

Projet Procédés : Construction d'une passerelle

Travail réalisé par
BECRET Philippe
CAPRON Alexandre
de PRELLE Arnaud
de WAEGHE Bruno
KICQ Jean-Christophe

LENOM Thierry
PILAVACHI Paul
PHAM Son Tung

Tuteur : Pr Dr Ir Bernard ESPION

Nous tenons à témoigner notre gratitude à Monsieur Espion, notre tuteur, pour ses conseils, à Monsieur Germain pour la commande des matériaux, et à Monsieur Descamps pour son aide ainsi qu'au Techniciens pour leur grande disponibilité et leur gentillesse à l'heure de nous expliquer le fonctionnement des machines.

TABLE DES MATIÈRES

I. INTRODUCTION	p.5
II. CHOIX DE LA STRUCTURE	p.6
III. CHOIX DES MATÉRIAUX POUR LA STRUCTURE PORTANTE	p.8
1. Possibilité de démontage	p.8
2. Recyclage	p.8
3. Résistance/Poids	p.9
4. Prix	p.9
IV. NOTRE PASSERELLE	p.10
1. Treillis	p.10
a) Treillis pour notre passerelle	p.10
b) Calcul de résistance des treillis	p.10
c) Dimensionnement du treillis	p.12
d) Calcul du fléchissement de la passerelle	p.14
2. Garde-corps et Tablier	p.16
3. Finition	p.18
V. ASSEMBLAGE	p.19
1. Quels assemblages ?	p.19
2. Dimensionnement des assemblages	p.19
VI. OUTILLAGE ET RÉALISATION	p.24
VII. BUDGET	p.26
VIII. MISE EN PLACE	p.28

IX. CONCLUSION	p.29
X. BIBLIOGRAPHIE	p.30
XI. ANNEXES	p.33
Annexe 1 : Différents types de treillis	p.33
Annexe 2 : Câbles	p.35
Annexe 3 : Table du coefficient de réduction...	p.36
Annexe 4 : Peinture	p.37
Annexe 5 : Fléchissement de la barre centrale	p.40
Annexe 6 : Plans de notre passerelle	p.41

I. INTRODUCTION

Les politiques urbaines développées par les métropoles européennes tendent à rendre la ville plus accessible aux piétons et aux usagers de moyens de locomotion non polluants comme le vélo ou les patins à roulettes. Aujourd'hui, les grandes cités agrandissent leurs trottoirs, créent des zones piétonnières, développent des réseaux de pistes cyclables. De plus en plus, des passerelles sont construites pour permettre aux usagers de la voirie d'enjamber un obstacle sans aucune difficulté, dans un confort optimal et dans un cadre agréable. Citons par exemple, la passerelle de Solférino à Paris ou encore celle du Milenium à Londres.

Pour de telles structures, l'ingénieur doit rechercher la meilleure solution, celle qui permet d'obtenir le meilleur rapport qualité/prix en fonction des matériaux et des structures possibles, tout en restant créatif. Tout ceci nous a motivés, dans le cadre de notre projet procédés, à relever le défi proposé par la filière Constructions Civiles – Architecture qui consiste à construire une passerelle d'une portée de 5 mètres.

Pour qu'un tel projet puisse aboutir, il est essentiel de travailler en groupe. Dans un premier temps, nous avons regroupé le plus d'informations possibles que nous avons triées et synthétisées. Une fois cette tâche réalisée, nous avons commencé notre travail proprement dit. Nous avons d'abord essayé de déterminer la structure et les matériaux que nous allions utiliser, en fonction du cahier des charges. Ensuite, nous avons déterminé quelle était la méthode d'assemblage la plus adéquate. Avant de passer à la construction proprement dite, nous avons dimensionné notre passerelle et réfléchi aux différentes méthodes de mise en place.

II. CHOIX DE LA STRUCTURE

Pour la construction de ponts ou passerelles, il existe cinq principaux types de structures. Chacun présente des avantages et des inconvénients, nous allons les passer en revue afin de choisir celle qui sera la plus adaptée à notre projet. Remarquons qu'il est possible de combiner plusieurs types de structures de manière à optimiser la résistance.

Penchons nous dans un premier temps, sur les structures suspendues. Elles peuvent supporter des charges relativement élevées et sont assez esthétiques. Ces structures sont utilisées pour des ouvrages de longue portée. Or notre passerelle est exclusivement réservée aux piétons et cyclistes, ce qui ne représente pas une charge très élevée, de plus, elle n'a qu'une longueur de 5 mètres. Ces structures font appel à des méthodes de calcul et de construction trop compliquées à notre stade de formation. De plus, ce type de structure nécessite des fondations pour les pylônes ainsi que des ancrages pour les câbles, ce qui ne rentre pas dans notre cahier des charges. Nous n'avons donc pas opté pour ce type de structures. Pour des raisons similaires, nous n'avons pas non plus choisi une passerelle avec une structure à haubans qui présente des caractéristiques semblables aux ponts suspendus.



Pont suspendu : « Golden Gate Bridge »
San Francisco, États-Unis d'Amérique
Source : <http://www.structurae.de>

Pont à haubans : Pont d'Alamillo.
Séville (Andalousie), Espagne
Source : <http://www.structurae.de>



Adaptées pour de petites et moyennes longueurs, les structures en arc sont également très esthétiques. Malheureusement, elles nécessitent souvent des appuis avec encastrement. De plus, les calculs de résistance de l'arche ne sont pas simples vu la combinaison de différentes

contraintes. Il est aussi à noter que les procédés de construction seront plus complexes que pour d'autres types de structures.



Passerelle en arc :
Vaxholm, Stockholms län
(Suède)
Source :
<http://www.structurae.de>

Les ponts et passerelles en poutre simple sont constitués d'une ou plusieurs poutres parallèles qui assurent toute la portance de la structure. La poutre doit avoir la longueur totale du pont. Ce type de structure n'est pas optimal car la rigidité n'est assurée que par des poutres en flexion, ce qui implique un poids assez élevé et une faible portée.

Les structures en treillis sont adaptées pour des petites et moyennes portées. Leur développement est lié à celui des chemins de fer. Elles présentent l'avantage de ne solliciter les poutres qui la composent qu'en traction ou en compression. Or une poutre résiste mieux à ce type de sollicitation qu'à la flexion que l'on retrouve dans une structure en poutre simple.



Pont en treillis :
Maxau, Karlsruhe, Bade-Wurtemberg
(Allemagne)
Source : <http://www.structurae.de>

Il existe des passerelles qui utilisent différents types de structures à la fois comme celle de Solférino à Paris où la structure générale est en arc mais on y retrouve également des treillis.

Passerelle piétonnière de Solférino
Paris, France
Source : <http://www.structurae.de>



D'après les avantages que présentent les différents types de structures, nous avons décidé de mettre en œuvre une structure en treillis. Celle-ci sera constituée de deux treillis de part et d'autre du tablier. Leur rôle sera double, d'une part, ils serviront de poutres portantes et de l'autre, ils feront office de garde-corps. Il existe différents types de treillis, le choix de celui que nous utiliserons sera détaillé par après.

III. CHOIX DES MATÉRIAUX

Le cahier des charges nous impose certains critères concernant les matériaux. Pour répondre au mieux à ces exigences, nous avons pris en compte la possibilité de démontage, le recyclage, la résistance, le poids et le prix. Passons en revue ces critères et éliminons au fur et à mesure les matériaux qui n'y répondent pas. Nous aurons le choix entre les métaux comme l'acier et l'aluminium, les plastiques, les composites, sans oublier le béton et le bois.

1. Possibilité de démontage

Notre passerelle devant pouvoir se démonter dans de brefs délais, nous devons dès à présent repousser les matériaux coulés comme le béton. De plus celui-ci ne résiste qu'à la compression à moins de le combiner avec des barres en acier, ce qui complique fortement l'assemblage. Notons encore que ces matériaux sont relativement lourds et peu recyclables.

2. Le recyclage

Attardons nous quelque peu sur la notion de recyclage. Nous pouvons la définir comme suit : «Le recyclage est le traitement des produits récupérés dans un processus de production aux fins de leurs fonctions initiales ou à d'autres fins, incluant le compostage mais excluant la valorisation énergétique. »¹. Aussi ne faut-il pas confondre le recyclage avec la réutilisation. En effet, dans ce dernier cas, on ne peut retrouver le produit de départ.

Au sens de la définition, le bois n'est donc pas un matériau recyclable. Nous ne pouvons jamais créer un cycle d'utilisation. En effet, dès que l'on coupe, on agit de manière irréversible sur le matériau. De plus, l'utiliser comme combustible n'est pas considéré comme du recyclage vu que nous ne pouvons tenir compte de la valorisation énergétique.

L'acier est un matériau très recyclé, en effet, il suffit de le fondre pour pouvoir obtenir un acier de base pouvant être usiné et profilé à souhait. De plus, la qualité de l'acier n'est pas altérée par la refonte et tous les effets de déformations plastiques ou de trempes antérieures sont supprimés. Il en va de même pour l'aluminium.

Pour ce qui est des plastiques, il en existe deux types : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Les thermodurcissables ont la propriété de ne pas avoir de phase liquide mais de se décomposer dès que l'on dépasse une certaine température. Nous ne pouvons donc pas redonner sa forme primitive à une pièce en plastique thermodurcissable, ils ne sont donc pas recyclables. Les thermoplastiques se ramollissent sous l'action de la chaleur et se durcissent en se refroidissant de manière réversible. Citons, par exemple, le plexyglas qui aurait pu nous servir dans la réalisation du tablier, mais nous n'utiliserons pas ce matériau car il se griffe rapidement.

En ce qui concerne les composites, ils sont difficilement recyclables car ils sont constitués de différents matériaux. Le recyclage doit donc comporter une phase de séparation des matériaux ce qui implique des coûts supplémentaires et en font des matériaux peu recyclés.

¹ Source : http://www.packplast.org/_prog/legislation2.htm

Nous ne retiendrons pas non plus les matériaux céramiques qui nous limitent à cause de leur processus de fabrication. En effet, ces matériaux sont passés au four et nous sommes donc limités en dimensions. De plus ils sont assez cassants.

3. Résistance / Poids

Il ne nous reste maintenant que l'acier et l'aluminium, si on compare leur module de résistance à la traction, exprimés en MPa, on voit que l'acier est plus résistant. Il s'étend de 250 à 1155² suivant le type d'acier utilisé et de 29 à 280³ pour l'aluminium. Ce n'est pas pour autant que l'aluminium est à évincer de notre esprit. En effet, l'aluminium est plus léger que l'acier. Sa densité vaut à peu près 2,75⁴ alors que celle de l'acier est de plus ou moins 7,85⁵. Mais ce n'est pas une raison suffisante pour supprimer l'acier de notre liste de matériaux. En effet, il faudra moins d'acier que d'aluminium pour supporter une même charge. Il en résultera donc, peut être et malgré tout, un allègement de la structure grâce à l'acier.

4. Prix

Le prix sera le critère décisif qui arrêtera notre choix. Le prix de l'acier, à l'état brut, est compris entre 0,5 €/kg et 1 €/kg. En ce qui concerne l'aluminium, son prix se situe dans la fourchette 1,5 €/kg – 2 €/kg. L'aluminium est donc de 2 à 4 fois plus cher que l'acier. Or, nous l'avons vu précédemment, il faut plus d'aluminium pour obtenir la même résistance. Afin de minimiser les coûts, notre choix se portera sur l'acier.

² Source : CES Selector

³ Source : CES Selector

⁴ Source : CES Selector

⁵ Source : CES Selector

IV. NOTRE PASSERELLE

1. Treillis

a) Treillis pour notre passerelle

Nous avons décidé de réaliser les deux éléments porteurs de notre passerelle au moyen de deux treillis articulés, il nous faut maintenant décider quel treillis sera optimal. Notre cahier des charges nous impose une passerelle isostatique, dans le cas du treillis, cela nous conduit à introduire une relation entre le nombre de nœuds, de barres et de réactions de liaisons. Cette relation est $2N = P+3$ où N représente le nombre de nœuds et P le nombre de barres. Dans les treillis plans vérifiant cette relation, nous avons choisi celui de Pratt (nous avons placé en *annexe 1* les différents types de treillis). Ce treillis a la particularité de n'avoir que de la traction dans ses barres obliques. En effet, dans un treillis articulé, toutes les barres sont soit en traction soit en compression, et toutes les forces extérieures s'exercent aux nœuds. Nous l'avons donc préféré aux autres car nous pourrions remplacer les poutres obliques par des câbles, ce qui allégerait la structure.

b) Calcul de résistance des treillis

Il existe deux méthodes principales pour effectuer les calculs de résistance dans le treillis : la méthode de Ritter et l'équilibre aux nœuds. En voici une explication brève.

A. Méthode de Ritter

On désire calculer l'effort normal dans une barre. On va pour cela couper la structure en deux parties disjointes. Ensuite, on remplace les barres coupées par l'effort qu'elles subissent. On pourra alors écrire les équations d'équilibre en faisant en sorte que l'effort normal soit la seule inconnue dans l'équation. S'il y a plusieurs inconnues, on écrira l'équilibre de rotation autour du point d'intersection des autres vecteurs forces inconnus. Dans le cas où les deux autres forces ont leur point d'intersection à l'infini, cela devient un équilibre de translation vertical si les deux autres forces sont horizontales.

B. Equilibre aux nœuds

Le but est ici d'isoler un nœud en coupant les barres qui y aboutissent. On applique ensuite les efforts normaux et les efforts extérieurs (charge, etc.). Enfin, on écrit les différentes équations d'équilibre suivant les deux dimensions. C'est cette méthode que nous allons mettre en application afin de déterminer les efforts appliqués aux barres de notre système isostatique.

C. Calculs

D'après le cahier des charges, notre passerelle doit résister à un poids de 500 kg/m^2 ce qui équivaut environ à 5 kN/m^2 . Cela fait que notre passerelle doit résister à un poids de 25 kN . Chacun des deux treillis doit donc supporter $12,5 \text{ kN}$. A cela, nous devons rajouter $1,5 \text{ kN}$ qui proviennent du fait que la passerelle doit également supporter son propre poids. Or, nous avons

estimé que notre passerelle pèsera au maximum 300 kg. Ce qui fait que chaque treillis devra supporter 150 kg, ce qui équivaut comme dit précédemment à environ 1,5 kN.

Dans un treillis, nous pouvons considérer que la force répartie s'applique aux nœuds. Celle-ci étant dans chaque treillis de 14kN (12,5kN+1,5kN), l'effort se répartira comme montré sur la *figure 1*.

Toutes les mesures sur les schémas qui suivent sont exprimées en kN. Les barres verticales et horizontales mesurent 1,25 m et les barres obliques font un angle de 45° degré avec l'horizontale.

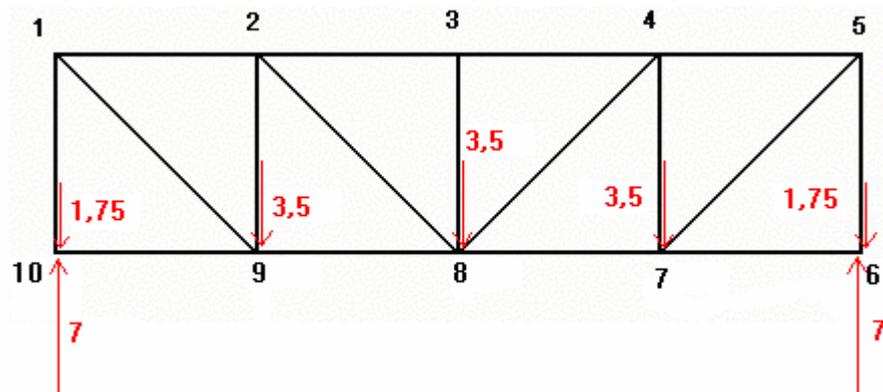
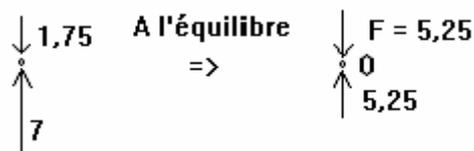


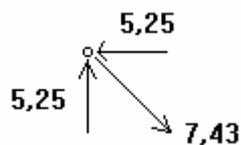
Figure 1

Commençons par le nœud 10.



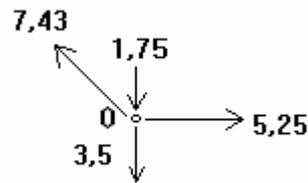
Nous remarquons qu'il n'y a aucune réaction horizontale.

Passons au nœud situé juste au dessus, le numéro 1.



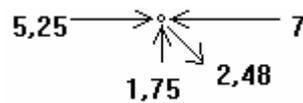
7,43 kN est le résultat de $5,25\sqrt{2}$ kN.

Etudions le nœud 9.



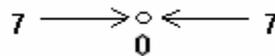
$$1,75 = (5,25\sqrt{2}) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 3,5 \text{ kN}.$$

Nous poursuivons avec le nœud 2.



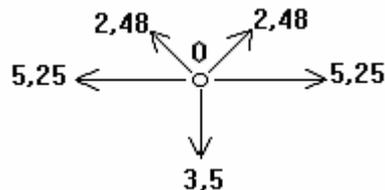
$$2,48 = 1,75\sqrt{2} \text{ kN}.$$

Nous arrivons au nœud 3.



Cela signifie que la barre centrale ne reprend aucun effort.

Terminons par le nœud 8.



Les nœuds 4, 5, 6 et 7 s'obtiennent en utilisant la symétrie du treillis.

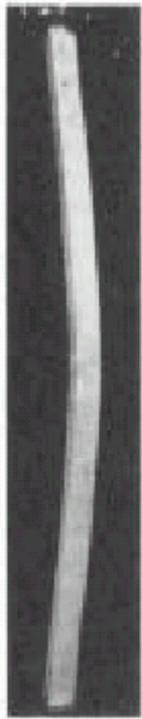
c) Dimensionnement du treillis

Pour constituer les différents éléments de notre treillis, deux possibilités s'offrent à nous. Nous pouvons d'une part utiliser des poutres et de l'autre des câbles. Les câbles ne sont utilisables que pour des éléments en traction tandis que les poutres résistent aussi à la compression. Etant donné le fort allongement des câbles nous utiliserons uniquement des poutres (une justification plus étoffée se trouve en *annexe 2*)

Après avoir calculé les efforts qui se répartissent dans les différentes barres du treillis, il faut choisir les poutres appropriées. Ces poutres doivent d'une part supporter les charges auxquelles la passerelle sera soumise mais aussi faire face, sans céder, à différentes éventualités, pour lesquelles elle n'a pas été prévue. C'est pourquoi, nous ne dimensionnons pas nos poutres au plus juste pour résister seulement à la charge maximale du cahier des charges, mais nous introduisons un

coefficient de sécurité de 1,5. Celui-ci nous assure que la passerelle résistera d'une part à la charge prévue mais aussi à certaines situations inattendues.

Comme nous sommes dans le cas d'un treillis isostatique, nous avons vu que les poutres ne sont soumises qu'à la traction ou à la compression. Tous les autres types de sollicitations qui apparaîtraient du fait que le treillis n'est pas totalement isostatique et articulé peuvent être négligés, car elles sont très faibles par rapport aux tractions et compressions.



Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux poutres soumises à la compression. Dans ce cas-ci, une poutre cédera pour deux raisons. Il se pourrait que l'effort que subit la poutre soit supérieur à la limite de résistance de l'acier et celui-ci céderait. Cependant, ce phénomène ne se rencontre pas souvent en compression car un autre problème apparaît avant : le flambement. Lorsqu'on comprime une poutre, avant de céder, elle va essayer de réduire l'effort qui lui est appliqué et va se plier sur un de ses côtés. Il faudra donc tenir compte de ce phénomène pour le dimensionnement des poutres. La *figure 2* ci-contre illustre ce qui se passe lorsqu'on comprime une poutre.

Figure 2 : flambement d'une poutre extrait de « Mécanique des structures et résistance des matériaux » P. BOUILLARD, chapitre 15 : le flambement

Le calcul de résistance d'une poutre en acier à la compression se fait comme suit.

$$\text{On calcule d'abord l'élanement de la poutre } \lambda = \frac{l_f}{r}$$

l_f est la longueur de flambement. Dans notre cas, elle vaut la distance entre deux nœuds. Si la poutre était encastrée aux deux extrémités, elle vaudrait la moitié de la distance entre deux nœuds, si la poutre était articulée d'un côté et encastrée de l'autre ce serait la longueur divisée par la racine carrée de deux et si la poutre n'était encastrée que d'un seul côté et libre de l'autre ce serait deux fois cette longueur.

$r = \sqrt{\frac{I}{\Omega}}$ est le rayon de giration de la poutre. Il correspond à la racine carrée du produit d'inertie I suivant la direction où l'on souhaite calculer la résistance au flambement divisé par la section de la poutre Ω .

Il peut se présenter trois cas de figure possible.

Si λ est inférieur à 20, il ne faut pas tenir compte du flambement et la limite de rupture de la poutre sera fonction simplement de sa limite élastique.

Si λ est compris entre 20 et 175 il faudra tenir compte du flambement dans le calcul de résistance de la poutre comme il sera expliqué par après.

Si λ est supérieur à 175 la poutre est instable et il faudra utiliser une autre poutre dont l'élanement sera plus faible.

Dans le cas où il faut tenir compte du flambement, la résistance théorique de la poutre à la compression E_{Max} s'exprime comme suit :

$$E_{Max} = \varphi_{fl} \cdot \Omega \cdot R_E$$

φ_{fl} est le coefficient de réduction au flambement, sa valeur se trouve dans des tables et est fonction de l'élanement λ et du type d'acier utilisé.

Ω est la section de la poutre.

R_E est la limite élastique à la traction de l'acier, c'est la valeur au delà de laquelle l'acier ne subit plus une déformation réversible mais plastique. Il existe différentes qualités d'acier qui se caractérisent par des valeurs différentes de leur limite élastique. Pour un acier de basse qualité de type S235 elle vaut 235 N/mm^2 c'est-à-dire 23500 N/cm^2 .

Faisons le calcul pour le plus grand effort en compression dans notre passerelle qui est de 7kN. Nous avons essayé différentes poutres et choisi des sections carrées de 30 mm et de 1,5 mm d'épaisseur. Ces poutres ont un rayon de giration de 1,16 cm et une section de $1,70 \text{ cm}^2$. Ces valeurs se trouvent dans des tables fournies par les fournisseurs d'acier. La longueur de flambement sera de $\lambda = \frac{125}{1,16} = 107,8 \text{ cm} \approx 108 \text{ cm}$

Dans les tables en *annexe 3* nous trouvons un coefficient φ_{fl} égal à 0,274.

La poutre résistera donc à $E_{Max} = 0,274 \cdot 1,70 \cdot 23500 \approx 11 \text{ kN}$, ce qui est bien plus de 1,5 fois supérieur à l'effort maximal en compression.

Pour des raisons d'homogénéité, de coût et de facilité pour l'assemblage, nous utilisons les mêmes poutres sur toute la passerelle. Il faudra encore vérifier que celles-ci résisteront à la traction. Pour ce faire, nous vérifions simplement la résistance de la poutre soumise à la plus forte traction. Si celle-ci résiste, toutes résisteront.

La résistance d'une poutre à la traction se calcule comme suit.

$$E_{Max} = \Omega \cdot R_E$$

Dans notre passerelle l'effort maximal en traction est d'environ 7,5 kN et une poutre résistera à $E_{Max} = 1,70 \cdot 23500 = 39,95 \text{ kN}$ ce qui est plus que suffisant.

Notre passerelle sera donc constituée de tubes carrés 30x30x1,5 mm.

d) Calcul du fléchissement de la passerelle (Théorème de Castigliano)

Le fléchissement de la structure est un facteur important, en effet, une structure qui plierait trop sous l'effet d'une charge pourrait céder. Nous avons donc fait une vérification théorique de la flèche de la structure dans le cas où elle est la plus sollicitée, c'est-à-dire lorsque la charge est maximale. Ce calcul reste très théorique. En effet, il ne prend en compte que la déformation de la structure dans le calcul de son fléchissement alors qu'en réalité il faudrait aussi tenir compte des éventuels jeux dus à la construction. De plus, nous considérons des nœuds articulés alors qu'en réalité, comme nous le verrons par la suite, leur rotation est impossible. Il est aussi à noter que les poutres horizontales sont constituées d'une seule barre de cinq mètres allant d'un bout à l'autre de la passerelle, ce qui empêche aussi la rotation aux nœuds.

Pour effectuer ce calcul, nous avons utilisé le théorème de Castigliano qui nous fournit la déformation $\delta = \sum_i \frac{S_i \cdot l_i}{A_i \cdot E} s_i$

S_i représente la contrainte qu'il y a dans la barre i dans le cas de charge considéré.

l_i est la longueur de la barre i .

A_i est la section de la barre i .

E est le module d'élasticité de l'acier, il vaut 205000 MPa (ou N/mm²).

s'_i est la contrainte qu'il y aurait dans les différentes barres du treillis si on appliquait à ce treillis une charge unité au nœud dont on souhaite connaître le déplacement et dans la direction de celui-ci (voir *figure 3*).

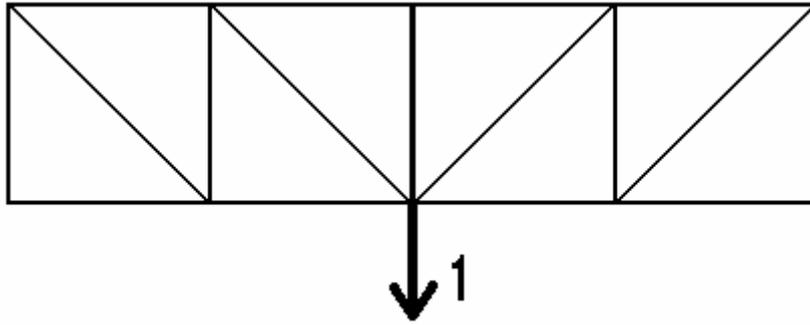
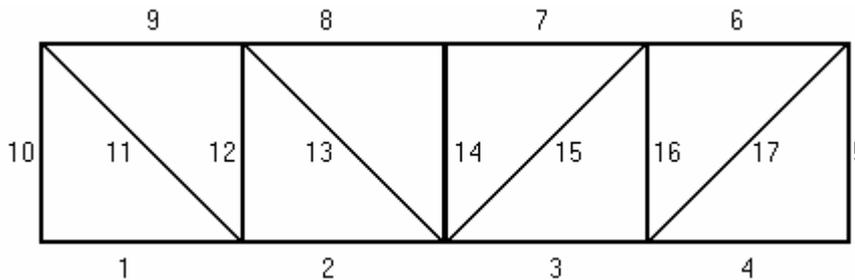


Figure 3

Le facteur $\frac{S_i \cdot l_i}{A_i \cdot E}$ représente en fait d'après la loi de Hooke l'allongement ou le rétrécissement de la barre considérée.

Flèche de la passerelle en son centre.

La section de toutes les barres est de 1,70 cm²



Barre	Effort réel S_i	Effort virtuel s'_i	Longueur de la barre l_i	$\frac{S_i \cdot l_i}{A_i \cdot E} s'_i$
5-6-9-10	-5250	-0,5	125	0,00941535
7-8	-7000	-1	125	0,0251076
12-16	-1750	-0,5	125	0,00313845
11-17	$5250\sqrt{2}$	$0,5\sqrt{2}$	$125\sqrt{2}$	0,02664366
13-15	$175\sqrt{2}$	$0,5\sqrt{2}$	$125\sqrt{2}$	0,00886925
2-3	5250	0,5	125	0,00941535
1-4-14	0	0	125	0

La flèche sera la somme des allongements pondérés par l'effort virtuel de chaque barre. Dans notre cas elle est d'environ 0,184 cm.

2. Garde-corps et tablier

Jusqu'à présent, nous avons étudié une structure plane minimisant la flèche pour une charge dans ce plan. Nous devons maintenant construire notre passerelle dans l'espace. Pour ce faire, nous avons décidé de créer une structure soutenue par les deux treillis porteurs plans explicités précédemment. Ces treillis servent de poutres traversantes mais également de garde-corps. Un tablier vient alors relier la partie inférieure des deux treillis comme cela est représenté à la *figure 4*.

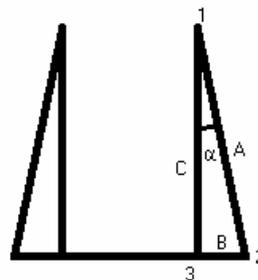


Figure 4

Nous avons attribué aux treillis une nouvelle fonction. Nous allons donc vérifier que celui-ci puisse l'assumer en toute conformité. Afin de définir les contraintes que doivent subir nos treillis, nous nous reportons aux normes qui nous imposent une résistance du garde-corps à une force de 1 kN/m exercée au sommet et horizontalement sur ce dernier. Dans ce projet, nous ne tiendrons pas compte de forces concentrées et nous imposerons une force maximale de 1,5 kN/m exercée sur le garde-corps afin d'intégrer un coefficient de sécurité. Notre treillis ne peut résister à cet effort. Nous allons introduire trois renforts par treillis de manière à reprendre ces efforts horizontaux.

En pratique, ce sont deux barres qui partent de la partie supérieure du treillis et qui sont reliées entre elles par une troisième passant sous la passerelle et assurant ainsi la rigidité de l'ensemble. Ces renforts permettent également de limiter la tendance des treillis à flamber.

Remarquons que la *figure 4* ne représente pas un treillis articulé et cela même si le nombre de nœuds et de barres satisfait à la relation $2N=P+3$. En effet, nous voyons que si nous prenons l'équilibre aux nœuds 2, il est facile de montrer que la barre B ne peut reprendre l'effort transmis par la barre A. Nous ne pouvons donc pas appliquer les résultats vus précédemment. Les barres de renforts seront placées aux extrémités de la passerelle ainsi qu'une paire au centre. Les renforts situés aux extrémités verront leurs barres inférieures reposées directement sur le sol, ce qui permet de reprendre directement l'effort vertical transmis par la barre A. L'effort horizontal sera alors repris par la barre A qui se verra infliger une compression d'environ $9 \text{ kN} = 1,5/\sin \alpha$ (la distance entre les nœuds 2 et 3 est de 25 cm). Nous voyons dès lors, que les tubes choisis pour le treillis conviennent. La barre inférieure sera alors soumise à une traction de 1,5 kN.

Le principal avantage d'utiliser le treillis comme garde-corps est de limiter la quantité de matériaux, donc le coût et le poids de notre passerelle, ce dernier étant primordial vu que l'on doit savoir la porter et la démonter.

Il nous reste à développer la partie traitant du tablier. Ce dernier va relier les deux treillis. Pour le réaliser, nous avons deux solutions ; soit créer un tablier portant c'est-à-dire un tablier qui va assurer lui-même sa rigidité, soit un tablier de remplissage. Il sera alors constitué d'une structure extérieure, qui assure la rigidité sur laquelle on va poser une plaque, qui va permettre le passage des piétons. Notre cahier des charges nous impose une largeur utile d'un mètre, ce qui d'après les normes constitue un usage piétonnier. Nous ne prenons donc pas en compte le passage de cycliste car d'après les normes, la largeur de la passerelle devrait être d'au moins un mètre et demi. Nous allons également nous tourner vers un tablier autoporteur afin de lui donner une fonction utile. Cela nous permet de diminuer à la fois le poids total de la structure mais également de réduire les opérations de montage.

Lors de nos recherches, nous avons trouvé deux types de tablier autoportants. L'un est constitué de traverses en métal dépoli (*figure 5b*), l'autre est un tablier constitué de plaques de caillebotis (*figure 5a*). Les deux structures doivent résister à la charge de 500 kg/m^2 et ne pas fléchir de trop sur une portée d'un mètre. Mécaniquement et ce d'après les brochures des firmes consultées⁶, les deux types permettent l'usage sur notre passerelle mais les traverses de métal nécessitent plus d'assemblage car les plaques sont plus petites et plus chères que celles du caillebotis. Nous nous sommes donc tournés vers un caillebotis en acier galvanisé pour limiter le coût. D'après les tables des constructeurs, nous avons remarqué que le caillebotis optimum serait fait de plaques d'un mètre carré. Il aurait des mailles de $33 \times 33 \text{ mm}$ et des barres portantes de $25 \times 2 \text{ mm}$

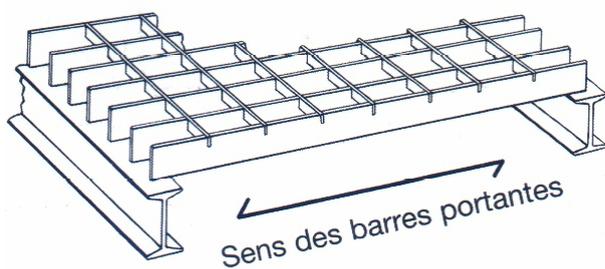


Figure 5a

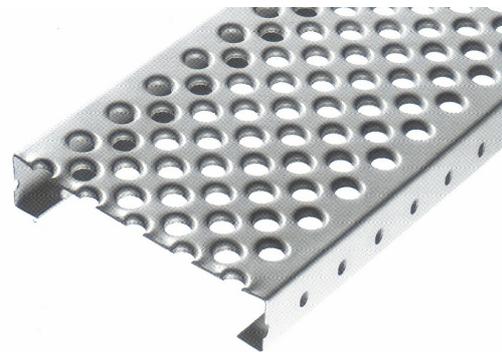


Figure 5b

Nous devons maintenant voir comment relier ce caillebotis à notre treillis. Les forces réparties sur le caillebotis doivent être reportées aux nœuds afin de respecter nos hypothèses de chargement. Notre caillebotis est calculé pour respecter les contraintes de flèche dans le sens de ses barres portantes. Néanmoins, il doit aussi les respecter dans l'autre sens, c'est-à-dire dans l'axe du treillis. Pour répondre à ces critères, nous allons placer sur chaque treillis une poutre en « L » laminée à froid sur laquelle viendra s'appuyer le caillebotis. Nous les prendrons d'une taille de $60 \times 60 \times 3 \text{ mm}$ de manière à respecter la contrainte de flèche sur une portée de 1,25 mètre, c'est-à-dire la distance entre deux nœuds. Nous avons également décidé de prendre les « L » symétriques de sorte à avoir une surface de contact suffisante avec le caillebotis pour le boulonner directement dans la poutre et ainsi rigidifier notre structure.

⁶ Source : Staco SA

Lors de la construction proprement dite de notre passerelle, nous nous sommes rendus compte que nos barres transversales fléchissaient. Cela est dû au fait que nous n'aurions pas dû négliger les moments situés aux nœuds où l'on retrouve les barres transversales. Ayant découvert la notion de fléchissement lors de ce projet, nous n'imaginions pas les conséquences que cela pouvait avoir sur la structure.

Pour pallier à ce problème nous devons vérifier la flexion de la barre transversale, et trouver une solution pour ne pas dépasser la contrainte maximale de notre acier. Afin de ne pas dépasser celle-ci, il faudrait rigidifier la barre transversale pour éviter son fléchissement. Pour ce faire, nous avons considéré que nous avons une poutre constituée de la transversale et de la plaque de caillebotis centrale. Afin que cette approximation soit acceptable, il faut que ces deux parties soient liées entre elles de manière rigide pour ne plus, en théorie, ne former qu'une seule poutre. Ceci se fera en accrochant le caillebotis aux nœuds centraux, ce que nous ferons à l'aide d'une cornière en « L » renversée que nous lierons à la première (figures 6). Il est à noter aussi qu'il faudra doubler la transversale. Les calculs complets se trouvent en *annexe 5*



figures 6

3. Finition

Nous devons également tenir compte de la dégradation de notre passerelle au cours du temps, ainsi que de l'aspect esthétique. Nous devons protéger notre passerelle contre la corrosion. Nous pouvons procéder de différentes manières. Une première façon est d'effectuer un sablage suivi d'une métallisation c'est-à-dire que nous allons poncer puis peindre avec une couche spéciale anticorrosion. On applique ensuite une couche de peinture de finition. Une autre manière de faire est d'utiliser, à la place de la peinture, un traitement par thermolaquage. Ce qui est meilleur mais également plus coûteux. Nous avons placé en annexe les différentes caractéristiques des peintures des firmes que nous avons consultées.

V. ASSEMBLAGE

1. Quels assemblages ?

Maintenant que nous avons dimensionné les barres qui composent notre passerelle, nous devons trouver un moyen de les assembler. Il existe diverses méthodes d'assemblage que nous avons passées en revue afin de trouver celle qui convient le mieux au cahier des charges.

Le critère primordial dont nous devons tenir compte est la démontabilité de la structure. De ce fait, des assemblages permanents ne peuvent pas être utilisés. Nous avons donc directement rejeté la soudure ou le collage ainsi que les rivets. Ces différents assemblages, en plus de ne pas être démontables, présentent d'autres inconvénients comme, par exemple, le fait que les rivets doivent être posés à haute température.

Il ne nous reste des lors que très peu de possibilités d'assemblage. Tout d'abord, il y a l'utilisation de clavettes ou de goupilles. Cette solution ne paraît pas très adaptée à notre structure. La solution la plus pratique et facile à mettre en œuvre est l'utilisation de boulons. Pour satisfaire au mieux la contrainte de prix, nous avons utilisé des tiges filetées que nous découpons à la bonne longueur et que nous maintenons en place par deux écrous. Pour s'assurer que les écrous ne se dévisseront pas, nous avons placé une rondelle entre l'écrou et la plaque.

Les boulons seuls ne permettent pas d'assurer l'assemblage de la structure. En effet, nous avons différentes barres qui arrivent aux nœuds. Nous pourrions accrocher les barres les unes à côté des autres et utiliser un boulon traversant les deux barres. Cependant, cette option sera à



rejeter car nous aurions alors des efforts qui ne se concentreraient pas en un point. De ce fait, il se créerait un moment de torsion, ce qui n'est pas recommandé pour une passerelle. Il serait donc préférable de trouver une option qui concentre en un point toutes les forces appliquées à un nœud. La solution la plus simple est d'utiliser des goussets. Il s'agit d'un ensemble de deux plaques qui vient enserrer chaque nœud (*figure 7*).

Figure 7

2. Dimensionnement des assemblages

Nous avons commencé par dimensionner les boulons nécessaires à notre passerelle. Ensuite, nous nous sommes préoccupés de la résistance des goussets et des poutres au niveau des assemblages.

Dimensionnement des boulons

Il existe deux causes principales pouvant conduire un boulon à céder : le cisaillement et la traction. Le cisaillement apparaît lorsque l'on applique deux forces opposées à la tige du boulon. A ce moment, la section risque de lâcher. C'est le cas le plus fréquent sur notre passerelle, cela se passe au niveau de tous les goussets (voir *figure 8*). La traction se produit lorsque le boulon est tiré dans le sens de sa longueur dans deux directions opposées, le boulon se comportera alors comme une poutre en traction. Lorsqu'on dépassera sa limite d'élasticité, il rompra (*figure 9*). Il n'y a que très peu de boulons soumis à la traction sur notre passerelle, ils se trouvent au niveau de la cornière en « L ».

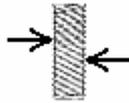


Figure 8 : cisaillement d'une tige filetée



Figure 9 : traction dans une tige filetée

Le calcul de résistance des assemblages est soumis à des normes aussi bien belges qu'européennes, les informations qui suivent proviennent du cours de quatrième année « Conception des ouvrages métalliques et mixtes » de Monsieur Eli SCHMIDT et sont extraites des Eurocodes.

Plaçons nous d'abord dans le cas du cisaillement au niveau des boulons qui assurent la mise en place des goussets. Il faudra prendre des boulons de diamètre suffisant pour reprendre les efforts qui passent d'une barre à l'autre. Le calcul de résistance ne se fera qu'avec le plus grand effort possible. En effet, si le boulon résiste à un grand effort, il sera suffisant pour un effort inférieur. De plus, nous ne prendrons pas des boulons différents suivant les efforts, il est préférable d'utiliser les mêmes boulons sur toute la structure. D'une part, cela facilite le montage puisqu'il ne faut pas jongler avec différents types de boulons et d'autre part, cela réduit le coût puisqu'il n'est pas nécessaire d'acheter de petites séries de boulons différents.

Si la section cisillée se trouve dans la zone du filetage, ce qui est le cas sur notre passerelle, il faudra que l'effort maximal soit inférieur à $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

f_{ub} est la valeur de la résistance à la traction de l'acier du boulon.

Cette valeur n'est pas la même pour tous les types de boulons. Comme notre assemblage n'est pas très sollicité par rapport à ce que pourrait supporter un boulon à haute résistance et que notre budget est limité, nous utilisons des boulons de charpente moins résistants mais suffisants. f_{ub} vaudra alors de 400 à 500 N/mm² suivant la qualité du boulon.

A_s est la section qui résistera du boulon, elle sera inférieure à la section réelle du boulon. En effet, le filetage ne participe pas à la reprise de l'effort.

γ_{Mb} est le coefficient de sécurité pour l'assemblage, il est pris à 1,25.

L'effort le plus intense dans notre passerelle est de $5,25 \cdot \sqrt{2}$ kN. Considérons des boulons de diamètre 8 mm et de résistance 400 N/mm². Pour ce diamètre, la section résistante est d'environ 32 mm².

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot 400 \cdot 32}{1,25} = 6144 \text{ N}$$

Nous voyons donc que de tels boulons ne sont pas suffisants pour reprendre le plus grand effort, il existe plusieurs possibilités pour remédier à ce problème. Nous pourrions tout d'abord prendre des boulons d'un diamètre plus élevé, cette option est à rejeter pour des raisons qui seront abordées lorsque nous dimensionnerons les goussets. Nous pourrions prendre des boulons à haute résistance mais leur prix plus élevé est un obstacle. L'option retenue a été de placer deux boulons à la suite l'un de l'autre, ainsi l'effort se répartira sur chacun d'eux et le boulon sera suffisamment résistant. De plus, le fait de mettre deux boulons rigidifie la structure et permet donc une meilleure stabilité de celle-ci, qui sera de ce fait moins sujette à la fatigue.

Il y a quelques boulons qui sont soumis à la traction, leur résistance est $F_{t,Rd}$.

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

Un boulon fileté résistera à la traction à $0,9 \cdot 400 \cdot 32 = 11520 \text{ N}$. Ce qui est suffisant pour soutenir l'effort, vu qu'il se répartit sur un grand nombre de boulons.

Notre passerelle sera donc constituée de boulons de 8 mm de diamètre à tous les niveaux. Un diamètre plus petit est à rejeter car il ne serait pas assez résistant dans le cas d'un boulon en traction, un diamètre plus grand sera aussi à rejeter car il se poserait alors un problème au niveau de la résistance de la poutre comme il sera expliqué dans ce qui suit.

Dimensionnement des goussets

Nous allons maintenant nous intéresser au dimensionnement des goussets. Il y aura plusieurs phénomènes à éviter pour obtenir des assemblages suffisamment solides. Tout d'abord, il faudra vérifier que l'effort exercé par le boulon au niveau du trou ne le rende pas oval. Ensuite, il faudra laisser une distance suffisante entre le trou et le bord de la plaque pour que lors de la mise en charge, elle ne se déchire pas. Enfin, il faudra vérifier que les sections restantes après avoir fait des trous sont encore suffisantes pour résister aux tractions et compressions.

Nous nous sommes tout d'abord intéressés aux dimensions de sécurité qu'il faut laisser sur les plaques et les poutres entre les différents boulons et entre les boulons et le bord d'une plaque. Les *figures 10* et *11* nous montrent ce qu'il se passe s'il n'est pas laissé une distance suffisante entre le trou et le bord de la plaque.



Figure 10

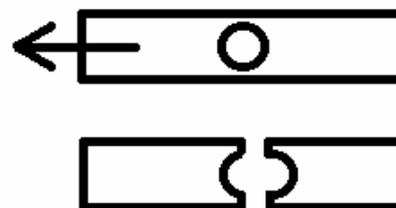


Figure 11

La largeur minimale à laisser entre le trou et le bord de la plaque dans le sens de la force e_1 est de 1,2 fois le diamètre du trou, dans le sens perpendiculaire à la force e_2 , 1,5 fois. Entre deux trous dans le sens de la force, la distance minimale p_1 est de 2,2 fois le diamètre du trou (voir *figures 12 et 13*). Comme nous utilisons des boulons de 8 mm, les trous devront être légèrement

plus grands pour permettre de laisser passer les boulons dans le trou. Nous ferons des trous de 8,5 mm de diamètre. Ces valeurs sont des valeurs minimales, il est bon de laisser une certaine marge pour plus de sécurité. Ces valeurs sont comptées à partir du centre du trou.

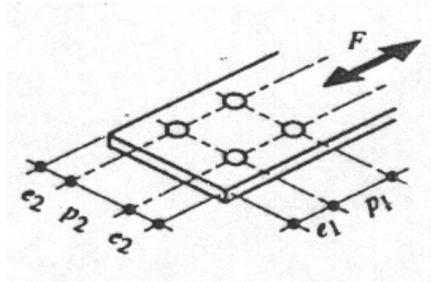


Figure 12 : distances de sécurité

Source : « Conception des ouvrages métalliques et mixtes », Eli SCHMIDT

	Valeur minimale (en mm)	Valeurs utilisées (en mm)
e_1	10,2	20
e_2	12,75	15
p_1	18,7	30

Figure 13

La valeur de e_2 a été prise à 15 mm car une plus grande valeur n'est pas possible. En effet, la distance entre un trou et le bord d'une poutre ne peut dépasser 15 mm puisque les poutres n'ont que 30 mm de largeur. Si nous avions utilisé des boulons plus larges, la valeur de e_2 aurait dépassé ce qui nous était permis.

Maintenant que nous sommes sûrs que les plaques et les poutres ne se déchireront pas sous l'effet des contraintes, nous devons vérifier que les trous ne s'ovalisent pas. L'ovalisation sera fonction de l'épaisseur des plaques et des poutres. Pour des raisons d'homogénéité, nous utiliserons des goussets de la même épaisseur que les poutres. La résistance de la plaque à la pression du boulon est $F_{b,Rd}$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}}$$

$$\alpha \text{ coefficient} = \min \left(\frac{e_1}{3d_o}, \frac{p_1}{3d_o} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1 \right)$$

d_o est le diamètre du trou (8,5 mm)

f_u est la résistance à la traction de l'acier de la pièce à assembler, nous utilisons de l'acier S235, donc cette valeur est de 235 N/mm².

f_{ub} est la valeur de la résistance à la traction de l'acier du boulon, 400 N/mm² au minimum.

d est le diamètre du boulon (8 mm)

t est l'épaisseur de la plaque où de la poutre (1,5 mm)

γ_{Mb} est le coefficient de sécurité (1,25)

Dans notre cas le coefficient α vaudra $\min\left(\frac{20}{25,5}; \frac{30}{25,5} - \frac{1}{4}; \frac{400}{235}; 1\right)$ ce qui vaudra
 $\min(0,784; 0,926; 1,70; 1) = 0,784$

La résistance de la plaque à l'ovalisation sera donc $F_{b,Rd} = \frac{2,5 \cdot 0,784 \cdot 235 \cdot 8 \cdot 1,5}{1,25} = 4421 \text{ N}$.

L'effort le plus important dans le treillis est de 7,42 kN, comme il se répartit dans chacun des deux boulons, l'effort que devra supporter chacun des trous est de 3712 N, ce qui est bien inférieur à la résistance maximale de la plaque. Les trous ne s'ovaliseront donc pas.

Nous avons dès lors dessiné les goussets dont les plans se trouvent en *annexe 6*.

Maintenant que nous sommes sûrs que les goussets et les poutres ne risquent rien au niveau des trous, c'est à dire que les trous ne s'ovaliseront pas et que le boulon n'arrachera pas le bord de la plaque, il nous faut encore vérifier que les trous effectués dans les poutres et les plaques laissent encore une section d'acier suffisante pour qu'il n'y ait pas de problèmes.

Pour en être sûr, nous pourrions vérifier ce qu'il se passe assemblage par assemblage, cependant cela prendrait un certain temps. La manière la plus simple sera de vérifier si le plus grand effort ne déchire pas le gousset de plus petite section. Le plus grand effort est d'environ 7,5 kN, la plus petite section perpendiculairement à l'effort se trouvera dans un de nos goussets (goussets en haut aux extrémités). La largeur de la plaque, en ayant déjà enlevé la diamètre du trou est d'environ 36 mm. Cela nous donne une section de 54 mm². Comme nous travaillons avec de l'acier S235 qui résiste à 235 N/mm², cette section ne dépassera cette limite élastique que si on lui applique en effort de plus de 12,5 kN. Ceci est bien supérieur au plus grand effort rencontré.

VI. OUTILLAGE ET RÉALISATION

Maintenant que nous avons fini de dimensionner les différents éléments qui composent notre passerelle, nous pouvons passer à la construction. Pour ce faire nous avons besoin des outils adéquats au travail de l'acier.

Il nous faudra tout d'abord des outils de mesure et de pointage pour pouvoir repérer à quel niveau il faudra couper, trous... les différents matériaux que nous avons commandés.

L'outillage de mesure se compose d'un mètre nous permettant de pouvoir couper les tubes et les cornières en « L » à la bonne longueur, d'une pointe à tracer permettant de tracer des lignes suffisamment fines sur de l'acier, et d'une équerre afin que ces lignes soient perpendiculaires au bord des tubes.

Ensuite, il nous faudra des outils afin de découper les tubes, cornières et goussets à la bonne longueur. Pour les tubes et les cornières nous avons utilisé une scie pendulaire hydraulique (*figure 14*). A l'origine nous pensions effectuer ce travail à l'aide d'une disceuse.

Pour découper les plats, étant donné leur faible épaisseur, nous avons utilisé une cisaille (*figure 15*).



Figure 14 : scie



Figure 15 : cisaille

Une fois que toutes les pièces ont été coupées à la bonne longueur, il nous a fallu percer les trous nécessaires au passage des boulons. Pour ce faire, nous avons utilisé deux méthodes suivant les pièces à percer. Pour les goussets qui n'ont qu'une épaisseur de 1,5 mm, nous avons utilisé une poinçonneuse (*figure 16*), ce qui nous a permis de faire les trous avec une grande précision. Pour toutes les autres pièces, ce moyen n'était pas approprié, soit du fait de l'épaisseur trop élevée comme pour les cornières en « L », soit du fait qu'il y avait deux épaisseurs à percer, comme pour les tubes. Nous avons alors utilisé une perceuse sur colonne (*figure 17*) afin de pouvoir faire des trous d'une bonne précision mais surtout afin que les deux trous dans un tube soient bien alignés.



Figure 16 : poinçonneuse



Figure 17 : perceuse sur colonne

Pour être certains que nos trous étaient alignés, nous avons d'abord effectué un pointage afin d'être sûr que la mèche rentrait précisément à l'endroit voulu. Nous avons ensuite effectué un premier trou avec une mèche de faible diamètre, ce qui nous permettait d'être très précis. Nous avons enfin percé les trous au diamètre final en nous aidant du premier trou.

Il reste encore un certain nombre d'outils qui nous seront nécessaires pour mener à bien la construction. Il nous faudra tout d'abord une lime pour éliminer les bavures dues aux découpes. Dans la même optique nous avons besoin d'une mèche spéciale nous permettant d'enlever les bavures inévitables lorsqu'on perce un trou dans de l'acier. Il nous faudra une scie à métaux pour découper les tiges filetées afin d'avoir les bonnes longueurs pour nos assemblages. Une fois que nous avons nos tiges filetées, il nous faut un jeu de clés afin de serrer les écrous. Il nous faudra aussi des gants et des lunettes de protection pour travailler en toute sécurité et se protéger contre les éventuelles projections de copeaux d'acier.

Pour la finition de la passerelle nous aurons besoin de pinceaux afin d'appliquer une couche de peinture anti-corrosion.

L'outillage, bien que nécessaire, est relativement cher. Certains outils ne sont pas faciles d'emploi et nécessitent un certain apprentissage. Aussi, des précautions sont à prendre lors de l'utilisation de certains d'entre eux pour ne pas se blesser.

VII. BUDGET

Il ne nous reste plus qu'à chiffrer le prix de notre passerelle. Pour la commande des différents matériaux, nous avons d'abord demandé un devis à différents fournisseurs. Ensuite, nous avons comparé les offres et choisi les plus intéressantes. Le prix total de notre passerelle (hors outillage) est fixé à 470,16 €. Ci-dessous, vous trouverez les prix exacts ainsi que les fournisseurs retenus.

CAILLEBOTIS PRESSÉS 5 plaques de 1 m ² (type C, mailles 33x33, barres portantes 25/2, acier de qualité ST.37.2).	5 m ²	36,89€/m ²	184,45 €
ATTACHES CAILLEBOTIS Attaches normales (à boulonner)	20 attaches	0,54€/attache	10,80 €
TUBES EN ACIER* 13 tubes carrés de 6 m en acier 30x30x1,5 (mm)	78 mètres	2,057€/m	160,45 €
« L » EN ACIER* 2 profils en « L » de 6 m en acier 60x60x3 (mm)	12 mètres	2,541€/m	30,49 €
PLATS EN ACIER* 2 plats cisailés hors tôle de largeur de 100 mm et de longueur 3m, épaisseur minimum 1,5 mm	6 mètres	4,45€/3m	8,90 €
PLATS EN ACIER* 2 plats cisailés hors tôle de largeur de 130 mm et de longueur 3 m, épaisseur minimum 1,5 mm	6 mètres	5,45 €/3m	10,90 €
TIGE FILETÉE M8 DIN 976, acier 4,6 zingué minimum (pas haute résistance)	10 mètres	0,4 €/m	4,00 €
ECROUS M8 DIN 439B, 4mm de hauteur, acier 4,6 zingué min.	400 pièces	0,02 €/pièce	8,00 €
RONDELLES M8, normales	400 pièces	0,73€/100 pièces	2,92 €
PEINTURE Primer 1992, couleur grise (2 pots de 5 litres)	10 litres	3,99 €/litre	39,90 €
DILUANT POUR PEINTURE Thinner GB 10 (1 pot de 5 litres)	5 litres	1,87€/litre	9,35 €

* tous les profilés en acier sont laminés à froid.

PRIX TOTAL

470,16 €

Nos fournisseurs :

TUBES EN ACIER + « L » EN ACIER + PLATS:

Ets Gouthiere & Vankerckem S.A.

Rue de la Sambre 4 bte 2

6032 Mont-sur-Marchienne

Tel : 071 43 29 76

Fax : 071 43 29 79

CAILLEBOTIS et ATTACHES CAILLEBOTIS :

S.A. Staco

Meerscheid 17

4760 Büllingen

tel : 080 54 00 70

fax : 080 54 00 71

info@staco.be

PEINTURE + DILUANT PEINTURE :

Houben S.A.

Rue du Térés

Zoning Industriel de la Boverie

4100 Seraing

tel : 04 385 07 07

fax : 04 385 06 60

TIGE FILETÉE + ECROUS + RONDELLES :

Droeshaut S.A.

Chaussée de Ninove 41

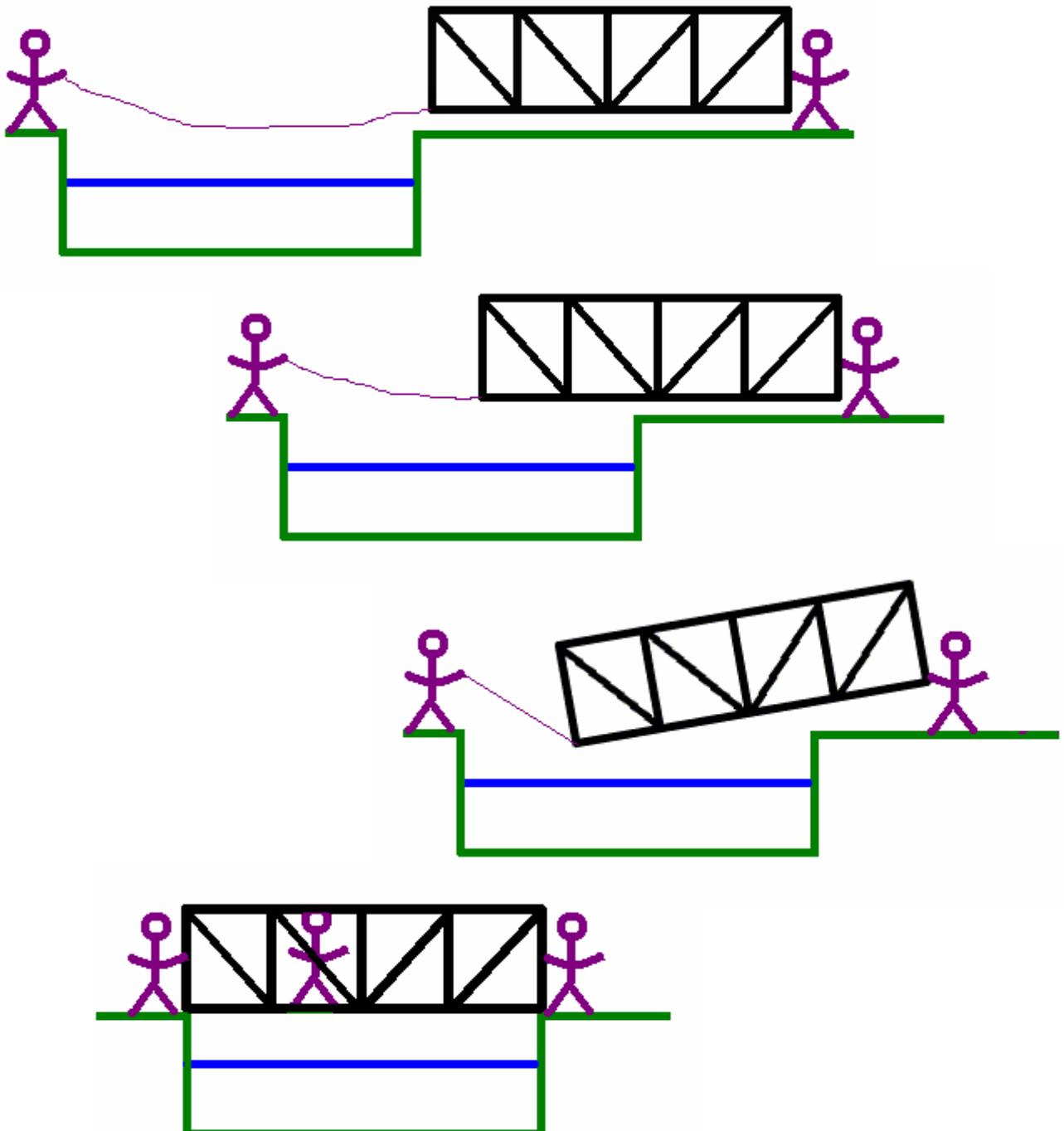
1080 Molenbeek-Saint-Jean

tel : 02 410 02 70

fax : 02 410 11 34

VIII. MISE EN PLACE

Pour la mise en place de notre passerelle, nous retirerons les quatre plaques de caillebotis des extrémités de manière à alléger la structure. Ensuite, nous placerons deux cordes aux extrémités d'un côté du treillis. Celles-ci sont lancées de l'autre côté de la berge. Nous nous répartissons de part et d'autre des berges, les uns porteront une extrémité de la passerelle et les autres tiendront les cordes. De cette manière, nous prenons la structure et la faisons traverser le trou. Une fois la passerelle en place, nous rattachons les plaques de caillebotis enlevées pour alléger la structure.



IX. CONCLUSION

Ce projet nous a permis de découvrir les difficultés liées à la construction d'une passerelle. À l'heure d'aborder la conception d'une telle structure, l'ingénieur n'est pas libre de faire ce qu'il veut. En plus d'être soumis à un cahier des charges, il doit veiller à respecter certaines normes. Au travers de la réalisation de notre passerelle, nous avons pu découvrir quelle devait être la démarche d'un ingénieur au moment d'aborder un problème. Nous avons pu nous rendre compte que les éléments d'une telle structure ne peuvent être considérées séparément. Rapidement, nous nous sommes rendus compte que tous les cours étaient liés et que les problèmes de l'ingénieur font appel à diverses matières à la fois.

Vu le stade auquel nous nous trouvons dans notre formation, nous n'avons pas eu l'occasion de couvrir l'entièreté du sujet. Il reste encore beaucoup de pistes à explorer. Ainsi, l'étude dynamique liée au déplacement du piéton sur la passerelle ou encore la prise en compte des charges concentrées n'ont pas été considérées. Ce qui est indéniable, c'est que ce projet nous a permis de changer le regard que nous portions sur ces structures dont nous ne pouvions pas imaginer la complexité.

X. BIBLIOGRAPHIE

LAMY A., *Mécanique Rationnelle I*, Bruxelles : Presses Universitaires de Bruxelles, 2000, 266 pages.

DELCHAMBRE A., *Mécanique Rationnelle II*, Bruxelles : Presses Universitaires de Bruxelles, 2001, 230 pages

WARZÉE G., *Mécanique des fluides et des solides*, Bruxelles : Presses Universitaires de Bruxelles, 1999, 286 pages

SCHMIDT E., *Conception des ouvrages métalliques et mixtes (tomes 1 et 2)*, Bruxelles : Presses Universitaires de Bruxelles, 2002, 494 pages

DELCHAMBRE A., *Technologies*, Bruxelles : Presses Universitaires de Bruxelles, 2002, 481 pages

BONHOMME J., *Les bois et les câbles dans les travaux publics*, Paris et Liège : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 1925, 348 pages

HIRT A., CRISINEL M., *Charpentes métalliques (volume 11)*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001, 715 pages

TIMOSHENKO S., YOUNG D.H., *Théorie des Constructions*, Paris et Liège : Librairie Polytechnique Ch. Béranger, 1961, 522 pages

GIET ET PASQUET, *Technologie de Construction*, Paris : Dunod, 1968, 788 pages

MAY G., *Staalconstructies deel 2*, Culemborg : Kluwer Schoolboeken, 1973, 468 pages

Le Petit Larousse illustré, Paris : Larousse – Bordas, 1998, 1788 pages

http://www.packplast.org/_prog/legislation2.htm

C.S.E.M.P., *C.S.E.M.P. Environnement : la législation*, Dernière mise à jour : 2002, consulté le 27 septembre 2002, les 5 et 11 octobre 2002.

<http://www.structurae.de>

Structurae, Dernière mise à jour : le 11 mars 2003, consulté les 23, 25, 26, 27 30 septembre 2002, 4, 9, 18, 19 octobre 2002, 15 novembre 2002, le 7 décembre 2002, les 14, 15 et 25 février 2003 et les 5, 8, 10 et 11 mars 2003.

<http://www.ulb.ac.be/smc/cours/cnst338/cnst338.html>

BOUILLARD P., *Mécanique des structures et résistance des matériaux*, Dernière mise à jour : non communiquée, consulté le 24 octobre 2002, les 22 et 25 novembre 2002, le 31 janvier 2003, les 24 et 25 février 2003, les 7, 8 et 10 mars 2003.

<http://www.ffacier.org/pages/rubriques-ffa/environnement/recyclage.htm>

FÉDÉRATION FRANÇAISE DE L'ACIER, *Fédération Française de l'Acier*, Dernière Mise à jour : non communiquée, consulté le 11 octobre 2002, les 15, 19, 25 et 28 novembre 2002 et le 7 décembre 2002.

<http://bricolage.free.fr>

RODRIGUEZ P., *Netbricolage*, Dernière mise à jour : le 19 juin 2002, consulté les 11 octobre 2002 et 14 février 2003.

<http://www.pghbridges.com/basics.htm>

BRUCE S. CRIDLEBAUGH, *Bridges and Tunnels*, Dernière mise à jour : 2003, consulté le 27 septembre 2002, les 2, 10, 19, 25, 27 octobre 2002

<http://www.matsuo-bridge.co.jp>

MATSUO BRIDGE CO, *Matsuo*, Dernière mise à jour : non communiquée, consulté les 15 et 16 octobre 2002.

<http://perso.club-internet.fr/labetapi/animations/betapoux/valor.html>

La Beta-Pi, Dernière mise à jour : non communiquée, consulté le 11 octobre 2002

<http://iut.univ-lemans.fr/gmp/cours/rebiere/ouvrages.html>

REBIERE J.-L., *Professeur Jean-Luc Rebière – ouvrages*, Dernière mise à jour : non communiquée, consulté le 1^{er} décembre 2002

http://www.a2im.com/aide_mem/new/RESISTANCE_DES_MATERIAUX.htm

Résistance des matériaux, Dernière mise à jour : non communiquée, consulté le 1^{er} décembre 2002

http://users.skynet.be/15102/matieres_plastiques.htm

Les plastiques, Dernière mise à jour : non communiquée, consulté le 16 octobre 2002

<http://www.google.be>

GOOGLE, *Google Belgique (moteur de recherche)*, Dernière mise à jour : dernière date susmentionnée, consulté le : toutes les dates susmentionnées.

XI. ANNEXES

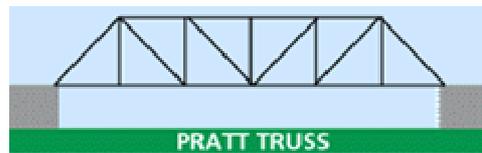
Annexe 1 : Différents types de treillis

Les matériaux utilisés pour construire des treillis sont en général le bois, l'acier ou le béton.

- Le bois (chêne en général) a de très bonnes performances tant en compression qu'en traction. Mais il a une mauvaise résistance au cisaillement ce qui induit un rapport poids-résistance assez mauvais.
- L'acier de par ses très bonnes performances en traction, compression, cisaillement, torsion est fort utilisé dans les treillis.
- Le béton jouit d'une très bonne résistance à la compression (Le béton armé peut lui résister aux compressions et tractions).

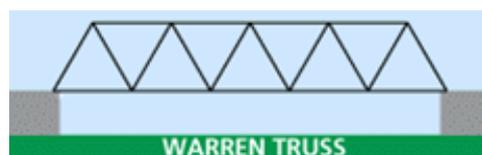
Différents types de treillis existent et ont été utilisés au cours de l'histoire :

- Treillis Pratt : système de barres horizontales, perpendiculaires et obliques. Les barres sont principalement sollicitées en traction.



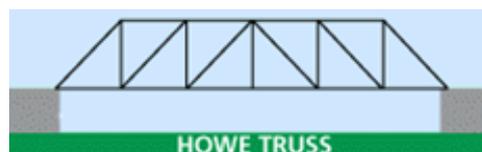
Source : <http://www.pghbridges.com/basics.htm>

- Treillis Warren : barres obliques et horizontales . Les barres sont principalement sollicitées en compression.



Source : idem

- Treillis Howe : ce type de treillis est l'équivalent du treillis Pratt à la différence que les barres obliques sont sollicitées en compression



Source : idem

Il existe de nombreuses variantes de ces différents types de treillis. Il en existe aussi d'autres types, cependant nous ne les aborderons pas ici car leurs structures sont bien plus complexes, ce qui implique une mise en place plus difficile.

Les ponts et passerelles à structures en treillis sont en général utilisés pour des structures de longueurs supérieures à 35 mètres, par exemple pour les ponts de chemins de fer et ceux ouverts à la circulation.

Annexe 2 : Câbles

Introduction

Les câbles en acier de construction sont des câbles à torons. Un toron est un ensemble de fils d'acier torsadés. Il existe de nombreux types de câbles qui dépendent du nombre de torons, de leur géométrie, du nombre de fils dans chaque toron, du matériau de l'âme du câble (âme en textile ou âme en acier), du sens d'enroulement... Ces différents aspects nous donnent les propriétés d'un câble : antigiratoires, résistance à la fatigue et à l'incurvation, déformations, charge de rupture... mais et surtout pour notre passerelle : l'allongement du câble.

Allongement

Pour minimiser l'allongement dans le câble, on aurait pu utiliser pour la passerelle un câble ayant ces propriétés :

- Câble ayant le moins de torons et de fils possible pour éviter un allongement dû à un effet giratoire.
- Câble croisé (ou normal), c'est à dire un câble dont les fils dans les torons seraient enroulés en sens contraire des torons pour éviter à nouveau cet effet giratoire engendrant un allongement.
- Câble à âme acier car l'acier est beaucoup moins flexible que le textile.

Pour calculer l'allongement d'un câble, on procède par des « essais de câbles ». On mesure l'allongement de rupture d'un câble qui doit avoir une longueur minimum de 3 mètres et on en déduit la valeur du module d'élasticité. Le problème est que cette valeur n'est pas constante dans le temps. Un câble qui a travaillé pendant un certain temps voit son module d'élasticité augmenter. La littérature nous dit que pour un câble ayant travaillé un certain temps le module d'élasticité (qui ne variera pratiquement plus) vaut 20% en plus que le module d'élasticité du câble neuf.

Il faut de plus considérer un allongement permanent et définitif qui est très rapide à la mise en place du câble et peut atteindre dans les premiers temps 2 à 4 %. Le problème est que cet allongement s'opère au début du temps de fonctionnement du câble, il est donc très difficile de savoir quand il s'arrête de s'allonger ainsi que de déterminer le taux exact d'allongement.

Conclusion

Etant donné la précision requise pour effectuer tous les calculs liés à la flèche de la passerelle, nous avons donc décidé de ne pas utiliser les câbles pour une solution certes moins originale mais beaucoup plus simple : le remplacement de ceux-ci par des barres d'acier. Ces barres sont les mêmes que celles qui composent les autres éléments de la structure de la passerelle (nous avons en conclusion tout de même gagné de l'homogénéité en défaveur de l'originalité).

Annexe 3 : Table de coefficient de réduction au flambement

Source : Institut Belge de Normalisation (I.B.N.)

Le tableau ci après donne les valeurs de φ_{fl} en fonction de λ pour diverses nuances d'acier.

Coefficients de réduction φ_{fl} (I.B.N. 1958).

λ	φ_{fl}			λ	φ_{fl}		
	A37	A42	A52		A37	A42	A52
20	1	1	1	66	0,694	0,672	0,605
21	0,993	0,993	0,991	67	0,687	0,665	0,597
22	0,987	0,986	0,982	68	0,681	0,658	0,588
23	0,980	0,979	0,974	69	0,674	0,651	0,580
24	0,973	0,972	0,965	70	0,667	0,644	0,571
25	0,967	0,965	0,957	71	0,661	0,637	0,563
26	0,960	0,958	0,948	72	0,654	0,630	0,554
27	0,953	0,950	0,940	73	0,648	0,623	0,545
28	0,947	0,943	0,931	74	0,641	0,615	0,537
29	0,940	0,936	0,922	75	0,634	0,608	0,528
30	0,933	0,929	0,914	76	0,628	0,601	0,520
31	0,927	0,922	0,905	77	0,621	0,594	0,511
32	0,920	0,915	0,897	78	0,614	0,587	0,503
33	0,914	0,908	0,888	79	0,608	0,580	0,494
34	0,907	0,901	0,880	80	0,601	0,573	0,485
35	0,900	0,893	0,871	81	0,594	0,565	0,477
36	0,894	0,886	0,862	82	0,588	0,558	0,468
37	0,887	0,879	0,854	83	0,581	0,551	0,460
38	0,880	0,872	0,845	84	0,574	0,544	0,451
39	0,874	0,865	0,837	85	0,568	0,537	0,443
40	0,867	0,858	0,828	86	0,561	0,530	0,432
41	0,860	0,851	0,820	87	0,554	0,523	0,423
42	0,854	0,844	0,811	88	0,548	0,516	0,413
43	0,847	0,836	0,802	89	0,541	0,508	0,404
44	0,840	0,829	0,794	90	0,534	0,501	0,395
45	0,834	0,822	0,785	91	0,528	0,494	0,386
46	0,827	0,815	0,777	92	0,521	0,487	0,378
47	0,820	0,808	0,768	93	0,515	0,480	0,370
48	0,814	0,801	0,760	94	0,508	0,473	0,362
49	0,807	0,794	0,751	95	0,501	0,466	0,354
50	0,800	0,786	0,742	96	0,495	0,459	0,347
51	0,794	0,779	0,734	97	0,488	0,451	0,340
52	0,787	0,772	0,725	98	0,481	0,444	0,333
53	0,781	0,765	0,717	99	0,475	0,435	0,326
54	0,774	0,758	0,708	100	0,468	0,426	0,320
55	0,767	0,751	0,700	101	0,461	0,418	0,314
56	0,761	0,744	0,691	102	0,455	0,410	0,307
57	0,754	0,737	0,683	103	0,448	0,402	0,301
58	0,747	0,729	0,674	104	0,441	0,394	0,296
59	0,741	0,722	0,665	105	0,435	0,387	0,290
60	0,734	0,715	0,657	106	0,427	0,380	0,285
61	0,727	0,708	0,648	107	0,419	0,372	0,279
62	0,721	0,701	0,640	108	0,411	0,366	0,274
63	0,714	0,694	0,631	109	0,404	0,359	0,269
64	0,707	0,687	0,623	110	0,397	0,352	0,264
65	0,701	0,680	0,614	111	0,389	0,346	0,260

Annexe 4 : Peinture

Nous avons demandé conseil à 2 sociétés : Sigma Coatings et Houben SA

Voici les caractéristiques des peintures fournies par ces 2 sociétés.

1. Sigma Coatings

A. Sigmacover CM primer

Définition primaire au phosphate de zinc à 2 composants, high build, à base de résine époxy et de durcisseur polyamide.

Caractéristiques Principales

- primaire époxy à emploi général et pouvoir garnissant élevé dans les systèmes de protection pour acier exposés aux conditions atmosphériques
- exempt de plomb et de pigments de chromates
- excellentes propriétés anti-rouille dans des atmosphères industrielles
- flexibilité prolongée
- durcit à basse température à partir de -10°C
- bonne adhérence sur l'acier et des anciens fonds époxy
- application aisée à la brosse
- résiste aux éclaboussures de produits chimiques d'agressivité moyenne

Données de base

Densité env. 1,4g/cm³
Rendement théo. 10,5 m²/l pour une couche de 60µm

Applications Pour le rouleau / brosse le diluant recommandé est : diluant Sigma 91-92 (pourcentage de dilution 0 - 5%)

Sécurité C'est une peinture à base de solvant. Eviter l'inhalation des vapeurs et éviter le contact entre la peinture humide et les yeux et la peau

Temps de séchage Sec manipulable (20°C) : 6h ; durcissement complet (20°C) : 4 jours

Prix +/- 30€ pour 5 litres (à vérifier)

B. Sigmacover CM miocoat

Définition revêtement high build (pouvoir garnissant élevé) à 2 composants, à base de résine époxy polyamide, pigmenté avec de l'oxyde de fer micacé

Caractéristiques Principales

- emploi général pour protection de constructions métalliques exposés à des conditions atmosphériques continentales
- durabilité excellente
- flexibilité prolongée
- durcit à basse température à partir de -10°C
- bonne adhérence sur des revêtements époxy vieilliss
- application aisée à la brosse

- résiste à l'eau et aux éclaboussures de produits chimiques d'agressivité moyenne
- résistant à des températures jusqu'à 200°C

Données de base

Densité env. 1,4g/cm³
 Rendement théo. 10,5 m²/l pour une couche de 60µm

Applications Pour le rouleau / brosse le diluant recommandé est : diluant Sigma 91-92 (pourcentage de dilution 0 - 5%)

Sécurité C'est une peinture à base de solvant. Eviter l'inhalation des vapeurs et éviter le contact entre la peinture humide et les yeux et la peau

Temps de séchage sec manipulable (20°C) : 6h ; durcissement complet (20°C) : 4 jours

Prix +- 30€ pour 5 litres (à vérifier)

2. Houben SA

A. Primer 1992

Définition Primer synthétique au phosphate de zinc à séchage rapide, à base de résine glycérophtalique et d'huiles traitées spécialement

Propriétés et applications

- Primer à haut rendement à séchage ultra rapide, bonne aptitude au rechapissage et bonnes propriétés anti-rouilles
- S'emploie comme couche de base anti-rouille dans des applications industrielles telles que l'acier de construction
- Primer 1992 a une excellente adhérence sur des surfaces d'acier bien nettoyées

Application Pistolet conventionnel ou Airless, rouleau

Données de base

Densité 1,3 g/cm³
 Rendement théo. 15 m²/l pour une couche de 30µm (épaisseur recommandée)

Temps de séchage

Sec hors-poussière 10 à 15 minutes
 Sec à cœur 2 heures

Prix 3,99€/l

B. Beckolak

Définition Peinture pour application au pistolet, à base de résine glycérophtalique et huiles traitées spécialement

Propriétés et - Couche de finition brillante à grand rendement

applications - Séchage rapide, bonne résistance aux intempéries et bonne brillance

Application Pistolet conventionnel ou Airless, rouleau

Données de base

Densité 1 à 1,3 g/cm³ en fonction de la couleur

Rendement théo. 16 m²/l pour une couche de 30µm

Temps de séchage

Sec hors-poussière 15 à 20 minutes à 20°C

Sec à cœur 4 heures

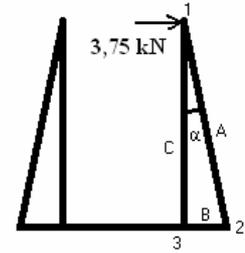
Prix De 5,9 à 7,02 €/l suivant la qualité de peinture voulue

Nous avons donc décidé de faire appel à la seconde société du fait de leurs prix attractifs et de la qualité de leurs peintures. Nous avons prévu de prendre 2 pots de 5 litres de Primer 1992 couleur grise (10 CO 7000 gris +- Ral 7000), ce qui nous a coûté 39,9€ auquel il faut ajouter le prix du diluant – Thinner GB 10 – qui est de 9,35€, ce qui nous fait un total de 49,25€.

Comme nous nous étions fixé un budget de 60€ pour la finition, nous avons dû faire l'impasse sur la couche de finition. Ce ne fut pas un problème étant donné que la couche primaire possède un pouvoir garnissant.

Annexe 5 : Fléchissement de la barre centrale

Les normes nous disent que la barre supérieure doit résister à une charge répartie de 1 kN/m, en tenant compte d'un coefficient de sécurité nous obtenons une charge de 1,5 kN/m. Comme nous nous plaçons dans le cas du renfort latéral du milieu, nous pouvons considérer que ce nœud devra reprendre un effort de $1,5 \cdot 2,5 = 3,75$ kN. Nous aurons dès lors un couple au nœud 3 qui vaudra $M = 3,75 \cdot 1,25 = 4,6875$ kN m = 46875 kg cm.

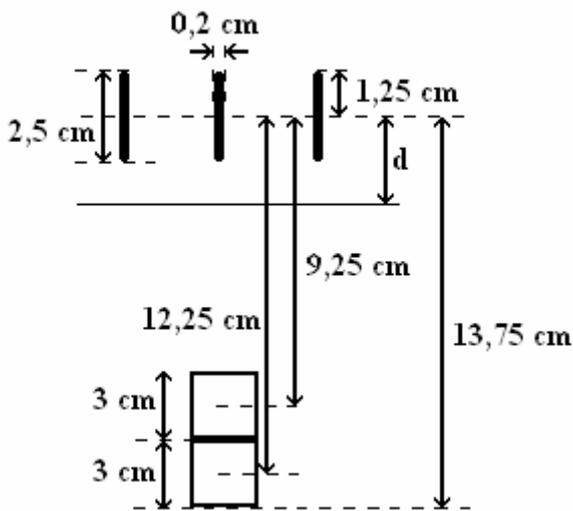


Le moment d'inertie de la transversale est celui de toutes les barres qui composent la passerelle et vaut $2,29$ cm⁴.

Une barre portante du caillebotis est en acier et mesure 25x2 mm. Son moment d'inertie par rapport à son axe principal d'inertie horizontal vaut $\frac{2,5^3 \cdot 0,2}{12} = 0,26$ cm⁴. Comme le caillebotis est composé de trente barres portantes nous pouvons considérer que le moment d'inertie total du caillebotis vaut trente fois le moment d'inertie d'une barre.

Nous allons considérer que nous avons créé une poutre constituée du caillebotis et de deux poutres transversales mises l'une en dessous de l'autre. Le moment d'inertie de cette poutre s'obtiendra en appliquant la formule de Steiner par rapport à l'axe principal d'inertie. Comme le moment d'inertie est minimal sur cet axe, en écrivant une équation du second degré où une inconnue est la distance entre l'axe principal d'inertie du caillebotis qui est connu et l'autre le moment d'inertie, nous pourrions trouver où se trouve cette axe et calculer la flexion de cette poutre.

$$I = 30 \cdot 0,26 + d^2 \cdot 2,5 \cdot 0,2 \cdot 30 + 2,29 + (9,25 - d)^2 \cdot 1,70 + 2,29 + (12,25 - d)^2 \cdot 1,70$$



En utilisant Matlab nous trouvons facilement la distance d pour laquelle I sera minimal.

$$d = 1,99 \text{ cm et } I = 340 \text{ cm}^4$$

En utilisant la formule d'écroutissage qui nous donne la contrainte de flexion d'une poutre $\sigma = \frac{M \cdot v}{I}$, où v correspond à la distance maximale entre l'axe principal d'inertie et le bord de la poutre. Dans notre cas, il vaut $13,75 - 1,99 = 11,76$ cm.

Nous avons donc un σ qui vaut 1621 kg/cm², ce qui est à la limite des contraintes admissibles.

Annexe 6 : Plans de notre passerelle