

Move Your Bridge 2.0 : Modélisation

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO
Xavier JOURDAIN - Martin PONCELET

Édité le
28/11/2022

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 études statiques effectuées pour concevoir les maquettes des ponts résistantes à une charge imposée.

La ressource « Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile » [1] présente le contexte et les grandes étapes du projet de conception et réalisation d'un pont mobile ferroviaire éco-responsable 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 et la ressource « Move Your Bridge 2.0 : Cinématique » [3] expose les cinématiques conçues par les cinq équipes. 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].

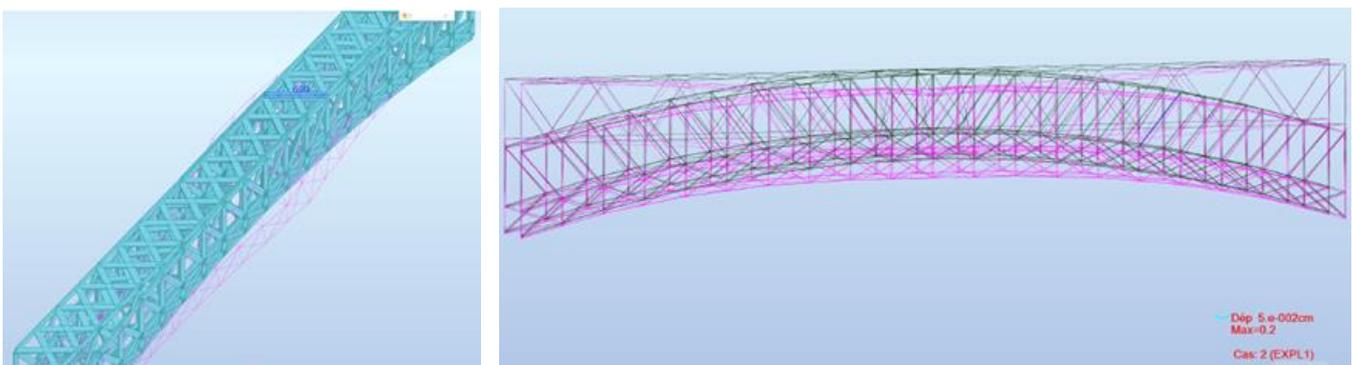


Figure 1 : Exemple de réponses à la charge d'une maquette 50 cm : à gauche, déversement en l'absence de traverse, à droite, déformation sous la charge

1 – Intérêts et objectifs

Robot Structural Analysis (RSA) est un logiciel de modélisation et d'analyse des charges structurales qui permet la vérification de la conformité aux réglementations.

L'objectif de l'étude via RSA est de visualiser, de dimensionner d'adapter et de prévoir les sollicitations et déplacements du pont sous charge. La première partie de la modélisation se fait sur la maquette intermédiaire de 50 cm qui est ensuite testée (voir paragraphe 4.4 - Essai flexion 3 points de la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile* » [1]). La modélisation est ensuite comparée aux résultats expérimentaux afin d'affiner les paramètres et ainsi concevoir le comportement de la maquette finale.

Les ponts des cinq équipes présentent des géométries très différentes, déterminées en fonction de leurs cinématiques (figure 2).

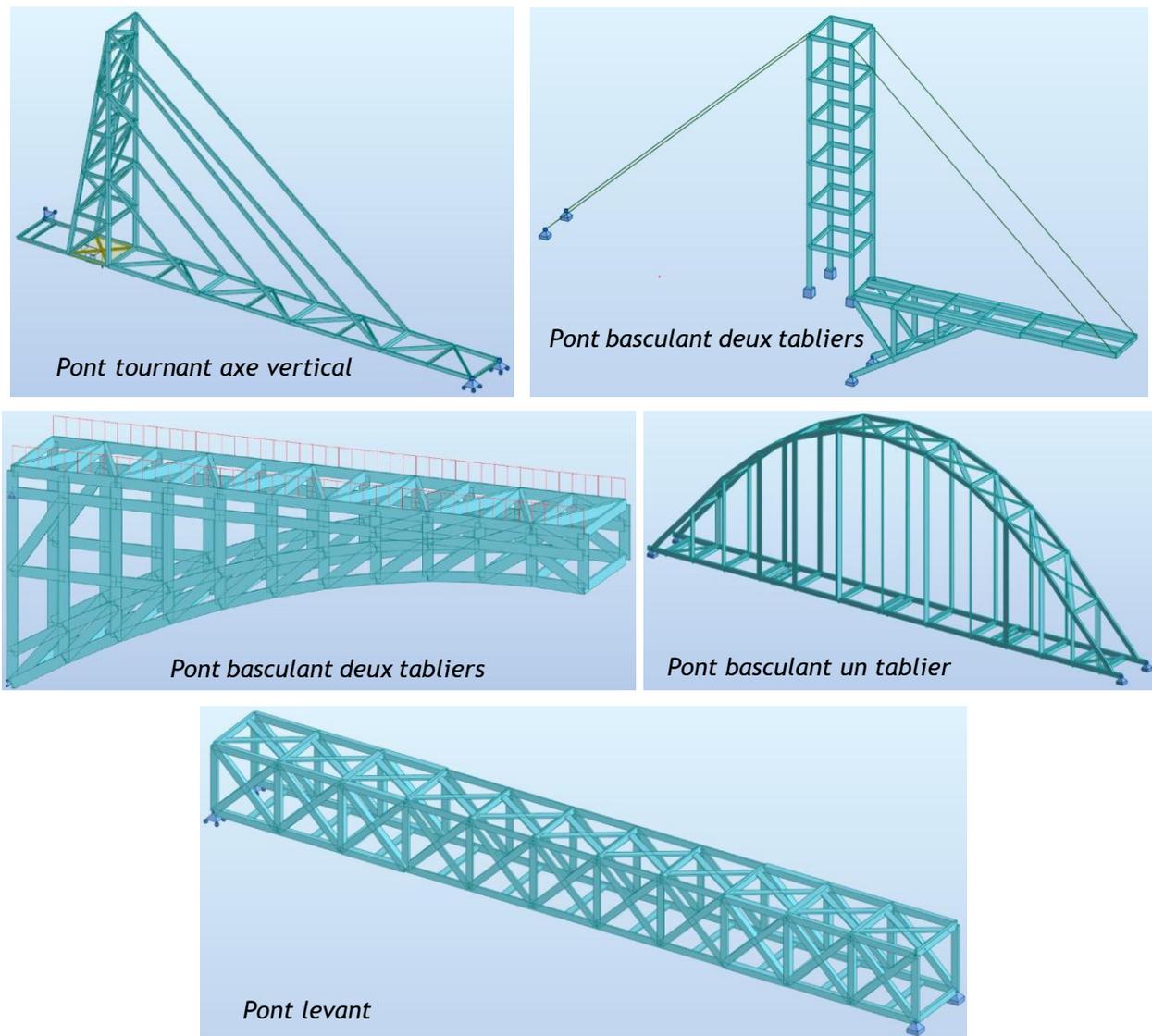


Figure 2 : Géométries des cinq ponts

Avant de pouvoir créer correctement un modèle sur *Robot Structural Analysis*, il est nécessaire de créer un matériau correspondant aux bâtonnets ainsi que des sections permettant de dimensionner automatiquement les différentes barres. Les sections utilisées sont constituées d'un bâtonnet seul à plusieurs collées. RSA modifie alors les sections nécessaires de façon automatisée.

2 – Caractéristiques des matériaux

Des essais de traction, flexion, flambement ont été réalisés sur des bâtonnets simples, des bâtonnets doubles collés, sur des assemblages de diverses formes afin de caractériser le matériau. Les cinq équipes ont constaté la grande variabilité de la contrainte à la rupture d'un bâtonnet à l'autre (voir le paragraphe 4 - Première partie du défi, octobre-février de la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile* » [1]). Figure 3 se trouvent les valeurs des caractéristiques matériau implémentées par les cinq équipes.

	Pont 1	Pont 2	Pont 3	Pont 4	Pont 5
Module d'Young expérimental	11,6 GPa (fractile à 95%)	15,7 GPa (fractile à 98%)	6,72 GPa (fractile à 95%)	14,5 GPa (fractile à 95%)	9 GPa (fractile à 95%)
Écart-type expérimental	4 GPa	2,83 GPa	NC	2,51 GPa	3,55 GPa
Module d'Young utilisé dans RSA	11,6 GPa	15,7 GPa	53 GPa	14,5 GPa	9 GPa
Limite élastique expérimentale	62,01 MPa (fractile à 95%)	60,7 MPa (fractile à 98%)	43 MPa (fractile à 95%)	13,70 MPa (fractile à 95%)	84 MPa (fractile à 95%)
Limite élastique utilisée dans RSA	62,01 MPa	60,7 MPa	43 MPa	13,70 MPa	11 MPa

Figure 3 : Caractéristiques matériau implémentée par les cinq équipes
(les valeurs aberrantes ont été ici grisées)

Le matériau est défini dans *RSA*, en réutilisant les données déterminées expérimentalement (figure 3) et en utilisant les valeurs d'un bois résineux C18 possédant ces mêmes premières caractéristiques.

The screenshot shows a software interface for defining material properties. At the top, there are tabs for 'Acier', 'Béton', 'Aluminium', 'Bois', and 'Autres'. The 'Bois' tab is selected. Below the tabs, there are fields for 'Nom' (set to 'CB_RESIN C22') and 'Description' (set to 'Bois Resineux C22'). A dropdown menu for 'Paramètres spécifiques pour' is set to 'CB71'. The main area is divided into two columns of input fields:

- Elasticité:**
 - module d'élasticité longitudinale: 9000,000 (MPa)
 - module moyen de cisaillement G: 550,000 (MPa)
- Résistance (MPa):**
 - à la flexion: 10,000
 - à la traction axiale: 6,000
 - à la traction transversale: 0,200
 - à l'effort axial: 9,000
 - à la compression transversale: 2,200
 - au cisaillement: 1,100
- Autres propriétés:**
 - Poids spécifique (poids): 0,000 (N/mm³)
 - Expansion thermique: 0,000005 (1/°C)
 - Coefficient d'amortissement: 0,04
 - Type: Massif

At the bottom, there are buttons for 'Ajouter', 'Supprimer', 'OK', 'Annuler', and 'Aide'.

Figure 4 : Fenêtre de définition du matériau bois

3 – Application de la charge et dimensionnement

Le tablier est soumis à deux chargements : son poids propre et le poids du train, ce qui correspond à la charge d'exploitation du pont. Le poids propre a été renseigné dans le logiciel RSA via la masse volumique du matériau des bâtonnets, celui-ci traite l'information. Le chargement dû au passage du train vaut 941 N également réparti sur les boggies du train, qui eux-mêmes répartissent la charge sur les roues.



Figure 5 : Le système de chargement simulant un train

L'essai de flexion 3 points sur la maquette intermédiaire a permis aux équipes d'affiner les modélisations de la maquette finale, des changements de conception ont été faits. L'exemple figures 6 montre comment les dix câbles soutenant le tablier (ici un demi pont, celui-ci est symétrique) ont été réduits à deux et remplacés par une béquille.

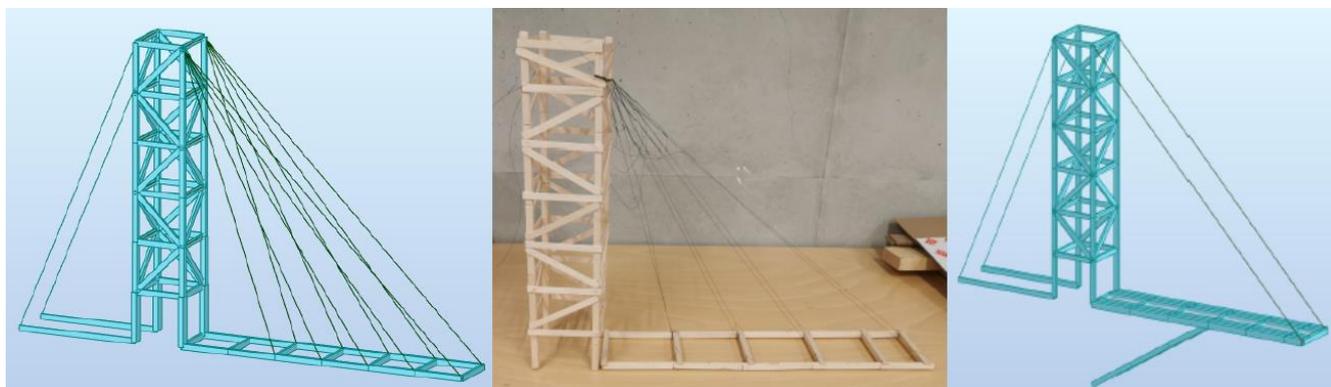


Figure 6 : Première conception et maquette correspondante, évolution du pont suite à l'essai de flexion

Le tablier du pont tournant à axe vertical a été conçu suspendu avec des câbles. La mise en place de ces haubans sur la maquette de 50 cm a été très difficile, sur les 5 paires seules 3 ont pu être installés pour l'essai de flexion (figure 7). Compte tenu des difficultés rencontrées et suite à l'essai, l'équipe a repris les modélisations en remplaçant les câbles par des haubans en bâtonnets (figure 8).

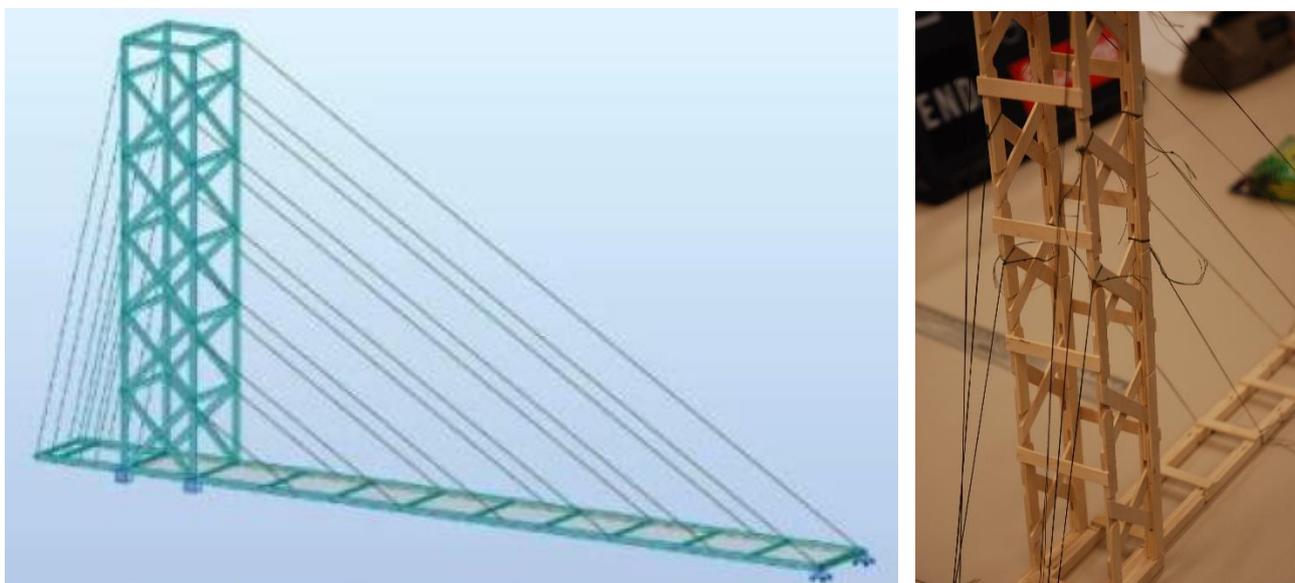


Figure 7 : Première conception et maquette correspondante du pont pour l'essai de flexion



Figure 8 : Maquette définitive de Ponta Cana et ses haubans en bâtonnets

Le tablier du pont levant après l'essai de flexion a vu son nombre de bâtonnets rester constant mais ils ont été répartis différemment (par exemple le nombre de bâtonnets en partie basse a diminué alors qu'en partie supérieure, il a augmenté).

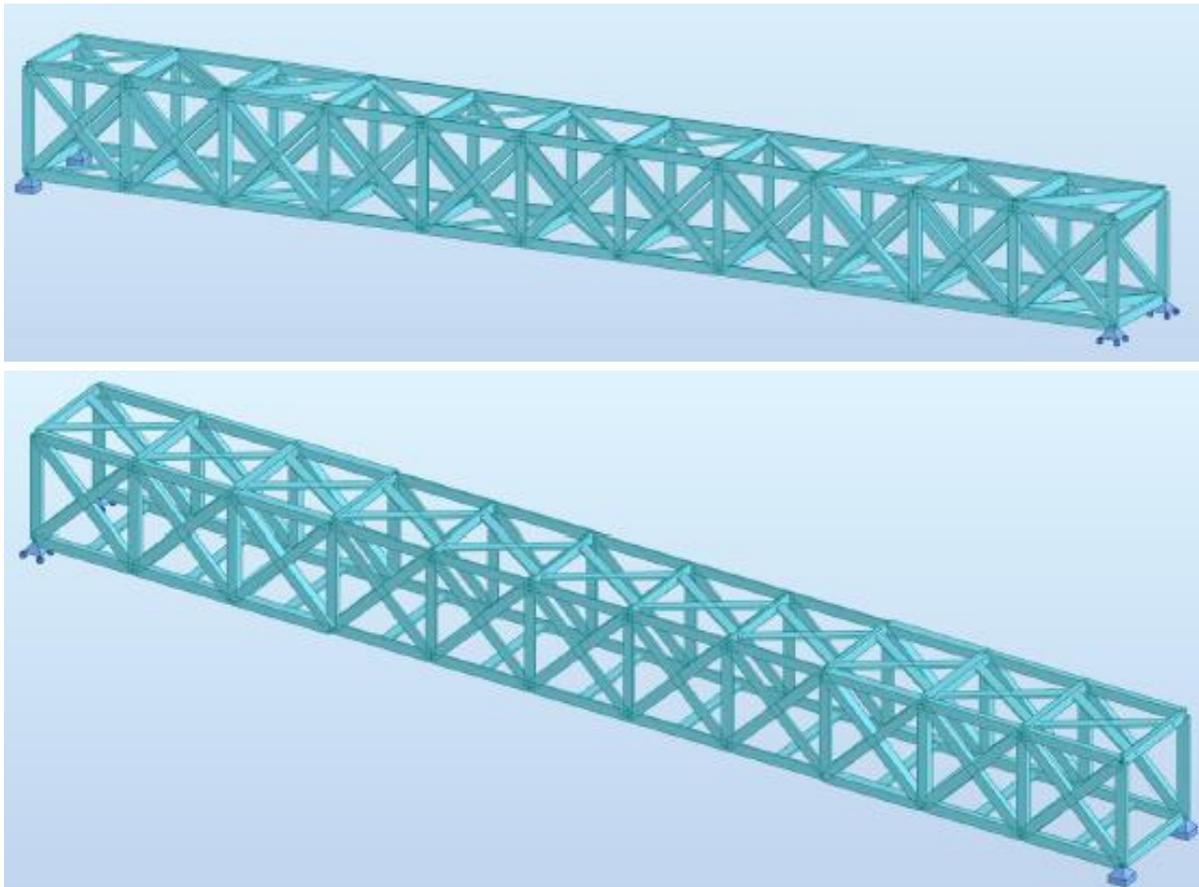


Figure 9 : Première conception du tablier de Pontain-d'idée (en haut) et son évolution après essai de flexion (en bas)

Après essai sur la maquette de 50 cm du pont Louis Vuitton (figure 1), l'équipe a diminué le nombre de bâtonnets, en effet cette maquette présentait un poids et une rigidité très importants par rapport aux autres maquettes.

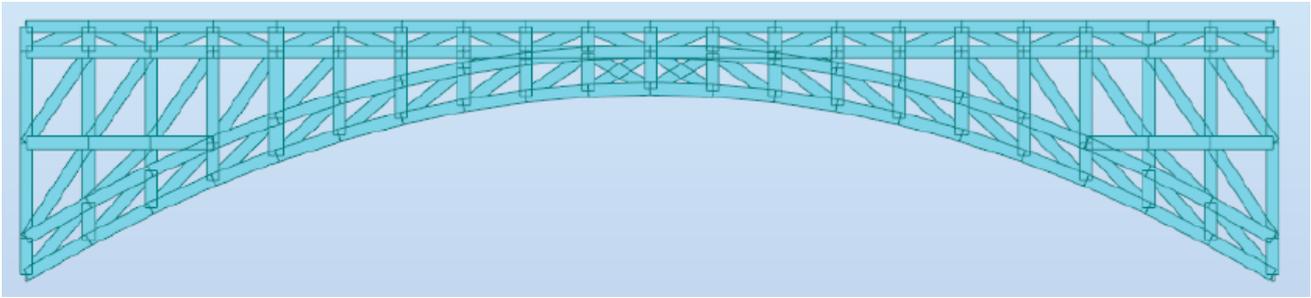


Figure 10 : Conception définitive du tablier de Louis Vuitton après essai de flexion 3 points

Une autre équipe a corrigé les modélisations des liaisons tirants/tablier pour les rendre plus réalistes en choisissant une liaison rigide possédant un relâchement élastique. Un coefficient de raideur a été appliqué à chaque jonction tirants/tablier (figure 11).

Un premier dimensionnement en hypothèse de petites perturbations (HPP) permet d'évaluer la résistance de la structure lorsque la norme du vecteur déplacement est négligeable devant les dimensions de la structure étudiée.

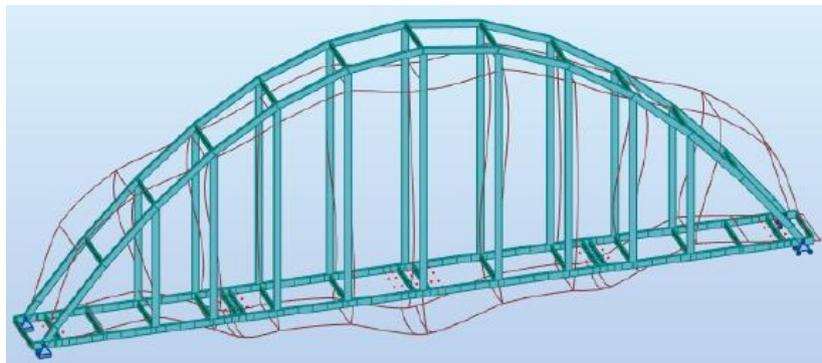


Figure 11 : Déformée avec relaxation en hypothèses de petites déformations

Limiter le déplacement du tablier implique souvent la rigidification de celui-ci. En reprenant l'exemple de la figure 6, on note que les poutres longitudinales du tablier ont été doublées, les épaisseurs de chaque portion du tablier ont été adaptées (plus épaisses aux appuis de la béquille) et la structure de la tour a été allégée (figure 12).

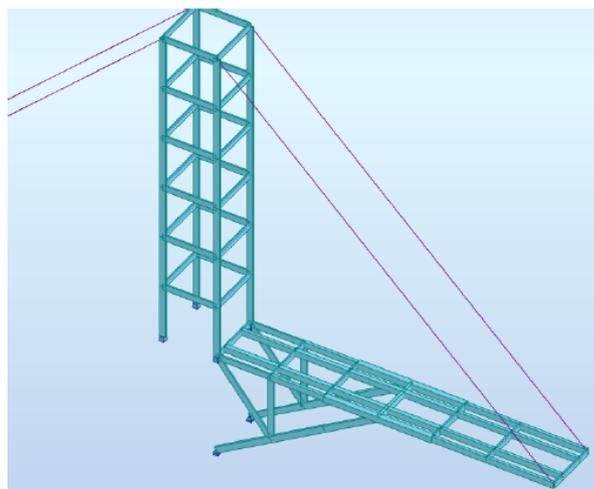


Figure 12 : Évolution de la conception de (vis-le-pon)^T

La résistance de la structure vérifiée par RSA selon l'hypothèse des petites déformations, permet d'obtenir les sections idéales assurant une contrainte à rupture supérieure à la contrainte des matériaux. Une section idéale est obtenue pour chaque famille qui compose la structure comme les bords du tablier, les traverses du tablier, les tirants, ou encore les arches s'il y en a.

4 – Vérification en grand déplacement

Un second dimensionnement permet de vérifier la stabilité de la structure en prenant en compte l'influence du changement de géométrie (grand déplacement), des imperfections géométriques ou une excentricité du chargement. Il s'agit de se rapprocher de la maquette réelle qui ne pourra pas être parfaite. Sur l'exemple des figures 6 et 12, en forçant un grand déplacement en bout de tablier, le flambement des béquilles a été observé, des barres transversales ont été ajoutées afin de limiter les longueurs (figure 13).

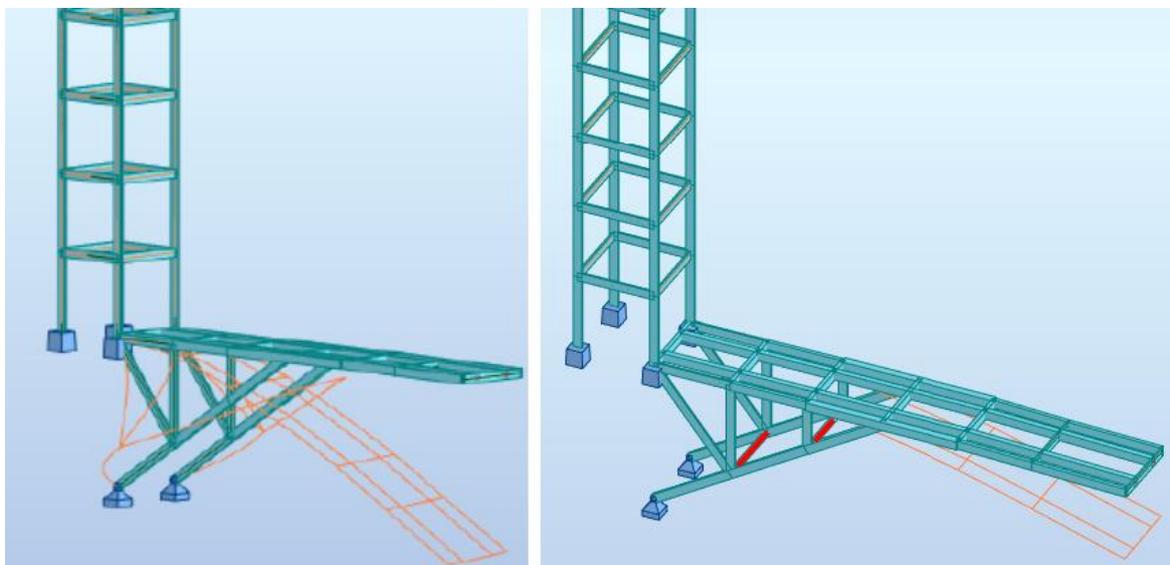


Figure 13 : Déformée en grand déplacement sur modélisation intermédiaire, et déformée sur modélisation finale de (vis-le-pon)^T avec ajout des barres en rouge

La structure élancée de l'exemple de la figure 11 favorise son déversement, c'est un défaut favorable à ce cas qui a donc été choisi. Il en résulte des ajouts de croix Saint-André pour l'arche ainsi qu'aux extrémités du tablier (figure 14).

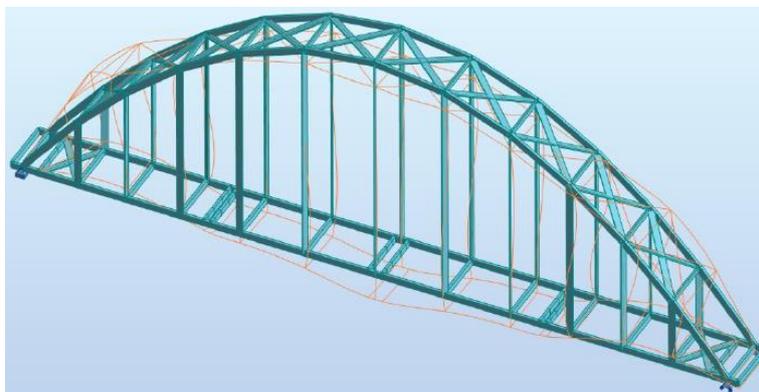


Figure 14 : Évolution de la conception de Pont de l'Ascension

L'équipe du pont des figures 7 et 8, Ponta Cana, a choisi de tenir compte des défauts géométriques de réalisation de la maquette. Via un API¹, des défauts géométriques des nœuds de la structure sont implémentés et le module d'Young de chaque barre peut également varier selon l'écart-type calculé (figure 3). Après quelques centaines de simulations, 69% des essais sur le modèle résistent au chargement. La stabilité du tablier au flambement n'est pas assurée. Dans le but d'améliorer la stabilité et la résistance, des croix de Saint-André ont été ajoutées au tablier. Avec cette modélisation, le pont résiste dans 91% des essais simulés.

¹ API : Application Programming Interface, interface de programmation d'application

5 – Difficultés et défauts rencontrés

Un essai de résistance a été réalisé sur les maquettes finales. Les maquettes sont en position fermée, et un système de chargement simule le positionnement d'un train sur le tablier (figure 5). Le paragraphe 8.2 - Essai de résistance de la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile* » [1] présente une synthèse des résultats obtenus. Aucun des ponts n'a tenu la charge imposée par rupture d'un élément structural (point de colle ou bâtonnet) soit par déversement. La vidéo « *Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance des maquettes de ponts mobiles* » [4] permet de visualiser les essais. La valeur atteinte par le pont le plus résistant est à environ la moitié (455 N) de la charge visée (941 N) et dans des conditions qui ne permettent pas la circulation d'un train (figure 15) !

Des divergences ont pu être constatées entre les résultats de simulation numériques et les résultats expérimentaux. La modélisation des appuis, c'est-à-dire les conditions limites ont été mal appréhendées, ce qui a eu pour conséquence une mauvaise évaluation de la rigidité des ponts, plus souples que prévus, les déformées ont été plus importantes (figure 15).

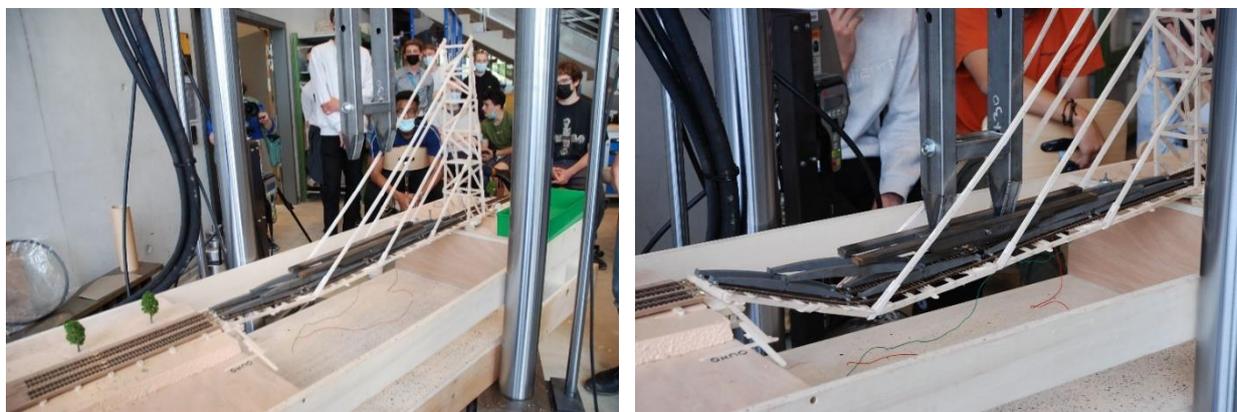


Figure 15 : Ponts Cana en début et fin d'essai

Le flambement a également été sous-estimé. Pour le Pont d'Ascension, la modélisation prenait en compte des points d'appuis au pied de l'arche. Or lors de la réalisation ces appuis ont été décalés d'environ 2,5 cm vers l'extérieur, sans que ce décalage ne soit pris en compte ni même totalement réalisé sur le moment. Afin de réaliser la liaison pivot pour pouvoir lever le tablier, des bâtonnets transversaux ont été enlevés. Au cours d'essai, le flambement s'est assez rapidement mis en place (figure 16) conduisant à la rupture de bâtonnets (appui de l'arche à droite). L'équipe a repris la simulation numérique en prenant en compte la géométrie réelle de la maquette et ses défauts aléatoires. Avec cette nouvelle modélisation, les déformations modèle et expérimentale sont très semblables (figure 17).



Figure 16 : Flambement du Pont de l'Ascension lors de l'essai

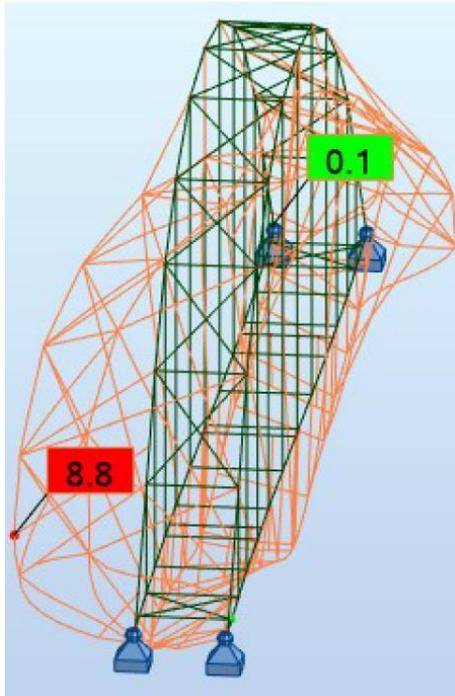


Figure 17 : Simulation numérique avec un modèle prenant en compte les modifications géométriques

Par exemple sur le pont présentés figures 6, 12 et 13, la modélisation des piles et de l'action des câbles a subi quelques approximations. Les câbles du bout du tablier passent sur la pile et sont ancrés à l'arrière de celle-ci. La continuité du câble permet de limiter les efforts sur la pile sollicitée alors seulement en compression. La modélisation en grand déplacement dans ces conditions s'est avérée problématique conduisant à des solutions de modèle approché (modèle sans câble mais avec des charges équivalentes). Les défauts des piles mal pris en compte ont été les premiers à mettre en défaut le comportement de la structure. À partir d'un chargement de 380 N, un flambement s'est installé sur une des piles manifestement sous-dimensionnée (figure 18). L'essai continuant, le basculement de la partie du tablier reliée à cette pile a commencé, le tablier a déversé engendrant des efforts importants sur la béquille en appui sur la rive qui a fini par céder.

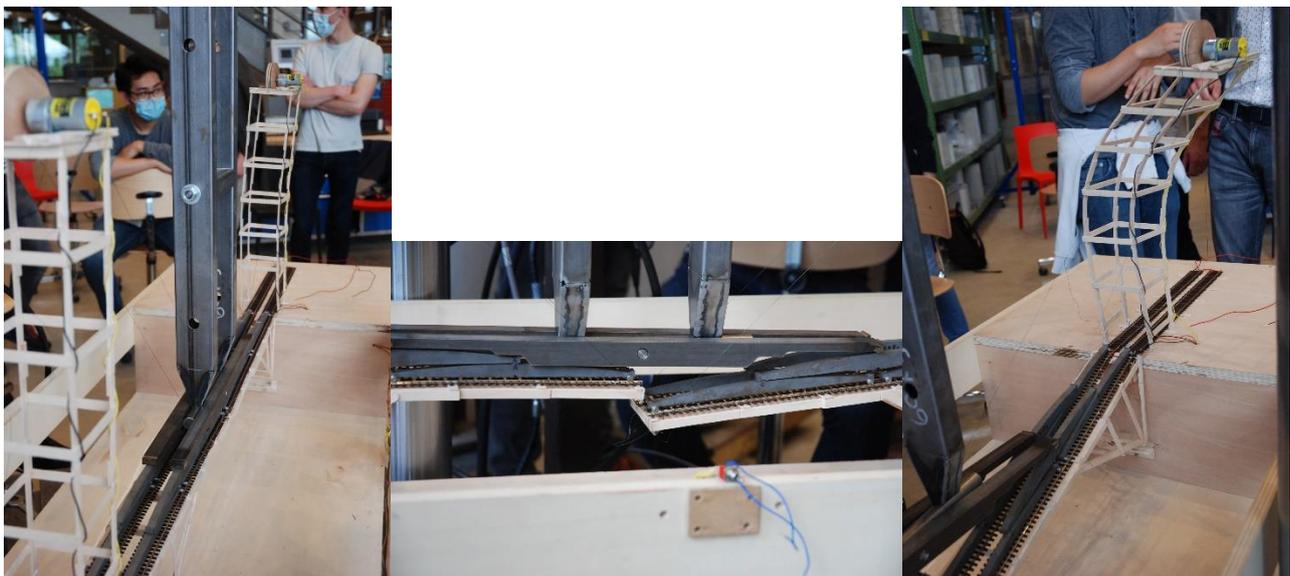


Figure 18 : Début du flambement (à gauche) d'une des piles pour (vis-le-pon)^T et déversement du pont

Certains défauts inévitables à la réalisation des maquettes sont difficiles à prendre en compte dans les simulations de façon réaliste. La modélisation de certaines liaisons cinématiques comme le contact entre deux demis tabliers sont peu probantes via les logiciels. La modélisation des liaisons collées, par relâchement des liaisons par exemple, s'avère très difficile.

Des problèmes liés à l'environnement de l'essai ont été aussi sous-estimés. Prenons par exemple le pont dont le tablier est présenté figure 9. Pontain-d-idée a été modélisé avec un système de croix Saint-André tout le long de la structure de son tablier. Or pour réaliser l'essai de résistance sur la maquette finale, un accès du système de chargement a été fait en ménageant deux puits sans ces croix (figure 19). Ce point n'a pas été pris en compte dans la simulation numérique. Lors du chargement, le pont s'est déformé linéairement jusqu'à 200 N, puis les traverses supérieures ont flambé et vers 220 N le déversement a commencé. Une nouvelle simulation refaite après l'essai et prenant en compte l'absence des croix Saint-André aux deux puits, permet de déterminer que la structure devient instable pour une valeur de chargement de 230 N.

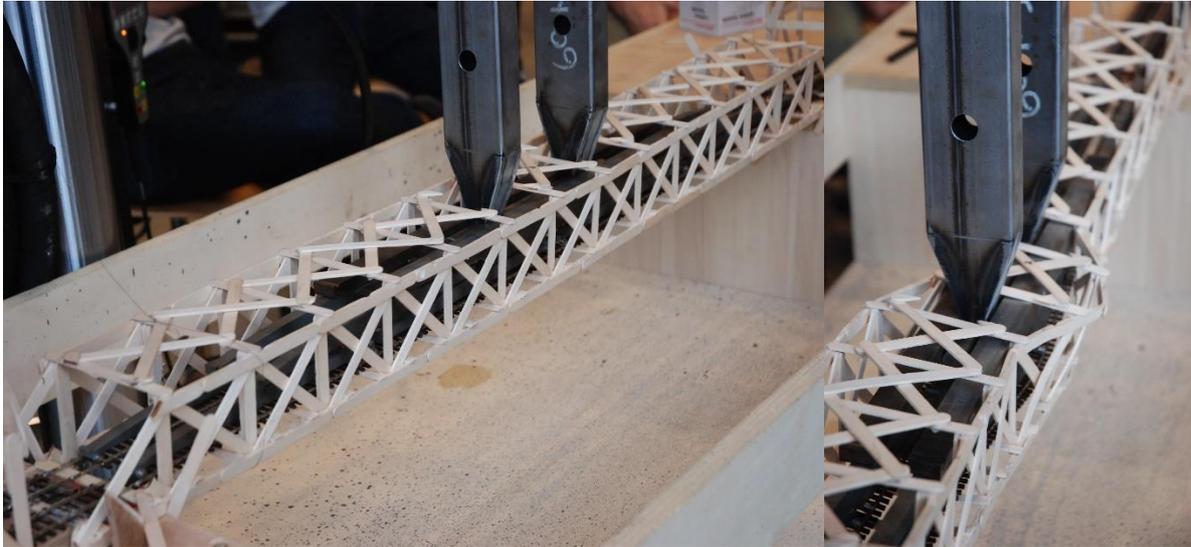


Figure 19 : Pontain-d-idée en début d'essai (à gauche), flambement et déversement -à droite)

Les équipes en fin de projet ont présenté lors d'une soutenance leurs travaux par thème (Comparaison cahier des charges / Modélisation / Expérimental, caractérisation expérimentale, cinématique, modélisation statique). Un travail de mise en commun a donc été effectué et des points d'amélioration sont suggérés pour de futurs projets. En particulier, la phase de communication / mise en commun des premiers essais matériaux aurait dû être plus importante. Certes les valeurs ont été données, mais la concertation et une réelle prise en compte par chaque groupe n'a pas été suffisante. Les techniques de dimensionnement ont été propres à chaque équipe qui a donc développé ses propres points positifs mais également ses manques ou oublis.

6 – Conclusion

Pour revenir sur les essais matériaux, les analyses faites ont été jugées insuffisantes par les élèves, le temps limité des projets impose un rythme qui ne permet pas de pousser plus avant les recherches. Sur ce point, l'équipe enseignante propose des ressources supplémentaires : « *Expérimenter la RdM avec le banc 3R Bed 100 : Caractérisation d'assemblages sollicités en flexion (bâtonnets bois)* » [6] et « *Caractérisation de la variabilité de la résistance en traction de bâtonnets bois* » [7].

Les équipes suggèrent de prendre plus de temps sur les modélisations, en particulier les liaisons dont les collages. Du temps également devrait être réservé à l'observation attentive des comportements des matériaux et des structures lors du premier essais de flexion 3 points sur la maquette de 50 cm.

Néanmoins, il est à noter que globalement, les comportements lors des essais finaux sont cohérents avec les études numériques menées.

La vidéo « *Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance des maquettes de ponts mobiles* » [4] permet de voir les essais réalisés sur les maquettes finales et le paragraphe 8.2 - Essai de résistance de la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile* » [1] présente une synthèse des résultats obtenus.

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-construite-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 : Cinématique*, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-cinematique
- [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]: *Introduction à la modélisation d'une structure métallique sous Revit*, X. Jourdain, mai 2019, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/introduction-ala-modelisation-dune-structure-metallique-sous-revit
- [6]: *Expérimenter la RdM avec le banc 3R Bed 100 : Caractérisation d'assemblages sollicités en flexion (bâtonnets bois)*, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/experimenter-la-rdm-banc-3rbed100-caracterisation-dassemblages-sollicites-en-flexion
- [7]: *Caractérisation de la variabilité de la résistance en traction de bâtonnets bois*, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/caracterisation-dela-variabilite-en-traction-de-batonnets-en-bois