

Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO
Xavier JOURDAIN - Martin PONCELET

Édité le
21/11/2022

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 ;
- 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.

Dans un monde où les modes de locomotions les plus rentables énergétiquement doivent être privilégiés, bateaux et trains sont des solutions pertinentes. Les plateformes multimodales permettant de passer d'un mode à l'autre poussent aussi à ces usages. 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.

Imaginons une embouchure de fleuve devant être empruntée par des péniches et plus rarement par des bateaux porte-conteneurs fraîchement construits, mais devant également être traversée par une ligne de train de fret. Quelle technologie sera la plus pertinente pour créer un pont mobile permettant soit de faire passer les trains, soit de faire passer les bateaux ?

Quelle sera la plus pertinente pour le contexte proposé ?

Cette ressource présente le projet, ses contexte et objectifs, ainsi que les grandes phases de ce défi réalisées par cinq groupes d'élèves. Le cahier des charges tel que donné en début de projet est détaillé dans la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Cahier des charges* » [1]. La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Cinématique* » [2] expose les cinématiques conçues par les cinq équipes. 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

passées par les maquettes finales se retrouvent dans La vidéo « *Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance sur des maquettes de pont mobile* » [4].



Figure 1 : Exemples de solutions : pont levant Jacques-Chaban-Delmas (Bordeaux), pont tournant entre Newcastle upon Tyne et Gateshead (Angleterre), pont basculant Tower Bridge (Londres), sources [5], [6] et [7]

1 – Contexte et objectifs du défi Move Your Bridge 2.0

Énergie et mobilité sont les problématiques mises en jeu dans ce projet. Une approche ingénierie intelligente doit permettre une adaptation aux contraintes de site, une analyse des matériaux disponibles, le choix d'une structure adaptée et enfin la modélisation et la réalisation.

L'objectif est de concevoir et réaliser une maquette de pont ferroviaire de 87 m de portée à la fois mobile et éco-responsable. Il devra donc remplir le cahier des charges suivant :

- Minimiser la quantité de matériaux nécessaire (pondéré 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 ;
- Survivre au passage des trains de fret !

L'évaluation finale portera sur une maquette à l'échelle 1/87^e.

2 – Organisation du projet

2.1 - Déroulement

Le projet se déroule de mi-octobre à fin mai à raison d'une demi-journée par semaine.

Mi-février, une soutenance intermédiaire est organisée dont les points attendus sont :

- Cahier des charges ;
- Définition du problème posé ;
- Réalisation(s) à mi-parcours ;
- Solutions finales envisagées et retenue(s) ;
- Planning d'avancement.

En juin, le rapport final permet de traiter par équipe :

- Démarche du projet ;
- Résultats et exploitations ;
- Présentation de la réalisation ;
- Perspectives.

Puis, toujours en juin, la soutenance permet de comparer les approches par thématiques :

- Caractérisation expérimentale ;
- Cinématique ;
- Modélisation statique ;
- Comparaisons respect du cahier des charges/ modélisation/expérimentation.

Le module se termine mi-juin par une demi-journée de rassemblement des projets et d'essais sur les maquettes.

2.2 - Travail attendu et livrables

La centaine d'heures doit permettre d'établir :

- Un état de l'art ;
- La conception/Réalisation de la structure du pont :
 - Caractérisation des matériaux à disposition ;
 - Étude numérique de la structure choisie ;
 - Étude expérimentale de différents éléments structuraux pour valider les calculs.
- La conception/Réalisation de la cinématique :
 - Modélisation cinématique ;
 - Conception et réalisation des pièces mécaniques.

Les livrables se différencient selon la période :

- Soutenance intermédiaire
 - Maquette d'un tablier de 50 cm de portée qui aura été testé jusqu'à rupture ;
 - Présentation des calculs *a priori* (réalisés avant l'essai) ;
 - Analyse des éventuelles différences entre calcul et résultats d'essai ;
 - Présentation de la cinématique choisie pour le futur pont mobile.
- Soutenance finale
 - Maquette de pont mobile prête à être testée !

Dans un contexte alliant écologie et résistance, le pont doit répondre à des points essentiels :

- Calcul de l'impact CO₂ équivalent ;
- Mesure de l'énergie consommée lors d'un cycle montée - maintien - descente ;
- Franchissement des deux voies par une locomotive tractant un wagon de fret ;
- Chargement jusqu'à rupture.

La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : cahier des charges* » [1] permet une information complète du cahier des charges ainsi que des critères d'évaluation.

3 – Matériaux, matériels, et équipes

Pour réaliser les maquettes intermédiaire et finale, les cinq groupes disposent de bâtonnets de bois, de colle à bois, de fil, de deux motoréducteurs, d'un interrupteur et de deux butées de fin de course.



Figure 2 : Matériaux et matériels disponibles hors commande spéciale

Après l'expérience de 2019-2020 [8], il a été décidé que les bâtonnets seraient sans colorants et donc identiques pour tous les groupes. La précédente expérience avec des bâtonnets de couleurs pour identifier visuellement les groupes a révélé que la teinture du bois modifiait sensiblement ses caractéristiques mécaniques.

Les motoréducteurs ont également été choisis en regard de cette première expérience où de nombreuses liaisons complètes par adhérence internes n'ont pas tenu et glissaient au fur et à mesure des utilisations.

Après demande et discussion auprès de l'équipe encadrante, d'autres matériaux et matériels peuvent être commandés.

Les cinq équipes sont constituées de cinq à six personnes.

4 – Première partie du défi, octobre-février

Cette première partie du projet permet aux équipes d'étudier l'existant afin de pouvoir faire un choix de cinématique qu'il faut ensuite modéliser et valider par des essais.

Les équipes mènent également une campagne d'essais sur les bâtonnets et assemblages de bâtonnets.

Enfin des maquettes du tablier du pont de 50 cm sont conçues, modélisées et réalisées afin d'être soumises à des essais de flexion 3 points. Un premier dimensionnement des futures maquettes de pont est établi et modélisé pour validation et/ou modification après les essais faits sur les maquettes de tablier.

4.1 - Caractérisation des matériaux

Les bâtonnets ont été mesurés (tableau 1) puis des essais de traction, flambement, flexion ont été menés sur des bâtonnets simples, des bâtonnets doubles collés, sur des assemblages en T, en I ... afin de caractériser le matériau.

Longueur [mm]	Largeur [mm]	Epaisseur [mm]	Masse volumique [kg/m ³]
114 ±1,4	9,6 ±1	2,02 ±0,4	630 ±12

Tableau 1 : Dimensions moyennes des bâtonnets, intervalle de confiance : 95 %

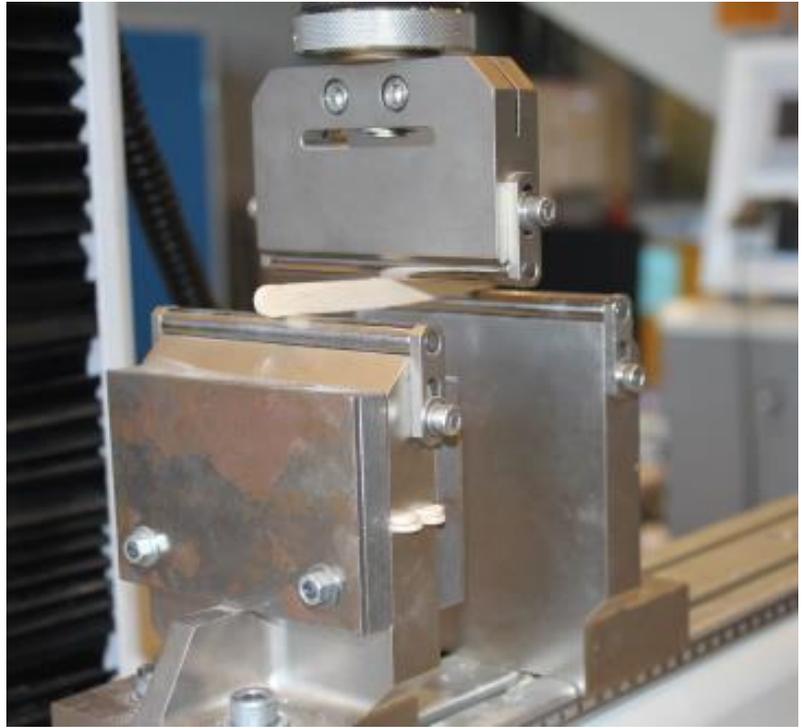


Figure 3 : Exemples de campagne d'essai : à gauche traction sur un bâtonnet simple (avec extrémités renforcées), à droite flexion 3 points sur deux bâtonnets collés posés sur axe fort

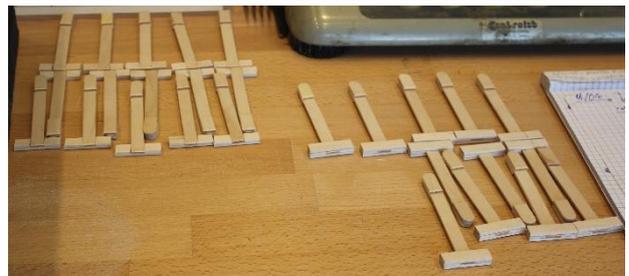


Figure 4 : Exemples d'assemblages réalisés

Les cinq équipes ont constaté, après les essais de traction, la grande variabilité de la contrainte à la rupture d'un bâtonnet à l'autre comme le montre les figures 5 et 6. Cela implique d'utiliser une approche statistique pour exploiter les résultats expérimentaux (pour aller plus loin sur ce point,

voir la ressource « *Caractérisation de la variabilité de la résistance en traction de bâtonnets bois* » [9].

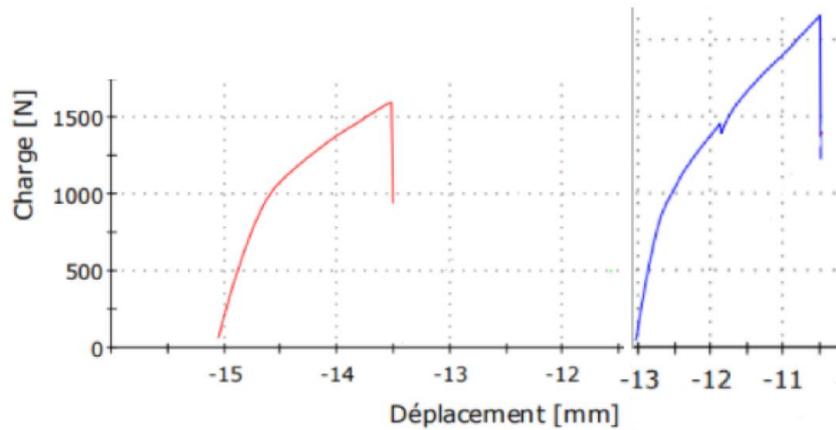


Figure 5 : Exemples de courbes de traction de bâtonnets simples jusqu'à la rupture, $F_{max}(rouge) \approx 1500N$, $F_{max}(bleu) \approx 2200N$

	Contrainte max (MPa)	E (GPa)	Force max (N)
	105	12,7	2098
	87	19,73	1743
	65	11,4	1300
	113	14,9	2278
	114,8	16,5	2297
	117,7	17,97	2340
	88,8	11,6	1776
	118	15,47	2359
	87,8	8,2	1756
	159	18,5	3181
	103,2	11,6	2063
	93,4	17,6	1869
Moyenne	104,391666666667	14,6808333333333	2088,33333333333
Ecart-type	23,3976866895905	3,55569059481567	467,838032060695
Variabilité	22,4133663506894	24,2199506940955	22,4024596357875

Figure 6 : Exemples de valeurs relevées et calculées pour quelques essais de traction de bâtonnets simples jusqu'à rupture

L'analyse statistique permet de déterminer une charge pour laquelle 95% des bâtonnets n'ont pas atteint la charge de rupture. Figure 7 se trouvent des exemples de résultats d'essais de traction, avec la gaussienne identifiée (en supposant que la valeur de la charge à rupture suive une loi normale).

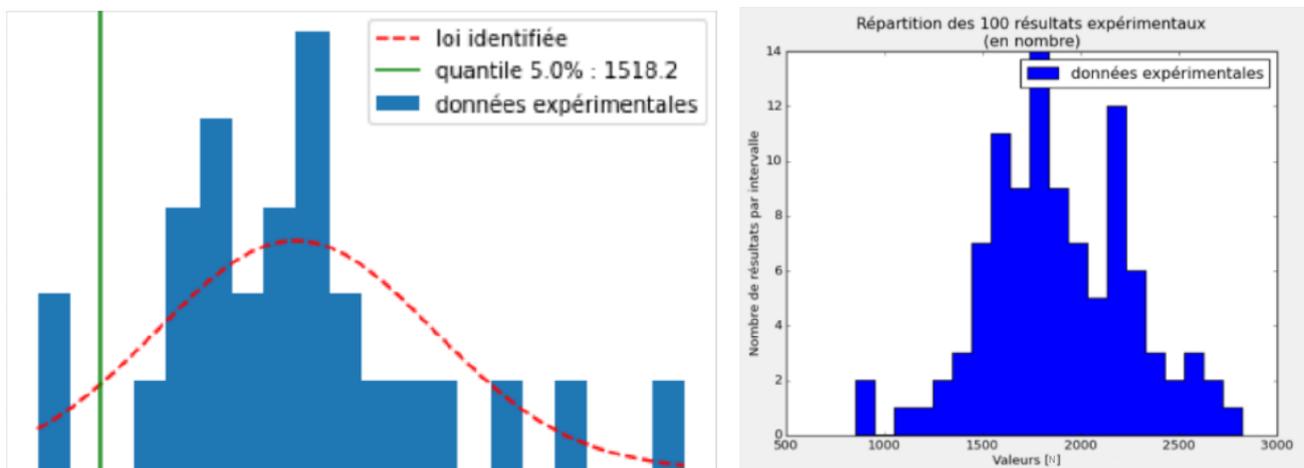


Figure 7 : Exemples de répartition des essais de traction, gaussienne tracée à gauche

Essai de traction bâtonnet simple	F_{\max} à 95% [N]	$R_{95\%}$ [MPa]	E [GPa]
Groupe Louis-Vuipont	1200	60	11,3
Groupe Pont-ain-d'idée	1400		15
Groupe Pont de l'Ascension	1280	71	14,7
Groupe Ponta Cana	1380	69	14
Groupe (Vis le Pon) ^T	870	43	6,7

Tableau 2 : Exemples de résultats obtenus par les cinq groupes

Les assemblages collés ont également été étudiés et testés selon leur état de surface ou la longueur de collage (figure 8). Certains groupes utilisant des câbles, ceux-ci ont évidemment été étudiés afin de vérifier la rupture annoncée par le constructeur pour un chargement d'une masse de 13 kg. La machine de traction ne pouvait pas être utilisée pour ces essais, des câbles d'une dizaine de mètre ont donc été accrochés avec des masses à leurs extrémités. Les câbles cassent pour un chargement d'une masse de 5kg maximum.

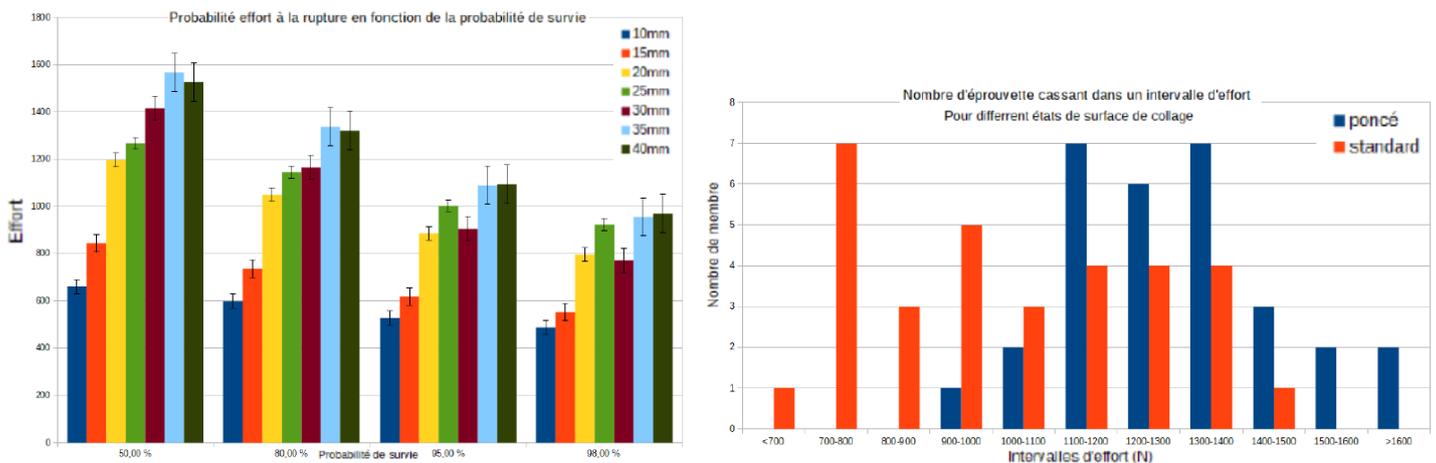
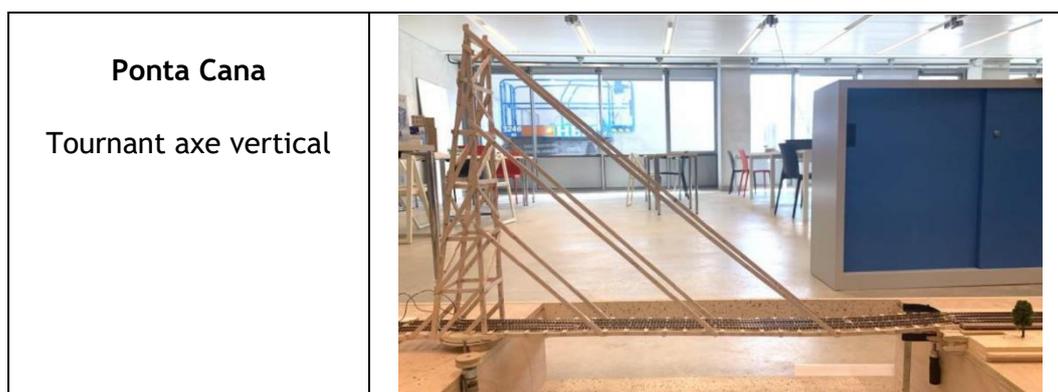


Figure 8 : Exemple d'essais réalisés : à gauche, contrainte en fonction de la probabilité de survie pour différentes longueurs de collage, à droite, répartition des efforts à la rupture pour des collages à plat sur bois poncé ou non

4.2 - Cinématiques

L'étude de l'existant réalisée dans chaque équipe permet un choix de cinématique pour les futurs ponts mobiles. Le groupe Ponta Cana a fait le choix d'un pont tournant sur un axe vertical, les groupes (Vis le Pon)^T et Louis-Vuipont ont choisi un pont basculant à deux tabliers, le groupe Pont de l'Ascension a choisi un pont basculant à un tablier et enfin le groupe Pont-ain-d'idée a fait le choix d'un pont levant (figure 9).

La ressource « Move Your Bridge 2.0 : Cinématique » [2] expose plus en détail les cinématiques définitives conçues par les cinq équipes.



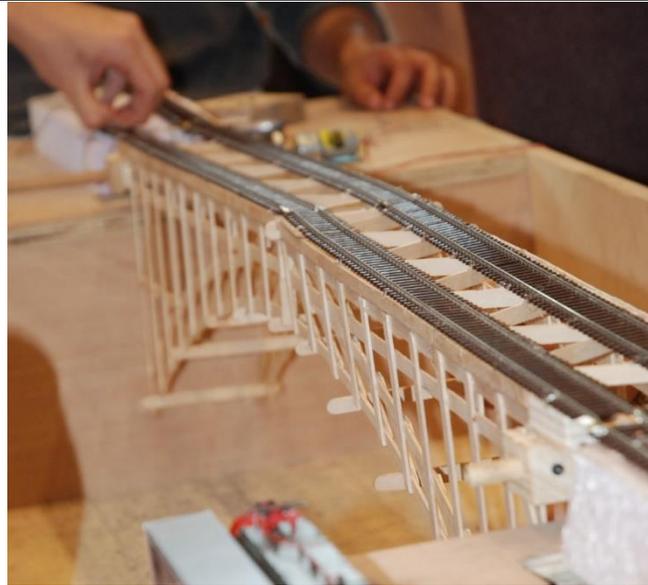
(Vis le Pon)^T

Basculant deux tabliers



Louis-Vuipont

Basculant deux tabliers



Pont de l'Ascension

Basculant un tablier



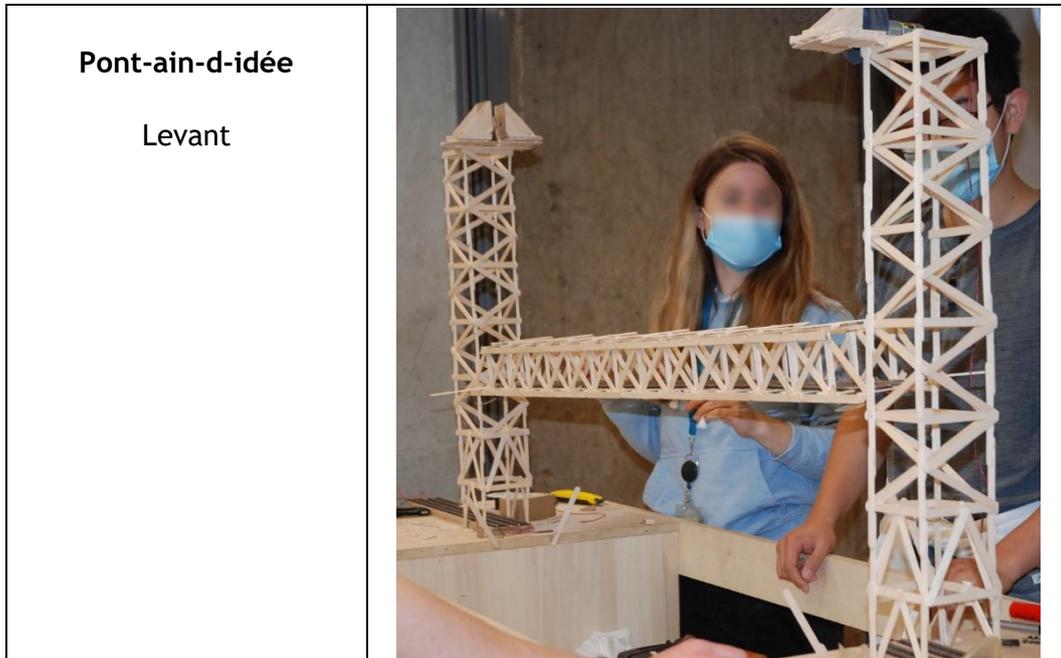


Figure 9 : Cinématiques choisies par les équipes pour les maquettes définitives

Les ponts sont ensuite modélisés avec les cinématiques choisies, les contraintes géométriques sont vérifiées. Un premier dimensionnement est établi et modélisé, sa validation sera établie après les essais réalisés sur la maquette du tablier et les éventuelles modifications et ajustements.

4.3 - Maquettes tablier

Chaque équipe réalise une maquette de 50 cm du tablier du futur pont tel qu'envisagé, avant de la soumettre à un essai de flexion 3 points. L'objectif est de valider les choix faits, de modifier certaines conceptions s'avérant insuffisantes, d'ajuster les valeurs si nécessaires.

Les maquettes ont été réalisées à l'aide de gabarits et pointes, des coupes ont été faites, les assemblages collés maintenus sous presse plusieurs jours, les câbles accrochés...

Les maquettes sont modélisées et l'essai de flexion 3 points simulé. Ces résultats sont alors mis en comparaison avec l'essai réel (présenté au paragraphe suivant) afin de pouvoir concevoir la maquette définitive avec des modélisations les plus réalistes possible.

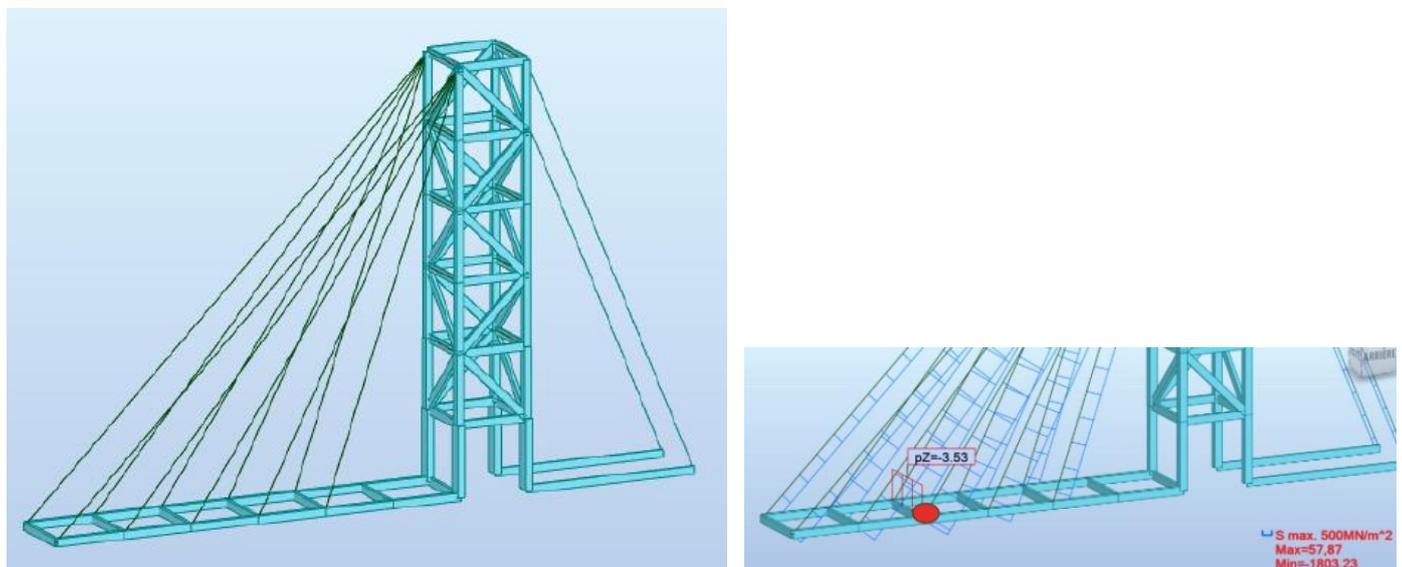


Figure 10 : Exemple de modélisation des maquettes 50 cm et simulation de point de rupture

4.4 - Essai flexion 3 points

Les maquettes de 50 cm sont installées sur la machine d'essai pilotée en déplacement, des mesures d'effort et de déplacement sont prises et visualisées sur écran afin de suivre l'essai. Les groupes doivent indiquer l'ordre de grandeur de l'effort maxi déterminé par simulation.

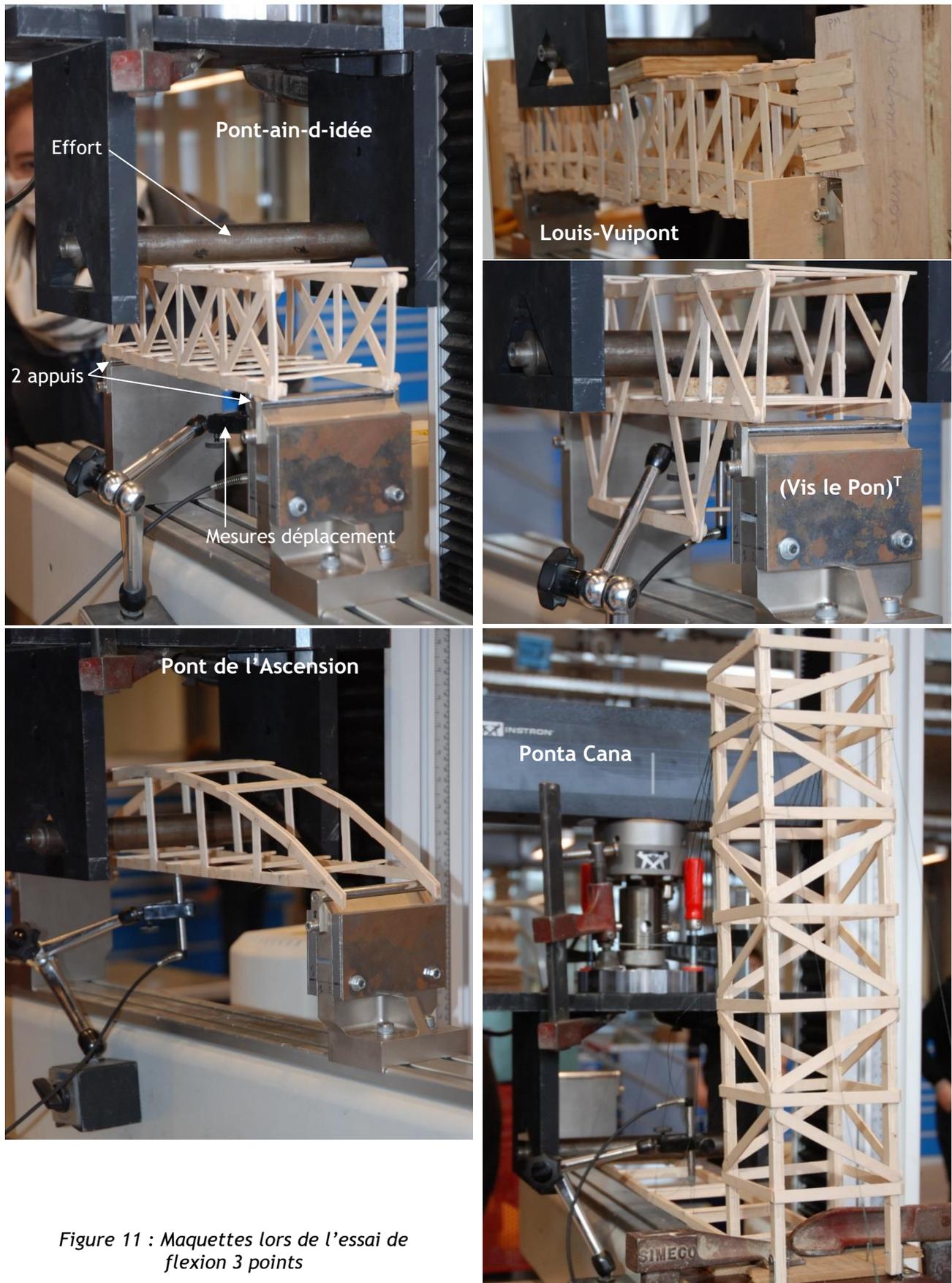


Figure 11 : Maquettes lors de l'essai de flexion 3 points

Les cinq maquettes ont subi l'essai de flexion 3 points qui a généré des phénomènes de flambement locaux, à l'échelle du bâtonnet, voire globaux (aussi appelés déversement) pouvant être importants et des ruptures de câble. Les modélisations et simulations de ces maquettes avant essai ont permis de déterminer correctement ou non les zones de faiblesse et l'effort de fin d'essai prévu.

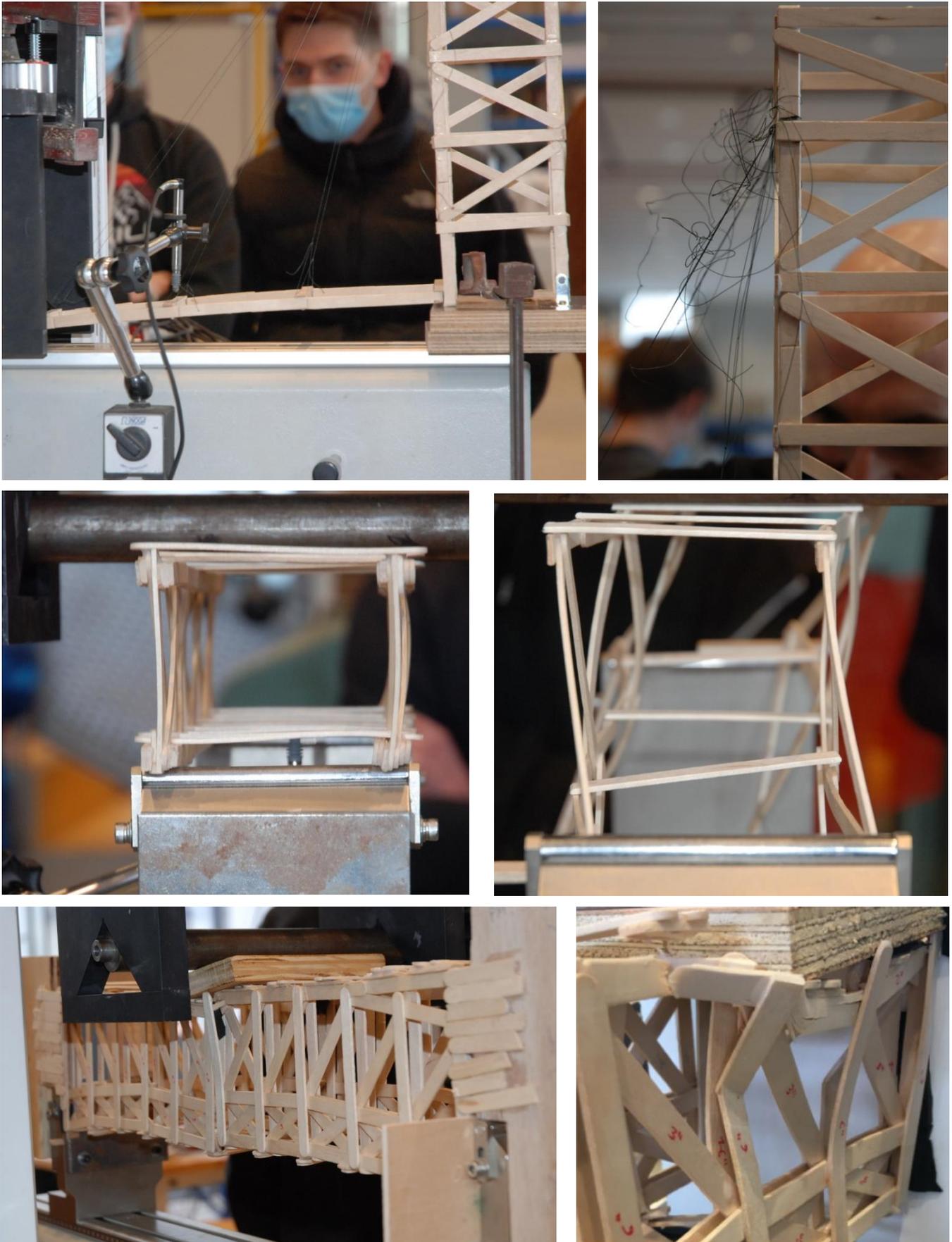


Figure 12 : Exemples de maquettes de 50 cm en fin d'essai flexion 3 points

La prise en compte des résultats de ces essais a permis de valider ou d'ajuster les modélisations et d'améliorer les conceptions. Par exemple, les câbles installés sur une des maquettes ont eu un comportement mal maîtrisé, les câbles ont été dans la suite du projet remplacés par des assemblages de bâtonnets.

5 – Soutenance intermédiaire, mi-février

Les équipes disposaient de 10 minutes de présentations suivies de 15 minutes de questions/réponses, des points étaient particulièrement attendus :

- Présentation et justification des essais réalisés en amont de la fabrication de la structure à tester avant la soutenance intermédiaire (tests sur bâtonnets seuls, tests sur assemblages, etc.) ;
- Présentation et justification de la modélisation adoptée, des hypothèses choisies et des quantités d'intérêts observées (effort ? contrainte ? déplacement ?) ;
- Présentation du chargement et des conditions aux limites + analyse du mode de rupture de la partie de tablier réalisée testée en flexion ;
- Analyse des différences de comportement expérience réelle VS numérique => critique du modèle numérique ;
- Proposition d'améliorations à apporter sur le modèle numérique pour mieux prévoir la ruine de l'ouvrage final ;
- Présentation de la cinématique prévue ;
- Présentation de l'architecture globale prévue.

6 – Seconde partie du défi, mars-juin

Les équipes travaillent désormais sur la maquette finale du pont ferroviaire mobile de 87 m de portée. Chacun organise les tâches : finalisation des modélisations et simulations, réalisation des parties mobiles et fixes des maquettes, réalisation du montage liés à la motorisation, câblage électrique, fixation des rails...

6.1 - Modélisation

Avant de réaliser la construction matérielle des ponts, une étude statique est effectuée pour savoir si les ouvrages vont soutenir la charge imposée par le cahier des charges. Afin d'assurer la stabilité des ponts sous la charge du train, ils ont été modélisés sous *Robot Structural Analysis (RSA)*. Ce logiciel permet de dimensionner les ouvrages en fonction des matériaux précédemment caractérisés.

La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Modélisation* » [3] les études statiques effectuées pour concevoir les maquettes des ponts résistantes à une charge imposée.

6.2 - Réalisation des maquettes

La réalisation commence par le traitement de la matière première, les bâtonnets peuvent ainsi être triés visuellement puis poncés pour augmenter la résistance des collages. La maquette est alors scindée en surfaces élémentaires, par exemple les arches sont donc réalisées indépendamment, les surfaces identiques ou symétriques sont réalisées à l'aide de patron imprimé échelle 1. Une équipe a réalisé des gabarits en bois permettant un collage des bâtonnets comme dans un moule. Quoiqu'il en soit les réalisations pratiques des maquettes ont nécessité diverses techniques afin d'obtenir des géométries les plus précises possibles et les collages les plus efficaces, figures 13 et 14 se trouvent divers exemples de ces techniques.

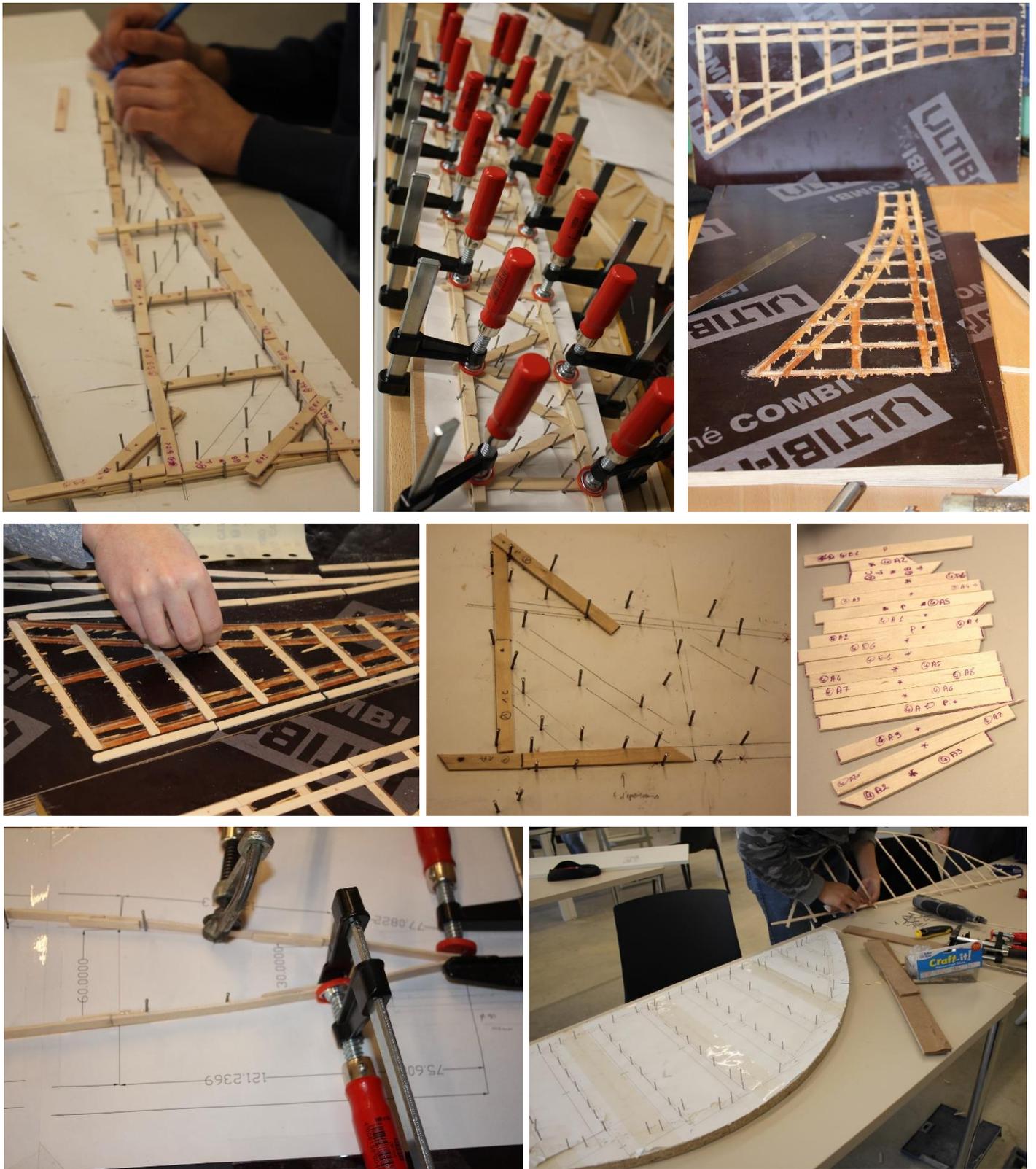


Figure 13 : Exemples de gabarits réalisés pour la fabrication des maquettes



Figure 14 : Exemples de phases d'assemblage

6.3 - Motorisation

Selon les équipes et la mobilité du pont choisie, un ou deux moteurs ont été montés ; ceux-ci ont été installés en haut des piles ou sur la rive (figure 9). La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Cinématique* » [2] permet de comprendre les solutions des cinq équipes et le positionnement des motorisations.

6.4 - Transmission du mouvement

Pour le pont basculant à deux tabliers « Louis Vuitton », les moteurs sont directement placés sur les axes de rotation. Les quatre autres ponts nécessitent des renvois de poulie et éventuellement des contre-poids (figure 11).

La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Cinématique* » [2] expose les solutions de transmissions des équipes.

6.5 - Guidage du tablier

À la fermeture du pont, les tabliers doivent revenir dans une position permettant la continuité des rails et la continuité électrique. Le guidage du tablier a dû être conçu en fonction selon la cinématique choisie.

La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Cinématique* » [2] expose les solutions de guidage des équipes.

7 – Écoconception

La problématique principale liée à la minimisation du coût carbone entraîne une utilisation minimale de matière en particulier d'acier ou de plastique puisque leur coût carbone est important. Les équipes ont donc essayé de les remplacer par des alternatives plus écologiques comme des poulies et axes en bois.

La minimisation du nombre de bâtonnets comme l'utilisation parcimonieuse et judicieuse de la colle permettent un bénéfice sur la masse, donc un bénéfice écologique aussi bien en utilisation de matière première qu'en énergie pour réaliser le cycle ouverture/fermeture. En toute fin de projet, les bâtonnets et la colle restantes ont été pesés, les longueurs de câble et fil électrique mesurées, tous les éléments ajoutés (poulie, contrepoids, ...) ont été mesurés afin d'établir un coût carbone de chaque projet, un des critères d'évaluation du défi.

	Ponta Cana	Pont-ain-d-idée	Louis Vuipont	Pont de l'ascension	(Vis le pon) ^T
Masse bâtonnets [kg]	0,296	0,5819	0,394	0,414	0,391
Masse bois autre [kg]	0,05135			0,054	
Total bois [kg]	0,35035	0,5819	0,394	0,468	0,391
Masse colle [kg]	0,0829	0,1422	0,0642	0,0537	0,1178
Acier [kg]	0,009633				
Moteur [kg]	0,089	0,089	0,27	0,089	0,178
Longueur câble [m]	1,76	3,87		5	8,1797
Longueur fil élec [m]	0,5	1,64	2,52	2	5,54
Plastique [kg]		0,0315		0,15	
Granite [kg]				0,285	

Tableau 3 : Bilan des masses de matériaux utilisés par les cinq équipes

Équipe	Kg eq CO ₂
Ponta Cana	0,523
Pont-ain-d-idée	0,811
Louis Vuipont	0,868
Pont de l'ascension	0,926
(Vis le pon) ^T	0,967

Tableau 4 : Bilan du coût carbone des cinq équipes [kg eq CO₂]

8 – Maquettes finales

Les maquettes ont été finalisées en juin. Elles ont passé deux types de critères. Une première partie des critères exigés est l'ouverture et la vérification des gabarits fluviaux, puis la tenue en position ouverte, la fermeture et enfin le passage du train (continuités des rails et électrique). Le dernier critère est l'essai en résistance de chaque maquette en position fermée.

8.1 - Première série de tests

Chaque maquette est installée sur le support décrit dans la ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Cahier des charges* » [1], les tests se font en trois phases :

- Mise en position « ouverte » du pont
- Vérification du gabarit fluvial New Panamax (tous les ponts ont validé ce critère).

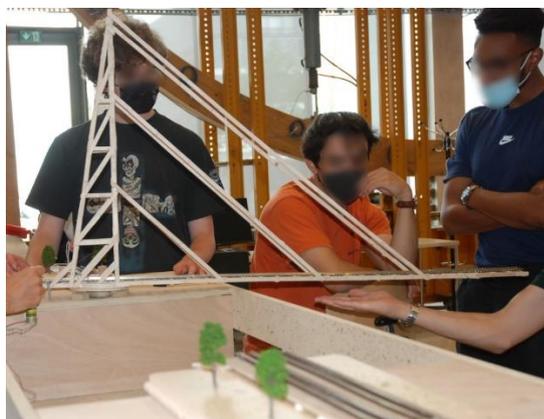
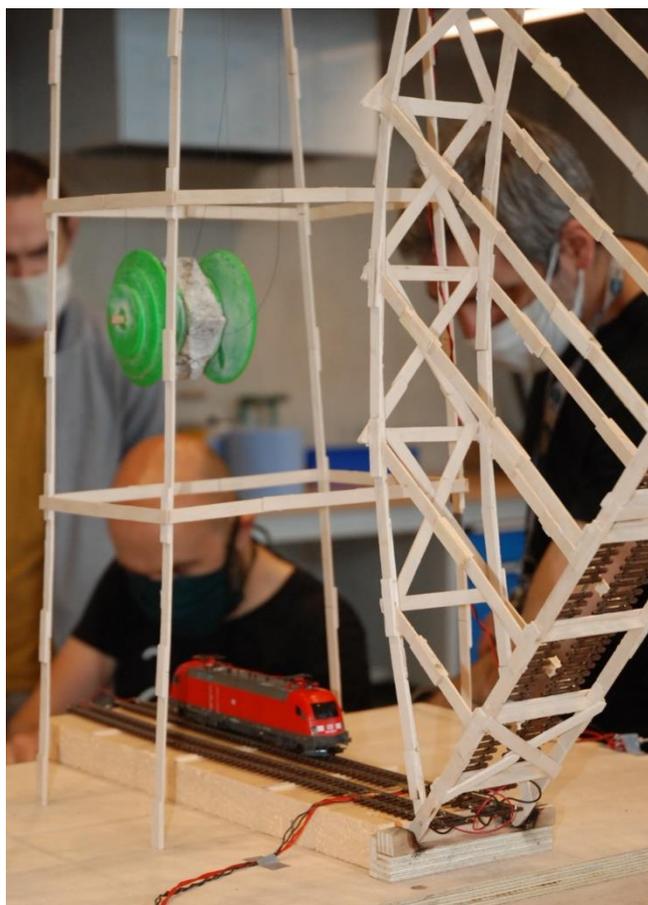


Figure 15 : Exemples de vérification du gabarit fluvial New Panamax

- Mise en position « fermée » du pont
 - Vérification du gabarit fluvial Freycinet (péniche) (tous les ponts ont validé ce critère) ;
 - Passage des trains sur les deux voies : continuité des rails assurée s'il n'y a pas de déraillement, continuité électrique validée si les trains vont d'une berge à l'autre (deux des ponts ont eu des soucis : passage à l'interface rive-tablier ou déraillement du train).

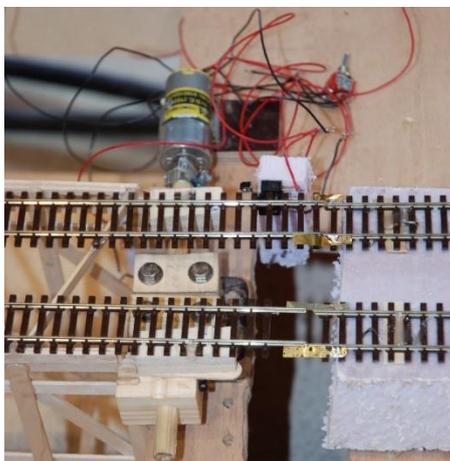


Figure 16 : Exemples de vérification, pont fermé, du passage du train sur les deux voies

- Réalisation d'un cycle (mesure d'énergie) : Ouverture - Tenue en position ouverte 10 secondes - Fermeture.

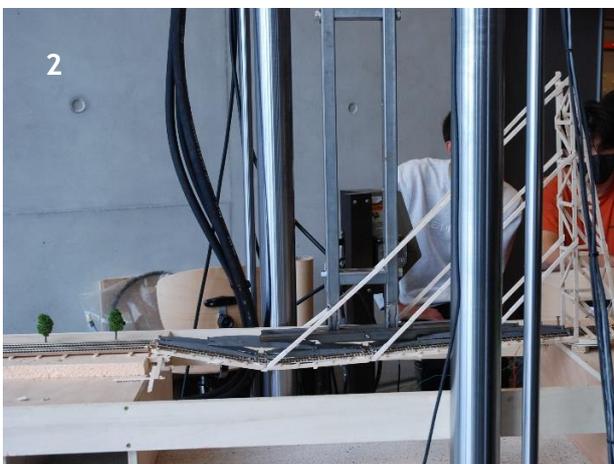
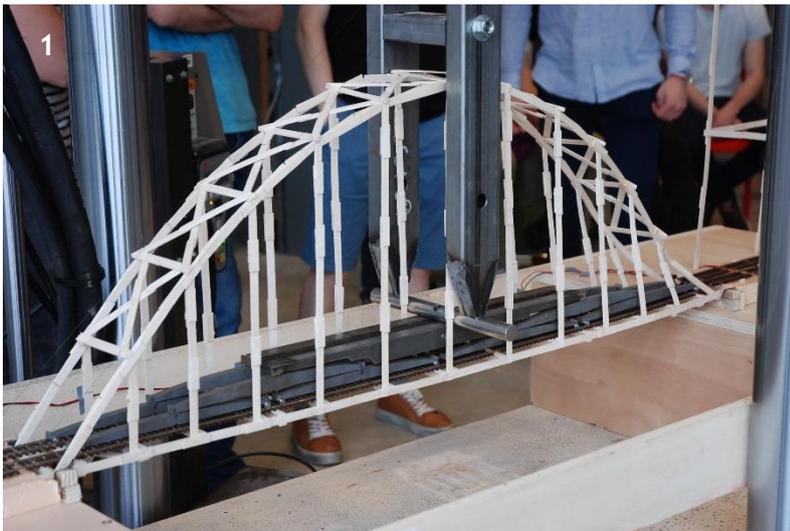
Équipe	Énergie [mWh]
Ponta Cana	Non fonctionnel
Pont-ain-d-idée	14,7
Louis Vuipont	Non fonctionnel
Pont de l'ascension	9,2
(Vis le pon) ^T	19,7

8.2 - Essai de résistance

Les ponts sont en position fermée sur un banc d'essai, et ils sont chargés par un pilotage en déplacement (~ 1 mm/min soit ~ 15 μ m/sec), via un système de chargement figurant les essieux de quatre wagons, jusqu'à rupture c'est-à-dire lorsque l'effort chute de 5% par rapport à l'effort maximal atteint.



Figure 17 : Banc d'essai et système de chargement



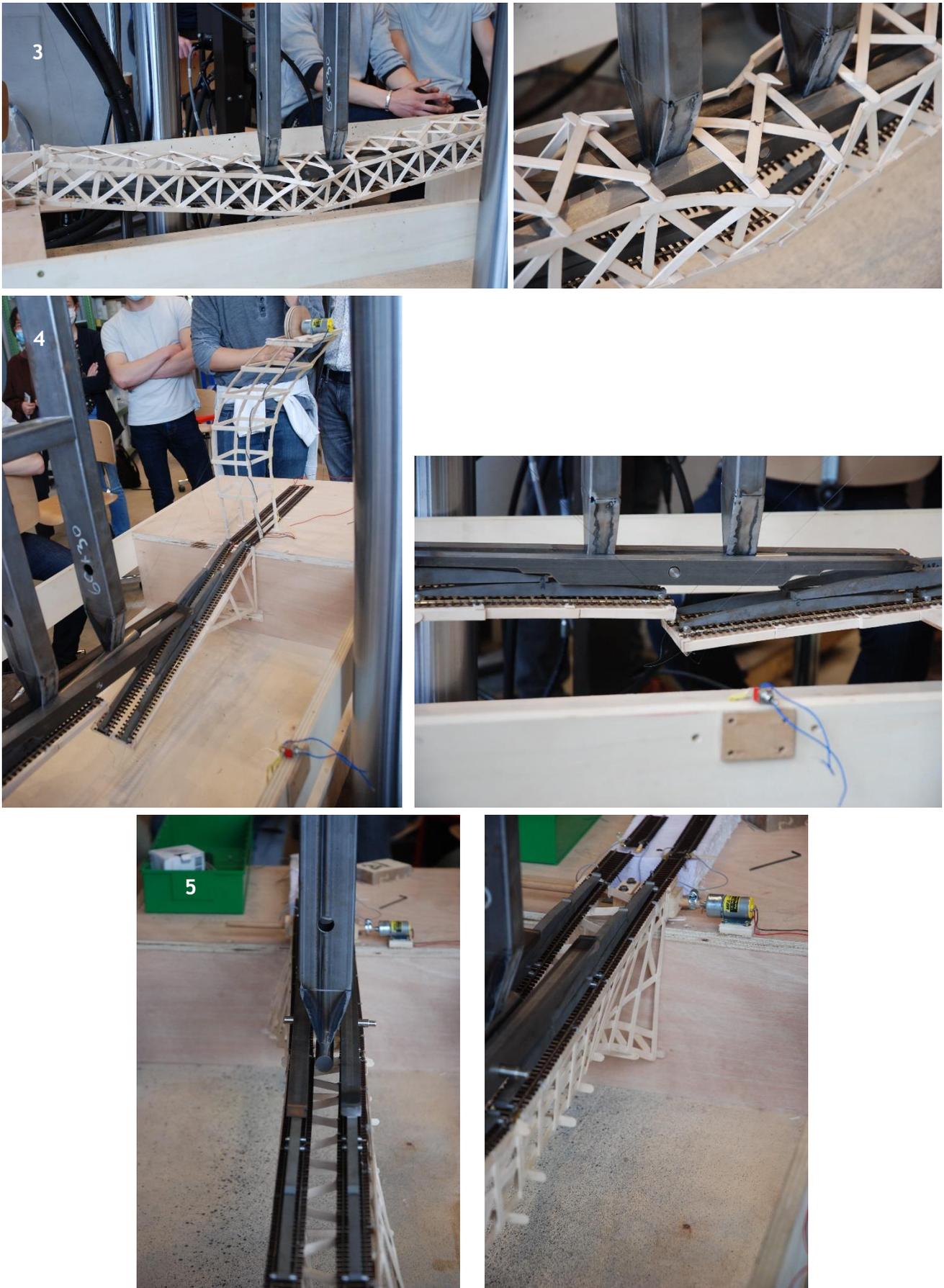


Figure 18 : Les maquettes en fin d'essai de résistance (941 N visés)

Les ruptures observées sont de deux types : soit la rupture d'un point faible (d'un collage pour l'exemple 1 figure 18, ou d'un bâtonnet pour l'exemple 2, ou l'exemple 4 par flambement) soit le déversement du tablier (exemples 2, 3 et 5 figure 18).

L'effort maximal visé était 941 N. Aucun pont n'a atteint cette valeur, le plus résistant est environ à la moitié de la charge visée. Le plus faible tient environ 17% de l'effort maximal visé.

Équipe	Effort maxi [N]
Ponta Cana	455,14
Pont-ain-d-idée	218,14
Louis Vuipont	158,14
Pont de l'ascension	372,84
(Vis le pon) ^T	381,67

Tableau 5 : Résultats des essais de résistance

Notons que le pont qui résiste le mieux présente le meilleur bilan carbone à la réalisation, et le pont le moins résistant, sans avoir le moins bon bilan en coût carbone, n'est pas économe pour la planète néanmoins ! Ces deux ponts précisément ne présentent pas de bilan énergétique de fonctionnement puisqu'au moment de la mesure, un élément de transmission était défaillant.

La ressource-vidéo « *Move Your Bridge 2.0 : Tests et essais de résistance sur des maquettes de pont mobile* » [4] montre les diverses épreuves passées par les maquettes.

9 – Soutenance finale

Afin de faciliter la communication entre les équipes et encourager les collaborations, les soutenances finales ont été organisées par thématique. Ainsi, chaque équipe a délégué un représentant afin d'établir avec ses collègues un bilan des cinq réalisations sur quatre thèmes :

- Comparaison cahier des charges / Modélisation / Expérimental
- Caractérisation expérimentale
- Cinématique
- Modélisation statique

Cet exercice a permis des travaux de synthèse et de réflexion très pertinents.

10 – Conclusion

Pédagogiquement ce défi fût une grande source de motivation pour les étudiants qui n'ont pas compté leurs heures pour mener à bien leur projet. Ils ont pu y développer de nombreuses compétences :

- Mettre en place une démarche scientifique empirique pour définir le comportement des bâtonnets et des assemblages ;
- Mettre en œuvre une démarche numérique sur un problème réel en augmentant graduellement la complexité des modèles utilisés (calcul élastique, puis du second ordre, analyse limite, champ aléatoire sur les propriétés des matériaux, positionnement aléatoire de défauts géométriques, ...) ;
- Effectuer des choix éco-responsables basés sur une démarche scientifique ;
- Apprendre à communiquer efficacement en intra et inter équipes et également lors des soutenances ;
- Développer des connaissances : comportement des matériaux, modèles de calcul de structure, utilisation de logiciels, ... ;
- Apprendre le langage lié aux projets (appel d'offre, MOA, MOE¹).

¹ MOA : maître d'ouvrage ; MOE : maître d'œuvre.

Références :

- [1]: Move Your Bridge 2.0 : Cahier des charges, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-cahier-des-charges
- [2]: Move Your Bridge 2.0 : Cinématique, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-2-cinematique
- [3]: Move Your Bridge 2.0 : Modélisation, 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, 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-surdes-maquettes-pont-mobile
- [5]: Par CC BY-SA 3.0, A. Delesse (Prométhée), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25135859>
- [6]: Par Bob Castle – Commons, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5964109>
- [7]: Par Mvkulkarni23 – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16088297>
- [8]: Move Your Bridge : défis étudiants, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, décembre 2019, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-defis-etudiants
- [9]: 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-de-la-variabilite-en-traction-de-batonnets-en-bois