

Move Your Bridge : écoconception, exemple de calcul coût carbone

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 une maquette de pont ferroviaire de 130,5 m de portée à la fois mobile et éco-responsable. La ressource « Move Your Bridge - défi étudiants » [1] présente le contexte et les grandes étapes du projet de conception et réalisation d'un pont mobile ferroviaire éco-responsable accompli par six groupes de quatre étudiants. La ressource « Move Your Bridge - cahier des charges » [2] détaille les informations reçues par les six équipes en début de défi.



Figure 1: Les 6 ponts ferroviaires mobiles du défi Move Your Bridge

Cette ressource propose un exemple de calcul du coût carbone afin de sensibiliser étudiants et concepteurs aux impacts des choix réalisés lors de projets.

1 – Introduction

Les critères dévaluation du défi reposent sur 5 grandes catégories (ressource « *Move Your Bridge - cahier des charges* » [2]). Dans cette ressource, nous nous attacherons à examiner les critères « Conception et construction éco-responsable » et « Fonctionnement éco-responsable & efficace ».

Dénombrer les quantités utilisées à la réalisation d'une maquette permet de mettre en parallèle les quantités réelles qui seraient utilisées lors de la fabrication d'un pont réel. Par exemple, le nombre de bâtonnets figure le nombre de poutres d'une construction en treillis, la quantité de colle symbolise les quantités de produits chimiques, ...

2 – Conception et construction éco-responsable

Les équipes ont à leur disposition en début de projet un peu plus de 3 kg de bâtonnets, un pot de colle, du fil de pêche, 2 motoréducteurs, 1 interrupteur DPDT, 2 interrupteurs fin de course. D'autres matériaux et matériels peuvent être utilisés, ils seront également comptabilisés dans le bilan du coût carbone, leur choix doit donc être réfléchi.



Figure 2 : Matériaux et matériels disponibles hors commande spéciale

2.1 - Bâtonnets et colle

Le bilan d'utilisation des bâtonnets et de la colle court sur toute la durée du projet. Il comprend donc les essais de caractérisation des matériaux, la réalisation de la première maquette de 50 cm du tablier soumise à un essai de flexion 3 points et enfin la construction de la maquette finale au $1/87^e$, $130,5 \text{ m}/87 \approx 1,50 \text{ m}$.

Les équipes ont eu des consommations variables de bâtonnets, pour l'équipe la moins gourmande à peine 1,5 kg contre plus de 2,2 kg pour l'équipe la plus dépensière. L'utilisation de la colle présente également des chiffres très éloignés, de 120 g à presque 370 g.

Équipe	Masse bâtonnets [kg]	Masse colle [kg]
Rouge	1,798	0,3695
Orange	1,532	0,157
Jaune	1,575	0,207
Vert	2,2865	0,344
Bleu	1,765	0,208
Violet	1,46	0,12

Tableau 1 : Bilan des consommations de bâtonnets et colle

Une corrélation assez évidente entre quantité de colle et bâtonnets est à souligner. On peut remarquer que l'équipe pont violet a eu une utilisation mesurée des bâtonnets comme de la

colle. Leur démarche de conception puis de réalisation a été guidée par l'éco-responsabilité, l'équipe a ainsi étudié le collage sur les bâtonnets tels que fournis ou après ponçage de la teinte déposée, ainsi qu'une pose de quantité dosée de colle. Certains points de liaison ont été renforcés par un goupillage réalisé avec des cure-dents. Les essais après ponçage et dosage de colle étant probants, toute la conception a pu se baser sur un nombre de bâtonnets minimal alors que d'autres équipes pouvaient doubler les assemblages afin d'assurer la tenue.

Outre la précaution dans l'utilisation de la colle en évitant, autant que faire se peut, les gaspillages de colle, ce sont les formes des structures qui engendrent une quantité différente de bâtonnets et de colle. Par exemple avec de larges surfaces de collage, l'équipe pont rouge a eu la consommation maximale de colle à presque 370 g pour une masse de bâtonnets importante, 1,8 kg, mais de 500 g inférieure à l'équipe pont vert. Les deux ponts orange et jaune ont des masses de bâtonnets très proches, pour autant on note une consommation 25% moins importante pour l'équipe pont orange. La quantité de colle n'était cependant pas estimée lors des simulations, seule la quantité de bâtonnets était évaluée.

2.2 - Motorisation

Les équipes ont fait des choix de cinématiques très différentes, la motorisation du mouvement et sa transmission qui en découlent directement, donnent également lieu à de fortes variations.

Les équipes ponts bleu et violet ont choisi de n'utiliser qu'un seul moteur, les équipes jaune et violet ont mis en œuvre des contrepoids. Les interrupteurs ont été posés pour toutes les équipes, les fins de course pour la moitié des ponts. Des équipes ont ajouté des poulies en bois, d'autres des contrepoids faits de gobelets carton ou rouleau de papier toilette, lestés de sable, ou encore des brochettes de bois pour guider les contrepoids. Toutes ont utilisé des câbles que ce soit pour la mobilité ou en hauban pour les piles. Les tableaux suivants récapitulent les utilisations :

Équipe	Nombre de motoréducteurs	Fin de course
Rouge	2	non
Orange	2	non
Jaune	2	2
Vert	2	non
Bleu	1	Prévus mais non installés
Violet	1	2

Tableau 3 : Utilisation des motoréducteurs et des fins de course

Équipe	Parties en bois [mm]	Bois brut [kg]	Plastique [kg]	Fil [m]
Rouge	Guidage du tablier	0,805	-	2,39
Orange	2 poulies Ø45 ép 22	0,070	-	3
Jaune	2 poulies Ø30 ép 5 2 poulies Ø45 ép 5	0,011	-	5,98
Vert	pivots en bois massif 4 engrenages impression 3D de 16 g	1,161	0,064	8,65
Bleu	1 poulie Ø37 ép 18 1 poulie Ø24 ép 18 1 poulie Ø40 ép 10	0,039	-	4,28
Violet	4 poulies Ø47 ép 15 4 poulies Ø30 ép 15 18 brochettes (28,6g)	0,102	-	8,49

Tableau 4 : Matériels ajoutés

On remarque dans le tableau 3 la grande disparité des masses de bois ajouté. L'équipe pont vert détient le record de plus de 1,1 kg, la réalisation des pivots des arches est en effet très massive (figure 3). À cette quantité importante de bois, il faut ajouter les masses des quatre portions d'engrenages réalisés en impression 3D servant à la synchronisation des deux arches. L'équipe pont rouge a ajouté plus de 800 g de bois principalement pour réaliser le guidage du tablier. Le pont rouge est un pont tournant en deux parties, il est nécessaire d'assurer à la fermeture un positionnement permettant la continuité des rails et la continuité électrique !



Figure 3 : Détails des pivots du pont vert et des engrenages ; guidage du tablier pont rouge

L'équipe pont violet a conçu la cinématique avec 8 poulies (mais un seul moteur), le guidage des contrepoids dans la pile en treillis a nécessité le collage de brochettes en bois. Notons que les axes des poulies ont été faits en tiges de bambou récoltées directement dans un jardin dans un souci de conception à moindre impact environnemental. La totalité de ces ajouts de bois donne une masse d'environ 100 g. L'équipe pont orange avec 2 poulies n'ajoute que 70 g de bois, l'équipe pont bleu totalise 39 g de bois ajouté avec 3 poulies (et un seul moteur). L'équipe pont jaune a optimisé la masse ajoutée en réalisant 2 poulies très peu épaisses.

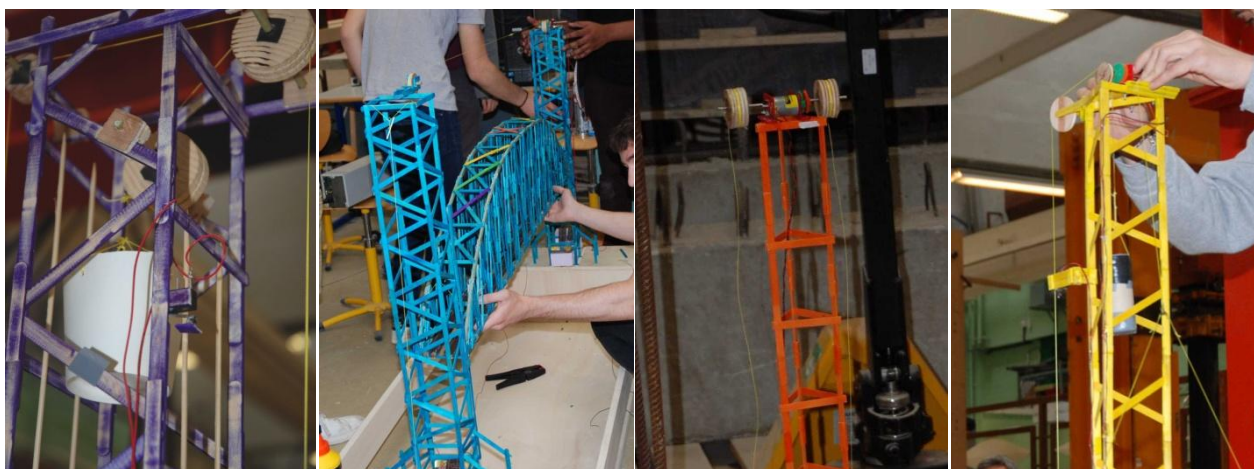


Figure 4 : Détails des parties en bois ajoutées

Les longueurs de fil utilisé sont également très variables d'un pont à l'autre en grande partie en raison des cinématiques choisies. Le tablier du pont vert est suspendu aux deux arches, les rotations de celles-ci, par l'intermédiaire des câbles permettent d'assurer le mouvement de montée du tablier. La réalisation de cette cinématique a nécessité plus de 8,6 mètres de fil. Avec presque 8,5 m, le pont violet est aussi très gourmand en fil. Rappelons qu'il n'utilise qu'un seul moteur installé au pied d'une des piles et qu'un câble sous-marin a été nécessaire pour transmettre le mouvement de part et d'autre du tablier. Le pont jaune utilise presque 6 m de fil, alors que le pont bleu et son unique moteur emploie presque 4,30 m de fil. Avec le pont orange, seuls 3 m ont été nécessaire, le pont rouge n'a besoin que de 2,4 m de fils pour faire tourner les deux parties de son tablier.

3 – Équivalent CO₂

Les points d'analyse de cycle de vie de l'ouvrage ont été donnés en début de projet (ressource « *Move Your Bridge - cahier des charges* » [2], paragraphe 6). La base de données a été établie en se basant sur des documents INIES [3] et ADEME [4], on considère les équivalences CO₂ suivantes :

- 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 m] : 0,02 kg 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

Notons que la démarche n'a pas été poussée jusqu'à prendre en compte les coûts de transports éventuels de tous les matériaux, coûts pouvant rapidement être non négligeables sur un projet réel ! Les moteurs, de masse 80 g, sont constitués de deux matériaux acier et plastique, qui ont tous deux la même équivalence CO₂. Le calcul qui est fait pour déterminer le coût carbone des différents ponts est le suivant :

$$\text{Coût carbone} = 0,2 * \text{Masse bâtonnets} + 2,3 * \text{Masse de colle} + 2,3 * 0,08 * \text{nombre de moteur} + 0,2 * \text{Masse bois brut} + 2,3 * \text{Masse plastique} + 0,02 * \text{longueur de fil}$$

Équipe	CO ₂ éq [kg]
Rouge	1,79
Orange	1,11
Jaune	1,28
Vert	2,17
Bleu	1,11
Violet	0,94

Tableau 5 : Bilan du coût carbone des six ponts

Ce bilan permet de synthétiser tous les résultats précédents, et sans surprise on constate que le coût carbone le plus impactant est le pont vert et le moins impactant le pont violet. Le ratio de 2,3 est néanmoins à regarder de plus près.

La cinématique du pont vert avec la rotation des deux arches et la montée du tablier est audacieuse, et hormis des projets dessinés, aucune réalisation concrète n'a eu lieu. Il a fallu réaliser deux arches de dimensions assez importantes (figure 5), consommant donc nombre bâtonnets et quantité de colle. Les arches ont été montées en pivot par rapport à la rive, les 4 liaisons qui en découlent sont massives. Les rotations devant être symétriques pour assurer une montée horizontale du tablier, la réalisation des engrenages par impression 3D pèse lourd dans le bilan. Et enfin le tablier est suspendu aux arches par de grande longueur de fils, ceux-ci servant également à transmettre le mouvement d'ouverture. Le choix de cette cinématique a entraîné des choix de solutions technologiques lourdes.

La cinématique du pont rouge avec les rotations opposées des deux parties du tablier, n'est pas non plus très usuelle. La plupart des ponts tournants tournent sur un axe vertical et par leur milieu prenant appui sur une pile centrale ici impossible compte tenu des gabarits fluviaux. Pour assurer la rigidité des deux parties du tablier afin que ceux-ci se raccordent correctement à la fermeture, les arches ont été renforcées avec trois treillis parallèles de chaque côté (figure 5).

Cela explique les quantités de bâtonnets et colle utilisées. La jonction des deux parties du tablier a également été un problème majeur à résoudre car mettant en péril l'utilité du pont lui-même si la continuité du rail n'était pas assurée. La solution réalisée (figure 3) a un impact important par la quantité de bois utilisée. À contrario, ce pont gagne en quantité de fil dont l'impact sur le bilan coût carbone est moindre.

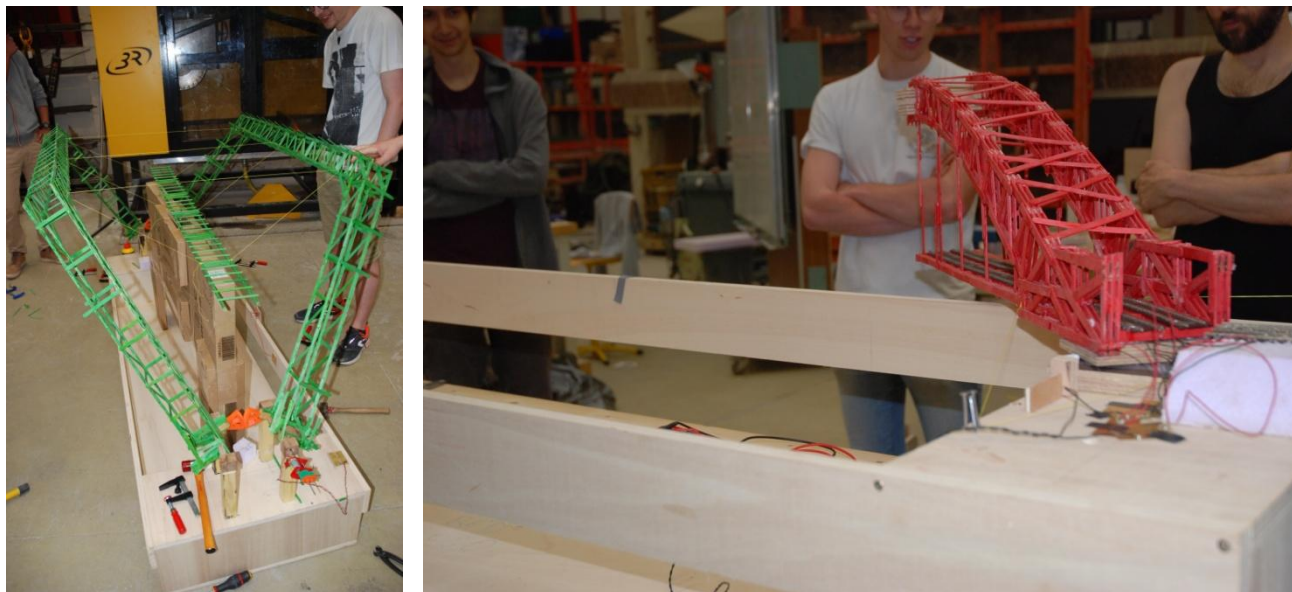


Figure 5 : Dimensions du pont vert et épaisseur des arcs du tablier du pont rouge

Les cinématiques à moindre coût carbone se trouvent donc être celles des ponts en translation dont on trouve beaucoup d'exemples dans la vie réelle.

Le pont jaune affiche un bon bilan en consommation de bâtonnets et une consommation de colle raisonnable. Il gagne énormément en matière ajoutée en ayant pris soin de réaliser des poulies très peu épaisses mais il utilise deux moteurs et une grande quantité de fils (5,98 m) soit respectivement 0,368 et 0,1196 kg éq CO₂.

Le pont bleu présente un bilan moins bon en masse de bâtonnets et colle, et légèrement supérieure en bois (39 g) mais avec son seul moteur (0,184 kg éq CO₂) et ses 4,28 m de fil (0,0856 kg éq CO₂) il présente un coût carbone à 1,11.

Même coût carbone pour le pont orange qui affiche de bons bilans de consommation de bâtonnets, colle et fils, peu de bois ajouté (70g), les deux moteurs coûtent un tiers du bilan carbone !

Enfin le pont violet présente le plus faible coût carbone avec les meilleurs bilans de consommation de bâtonnets et de colle, mais une quantité de fil importante (8,49 m), la masse de bois ajouté est raisonnable (102 g) et pèse peu dans le bilan (0,0204 kg éq CO₂). Le seul moteur monté ne représente qu'un cinquième du bilan carbone.

4 – Fonctionnement éco-responsable & efficace

Lors de la première série de tests (ressource « *Move Your Bridge - défi étudiants* » [1] paragraphe 8), la réalisation d'un cycle ouverture/tenue en position ouverte 10 secondes/fermeture a donné lieu à une mesure d'énergie.

La moitié des ponts n'ont pu être manipulés qu'à « la main » pour diverses raisons : une inversion dans le câblage, un motoréducteur défectueux, une rupture de pièces de transmission. Les trois

ponts électrifiés ont donné des résultats très différents de moins de 16 mWh à presque 76 mWh. Les encadrants assument ici un choix de moteur discutable dont les ponts, nécessitant trop de couple, ont fait glisser les axes sur les poulies montées en force. Un changement de moteur s'impose si le projet est reconduit !

Équipe	Energie cycle [mWh]	utilisée
Rouge	-	Inversion câblage, ouverture manuelle
Orange	48	
Jaune	75,9	
Vert	-	Rupture engrenage, ouverture manuelle
Bleu	-	Motoréducteur défectueux, ouverture manuelle
Violet	15,8	

Tableau 2 : Mesures énergétique du cycle ouverture/tenue en position ouverte 10 secondes/fermeture

Les mesures énergétiques permettent de visualiser le fonctionnement éco-responsable du pont. Avec seulement trois valeurs, il est néanmoins possible de se rendre compte de la grande disparité de consommation énergétique de ponts à la cinématique équivalente. Les trois ponts mesurés ont des tabliers levants le long de piles. La transmission de mouvement est traitée de façon différente, les ponts orange et jaune ont deux moteurs placés en haut des piles, cependant le pont jaune est muni de contrepoids afin d'aider à la fermeture ... ce qui ne semble pas avoir économisé l'énergie. Le pont violet n'a qu'un seul moteur, son système de transmission de mouvement avec huit poulies et deux contrepoids semble ici avoir été très efficace.

5 – Conclusion

Ce projet a permis de sensibiliser les étudiants aux notions d'emprunte carbone d'un ouvrage. Si le projet est de nouveau mené, des changements permettraient d'améliorer cette étude, notamment en utilisant des moteurs plus robustes ainsi qu'en forçant une étude plus précoce de la cinématique que la plupart des groupes n'ont finalisée que quelques heures avant les tests voire n'y sont pas parvenu. En localisant le projet géographiquement, on pourrait imaginer pondérer le coût carbone avec le coût CO₂ du transport des matières, ce qui rendrait l'estimation plus réaliste.

Références :

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

[2]: Move Your Bridge : cahier des charges, X. Jourdain, M. Poncelet, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-cahier-des-charges

[3]: INIES, <https://www.inies.fr/accueil/>

[4]: ADEME, <https://www.ademe.fr/>

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