puisque nous avons deux tabliers, il faut respecter cette continuité mécanique des rails de chaque côté du pont, mais aussi au milieu, entre les deux tabliers. Dans la plupart des ouvrages, les ingénieurs utilisent des dalles de transition pour assurer la continuité mécanique en présence de piles ou de remblai, ce qui n'est pas le cas de l'ouvrage à réaliser dans le cadre du projet. En outre, puisque le pont est de cinématique de rotation, il faut faire en sorte que les rails et les tabliers ne s'entrechoquent pas (phénomène lié à la largeur) lors de l'ouverture du pont. Ainsi, du fait de plusieurs éléments techniques, nous avons choisi pour solution d'excenter dans la même direction les deux axes par rapport au pont (voir partie construction).

Il reste alors le problème de coaxialité des parties de pont : cette contrainte est la même pour chacune des technologies de ponts. Pour cela, on peut utiliser différents systèmes de tension et de guidages mécaniques au niveau sol. A cela, il faut ajouter le fait qu'en position fermée (la majorité du temps) le pont est classiquement au repos, et qu'il n'y a pas d'éléments disgracieux qui seraient liés à une cinématique complexe. Nous validons d'un point de vue esthétique cette technologie. Notons que dans la réalité, les ponts de ce type sont rarement composés d'arcs.

3 Forme du treillis choisi

Le design du treillis est une étape difficile puisque le cardinal des topologies structurelles (configurations de treillis) possibles est très grand. Il a alors fallu développer une démarche facile permettant d'aboutir à une topologie initiale utilisable. Nous avons utilisé un treillis parallèle 2D élémentaire puis nous l'avons plié dans l'espace hyperbolique afin de réduire la contrainte de traction/compression maximale. Cette arche est ensuite symétrisée selon la profondeur pour obtenir un treillis 3D. Les barres transversales minimisant le flambage ont été ajoutées. En premier lieu, nous avions donné à l'arche une forme de parabole. A l'aide de simulations sous chargement sur les logiciels *CATIA* et *CASTEM*, nous avons modifié certaines caractéristiques géométriques propres au treillis, qui sont présentes ci-dessous en parallèle de leurs observations associées :

- Augmenter la hauteur de l'arche a pour effet de minimiser la valeur de la contrainte maximale mais aussi d'augmenter le flambage ;
- Plus il y a d'éléments, et donc de barres latérales, moins le treillis se déforme et moins il y a de flambage, mais plus la masse est importante ;
- Augmenter l'épaisseur de l'arche réduit le flambage ;
- Plus l'angle entre les traverses et le treillis 2D est perpendiculaire, plus il y a de flambage ;
- certaines combinaisons d'angles entre les barres latérales permet de réduire la compression et le flambage.

Il a alors fallu modifier les caractéristiques en prenant en compte le critère de masse de l'arche. Nous verrons plus tard que le set de points a été modifié pour réduire les amplitudes du flambage sous Python et CASTEM.

Sur ce type de treillis, les points de colle sont appliqués sur des surfaces réduites puisqu'il y a des angles relatifs entre les différents éléments. Il a alors fallu s'assurer expérimentalement que la surface de colle était suffisante pour permettre l'intégrité de la structure sous la charge.

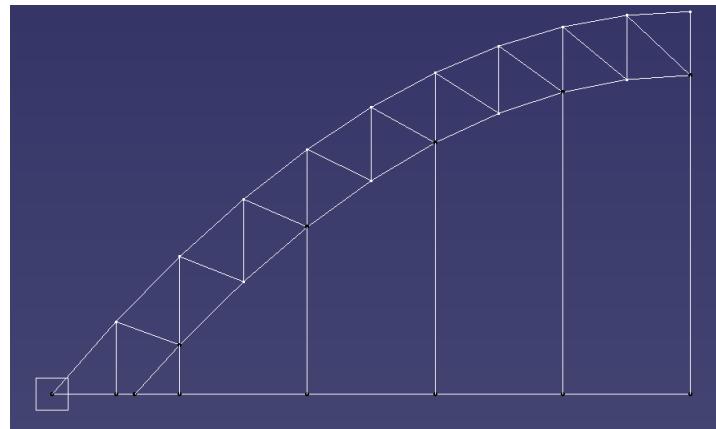


FIGURE 2.6 – Treillis 2D sous CATIA

L'image ci-dessus n'est qu'un prototype conçu sous *CATIA V5*. Notre forme finale est légèrement différente puisque la valeur des paramètres tels que l'épaisseur de l'arc ou la hauteur n'ont pas été optimisées lors de cette phase de conception.

Pour mettre en place ce pont, nous avons élaboré une solution innovante qui consiste à reprendre les efforts par compression à l'aide d'une zone de contact entre les deux tabliers par l'intermédiaire d'un bras de levier (structure en arche comme dans le cas d'un pont en pierre, mais en deux demi-arches rigides). Cela permet de résister efficacement au poids du pont et à son chargement. Chaque demi-arche soutient le tablier à l'aide de tirants sur toute la longueur. En phase de fermeture, ce type de pont est alors optimal : on diminue le moment fléchissant aux extrémités et on optimise la topologie de la structure. Néanmoins, elle n'a pas que des avantages puisque notamment en phase d'ouverture, il n'y a plus de reprise d'efforts : il apparaît alors un bras de levier et les pivots doivent alors supporter le couple du poids propre du pont. Il faut donc aussi assurer une certaine rigidité au niveau des pivots sans bloquer le mouvement. Les reprises d'efforts ne suffisent pas à elles-mêmes et il faut réfléchir à une solution mixte entre une méthode de demi-arche et une méthode classique.

Caractérisation du matériau et des assemblages utiles

Les essais mécaniques réalisés au cours du projet ont eu pour principal objectif de quantifier les propriétés des matériaux utilisés afin d'intégrer le plus justement possible ces propriétés dans les simulations numériques et d'approcher un modèle cohérent avec la réalité. Dans notre structure, les bâtonnets travaillent essentiellement en traction et en compression d'après le comportement général des arcs et les simulations.

1 Essais de traction

Les différents essais en traction ont permis de déterminer une module d'Young moyen du bois dans le sens longitudinal des fibres et d'identifier également la résistance mécanique du bois dans le sens des fibres.

Nous avons effectué des essais sur des poutres droites à rotation bloquée grâce à la machine *INSTRON 3369* pour des essais de traction-compression, pouvant supporter une charge maximale de 50kN. Cette machine possède une chaîne de transmission de mouvement composée de : un moteur à courant continu, un réducteur, une courroie en élastomères et une vis hélicoïdale afin de transformer la rotation du moteur en translation des mors. Cette chaîne est déformable à cause notamment de la courroie. Ainsi, afin d'avoir des mesures le plus fiable possible, nous n'avons pas fait confiance à la machine pour mesurer la déformation et avons utilisé un extensomètre.

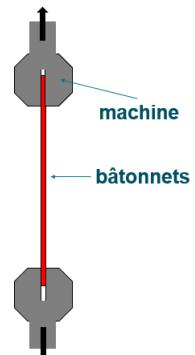


FIGURE 3.1 – Schéma du support de la maquette

Nous remarquons qu'il existe une grande différence de comportement en traction entre les bâtonnets. L'écart-type des valeurs des modules d'Young et des limites d'élasticité en sont donc affectées. Afin que la loi faible des grands nombres s'applique, il a fallu réaliser une trentaine d'essais de traction sur des bâtonnets différents.

Cette disparité peut s'expliquer, tout d'abord, par la forme des bâtonnets puisque ces derniers ne sont pas tous parfaitement droits et ne possèdent pas exactement les mêmes dimensions. D'autre part, certains possèdent des noeuds de bois, parties extrêmement rigides par rapport aux fibres classiques, qui influencent le comportement des bâtonnets. Enfin, les conditions aux

CHAPITRE 3. CARACTÉRISATION DU MATÉRIAUX ET DES ASSEMBLAGES UTILES

limites avec le serrage des mors lors des essais ne sont pas les mêmes à cause du manipulateur. Or, ce serrage fragilisant plus ou moins les fibres contribue à la rupture du bâtonnet.

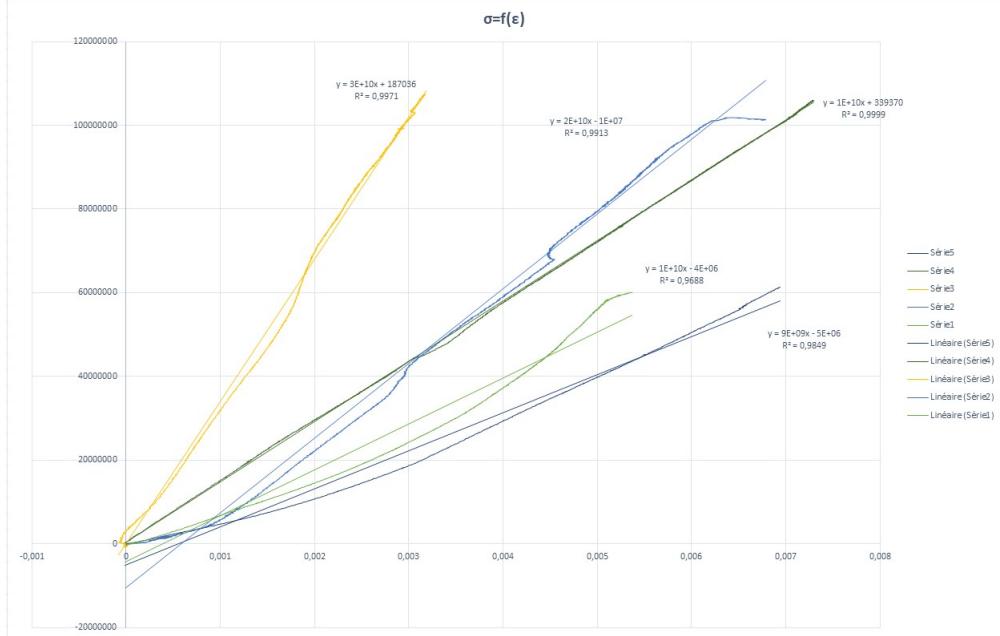


FIGURE 3.2 – $\sigma = f(\varepsilon)$

En réalisant une moyenne sur les essais réalisés, nous obtenons :

$$E = 14.2 \text{ GPa} \text{ (écart-type} = 1.3 \text{ GPa)}$$

$$R_m = 86.6 \text{ MPa} \text{ (écart-type} = 5.8 \text{ MPa)}$$

Avec :

- E : le module d'Young utile pour les simulations CAST3M et CATIA
- R_m : la contrainte à rupture permettant de prévoir la rupture d'un bâtonnet par simulation numérique par simulation

2 Essais de flambement

Le flambage ou flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure élastique qui pour échapper à une charge importante exploite un mode de déformation non sollicité mais opposant moins de raideur à la charge. Il est donc nécessaire de prévoir à partir de quel effort, le bâtonnet flambe.

3. ESSAIS SUR PONT DE 50 CM ET MODE DE FLAMBEMENT

Cette fois, nous laissons les extrémités du bâtonnet en rotations libres et réalisons une compression par l'intermédiaire de la machine. Cependant, nous précisons que ces conditions aux limites ne correspondent pas toutes à celles des bâtonnets dans le treillis du pont, qui est en réalité plus proche d'une condition limite liant à la fois une position angulaire et un moment. De plus, le degré de liberté lié au flambage suit une loi non linéaire en effort, ce qui rend l'interprétation des résultats de flambage plus délicate.

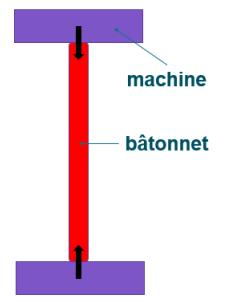


FIGURE 3.3 – Essai flambement

Nous testons plusieurs bâtonnets et réalisons une moyenne. On obtient :

$$F_{flambage} = 90N$$

Avec $F_{flambage}$ la force de compression minimale entraînant un flambage du bâtonnet.

3 Essais sur pont de 50 cm et mode de flambement

La première partie du projet était dédiée à la conception d'un pont de 50 cm de portée avec les mêmes contraintes géométriques et structurelles imposées par le cahier des charges. Ce premier jet a servi de prototype que nous avons testé en flexion 3 points. Ce pont était continu, nous ne tenions donc pas compte de la cinématique. Outre les difficultés rencontrées pour construire le pont, nous avons pu également analyser ses instabilités lors de l'essai pour limiter celles-ci lors de l'essai final du pont. La principale instabilité était le flambage.

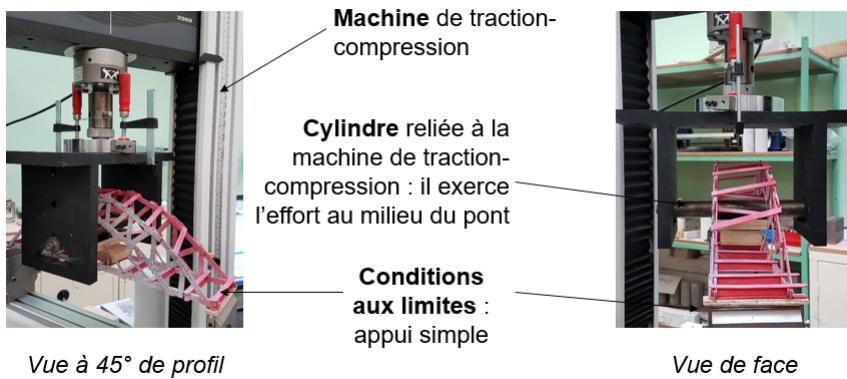


FIGURE 3.4 – Essais en flexion du pont de 50 cm

Le flambage apparaît à partir d'un effort de compression de 390N. Il se situe essentiellement à la base du pont qui reprend tous les efforts de compression de l'arc. Le pont ne rompt pas mais des poutres anti-flambage se décollent à cause de la déformation des arcs due au flambage. Finalement le pont peut tenir jusqu'à un effort central de 530N. Au delà, on observe une chute brutale de la contrainte.



FIGURE 3.5 – Flambage à la base de l'arc

La base de l'arc sera donc à consolider lors de la construction du pont de 150cm. La géométrie du tablier est également à revoir car beaucoup trop rigide. En effet, l'arc doit être l'élément reprenant le plus d'effort lors d'un essais, les fils transmettant les efforts du tablier à l'arc. De plus, la surface de collage des poutres anti-flambage est à augmenter puisque celles-ci sont décollées. Pour plus de stabilité, nous épaisserons l'arc. Les paramètres suivants seront déterminés à partir des simulations : épaisseur de l'arc dans le sens vertical et horizontal, hauteur de l'arc, forme du treillis de l'arc. Nous détaillerons ces simulations dans les parties ultérieures.

4 Essais sur les assemblages des tirants

La solution technique retenue pour lier l'arc et le tablier après les tests sur le prototype de pont du 50cm est l'assemblage de bâtonnets pour former les tirants. Le changement technologique est consécutif à une évaluation du critère d'éco-responsabilité de la construction ; en effet, les fils ont un coût d'empreinte carbone trop important ($0,2\text{g CO}_2 \cdot \text{cm}^{-1}$) comparé au coût carbone des bâtonnets pour la même longueur utile. Pour pouvoir optimiser le nombre de bâtonnets par tirant, on étudie le comportement d'un assemblage de deux bâtonnets soumis à des efforts de cisaillement en fonction de la position de l'encastrement par la colle des deux parties.

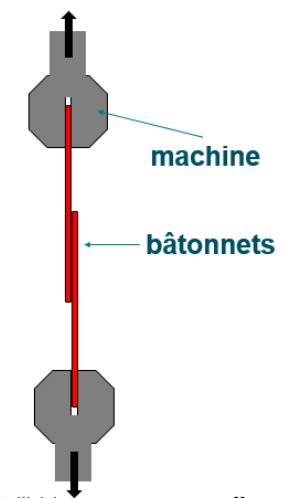


FIGURE 3.6 – essai de cisaillement

Nous avons réalisé 3 essais en modifiant la position de l'encastrement entre les parties : on colle respectivement sur la moitié, le tiers et le quart des bâtonnets. On utilise la machine d'essai usuelle *INSTRON 3369* que nous avons utilisé pour l'essai de traction. On obtient les résultats suivants :

4. ESSAIS SUR LES ASSEMBLAGES DES TIRANTS

— $\frac{1}{4}$ de surface de collage :

$$F_{rupture} = 1300N$$

On observe que le bois se casse de manière oblique et non dans le sens des fibres.

— $\frac{1}{3}$ de surface de collage :

$$F_{rupture} = 1700N$$

On observe que la colle se casse et non le bois.

— $\frac{1}{2}$ de surface de collage :

$$F_{rupture} = 2000N$$

On observe l'écrouissage du bois.

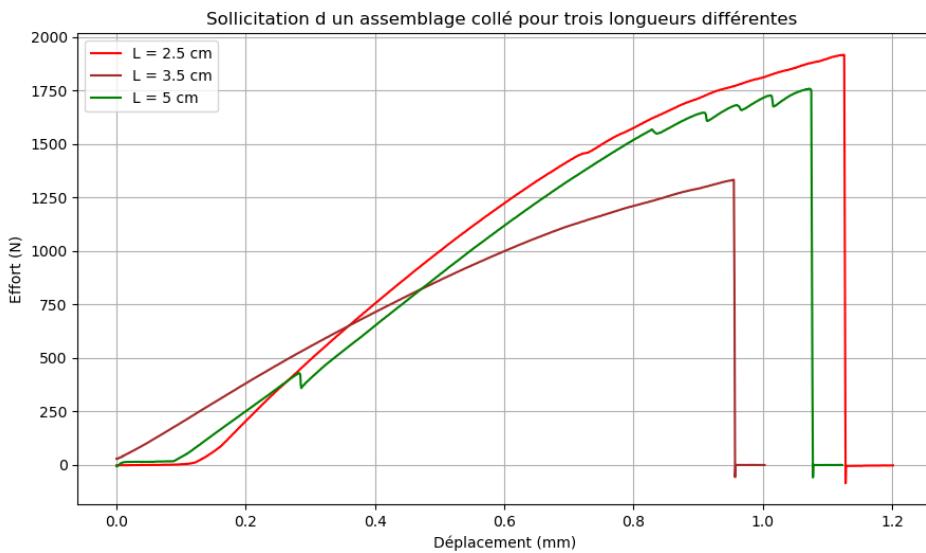


FIGURE 3.7 – essai de traction sur différentes longueurs de collage

Il est très difficile d'observer une tendance monotone entre résistance et longueur de collage. On considérera alors que les collages peuvent résister au plus à 1200N pour éviter le risque de défaillance localisée. De plus, nous mettons en place une redondance des collages.

Les mors modifient le comportement de l'assemblage pendant l'essai de cisaillement ce qui ne rend pas les résultats très fiables.

Conception et réalisation des pièces utiles à la cinématique

Comme mentionné en chapitre 2, la cinématique choisie du pont est une rotation des deux parties de pont selon un axe vertical. Ce choix de cinématique suppose la création d'une jonction entre les arcs et d'une liaison pivot d'axe vertical, pilotée de 0° à 90° . Nous allons, dans cette partie, développer la conception de cette jonction et de la liaison.

1 Jonction entre les deux moitiés d'arc

Lors du passage d'un train, les deux demi-arcs du pont doivent coïncider et s'engraîner de manière à transmettre le couple mécanique produit par le poids propre du pont, le poids du train et le chargement appliqué. Cette zone de transition se doit donc d'être rigide et au mieux indéformable pour éviter toute usure ou augmentation du jeu au cours du temps. Nous ne la construisons pas en bâtonnets et choisissons donc du bois massif pour la réaliser.

Lors du passage d'un bateau, la pièce doit pouvoir permettre la meilleure ouverture possible du pont. En outre, la pièce ou les ensembles de pièces de jonction des deux demi-arcs doivent être construits en tenant compte de jeux suffisants permettant une ouverture et une fermeture aisées. Il est donc délicat de concevoir une telle pièce puisqu'un trop grand jeu n'entraîne pas de reprise d'effort et un jeu trop faible engendre une trop grande adhérence entre les deux parties par frottements.

Nous avons réalisé plusieurs pièces différentes, en passant par la conception sur CATIA V5 jusqu'à la réalisation en atelier de menuiserie. Après plusieurs essais, nous nous sommes rendu compte de la complexité de la pièce.

Finalement, nous avons opté pour un ensemble de pièces relativement simple, une pièce mâle située sur une partie du pont et une pièce femelle située sur l'autre partie. Cet ensemble est représenté sur les figures 4.1 et 4.2 ci dessous. Chaque pièce est un assemblage de trois couches de planches de bois collées entre elles. En effet, réaliser cette pièce d'un seul tenant imposerait de découper la pièce selon deux directions orthogonales tout en maintenant l'angle nécessaire à l'ouverture du pont, ce qui est trop complexe pour être précis avec de simples outils de découpe.

2. PIVOT SUR LES BERGES

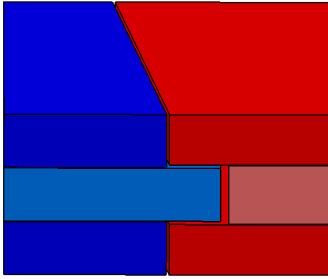


FIGURE 4.1 – Vue 3D - Pièce de jonction

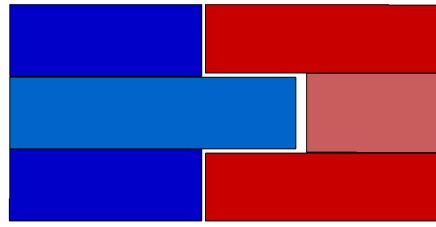


FIGURE 4.2 – Vue 3D - Section

En vue de dessus, nous avons volontairement choisi de découper la pièce suivant un angle de 6° dans le but de rendre l'ouverture possible. Cet angle est inclus dans le cône de frottement bois-bois et permet, lors du passage d'un train, de ne pas glisser et d'ouvrir le pont de manière spontanée.

La pièce mâle sera encastrée dans la partie droite de l'arc et la pièce femelle dans la partie gauche de l'arc. Ces deux pièces seront collées aux arcs de telle sorte à bloquer tous leurs degrés de liberté.

2 Pivot sur les berges

Une fois la pièce de jonction réalisée, nous devons entraîner chaque demi pont en rotation pour les phases d'ouverture et de fermeture. On choisit de réaliser des liaisons pivot pilotées par deux moteurs différents au niveau des berges. Les pivots sont désaxés de manière à rendre possible la rotation des demi-tabliers et ne pas provoquer de blocage (cf Figure 4.3).

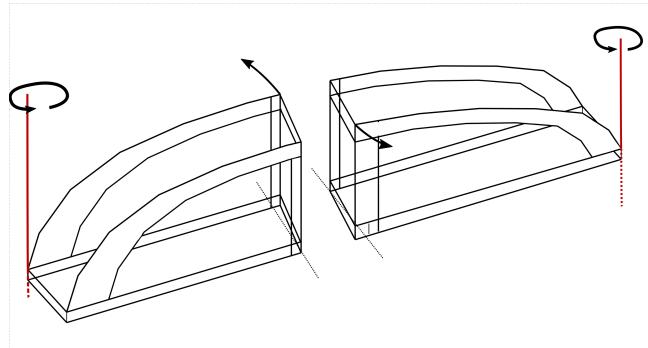


FIGURE 4.3 – Schéma des liaisons pivots

Les deux solutions techniques que nous avons retenues pour réaliser ces liaisons pivots pilotées sont deux pièces solidaires des deux demi tabliers avec deux trous de diamètre 14mm dans lesquels sera emmanché un axe en bois. Celui-ci est l'axe de rotation, par conséquence, il est impératif de limiter au maximum le jeu de manière à avoir une contrainte de perpendicularité. Nous avons, pour cela, réalisé un centrage long avec plusieurs pièces massives. Le contact entre le demi-pont et la berge sera glissant, ainsi, c'est l'ensemble du demi pont qui entrera en rotation. La gamme de fabrication de ces pièces est la suivante :

CHAPITRE 4. CONCEPTION ET RÉALISATION DES PIÈCES UTILES À LA CINÉMATIQUE

- Récupération d'un brut en bois
- Fraisage de deux épaulements sur les bords de la pièce sur une machine conventionnelle. La mise en position est effectuée à l'aide de cales de réglages, de manière à assurer une bonne direction de coupe. Le maintien en position est quant à lui assuré à l'aide de brides comme représenté en figure 4.6.
- Réalisation de perçages diamètre 14 sur une perceuse à colonne avec une vitesse de rotation de la broche d'environ 750tr/min. Le maintien en position est également effectué à l'aide de brides de serrage.
- Dans un soucis de minimisation de la masse, réalisation de poches débouchantes sur la pièce, de manière à ne garder que des bords de 5mm d'épaisseur.
- Découpage de la pièce en deux pièces

Nous pouvons observer la pièce avec l'axe emmarché dans l'alésage effectué en figure 4.7.



FIGURE 4.4 – Maintien en position



FIGURE 4.5 – Ensemble des pièces de la liaison pivot

Comme expliqué précédemment, les liaisons pivot sont pilotées. Après plusieurs tentatives (engrenage solidaire de l'axe, courroie), nous avons retenu un pilotage des liaisons pivot basé sur des câbles tendus qui seront tirés afin de permettre au demi-pont de se mouvoir. Un guidage par des clous est réalisé afin d'avoir des bras de levier suffisants pour faire pivoter le pont en minimisant la sollicitation du moteur.



FIGURE 4.6 – câblage vu de côté



FIGURE 4.7 – câblage vu de face

Optimisation du treillis

Nous avons choisi de créer un pont avec un arc, qui reprend la charge appliquée sur le tablier. Le tablier est relié à l'arc à l'aide de tirants, sollicités en traction pure. Des paramètres comme le nombre de tirants ou encore la hauteur de l'arc sont déterminants pour avoir un arc le plus résistant possible. Nous avons mis en place deux simulations. La première, qui a servi de base, est une simulation CATIA V5. Puis, afin d'affiner l'optimisation de notre pont, nous avons opté pour le logiciel CAST3M, développé par le CEA.

1 Simulation CATIA V5

Dans un premier temps, nous avons choisi de concevoir notre pont sous CATIA V5. Après réflexion, il nous est paru évident de fonder notre étude sur un modèle poutre, étant donné la géométrie des bâtonnets de bois (une longueur est dominante devant les deux autres).

Nous avons réalisé plusieurs configurations différentes de notre pont, avec des paramètres variés comme la hauteur et l'épaisseur de l'arc, le nombre de tirants, la densité du treillis intérieur à l'arc. Ces paramètres pouvaient être changés rapidement par paramétrage du fichier *CATIA.part*. Après avoir fixé le matériau utilisé (bouleau qui est le type de bois le plus souvent utilisé pour les bâtonnets de glace), la géométrie des poutres (en accord avec les bâtonnets) ainsi que les conditions aux limites (un encastrement à la base en bas à gauche sur la Figure 5.1 et un blocage de la translation selon l'horizontale en haut de l'arc afin de simuler le contact entre les deux parties du pont en haut à droite figure 5.1), nous avons lancé des simulations. Les encastrements ne sont pas les conditions aux limites qui seront utilisées lors du test final ; néanmoins, cela permettait de bloquer les mouvements de corps rigide de la structure et ainsi assurer l'unicité de la solution. Le treillis possédait au moins une condition au limite en déplacement et/ou contrainte à chaque frontière, donc la solution du problème de mécanique 3D existait. Le logiciel a donc bien pu calculer un déplacement et des contraintes en chaque point du maillage.

Nous avons sélectionné la géométrie qui donne les contraintes les plus faibles et avec un écart type minimal. Cette géométrie sert de base à l'étude du pont optimisé dans l'atmosphère CAST3M. Pour cela, il est nécessaire de récupérer tous les points, qui seront utiles pour CAST3M (Figure 5.2).

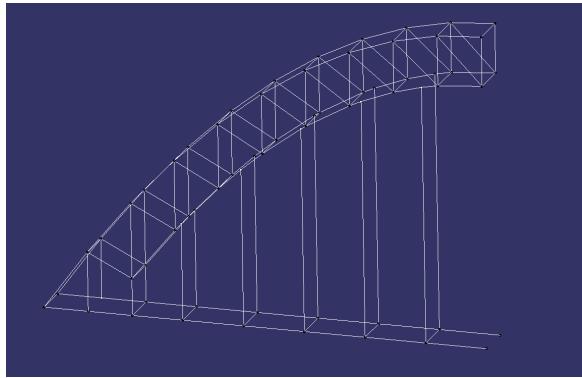


FIGURE 5.1 – Modélisation filaire du pont sous CATIA V5

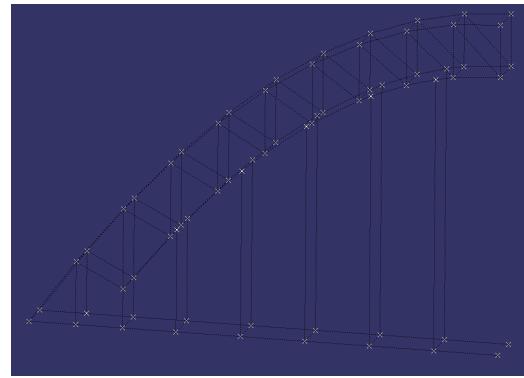


FIGURE 5.2 – Récupération des points aux sommets

L'inconvénient d'utiliser CATIA est que ce logiciel ne calcule que les solutions du problème linéaire et ne prend pas en compte les non linéarités du comportement des bâtonnets de bois contrairement à CAST3M. Nous pouvons, tout de même, ajouter le flambage pour ajouter un critère de sélection sur la géométrie. On précise qu'on ne connaît pas le comportement de la colle notamment en cisaillement. Il est donc en partie infondé de considérer des connexions rigides (on transmet tous les degrés de liberté) entre les poutres. Cependant, cela donne un aperçu du comportement de la structure à un chargement statique.

2 simulation CAST3M

Notre pont est composé principalement de poutres assemblées. On peut chercher à optimiser sa conception en changeant sa topologie (c'est-à-dire le graphe des structures) et les paramètres dimensionnels de la structure (c'est-à-dire les distances entre deux nœuds). L'optimisation de la structure passe par la minimisation d'un indice de performance. Au vu des résultats de la sollicitation du premier pont (le flambage induit des torsions de poutres qui font qu'elles se désolidarisent), nous cherchons à réduire le flambage. L'indice de performance doit donc prendre en compte un critère numérique caractérisant le flambage. Aussi, puisque nous souhaitons minimiser le flambage pour une masse donnée, ce critère doit aussi prendre en compte la masse de la structure. On peut utiliser plusieurs méthodes pour décrire numériquement l'aptitude à flamber :

- Méthode de calcul de l'effort de compression maximale, qui consiste à déterminer la charge appliquée sur la structure pour que l'effort de compression dépasse la force limite d'Euler ;
- Méthode du flambement linéaire d'Euler ;
- Méthode de bifurcations d'équilibre qui consiste à la résolution d'un problème aux valeurs propres d'une matrice de rigidité. Il reste la question du nombre de modes à utiliser ;
- Méthode de résolution par éléments finis en grands déplacements.

La méthode la plus précise est la méthode itérative en grands déplacements mais demande un trop grand temps d'évaluation. Il a alors fallu opter pour la méthode de bifurcation implémentée sur CAST3M sous la fonction FLAMBAGE. Cette fonction nous donne un coefficient multiplicateur de chargement qui caractérise l'aptitude de la structure à flamber au mode sélectionné. Nous définissons alors notre indice de performance par $\min(\lambda_i)/M$, avec λ_i le coefficient

2. SIMULATION CAST3M

multiplicateur du mode de flambage i , et M la masse de la structure. Nous allons maximiser λ_i avec un algorithme d'optimisation globale - la fonction critère étant non convexe - avec la fonction stochastique **differential_evolution** du module **scipy.optimize**. Cette méthode permet de définir des intervalles de mutation des coordonnées des noeuds. Cela permet de garder une géométrie physiquement cohérente malgré l'aspect stochastique de l'algorithme. Cet intervalle de mutation est modifié à chaque pas afin de laisser évoluer la structure.

Dans notre démarche, pour réduire la complexité du problème à résoudre, nous sommes partis d'un treillis naïf à topologie fixée. Nous avons effectué une première optimisation paramétrique (modification de la hauteur de l'arche), puis nous avons utilisé l'algorithme stochastique pour modifier les coordonnées des noeuds. Pour des soucis de performance, nous avons considéré le problème symétrique dans la minimisation stochastique. Cela permet a priori d'aboutir plus vite vers des solutions optimales. Nos premières minimisations stochastiques ont abouti à des résultats très étranges, avec des formes de treillis improbables. Cela provient du fait que l'algorithme ne gère pas la collision des poutres entre elles. Pour contrer ce problème, nous avons défini des conditions maximales de mouvement entre chaque itération (intervalles de mutation). Ainsi, la topologie reste inchangée et la structure générale du treillis

A la fin du processus de minimisation global itératif, il a fallu valider la structure selon l'algorithme le plus précis. Nous avons alors exporté les sets de points dans le code de calcul utilisant la fonction PASAPAS. L'algorithme a permis de faire évoluer λ_i de 2 à 7.

Pour effectuer cette minimisation, il a été implémenté un interfaçage entre python et CAST3M. Un code python est capable de générer un fichier **.dgibi** avec un set de coordonnées piloté par la fonction heuristique. Le code lance itérativement des simulations CAST3M qui renvoie la valeur de la fonction objectif dans un fichier **.txt**.

Voici les résultats de notre structure sur un code CAST3M PASAPAS sur un déplacement vertical de 5mm pour un treillis d'une seule épaisseur :

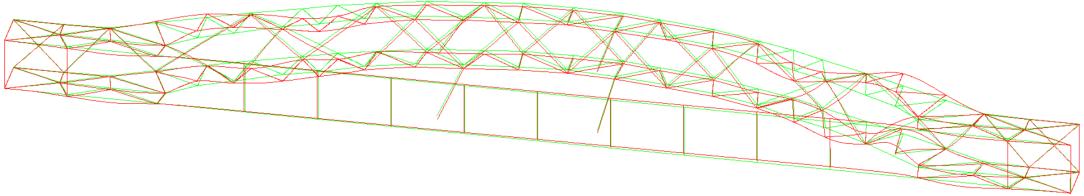


FIGURE 5.3 – représentation du mode de déformation critique par simulation CAST3M - PASAPAS sous un déplacement vertical de 5mm au niveau des tirants

L'analyse des résultats montre que cette structure résiste à 500 N avant de faiblir. Cette faiblesse est liée au flambage de la structure. Ce flambage se situe aux niveaux des pieds des arches. A posteriori, nous avons donc modifié sur ces zones le nombre de poutres anti-flambage et ajoute des couches pour solidifier la structure.

Test final

Une fois le treillis optimisé, nous attaquons la phase finale *i.e.* la construction du pont avant l'essai final dont nous présenterons le chargement. La phase finale contient aussi le contrôle des gabarits et des phases d'ouverture et de fermeture. Un premier passage de train se fait en fermeture pour vérifié le gabarit ferroviaire, puis la cinématique du pont est actionnée dans les deux sens de phase et enfin un passage de fret est à nouveau effectué pour vérifier la constance du respect du gabarit ferroviaire.

1 Construction du pont et géométrie finale

Après optimisation, le treillis du pont possède les propriétés principales suivantes (voir photo du pont) :

- une hauteur d'arc maximale de 36 cm ;
- une base rigidifiée pour limiter le flambement ;
- des tirants en bois pour limiter l'empreinte carbone ;
- un tablier respectant le gabarit et suffisamment rigide pour transmettre les efforts.

Au niveau de la cinématique, les cylindres en bois encastrés dans les pièces en bois massives aux extrémités du pont sont entraînées en rotation par un moteur à courant continu par l'intermédiaire d'une pièce d'accouplement en bois sur laquelle on enroule une bobine de fil pour remplacer une courroie.

L'alimentation du train de fret se fait directement par les rails en soudant des câbles reliés à une batterie sur les rails. On choisit également la même alimentation pour chacun des moteurs pour que ces derniers soient en phase et que la rotation des demi-ponts soit synchronisées bien que dans un sens de rotation opposé. Cependant, cette synchronisation peut être peu fiable à cause des arbres moteurs et des dispositifs de réduction qui peuvent être différents.

On présente le coût de l'empreinte carbone du pont final dans le tableau ci-dessous. On prend également en considération le coût écologique du premier prototype de 50cm, notamment dans la colle :

2. PRÉSENTATION DU CHARGEMENT

élément du pont	masse (g)	masse CO ₂ équivalente (kg)
bâtonnets		
demi-pont gauche	576	0.115
demi-pont droite	583	0.117
pont de 50cm (premier prototype)	150	0.03
bois massif		
pièces pivots	122	0.024
supports pivots haut	683	0.137
pièces accouplement moteur	15.1	0.03
support pivot bas gauche	93	0.19
support pivot bas droit	105	0.21
colle à bois		
masse utilisée	240	0.552
fil de pêche		
longueur utilisée	2m	0.04
masse totale équivalente des deux prototypes	1.45 kg CO ₂ eq	
masse totale équivalente du pont final	1.42 kg CO ₂ eq	

TABLE 6.1 – Empreinte Carbone

2 présentation du chargement

Afin de tester la résistance mécanique du pont, nous réalisons un test final. Le test mécanique consiste à appliquer un effort directement sur le tablier par l'intermédiaire d'une structure spéciale en métal. Deux puits reliés à la machine de compression passeront à travers l'arc et transmettront l'effort à celle-ci (voir Annexe C.1)

Conclusion

Tout au long de ce projet d'année, nous avons adopté une méthode de travail proche de celle utilisée par les ingénieurs en génie civil spécialistes des ouvrages d'art. Le projet nous a d'une part permis de nous confronter à des problématiques industrielles actuelles telles que l'impact écologique des constructions ainsi que leur rentabilité énergétique. D'autre part, d'un point de vue fonctionnel, nous avons dû établir un cahier des charges pour pouvoir envisager le dimensionnement du pont.

Nous avons surtout découvert ce qu'était un pont et quels critères mécaniques étaient essentiels pour une bonne tenue pendant les phases. Nous avons notamment pu mettre en évidence plusieurs phénomènes mécaniques tels que le flambement. Nous avons également pu concrètement exploiter nos connaissances en résistance des matériaux et en théorie des poutres.

Afin d'optimiser le coût des matériaux et de la construction du prototype qu'est notre pont mobile, nous avons mis en oeuvre, grâce aux outils numériques qui sont à notre disposition, des simulations de contraintes et de rupture. Nous avons ainsi appris à utiliser le calcul par éléments finis dans le cadre du génie civil.

D'un point de vue humain, nous avons acquis de l'expérience quant à la gestion à la fois d'une équipe de concepteurs et d'une équipe de techniciens, puisque nous avons dû endosser ces deux rôles au cours de la construction. Nous avons aussi mieux appréhender la notion d'échéance et de répartition temporelle du travail à fournir malgré le fait que le charge de travail n'a pas pu à chaque fois être répartie de manière homogène à cause des obstacles rencontrés.

Enfin, nous avons pris conscience du fait que chaque projet fait face à un nombre de problèmes non anticipés ou non résolvables qui demandent alors d'être traités ou contournés, parfois dans l'urgence.

Annexe **A**

Calcul des efforts du vent sur la structure

Puisque notre ouvrage est à proximité des côtes, il est important de pouvoir prédire les efforts liés au vents violents. Puisque notre ouvrage dépasse les 20 mètres, il est intéressant d'utiliser le profil logarithmique des vitesses, qui donne une relation entre altitude et vitesse de vent :

$$u_z = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z - d}{z_0}\right) + \Psi(z, z_0, L) \right]$$

Étant donné que l'interface inférieure est de l'eau, le coefficient de rugosité du terrain est d'environ 0.05m. Aussi, puisque l'assemblage est composé de poutres normales à la direction du vent, nous utiliserons un coefficient de traînée de 1.1. Dans notre étude, nous n'allons considérer que la surface projetée dans la direction du vent (direction du canal) en négligeant les efforts issus de la composition tri-dimensionnelle des poutres. Cela peut se justifier par le calcul de la longueur de traînée. Pour permettre le calcul de la résultante et du moment au niveau de chacun des pieds d'un arche, nous devons isoler la surface projetée du pont. La surface projetée peut être obtenue par photographie ou en récupérant le treillis utilisé lors de la construction du pont. Nous avons sélectionné la deuxième méthode pour simplifier les traitements numériques. A partir du treillis filaire, on peut tracer numériquement la surface $\Omega_{surface}$ telle que :

$$\forall M \in \Omega_{surface}, \exists N \in \Omega_{barre} \quad ||MN|| < 5 \times 10^{-3}$$

La distance 5×10^{-3} correspond à la demi-largeur d'un bâton. Il faudra bien calibrer la hauteur du pont par rapport au niveau de la mer. Voici le treillis de base et le résultat de la surface projetée :

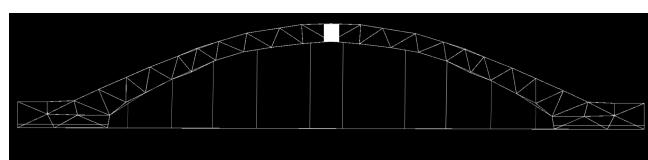


FIGURE A.1 – Treillis modèle pour la construction de l'arche

ANNEXE A. CALCUL DES EFFORTS DU VENT SUR LA STRUCTURE

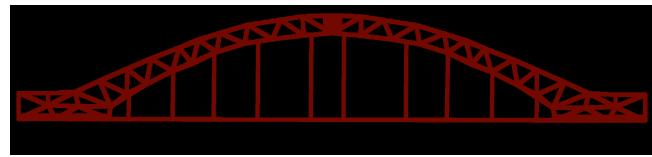


FIGURE A.2 – Surface projetée issue du treillis

Une fois la surface extraite, il faut déterminer la surface élémentaire pour chaque altitude. Pour cela, on détermine la longueur équivalente d'un pixel sur l'image depuis Python. Par somme, on peut ainsi compléter la surface dans la table de calcul Excel. Voici la répartition de la surface sur notre pont :

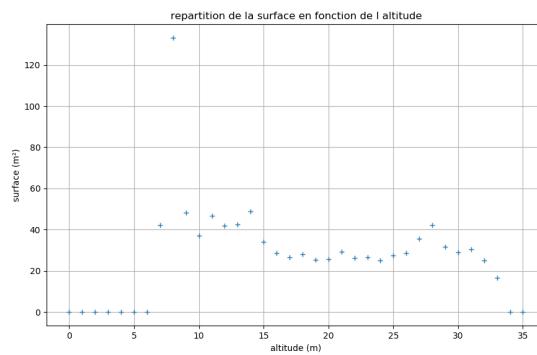


FIGURE A.3 – Estimation de la surface équivalente pour chaque mètre d'altitude

Les résultats de résultante et de moments au niveau des pieds du pont sont :

- une résultante de 9.10^5 N;
- un moment de 1.6×10^7 N.m.

Pour conclure, puisque la hauteur du pont en position fermée (mais aussi ouverte) est faible par rapport à un pont levant, les efforts sont raisonnables.

Annexe **B**

Gabarits ferroviaires et fluviaux

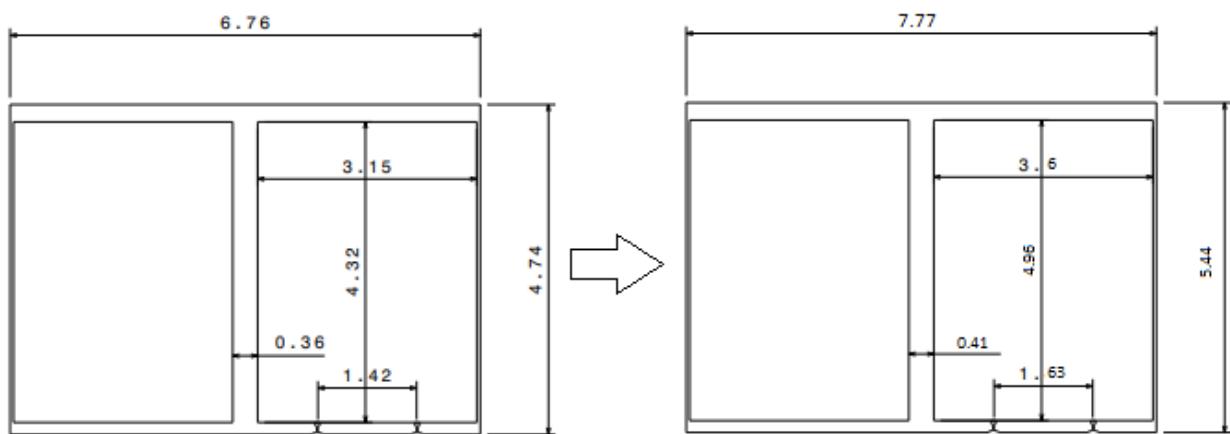


FIGURE B.1 – Gabarit ferroviaire pour les deux voies à l'échelle 1 :1 et à l'échelle 1 :87

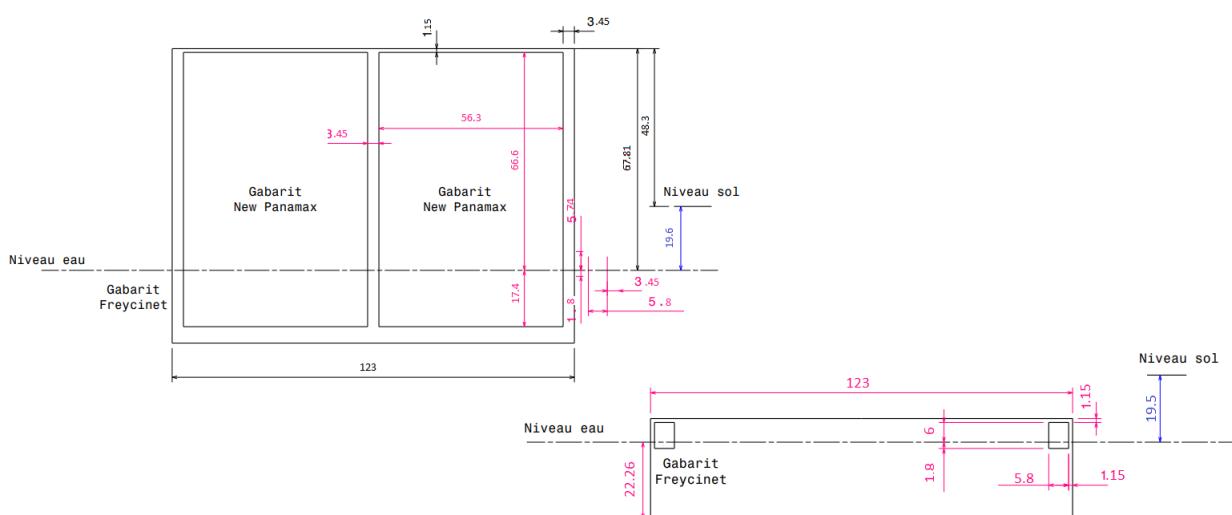


FIGURE B.2 – Gabarits fluviaux en ouverture (gauche) et en fermeture (droite) à l'échelle 1 :87 (cm)

Système de chargement

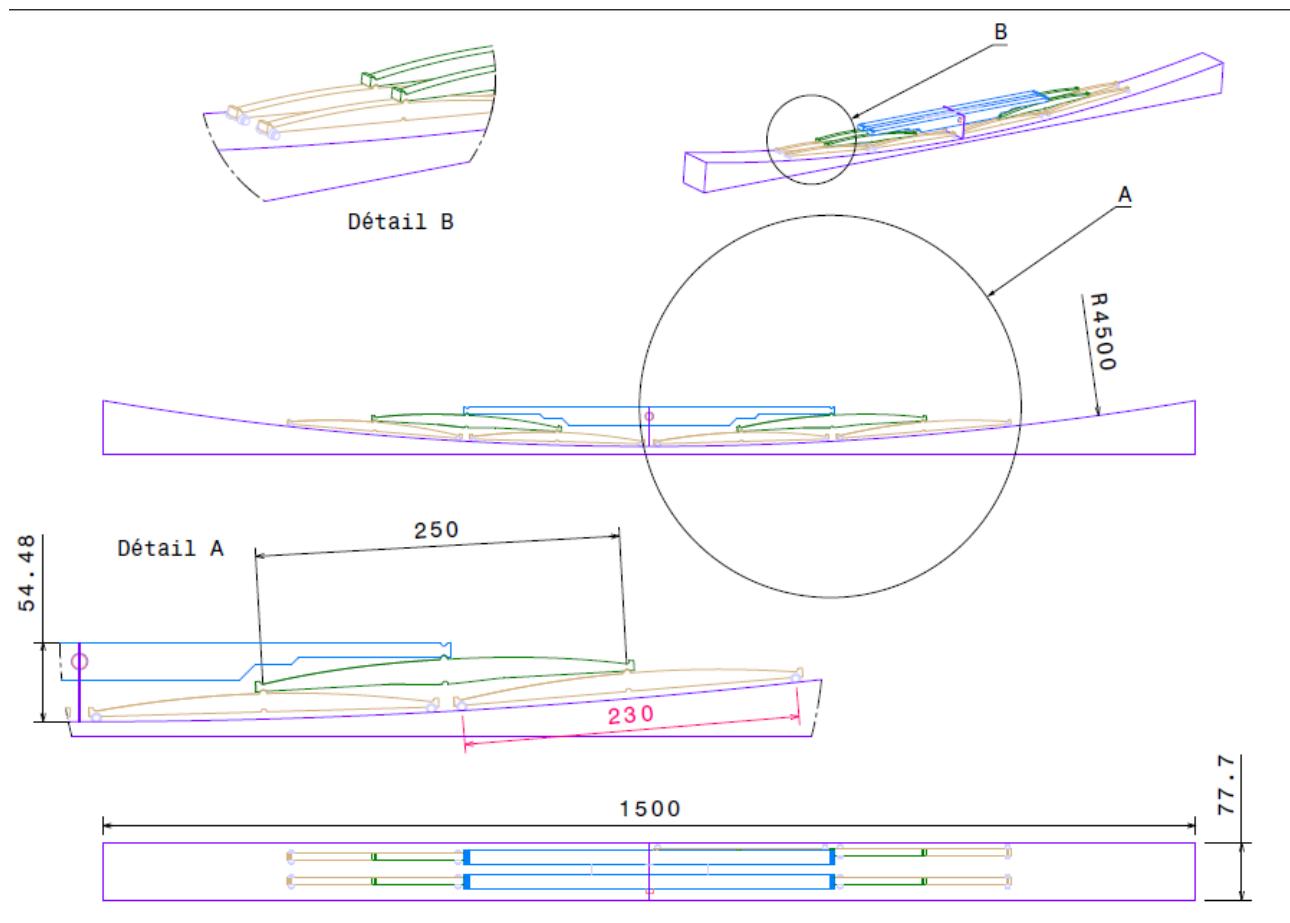


FIGURE C.1 – Schématisation du système de chargement

Bibliographie

Olivier Baumann, **Ouvrages d'art Ponts mobiles : du génie civil de haute précision**, LE MONITEUR, le 06/02/2009, Disponible sur <https://www.lemoniteur.fr/article/ouvrages-d-art-ponts-mobiles-du-genie-civil-de-haute-precision.1901864>

Wasoodev Hoorpah, **Contribution à l'approche numérique du comportement dynamique des ponts rails**, BIBLIOTHEQUE UTC, Disponible sur http://bibliotheque.utc.fr/EXPLOITATION/doc/IFD/IFD_REFDOC_0003203/contribution-a-l-approche-numerique-du-comportement-dynamique-des-ponts-rails

Adrien ANTONELLI - Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO, **Conception et construction des arcs**, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, le 16/11/2016, Disponible sur https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/8020/8020-conception-et-construction-des-arcs-ensps_0.pdf

Base de données internationale du patrimoine du génie civil, Disponible sur <https://struc-turae.info/>

Direction des Routes, Ministère de l'Equipement, du Logement, des Transports et de la Mer, **Guide de conception des ponts-dalles**, Disponible sur http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0000/Dtrf-0000430/DT430.pdf?openerPage=resultatsqid=sdx_q0