

# Move Your Bridge : cahier des charges

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Xavier JOURDAIN - Martin PONCELET

Édité le  
18/11/2019

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.

Lors de l'année 2018-2019, trois thèmes de projets ont été proposés :

- Orchestre Urbain, création d'un instrument de musique adapté à un environnement urbain (parc, place, quai,...) ;
- Saph Team Racing, transformation d'une voiture radio-télécommandée en véhicule autonome pour réalisation de courses ;
- 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 130,5 m de portée à la fois mobile et éco-responsable. La ressource « Move Your Bridge : défis étudiants » [1] présente le contexte et les grandes étapes de ce projet accompli par six groupes de quatre étudiants. La ressource « Move Your Bridge : écoconception, exemple de calcul coût carbone » [2] présente les coûts carbone des six maquettes de pont.

Cette ressource présente le cahier des charges tel que donné aux étudiants en début de projet.

## 1 – Présentation du défi Move Your Bridge

L'objectif est de concevoir et réaliser une maquette de pont ferroviaire de 130,5 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>e</sup> (portée de 1,50 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<sub>1</sub>W<sub>1</sub>) ;

- 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 que devront supportés les ponts.

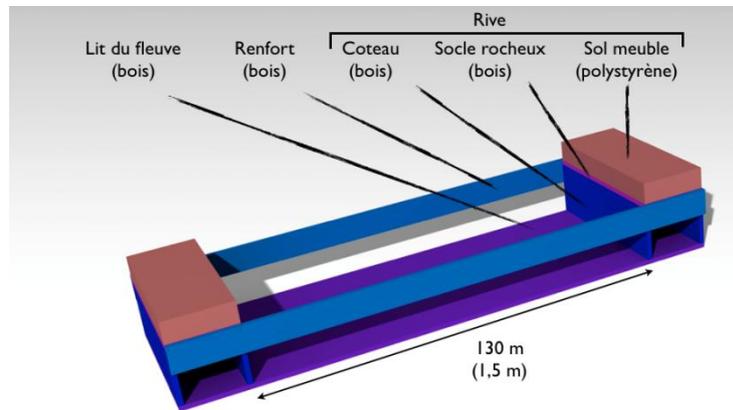


Figure 1 : Schéma du support de la future maquette

## 2 – Éléments fournis

Les éléments suivants seront fournis à chaque équipe concourante :

- une rivière et deux rives : socle avec 2 rives espacées de 1,50 m ;
- des poutres en bois (bâtonnets de glace) ;
- de la colle à bois ;
- du fil ;
- des rails ;
- une alimentation électrique et des fils électriques.

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

- acier (pièces de taille réaliste correspondant à  $1 \text{ m}^3$  pour la taille réelle) ;
- bois massif (pièces de taille réaliste correspondant à  $1 \text{ m}^3$  pour la taille réelle) ;
- pièce à réaliser en impression 3D (pièces de taille réaliste correspondant à  $1 \text{ m}^3$  pour la taille réelle).

## 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 2) ;
  - passage du gabarit fluvial de position fermée ;
  - passage du gabarit ferroviaire en position fermée (figure 4) ;
  - 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 suivant sont graduels :

- Critère Conception et construction éco-responsable
  - Barème :  $B_{\text{Fab}_\text{Éco}} = 5$  points
  - Pondération :  $P_{\text{Fab}_\text{Éco}} = (C_{\text{Max}} - C_{\text{Équipe}}) / (C_{\text{Max}} - C_{\text{min}})$ 
    - $C_{\text{Max}}$  = coût en kg CO<sub>2</sub> éq des matériaux utilisés par l'équipe la moins éco-responsable
    - $C_{\text{Équipe}}$  = coût en kg CO<sub>2</sub> éq des matériaux utilisés par l'équipe concernée
    - $C_{\text{min}}$  = coût en kg CO<sub>2</sub> éq des matériaux utilisés par l'équipe la plus éco-responsable
- Critère Conception optimisée
  - Barème :  $B_{\text{Opt}} = 5$  points
  - Pondération :
 
$$P_{\text{Opt}} = \frac{(F_{\text{Équipe}} - F_{\text{Opt}}) / |F_{\text{Équipe}} - F_{\text{Opt}}|_+}{(F_{\text{Max}} - F_{\text{Opt}})} \times [1 - (F_{\text{Équipe}} - F_{\text{Opt}}) / (F_{\text{Max}} - F_{\text{Opt}})] \times (1 + C_{\text{vent}}) / 2$$
    - $F_{\text{Opt}} = 941$  N
    - $F_{\text{Équipe}}$  = force à rupture du pont de l'équipe concernée
    - $F_{\text{Max}}$  = force à rupture du pont le plus résistant parmi les équipes engagées
    - $|X|_+$  = partie positive de X
    - $C_{\text{vent}}$  = qualité de la méthode de calcul de tenue au vent, notée par le jury (entre 0 et 1)
- Critère Fonctionnement éco-responsable
  - Barème :  $B_{\text{Fonct}_\text{Éco}} = 4$  points
  - Pondération :  $P_{\text{Fonct}_\text{Éco}} = (E_{\text{Max}} - E_{\text{Équipe}}) / (E_{\text{Max}} - E_{\text{min}})$ 
    - $E_{\text{Max}}$  = énergie électrique consommée pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe la moins éco-responsable
    - $E_{\text{Équipe}}$  = énergie électrique consommée pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe concernée
    - $E_{\text{min}}$  = Énergie électrique consommée pour le cycle ouverture/fermeture du système de l'équipe la plus éco-responsable
- Critère Fonctionnement efficace
  - Barème :  $B_{\text{Fonct}_\text{Eff}} = 3$  points
  - Pondération :  $P_{\text{Fonct}_\text{Eff}} = (t_{\text{Max}} - t_{\text{Équipe}}) / (t_{\text{Max}} - t_{\text{min}})$ 
    - $t_{\text{Max}}$  = 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
    - $t_{\text{min}}$  = temps total pour le cycle ouverture/fermeture du système le plus rapide
- Critère Qualité artistique
  - Barème :  $B_{\text{Art}} = 3$  points
  - Pondération :  $P_{\text{Art}} = (Q_{\text{Fin}} + A_{\text{Techno}} + Q_{\text{Est}}) / 4$ 
    - $Q_{\text{Fin}}$  = qualité de finition (entre 0 et 1 selon le jury)
    - $A_{\text{Techno}}$  = Audace technologique (entre 0 et 2 selon le jury)
    - $Q_{\text{Est}}$  = 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 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

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

## 5.3 - Gabarit ferroviaire

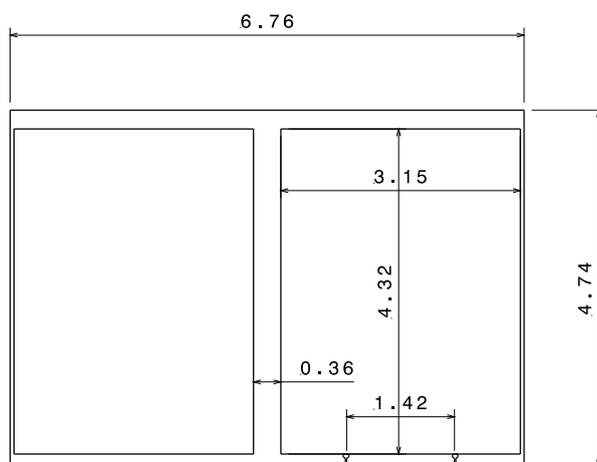


Figure 2 : Gabarit ferroviaire pour les deux voies (unité : mètre)

## 5.4 - Gabarits fluviaux

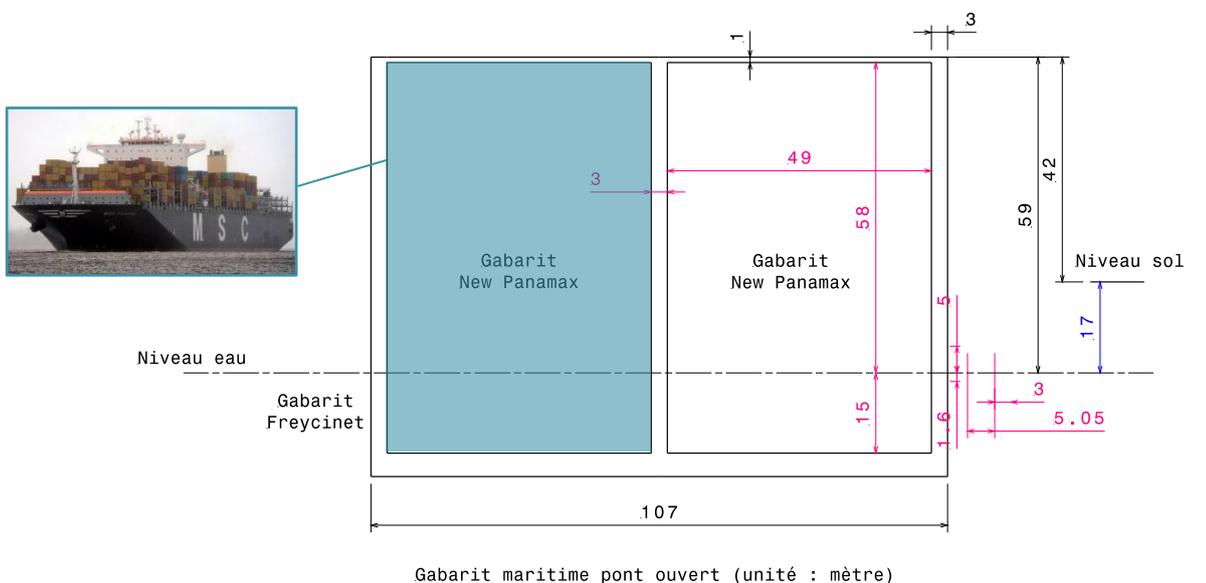


Figure 3 : Définition du gabarit fluvial - pont en position ouvert (unité : mètre)

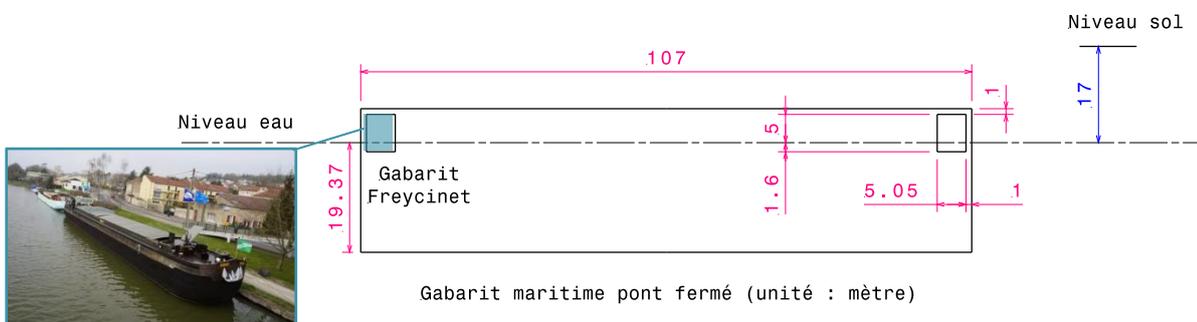


Figure 4 : Définition du gabarit fluvial - pont en position fermé (unité : mètre)

Le gabarit fluvial lorsque le tablier est en position fermé permettra le passage du gabarit Freycinet comme représenté sur la figure 4.

Le gabarit fluvial lorsque le tablier est en position ouvert permettra le passage de 2 porte-conteneurs de gabarit new Panamax comme décrit sur la figure 3.

### 5.5 - 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.

### 5.6 - 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 CO<sub>2</sub> 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.

### 5.7 - Contraintes liées aux éléments ornementaux

On nomme par la suite éléments ornementaux :

- Les éléments sur les structures tels que parements, revêtement, parois, éclairage, ...

Ces éléments sont autorisés à l'unique condition qu'ils ne jouent aucun rôle structurel, ce que le jury est le seul à pouvoir apprécier.

### 5.8 - 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.

### 5.9 - Contraintes liées au critère W<sub>8</sub>

Le critère W<sub>8</sub> 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 la figure 6. 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 60x30 mm<sup>2</sup>, écarté de 100 mm et centré par rapport aux rives doivent être aménagés afin de permettre le chargement via les montants de section 50x20.

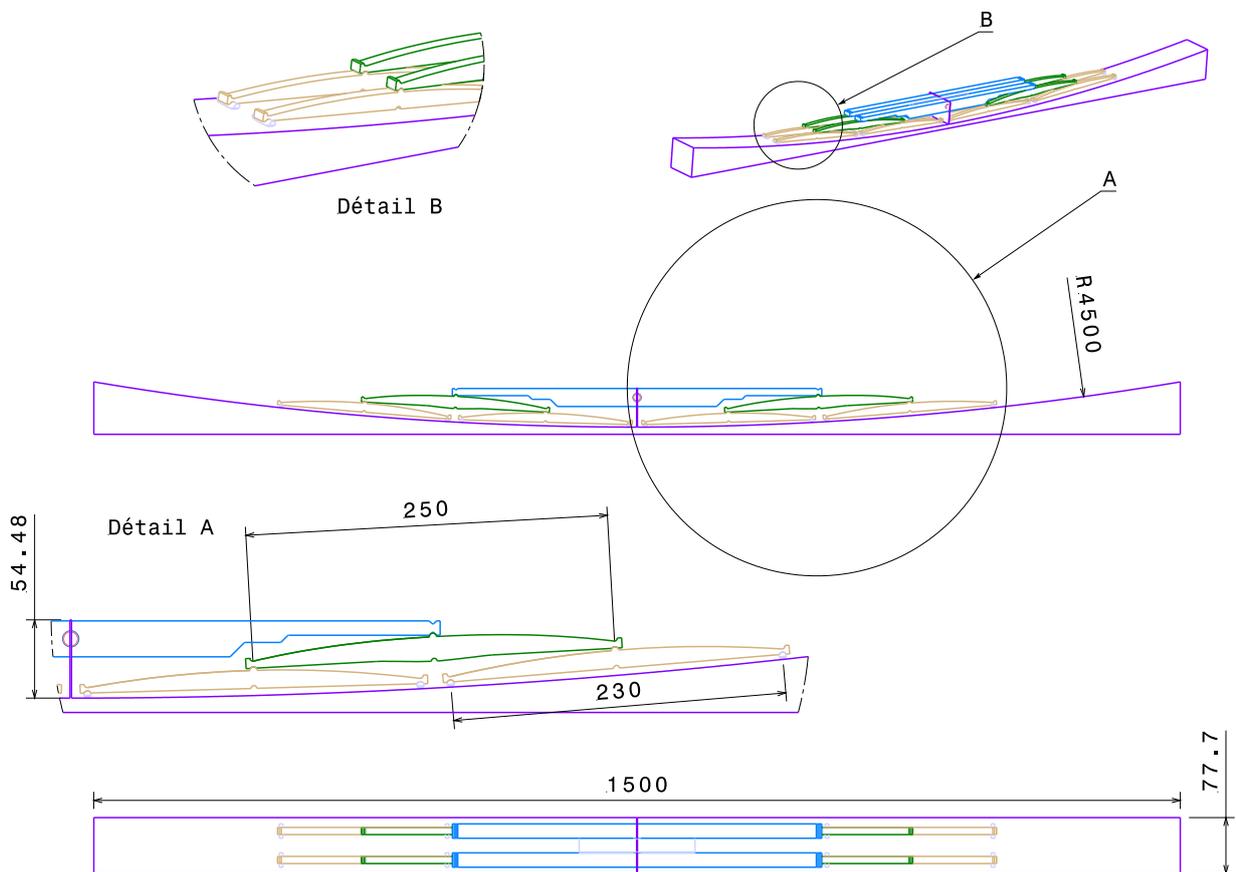


Figure 5 : Vue d'ensemble (sans les montants de chargement) du système de sollicitation (unité : millimètre)

## 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  $A_{\text{réf}}$  à une altitude  $z$  est donnée par la formule suivante :

$$F = c_f Q_p A$$

Où :

- $c_f$  est le coefficient de trainée de la structure, vous le prendrez égale 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.

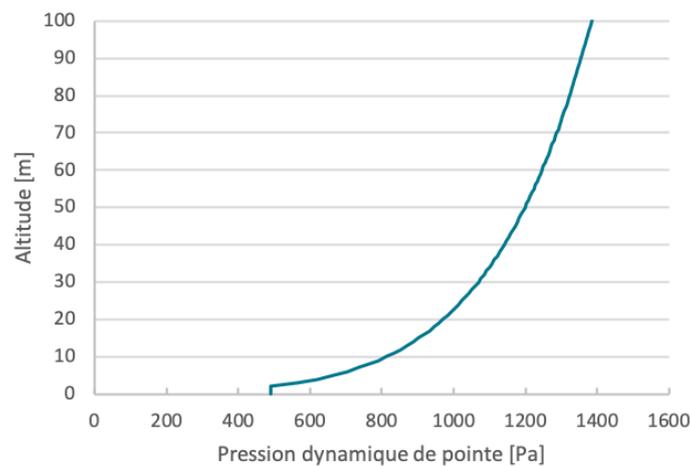


Figure 6 : Profil de la pression de pointe [Pa] pour cette étude

## 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 CO<sub>2</sub> éq
- Acier [par kg] : 2,3 kg CO<sub>2</sub> éq
- Aluminium [par kg] : 9,0 kg CO<sub>2</sub> éq
- Colle à bois [par kg] : 2,3 kg CO<sub>2</sub> éq
- Fil [par m] : 0,02 kg CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> éq

[source : pour les ordres de grandeur : base de données INIES, articles ADEME]

### 6.2 - Calcul des masses de matériaux utilisés

- La masse de bois utilisée sera déduite par pesée des bacs remplis des poutres restantes en fin d'année. Les chutes de bois de plus de 1 cm sont considérées réutilisables et feront donc partie de la masse pesée. Les morceaux inférieurs à 1 cm (chutes et sciure) ne seront pas comptabilisés.
- 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 comptabilisé 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 comptabilisé. 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

- Formation Cast3M pour le calcul de structure
- Formation Catia pour la cinématique
- Formation menuiserie
- Formation usinage

## 9 – Budget pour le défi (pour information)

	Dénomination	U	PU TTC	Nombre	PT TTC	Proportion coût total
Ponts	Bâtonnets	200U	3,5	60	210,19	10,95%
	Colle à bois	pot de 750g	13,19	8	105,50	5,50%
	Fil	U	30	2	60,00	3,13%
	acier				ND	
	plastique impr 3D				ND	
	Moteurs	U	25	12	300,00	15,63%
	Fil électrique	U bobine de 30 m	12,71	4	50,84	2,65%
	Butée de fin de course	U	4	12	48,00	2,50%
	Rails de 94 cm	U	6,396	24	153,50	8,00%
	Rails de 23 cm	12 pièces	21,996	2	43,99	2,29%
Outillage	serre-joint	U	9,41	18	169,34	8,82%
	forets 2/3/4	10 U par diamètre	14,46	1	14,46	0,75%
	visserie 3 mm	800 U	9,07	1	9,07	0,47%
Supports	polystyrène extrudé	6 m x 60 cm x ép 8 à 10 cm	24,42	3	73,26	3,82%
	Planche 3 mm	2,5x1,22	21,85	1	21,85	1,14%
	CP 15 mm	2,5x1,22	62,55	6	375,30	19,55%
	transport bois	U		1	34,56	1,80%
Défi	mesure de puissance	U	76,99	1	76,99	4,01%
	Bloc d'alim	U	79,9	1	79,90	4,16%
	Wagons	U	10,992	3	32,98	1,72%
	Locomotive	U	59,988	1	59,99	3,12%
				<b>Total</b>	<b>1 919,72</b>	

## Références :

[1]: Move Your Bridge : défi étudiants, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/move-your-bridge-defis-etudiants](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-defis-etudiants)

[2]: Move Your Bridge écoconception, exemple de calcul coût carbone, H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, M. Poncelet, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/Move-your-bridge-ecoconception-exemple-de-calcul-cout-carbone](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/Move-your-bridge-ecoconception-exemple-de-calcul-cout-carbone)

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