

Move Your Bridge 2.0 : Cahier des charges

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.*

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 RoboCup, 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 du défi Move Your Bridge est de concevoir et réaliser la maquette d'un pont ferroviaire de 87 m de portée à la fois mobile et éco-responsable. Cette ressource présente le cahier des charges tel que donné aux étudiants en début de projet.

La ressource « *Move Your Bridge 2.0 : Concevoir et construire une maquette de pont mobile* » [1] présente le contexte et les grandes étapes de ce projet. 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 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].

1 – Présentation du défi Move Your Bridge

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 (portée de 1 m, figure 1). Lors du défi 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 connectivité électrique (chargement L_1W_1) ;
- 8 wagons de fret seront stationnés simultanément au milieu de l'ouvrage de franchissement (chargement W_8), puis chargé uniformément et progressivement jusqu'à rupture. Le pont devra résister à la 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.

Une note de calcul justifiera les efforts aérodynamiques dus au vent que devront supporter les ponts.

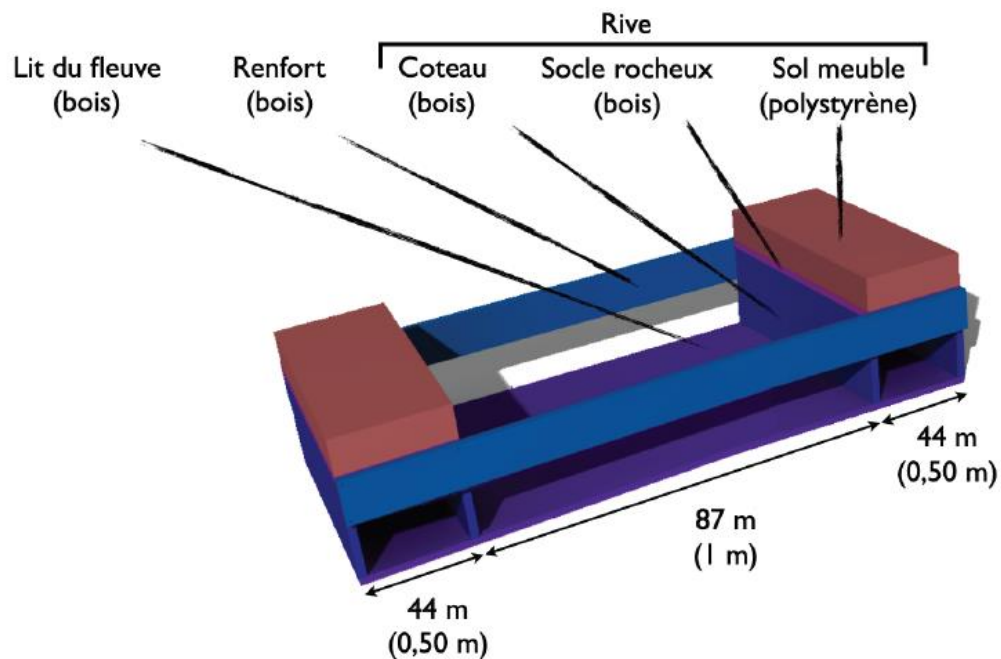


Figure 1 : Schéma du support de la future maquette

2 – Éléments fournis

Les éléments suivants seront fournis à chaque équipe concurrente :

- Une rivière et deux rives :
 - Socle avec 2 rives espacées de 1,00 m ;
 - Chaque rive a une largeur de 50 cm ;
 - Les rives sont constituées :
 - En surface : d'un sol meuble d'une hauteur de 3 cm par défaut (aussi possible en 6 cm) ;
 - En profondeur : d'un sol rocheux qui permet d'y ancrer les fondations ;
 - D'un coteau : l'ancrage des fondations étant possible sur la partie rocheuse ;
- Des poutres en bois (bâtonnets de glace) ;
- De la colle à bois ;
- Du fil ;
- Des rails ;
- Une alimentation électrique et des fils électriques, des moteurs et inverseurs.

Les éléments suivants pourront être fournis après **délibération de l'équipe encadrante** à chaque équipe mais avec potentiellement un délai dû à la commande et la livraison :

- Acier (pièces de taille réaliste correspondant à 1 m^3 pour la taille réelle) ;
- Bois massif (pièces de taille réaliste correspondant à 1 m^3 pour la taille réelle) ;
- Pièce à réaliser en impression 3D (pièces de taille réaliste correspondant à 1 m^3 pour la taille réelle) ;
- Pièce de fournisseur dans des cas spécifiques où la précision et la résistance ne peuvent être obtenues par impression 3D (pignons en injection plastique par exemple).

3 – Critères d'évaluation de la partie défi

L'évaluation de la partie défi repose sur des critères regroupés en 5 grandes catégories.

1. Conception et construction éco-responsable :
 - Nombre de poutres utilisées ;
 - Quantité de colle (= produit chimique) ;
 - Quantité de plastique (= produit chimique & coût énergétique) la plus faible possible ;
 - Quantité d'acier ;
 - Nombre de moteur(s).

⇒ Toutes ces quantités seront pondérées par leur empreinte carbone et intégreront les matériaux consommés sur toute la durée du projet, des phases de conception jusqu'à la réalisation finale.

2. Résistance optimisée aux charges ferroviaires :
 - La charge à rupture du pont doit être la plus proche possible du chargement optimum (941 N réparti sur les essieux de 2x4 wagons au centre de l'ouvrage de franchissement) mais doit impérativement supporter cette charge.
3. Évaluation des efforts dus au vent :
 - La position et la valeur de la résultante des efforts aérodynamiques dus à un vent arrivant perpendiculairement au pont seront calculées pour chaque partie du pont (tablier, pile(s) le cas échéant).
4. Fonctionnement éco-responsable & efficace :
 - Énergie consommée pour un cycle ouverture du pont - tenue en position ouverte pendant 10 secondes - fermeture du pont ;
 - Temps cumulé ouverture + fermeture.
5. Respect impératif du cahier des charges (Géométrie, fonctionnalité et résistance) :
 - Passage du gabarit fluvial de position ouverte (figure 3) ;
 - Passage du gabarit fluvial de position fermée ;
 - Passage du gabarit ferroviaire en position fermée (figure 2) ;
 - Passage de la locomotive tractant deux wagons successivement sur chacune des deux voies (chargement L_1W_1) ;
 - Stationnement de 8 wagons au milieu de l'ouvrage de franchissement (chargement W_8), utilisés pour le test de résistance.

La chronologie du défi sera la suivante :

- Réalisation d'un cycle [montée (ou autre mouvement de libération du gabarit) - tenue en position ouverte 10 secondes - descente (ou autre mouvement de retour en position initiale du tablier)] ;
- Mise en position ouverte du pont ;
- Vérification des gabarits fluviaux ;
- Mise en position fermée du pont ;

- Chargements L_1W_1 et W_8 ;
- Chargement jusqu'à rupture (chute d'effort de 5% par rapport à l'effort maximum atteint).

4 – Notation

La note finale est définie comme suit (détails définis ci-dessous) :

$$N = W_{V1} W_{V2} G_{F1} G_{F2} (P_{Fab_Éco} B_{Fab_Éco} + P_{Opt} B_{Opt} + P_{Fonct_Éco} B_{Fonct_Éco} + P_{Fonct_Eff} B_{Fonct_Eff} + P_{Art} B_{Art})$$

Les 4 premiers critères sont impératifs :

- Critère **Gabarits et Chargements W_{V1} et W_{V2}**
 - $W_{V1} = 1$ si Franchissement L_1W_1 réussi sur la voie 1, 0 sinon
 - $W_{V2} = 1$ si Franchissement L_1W_1 réussi sur la voie 2, 0 sinon
- Critère **Respect des gabarits fluviaux**
 - $G_{F1} = 1$ si le gabarit fluvial pont fermé est respecté, 0 sinon
 - $G_{F2} = 1$ si le gabarit fluvial pont ouvert est respecté, 0 sinon

Les critères suivants sont graduels :

- Critère **Conception et construction éco-responsable**
 - Barème : $B_{Fab_Éco} = 5$ points
 - Pondération : $P_{Fab_Éco} = (C_{Max} - C_{Équipe}) / (C_{Max} - C_{min})$
 - C_{Max} = coût en kg CO₂ éq des matériaux utilisés par l'équipe la moins éco-responsable
 - $C_{Équipe}$ = coût en kg CO₂ éq des matériaux utilisés par l'équipe concernée
 - C_{min} = coût en kg CO₂ éq des matériaux utilisés par l'équipe la plus éco-responsable
- Critère **Conception optimisée**
 - Barème : $B_{Opt} = 5$ points
 - Pondération : $P_{Opt} = [(F_{Équipe} - F_{Opt}) / |F_{Équipe} - F_{Opt}|]_+ \times [1 - (F_{Équipe} - F_{Opt}) / (F_{Max} - F_{Opt})] \times (1 + C_{vent}) / 2$
 - $F_{Opt} = 941$ N
 - $F_{Équipe}$ = force à rupture du pont de l'équipe concernée
 - F_{Max} = force à rupture du pont le plus résistant parmi les équipes engagées
 - $[X]_+$ = partie positive de X
 - C_{vent} = qualité de la méthode de calcul de tenue au vent, notée par le jury (entre 0 et 1)
- Critère **Fonctionnement éco-responsable**
 - Barème : $B_{Fonct_Éco} = 4$ points
 - Pondération : $P_{Fonct_Éco} = (E_{Max} - E_{Équipe}) / (E_{Max} - E_{min})$
 - E_{Max} = énergie électrique consommée pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe la moins éco-responsable
 - $E_{Équipe}$ = énergie électrique consommée pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe concernée
 - E_{min} = Énergie électrique consommée pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe la plus éco-responsable
- Critère **Fonctionnement efficace**
 - Barème : $B_{Fonct_Eff} = 3$ points
 - Pondération : $P_{Fonct_Eff} = (t_{Max} - t_{Équipe}) / (t_{Max} - t_{min})$
 - t_{Max} = temps total pour le cycle ouverture/fermeture du système le plus lent

- $t_{\text{Équipe}}$ = temps total pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe concernée
 - t_{min} = temps total pour le cycle ouverture/fermeture du système le plus rapide
- Critère **Qualité artistique**
 - Barème : $B_{\text{Art}} = 3$ points
 - Pondération : $P_{\text{Art}} = (Q_{\text{Fin}} + A_{\text{Techno}} + Q_{\text{est}})/4$
 - Q_{Fin} = qualité de finition (entre 0 et 1 selon le jury)
 - A_{Techno} = Audace technologique (entre 0 et 2 selon le jury)
 - Q_{est} = qualité esthétique (entre 0 et 1, voté par les participants des 2 autres défis)

5 – Contraintes

5.1 - Positions ouverte et fermée sécurisées

Lorsque les moteurs (ou les pompes) ne sont pas alimentés, le tablier doit rester en position stable dans les deux cas extrêmes (positions ouverte et fermée).

5.2 - Zone d'ancrage des piles/culées/moteurs/pompes

Il est interdit de s'appuyer ou de s'ancrer sur le plateau représentant le fond du canal.

5.3 - Encombrement hors support

Les pièces mobiles du pont sont autorisées à dépasser des rives, et du support en général : tablier pour un pont à axe de rotation vertical, contrepoids pour un pont à axe de rotation horizontal ...

5.4 - Gabarit ferroviaire

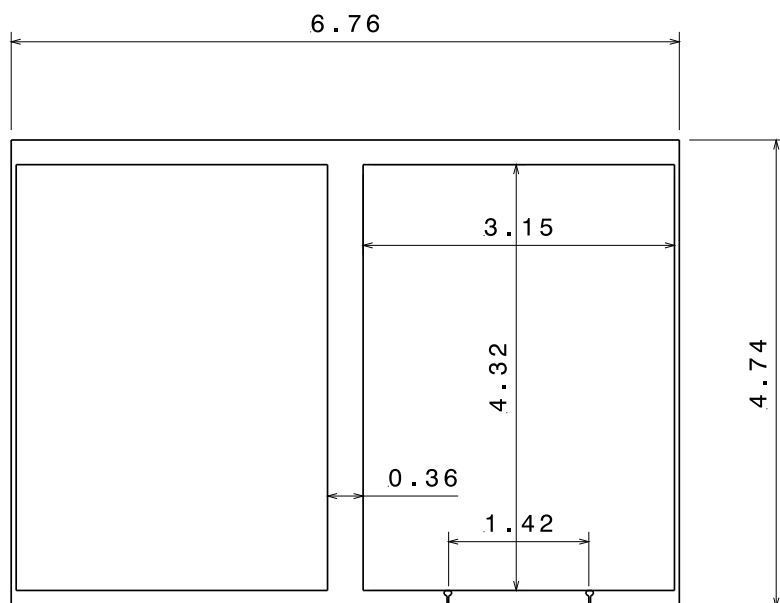


Figure 2 : Gabarit ferroviaire pour les deux voies (unité : mètre)

5.5 - Gabarits fluviaux

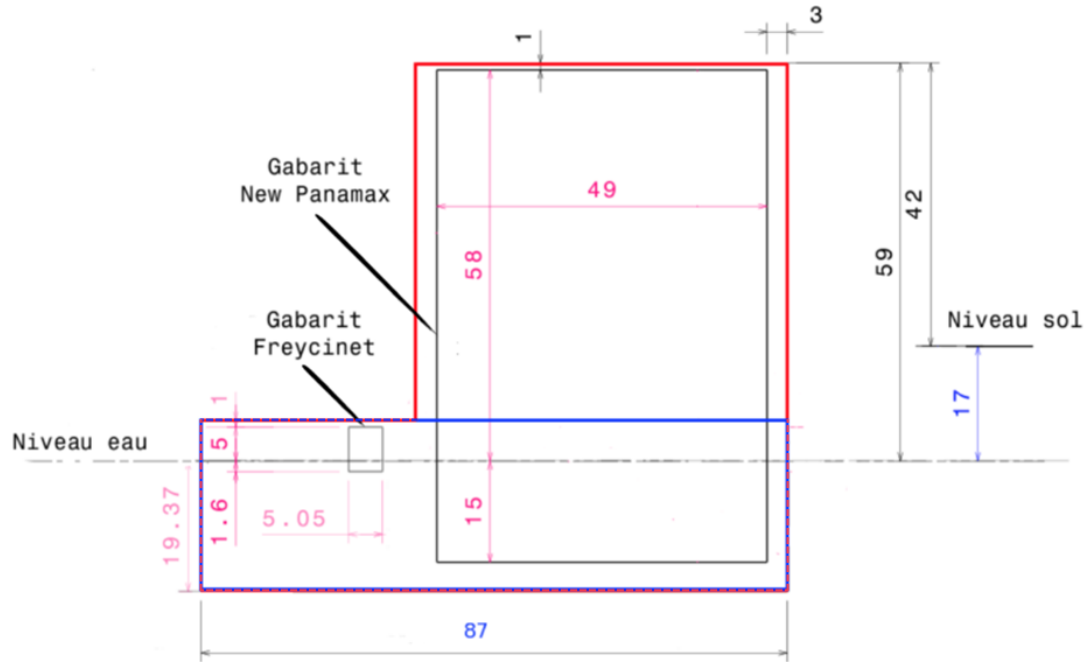


Figure 3 : Définition du gabarit fluvial et des gabarits des bateaux -pont en position ouvert (ligne rouge) et fermé (ligne bleue). Le gabarit fluvial en position ouverte est donné à titre indicatif afin de noter les espaces imposés, le gabarit new Panamax pouvant être situé rive gauche, droite, ou centré selon les choix de conception. (unité : mètre)

Le gabarit fluvial lorsque le tablier est en position fermé permettra le passage du gabarit Freycinet comme représenté sur la figure 3.

Le gabarit fluvial lorsque le tablier est en position ouvert permettra le passage d'un porte-conteneurs de gabarit new Panamax comme décrit sur la figure 3.

5.6 - Position des rails aux extrémités du support

L'altitude des rails aux extrémités de la maquette complète est obligatoirement celle de la hauteur avec le polystyrène extrudé tel qu'il était à l'origine.

5.7 - Contraintes liées au système de fondation (liaisons avec le support)

Les fondations peuvent être implantées n'importe où sur la berge en X et Y.

Le sol meuble (polystyrène) peut être retiré (pas de coût CO₂ éq supplémentaire).

Il est possible de percer le polystyrène et la planche de bois sur laquelle est collé le polystyrène.

Il est interdit de s'appuyer/percer/modifier la planche de fond (planche violette sur la figure 1).

Il est interdit de s'appuyer/percer/modifier les planches verticales autre que les coteaux.

5.8 - Contraintes liées aux éléments ornementaux

Les éléments ornementaux (parements, revêtement, parois, éclairage, ...) sont autorisés à l'unique condition qu'ils ne jouent aucun rôle structurel, ce que le jury est le seul à pouvoir apprécier.

5.9 - Contraintes liées aux passages des trains

Outre le respect des gabarits ferroviaires, le pont doit permettre le passage des trains sur chaque voie de manière autonome (c'est-à-dire grâce la traction de la locomotive alimentée par les rails). On précise que la locomotive :

- Possède 2 bogies motorisés ;
- Chaque bogie a ses 2 essieux motorisés ;
- Les 2 bogies sont reliés électriquement, ce qui assure que la traction est réalisée par les 2 bogies même si un seul est alimenté par les rails.

La pente maximale sur le tablier est de 2% (rappel : l'altitude au niveau des culées est fixée, voir « niveau sol » sur la figure 3).

5.10 - Contraintes liées au critère W_8

Le critère W_8 consiste à solliciter le pont avec un chargement similaire à une charge de service (4 wagons de fret sur chaque voie). La charge sera répartie avec le dispositif présenté sur trois figures :

- La figure 4 présente une photo du système de sollicitation avec les fourches de chargement ;
- La figure 5 présente une vue d'ensemble de la modélisation du dispositif de sollicitation ;
- La figure 6 présente un schéma de l'espace à libérer pour laisser passer les fourches de chargement.

On précise que :

- Le dispositif répartit la charge totale sur 8 wagons, chacun ayant 4 surfaces de contact avec les rails (2 axes diamètre 5 avec 2 méplats) ;
- Le dispositif respecte le gabarit ferroviaire ;
- Néanmoins, 2 puits de section $70 \times 30 \text{ mm}^2$, écarté de 100 mm et centré par rapport aux rives doivent être aménagés afin de permettre le chargement via les montants de section 50×20 .



Figure 4 : Système de sollicitation avec les fourches de chargement en action

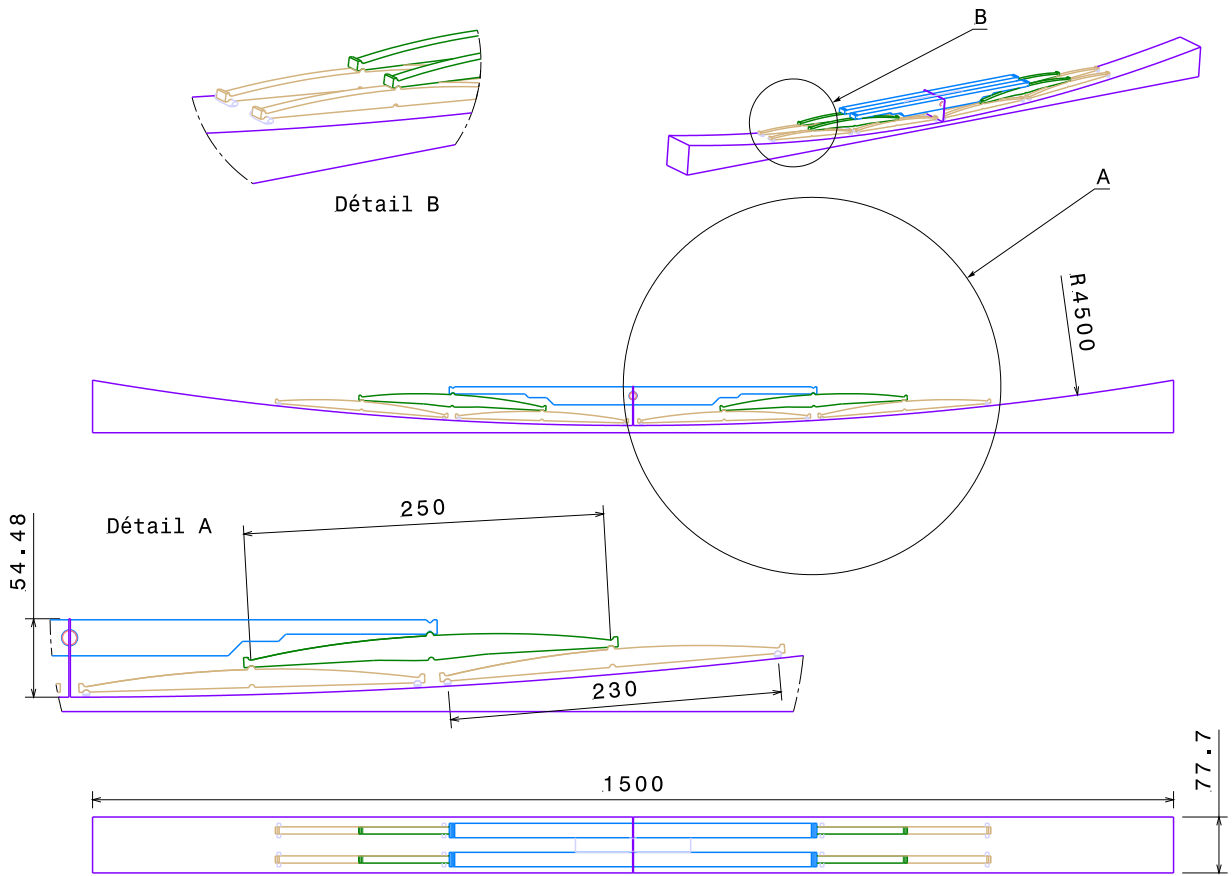


Figure 5 : Vue d'ensemble (sans les montants de chargement) du système de sollicitation (unité : millimètre)

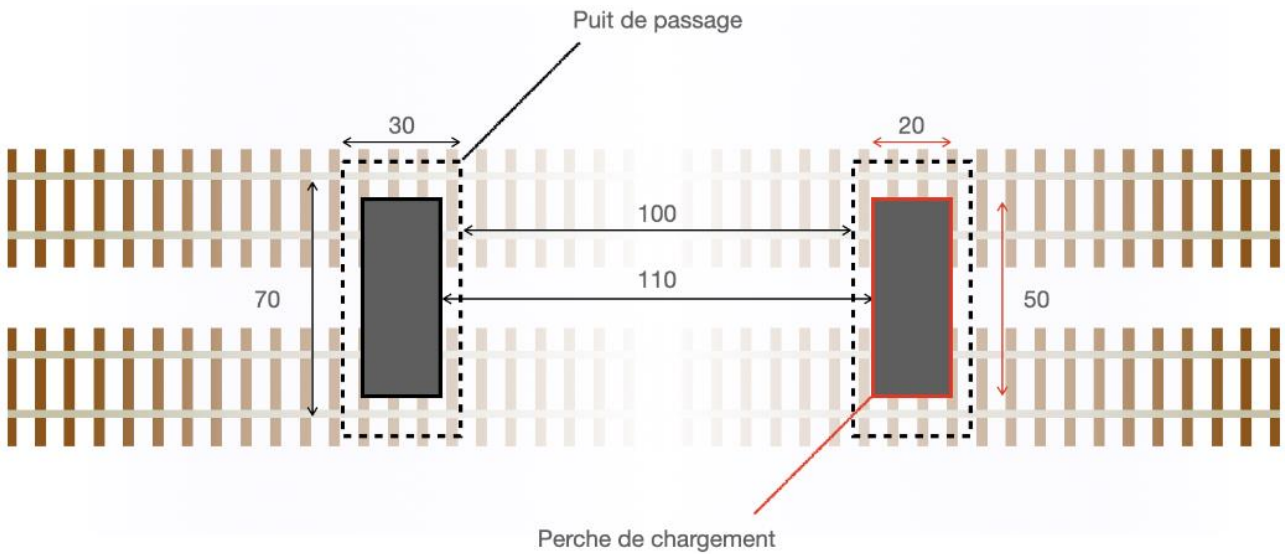


Figure 6 : Dimensions des fourches de chargement ainsi que de l'espace à laisser libre pour leur mise en place

5.10 - Contraintes liées à la tenue au vent

Le vent sera dirigé dans l'axe du canal. La structure devra résister et être stable sous ce vent en position ouverte et fermée.

La force s'exerçant sur une surface de référence $A_{réf}$ à une altitude z est donnée par la formule suivante :

$$F = c_f Q_p A$$

Où :

- c_f est le coefficient de traînée de la structure, pris égal à 2 ;
- Q_p est la pression de pointe définie ci-dessous ;
- A est la surface projetée de la structure dans le plan vertical passant par l'axe longitudinal du pont.

L'évolution de la pression de pointe Q_p en fonction de l'altitude est définie comme suit :

$$\begin{cases} Q_p(z) = \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \right] \frac{k_r^2}{2} \rho v_b^2 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{pour } 2 \text{ m} \leq z \leq 200 \text{ m} \\ Q_p(z) = Q_p(z = 2 \text{ m}) & \text{pour } z \leq 2 \text{ m} \end{cases}$$

où :

- $v_b = 24 \text{ m.s}^{-1}$ est la vitesse de vent de référence dans la région considérée ;
- $z = 0$ est l'altitude au niveau de la face supérieure de l'eau ;
- $z_0 = 0,05 \text{ m}$ est la longueur de rugosité du terrain ;
- $k_r = 0,19$ est le facteur de terrain ;
- $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ est la masse volumique de l'air.

Le profil des pressions de pointe est visible sur la figure 7.

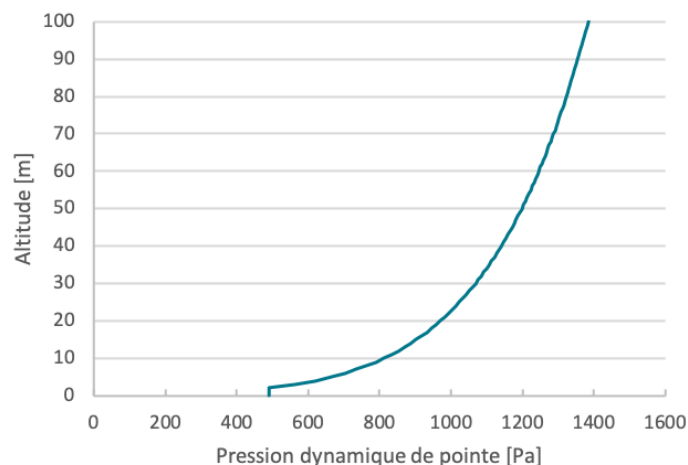


Figure 7 : Profil de la pression de pointe [Pa] pour cette étude

6 – Analyse de cycle de vie de l'ouvrage

6.1 - Base de données pour l'analyse de cycle

- Bois massif [par kg] : 0,2 kg CO₂ éq
- Acier [par kg] : 2,3 kg CO₂ éq
- Aluminium [par kg] : 9,0 kg CO₂ éq
- Colle à bois [par kg] : 2,3 kg CO₂ éq
- Fil [par cm] : 0,20 g CO₂ éq (équivalent à une chaîne en acier pouvant s'enrouler autour d'un axe ou à un câble de pont suspendu)
- Plastique pour impression 3D [par kg] : 2,3 kg CO₂ éq
- Granulats (sable, gravier ...) [par kg] : 0,004 kg CO₂ éq

[Source pour les ordres de grandeur : base de données INIES, articles ADEME, https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm]

6.2 - Calcul des masses de matériaux utilisés

- La masse de bois utilisée sera uniquement celle des bâtonnets utilisés pour la réalisation de l'ouvrage final ;
- La masse de colle à bois sera déduite par pesée des pots en fin d'année ;
- La masse d'acier, d'aluminium et de plastique sera comptabilisée grâce aux modèles CAO des pièces ou feuilles de calcul (fournies par les équipes) ;
- La longueur de fil sera obtenue par les modèles CAO ou les feuilles de calcul (fournies par les équipes) ;
- La masse de matériaux utilisés pour la *réalisation* proprement dite du pont (gabarit de collage, et de mise en place, montage d'usinage, etc.) n'est pas comptabilisée. Ces montages et gabarits peuvent être constitués de matériaux autres que les bâtonnets et n'ont pas de limite de taille (pas de limitation à 1 cm).

7 – Soutenance intermédiaire

Éléments à fournir ou à présenter :

- Caractérisation mécanique des bâtonnets (*a minima* module d'élasticité et limite en rupture obtenus en traction pure) ;
- Présentation d'une maquette du tablier de 0,50 m de portée qui aura été testée jusqu'à rupture avec comparaison avec les calculs menés *a priori* (c'est-à-dire sans avoir les résultats de l'expérience) et *a posteriori* si un recalage du modèle a été nécessaire et définition d'un éventuel coefficient de sécurité ;
- Calendrier permettant de faire un bilan sur le découpage du travail en sous-équipes (qui a fait quoi) et ce qui a été réalisé ;
- Calendrier prévisionnel avec le découpage du travail par sous-équipes et les prochaines étapes de réalisation ;
- Présentation de la cinématique prévue ;
- Présentation de l'architecture globale prévue.

8 – Formations liées au défi

- Modules de base (groupes au complet) :
 - Formation Robot pour le calcul de structure ;
 - Formation Catia pour la cinématique ;
 - Formation calcul du coût carbone d'une maquette de pont (auto-formation) ;
- Modules complémentaires au fil de l'eau selon les besoins (par sous-groupe) :
 - Formation menuiserie ;
 - Formation usinage ;
 - Formation impression 3D.

9 – Interprétations et variantes

Les porteurs du projet sont les seuls à décider de ce qui est autorisé ou non ! En cas de doute sur l'interprétation d'une consigne de ce document ou sur la possibilité d'utiliser un matériau/matériel, vous devez impérativement contacter les deux porteurs pour connaître leur avis commun !

Références :

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