



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Projet de Fin d'Etudes

- 3^e année ENSTIB -

Le Viaduc de Garabit

Un ouvrage réalisé par Gustave Eiffel



Clément Désire et Cédric Gruber

2012 / 2013

Enseignant responsable : Jean-François Boquet

INTRODUCTION

Le viaduc de Garabit est un ouvrage ferroviaire situé dans le Cantal, construit en 1884 par Gustave Eiffel. Ce viaduc haut de 122m et long de 565m permet de franchir les gorges de la Truyère. Cette réalisation peut être considérée comme une prouesse technologique car les possibilités de l'époque étaient moindres (on utilisait encore les animaux pour amener les différents éléments structuraux sur le chantier). Quant au dimensionnement réalisé par Gustave Eiffel et son équipe, il a été lui aussi réalisé avec les moyens disponibles à l'époque : les théorèmes de Castigliano, les intégrales de Mohr, la force unitaire sur différents appuis...

Grâce à deux recherches bibliographiques menées de front par nos deux binômes, sur la construction du viaduc de Garabit et sur la vie de Gustave Eiffel, nous nous sommes efforcés dans un premier temps, de comprendre comment ce géant d'acier a été construit, et avons analysé les hypothèses pour le dimensionner. Pour appréhender le dimensionnement, nous avons dû, au préalable, nous exercer sur des systèmes plus simples avant d'appliquer ces théorèmes sur le viaduc.

Après ces étapes, nous avons pu redessiner, à partir du mémoire et des plans originaux d'Eiffel, une pile, un élément de tablier, et l'arc central sur le logiciel Cadwork. Il a ensuite été possible de récupérer les fibres neutres de l'ensemble des éléments et de les transférer directement sur un logiciel de dimensionnement, pour comparer les résultats obtenus par M. Eiffel aux résultats dégagés par ce logiciel et retraités par nos soins.

Nous nous sommes ensuite penchés sur l'étude des pièces qui pourraient être remplacées par du bois dans cette structure hors norme, en mettant en place une note de calcul propre à notre matériau.

SOMMAIRE

Table des matières

Introduction	2
Sommaire	3
Les objectifs	5
Déroulement de notre projet de fin d'étude	6
Bibliographie	7
I. Introduction	7
II. Contexte global de l'époque	7
III. Le contexte local	8
IV. La construction du Viaduc de Garabit	9
IV.1. Un projet de longue haleine.	9
IV.2. Les premiers tracés du viaduc de Garabit.	9
IV.3. Le chantier du viaduc de Garabit	10
IV.3.a. La préparation du chantier	10
IV.3.b. Les matériaux, le transport et la communication	10
IV.3.c. Les ouvriers du chantier de Garabit.....	11
IV.3.d. Les différentes étapes de la construction.	12
V. Changement de visage de Garabit	14
V.1. 1992 à 1998 : la remise en peinture du viaduc.....	14
V.2. Les moyens pour l'entretien	15
V.3. Juillet 2001, l'illumination du viaduc.	15
V.4. 2010 : D'importants travaux à Garabit.....	15
VI. Le Viaduc en quelques chiffres	16
VII. Sources	17
VII.1. Ouvrage	17
VII.2. Emission télévisée.....	17
VII.3. Sites internet	17
Calcul des tabliers et piles	18
VIII. Les tabliers	18
VIII.1. Application de la force unitaire sur 3 appuis	18

IX. Calcul des différentes raideurs des piles. 20

IX.1. Calcul de la raideur de la grande pile coté Neussargues. 20

IX.2. Calcul de l'inertie du tablier 23

IX.3. Modélisation pour applique la force unitaire sur le viaduc 23

IX.4. Tablier coté Marvejols 27

X. Modélisation des piles sur Cadwork..... 28

X.1. Stratégie de dessin..... 28

X.2. Problèmes rencontrés avec Cadwork..... 29

XI. Transfert vers Acord Bat..... 29

XII. Calcul des moments d'inertie 30

XII.1. Calcul des centres de gravités et d'inertie pour les cornières 30

XII.2. Centre de gravité et d'inertie des arbalétriers..... 31

XII.3. Centre de gravité et moments d'inertie des Treillis..... 33

XIII. Modélisation Acord Bat..... 34

XIII.1. Problèmes rencontrés avec Acord Bat. 36

Conclusion 37

Abstract 38

Table des illustrations..... 39

ANNEXES 40

XIV. Annexe 1 : Intégrales de Mohr..... 40

LES OBJECTIFS

Les objectifs de ce projet sont nombreux :

- Savoir comment Gustave Eiffel a dimensionné et réaliser ce viaduc.
- Etudier si la structure est surdimensionnée.
- Utiliser les moyens modernes (logiciels) pour réaliser ce qu'Eiffel a fait à la main et comparer les résultats.
- Intégrer des théorèmes que nous n'avons pas appris dans nos unités d'enseignement.
- Voir qu'elle pièce serait possible de remplacer par du bois.
- Avoir une bonne méthode de travail pour gagner du temps lors des différents points réalisés.

DEROULEMENT DE NOTRE PROJET DE FIN D'ETUDE

Notre projet de fin d'étude a été suivi par Monsieur BOCQUET. Depuis fin octobre, nous avons programmé une réunion hebdomadaire pour nous permettre de travailler régulièrement sur ce projet.

Nous sommes deux groupes sur ce projet et nous avons toujours travaillé ensemble. La répartition du travail a été la suivante :

Sarah et Hélène, ont réalisé une bibliographie sur la vie de Gustave Eiffel et ont recalculé et dessiné la partie arc du viaduc.

Nous, nous avons conçu une bibliographie sur le viaduc, et nous nous sommes occupés des piles et tablier (calcul et dessin sur Cadwork).

En premier lieu nous avons lu le mémoire de Gustave Eiffel que Monsieur BOCQUET nous a confié pour s'imprégner du sujet. Vu son volume nous avons élaboré un sommaire détaillé de ce mémoire pour nous aider par la suite (voir annexe). En parallèle, nous avons effectué des recherches pour la bibliographie ce qui nous a permis de mieux comprendre comment le viaduc a été bâti et calculé.

En lisant, ce mémoire, nous avons souvent relevé que Gustave Eiffel, utilisait les théorèmes de Castigliano, la force unitaire, et les formules de Carnot. Ne connaissant pas c'est outil, nous avons dû nous entraîner sur des exercices plus simples, avant de pouvoir nous lancer dans les calculs du dit viaduc de Garabit.

Monsieur BOCQUET nous a également donné les plans officiels du viaduc, qui ont été dessinés à la main par les ingénieurs de Monsieur Eiffel. Après les avoir imprimés, nous avons pu modéliser sur Cadwork. Il nous a fallu un certain temps d'étude avant de vraiment commencer. Nous avons dû chercher comment chaque éléments était constitué et comment ils étaient assemblés et, malgré une impression de symétrie sur les plans, nous avons constaté que rien n'était tout à fait identique.

Pour la partie calcul, une fois les différents théorèmes acquis, nous avons eu un gros travail de calcul d'inertie avant de les intégrer dans nos feuilles de calcul. Les résultats obtenus sont comparés à ceux du mémoire dans tout notre rapport.

BIBLIOGRAPHIE

I. Introduction

Le Géant de Garabit est un viaduc ferroviaire qui se situe dans le Cantal. Il relie les gares de Marvejols et Neussargues en passant à 124 mètres au-dessus de la Tuyère. Le mot « Garabit » proviendrait de deux mots de langue Romane : « Garra » qui signifie jarret et « Biau » signifiant bœuf. L'interprétation que l'on peut en faire est la suivante : « la côte abrupte qui prise le jarret des bœufs ». Dans le dictionnaire topographique de la France comprenant les noms de lieux anciens et modernes datant du 27 janvier 1992 on trouve « Garaby » avec la définition suivante : viaduc en fer, commune de Ruines et de Chaliers, Chemin de fer du Midi, section de Neussargues à Sévérac-le-Château.

II. Contexte global de l'époque

La France connaît au milieu du XIX^{ème} siècle un important changement dû à l'ère industrielle qui voit apparaître des progrès considérables ; comme la production de fonte et d'acier qui est multipliée par cinq. On augmente également la production de machines à vapeur comme les navires et les locomotives qui n'arrêtent pas de s'améliorer et qui commencent à dépasser les 100km/h. Les techniques agricoles permettent un meilleur rendement, c'est aussi l'apparition des grands magasins, le début des expositions universelles qui reçoivent en 1855 plus de 5 millions de visiteurs. Nous devons ces changements essentiellement à Napoléon III qui renversa par un coup d'état le Second Empire le 4 septembre 1870. Napoléon III est un homme intelligent, obstiné, secret, et plus humain que son oncle. Il entreprend et dirige les grands travaux d'urbanisation et d'agrandissement de la Capitale, l'installation de 600 km d'égouts et d'adduction d'eau courante, l'éclairage au gaz, des hôpitaux, des casernes, des théâtres ; c'est l'époque où les 20 arrondissements parisiens voient le jour.

Parallèlement à ces nombreux changements, le réseau ferroviaire français se met progressivement en place. Alors que les Etats-Unis sont enthousiastes à l'idée du rail et de la locomotive, les Français sont un peu plus timides vis-à-vis de ce nouveau moyen de transport. Ils craignent la vitesse, l'inconfort du voyage, certains y voient un gâchis des terres labourables, l'affolement du bétail lors du passage du train. D'autres y voient un essor économique considérable. L'Angleterre et la France vont d'abord développer les voies ferrées à des fins économiques, dans le domaine de l'industrie, et notamment pour l'extraction du charbon. En 1863, l'achèvement du viaduc de Busseau-sur-Creuse près de Guéret, permet d'exporter le charbon. C'est le parfait exemple qui va permettre de démontrer les atouts de ce mode de transport ; sans tarder le milieu agricole y tire les avantages pour le transport de

bestiaux et des produits agricoles. Au début du XXème siècle le tourisme profitera des installations ferroviaires pour voyager et découvrir le pays.

La construction des lignes s'est faite progressivement. En 1870, 17 500 km de voies ferrées sont comptés contre 3 000 km en 1850. Ce n'est qu'en 1880 que l'on parle de pénétration de la France rural par le rail. Il y a également, à cette époque, un programme qui annonce l'ouverture de 150 nouvelles lignes et le projet de desservir toutes les sous-préfectures. A la fin du XIX siècle c'est 45 000 km de voies ferrées qui sont désormais construits. Paradoxalement en 2006 on ne compte plus que 31 000 km rails contre 36 000 km de réseau routier (nationales et autoroutes confondus).

Les voies ferroviaires sont un énorme enjeu économique au XIXème siècle. Plus personne ne s'oppose au rail. Les vendeurs de vin seront les plus fervents défenseurs du train car leurs produits sont transportés avec un minimum de secousses en un temps réduit. Et comme pour le Cantal et la Lozère, les enjeux économiques sont énormes, à partir de 1860 les constructions de lignes de voies ferrées se succèdent dans ces régions.

III. Le contexte local

Le viaduc de Garabit est situé au cœur du plus haut massif français de moyenne montagne : le Massif Central. Avec plus de quatre mille communes, vingt-deux départements, 6 régions, et 85 000 km², l'aménagement du réseau ferroviaire a été particulièrement compliqué. De nombreux ouvrages d'art : une multitude de ponts, 40 tunnels et 35 viaducs (dont 18 métalliques) ont dû être construits et ont considérablement freiné le développement ferroviaire. L'entreprise de Gustave Eiffel a fortement contribué à la croissance de cette région (cf. Tableau 1)

Les ouvrages d'art du Massif Central construits par la société de Gustave Eiffel

VIADUC	LIGNE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	LONGUEUR	HAUTEUR	LARGEUR	INSCRIPTION M.H.
Rouzat	Gannat - St-Bonnet (Allier/Auvergne)	1867-1869	180 m	59 m	4.50 m	8 décembre 1976
Neuvial	Gannat - St-Bonnet (Allier/Auvergne)	1867-1868	160 m	44 m	4,50 m	8 décembre 1965
Tardes	Montluçon - Eygurande (Creuse/Limousin)	1882-1884	251 m	91 m	8 m	-
Garabit*	Neussargues - Marjevois (Cantal/Auvergne)	1880-1884	565 m	122 m	3,95 m à la clé	14 septembre 1965

* Inscription sur la liste supplémentaire des monuments historiques

Tableau 1 : Les ouvrages de la société de Gustave Eiffel

IV. La construction du Viaduc de Garabit

IV.1. Un projet de longue haleine.

L'idée de construire une ligne reliant Neussargues à Béziers date de 1862 mais cette ligne ne sera ouverte que 26 ans plus tard. De nombreux événements viendront perturber la construction, comme la guerre de 1870, des projets refusés, des discussions de tracé interminables, des faillites de compagnies, mais également le relief. En tout, l'ouverture de cette ligne connaîtra 8 étapes différentes : la compagnie Graissessac-Béziers a ouvert le premier tronçon de Béziers à La Tour-sur-Orb en 1858. Par la suite, la Compagnie des Chemins de Fer du Midi ouvrira les autres portions de la ligne. Le dernier tronçon qui part de Saint Chély d'Apcher pour rejoindre Neussargues sera ouvert le 10 novembre 1888.

IV.2. Les premiers tracés du viaduc de Garabit.



Figure 1 : Le viaduc de Maria Pia, franchissant le Douro

Le premier tracé pour traverser la vallée d'Arcomie a été approuvé en 1877 par le ministre en charge des travaux publics. L'idée est de construire un pont de pierre d'une vingtaine de mètres de hauteur au-dessus de la Truyère, et de rattraper les deux versants pour atteindre les plateaux. Malgré que ce tracé soit tout à fait classique et conforme aux normes, il présente l'inconvénient de créer, d'un côté

comme de l'autre, un gros dénivelé et donc un considérable allongement du parcours. Le prix très coûteux et l'exploitation médiocre de ce premier tracé, ont fait qu'en 1879 le projet du viaduc de Garabit est né.

C'est avec l'accord de tous, que les différents ingénieurs ont sollicité les services de Gustave Eiffel. En effet après avoir réalisé un exploit au Portugal avec le viaduc de Douro (cf. Figure 1 et Figure 2) également nommé viaduc de Maria Pia à Porto, il semble le seul à pouvoir relever le défi. Le deuxième homme à avoir marqué ce viaduc d'exception s'appelle André Léon Boyer. Architecte de métier, il est chargé de réaliser l'étude de la ligne du chemin entre Marvejols et Neussargues. Remarqué par ses compétences, ses supérieurs lui confirment rapidement la partie Cantalienne de la ligne.



Figure 2 : Le viaduc de Maria Pia aujourd'hui

IV.3. Le chantier du viaduc de Garabit

IV.3.a. La préparation du chantier

Le village le plus proche étant à 6 km du site, il fallut construire un village de baraquement : dortoirs, cantine, pour les ouvriers et leur famille, écoles, bureaux pour les services administratifs, écuries pour les chevaux et les bœufs. Même un facteur a été nommé pour distribuer le courrier. Une grosse partie du matériel nécessaire à cette construction a été récupéré du chantier du viaduc de Maria Pia, et les différents matériaux en particulier la chaux, les cordages et le ciment, ont nécessité la construction d'un magasin pour le stockage au sec.

IV.3.b. Les matériaux, le transport et la communication

Les ouvriers du chantier de Garabit ont commencé en janvier 1888 par la rive droite, la plus difficile d'accès.

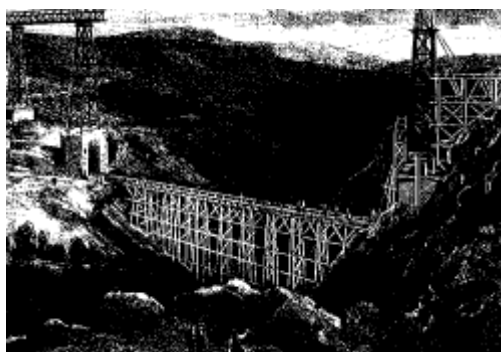


Figure 3 : Pont de service

La première construction fut celle d'un ouvrage de desserte afin d'aménager cet accès à la rive droite. Il était impossible d'atteindre celle-ci, à moins de très longs détours. Le problème fut résolu par un pont de service en charpente qui gagnait les 2 rives et dont le plancher, établi au niveau inférieur des deux grandes piles s'élevait à 33m au-dessus du fond de la vallée (cf. Figure 3).

Après avoir commencé les fouilles, c'est à partir de mi-septembre qu'ils commencèrent à bâtir les maçonneries (cf. Figure 5). Ce pont en bois fut d'une importance capitale pour transporter les matériaux.

Pour réaliser les différentes maçonneries, l'emploi d'estacades était utilisé (cf. Figure 4). Ces constructions étaient des sortes de plates-formes en charpente, établies à flanc de coteaux. Ces estacades étaient reliées à des treuils à vapeur pour acheminer les matériaux à l'endroit le plus rapproché du lieu d'emploi. Du côté de Neussargues, le plus accidenté, 3 estacades étaient utilisées. C'est grâce à elles et à 8 hommes qu'il a été possible de soulever 2.250 tonnes. Il fallait une heure et demie pour effectuer la translation d'une pièce à la vitesse ascensionnelle de 1m/min.

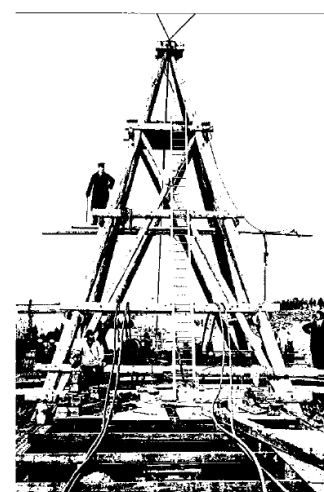


Figure 4 : Une estacade

Les bœufs étaient le moyen de traction le plus utilisé, mais il restait cependant limité un bœuf ne pouvant tracter que 6 tonnes par jour.

Une ligne téléphonique, spécialement mise en place pour coordonner l'avancée des travaux, a pu voir le jour entre la rive gauche et droite.

L'organisation sur le chantier de Garabit était totalement différente du chantier portugais où beaucoup de matériaux et de parties de l'ouvrage étaient acheminées par bateaux le long du fleuve.

Les maçonneries terminées, la fabrication des éléments en fer débuta dans les ateliers de la société Eiffel. Les pièces étaient ensuite placées sur des camions tirés par des chevaux pour être acheminées jusqu'à la gare la plus proche afin d'être transportées jusqu'à Neussargues. Les 34 derniers kilomètres restant, entre Neussargues et le chantier, était parcourus par de lourds attelages

composés essentiellement de chevaux. Ces différentes pièces arrivées prêtes à être installées (peinture et trous pour rivets déjà effectués), leur manipulation se faisait sur des petits chariots (des diables) trainés par des bœufs. La mise en place des différentes parties métalliques s'effectuait à la force humaine, car à cette époque on ne disposait pas d'appareils de levage comme aujourd'hui.



Figure 5 : Les maçonneries

IV.3.c. Les ouvriers du chantier de Garabit



Figure 6 : Travail des moellons à la boucharde

Le plus souvent on trouvait une centaine de personnes sur le site, mais ce sont plus de 400 ouvriers qui ont défilé sur l'ensemble du projet. Près de 200 étaient Italiens, spécialisés dans la taille de pierre et le travail des moellons à la boucharde (cf Figure 6). Ces personnes se décomposaient en 25 maçons présents lors de la construction des fondations et 28 au moment du montage de l'arc. Au niveau de l'ambiance, la cohabitation n'a pas toujours été très facile, et a souvent perturbé les habitudes des habitants de la région. Il a été relevé que les Italiens essayaient souvent de séduire les filles des villages avoisinants, ce qui provoquait quelques rivalités entre les ouvriers. Il est également arrivé à certains ouvriers de partir à la pêche avec des batons de dynamite récupérés du chantier.

IV.3.d. Les différentes étapes de la construction.

1) Le montage des piles et le lançage du tablier.



Figure 7 : Montage de la première pile

L'assemblage des différents éléments de la structure métallique est réalisé à l'aide de rivets posés à chaud. Cette technique fait appel à un savoir faire bien particulier et aujourd'hui il n'y a plus beaucoup de personnes capables de les poser de cette façon. Les soubassements des cinq piles métalliques exigeront deux ans de travaux. Le montage de la première pile débute le 1^{er} août 1882, elle est montée en 19 jours (cf Figure 7), la pile n°2 en 46 jours, la n°3 en 68 jours, la n°4 en 102 jours et la pile n°5 coté Neussargues en 100 jours.

A chaque pile a été affecté une équipe de 11 hommes qui avaient tous un rôle bien précis dans l'opération de montage. Simultanément on commence à monter les premiers panneaux de travées du tablier, sur chacune des deux rives. Progressivement, du côté Marvejols, le tablier prend appui sur les quatre premières piles métalliques (cf. Figure 8), alors que la pile n°5 repose solidement sur sa maçonnerie. A ce stade de la construction, beaucoup de monde prédisait une fin tragique dû à l'énorme porte-à-faux. Même certains ingénieurs rejoignaient l'idée d'un écroulement. C'est d'ailleurs ce qui s'est passé non pas sur le site de Garabit, mais sur le viaduc de Tardes, où dans la nuit du 27 janvier 1884 des vents violents ont fait basculer les 55 m de porte-à-faux au fond de la gorge.



Figure 8 : Montage du tablier simultanément au montage des piles

2) *Le lancement de la construction de l'arc*

Le lancement de l'arc s'est fait le 24 juin 1883. L'intrados de l'arc est clavé, c'est-à-dire assemblé au moyen de rivets. L'arc est commencé de chaque côté des piles 4 et 5, le but étant de joindre les deux moitiés de l'arc au sommet de celui-ci. La progression du montage est illustrée ci-dessous, Figure 9.

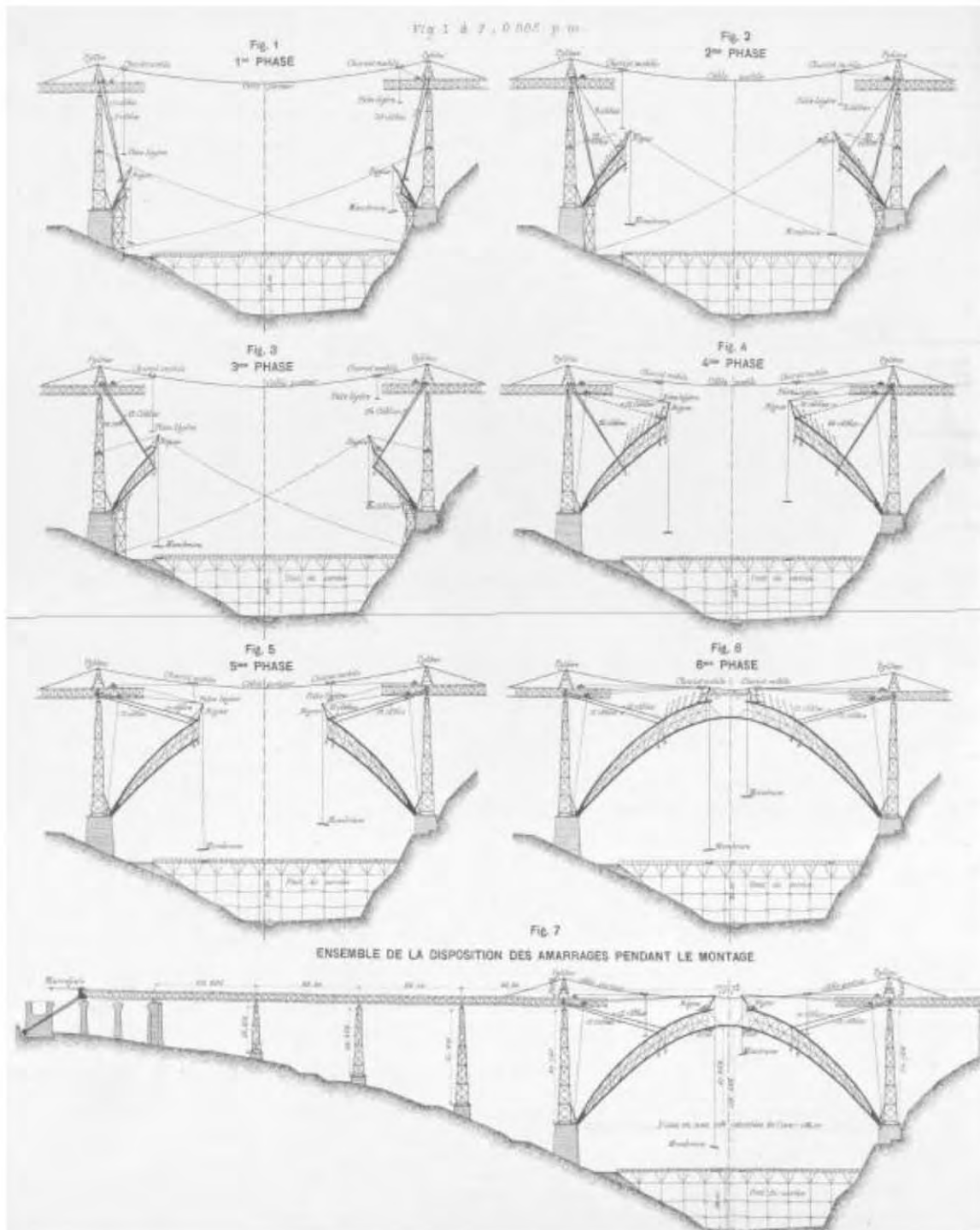


Figure 9 : Phase de montage de l'arc

Le 26 juin 1884 la foule se masse devant le pont, car tout le monde veut assister à l'assemblage des deux parties de l'arc. Après une heure de travail, les deux moitiés de l'arc furent réunies et clavées. Un coup de canon célébra le moment et libéra la foule, retenant son souffle, d'une explosion de joie. Le 18 septembre 1884 la partie métallique est enfin achevée et ce n'est qu'un an plus tard que les maçonneries seront terminées. Comme on pouvait s'y attendre le viaduc suscita l'admiration de tout le monde. De nombreux articles parurent dans les journaux et de nombreuses cartes postales furent éditées spécialement pour l'occasion. Les titres sont plutôt élogieux : « un travail merveilleux », « une des merveilles des temps modernes »... La réception définitive des travaux a lieu le 1^{er} octobre 1887. S'en suivit les 10 et 15 avril 1888, une série de tests de résistance mécanique sur l'ouvrage, au moyen d'un train de 200 tonnes, puis d'un train lancé à différentes vitesses portant des charges graduées. Les tests effectués, la commission officielle de réception fut convoquée le 14 mai 1888. Par ailleurs, aussi étonnant que cela puisse paraître, il n'y eut pas d'inauguration officielle à cause de la période électorale du moment. Pourtant le maire de Saint-Flour s'était rendu à Paris pour inviter le ministre à l'inauguration.

Pour Gustave Eiffel, la construction de ce viaduc a été une inspiration pour la réalisation de sa célèbre tour érigée à l'occasion de l'exposition universelle de 1889. Il reprit les études réalisées pour la construction de Garabit, en particulier celle de la résistance au vent.

V. Changement de visage de Garabit.

En 1929 commence l'électrification de la ligne qui s'achève en octobre 1932. Cela a permis de transporter le vin du Languedoc jusqu'à la partie nord du Massif Central au détriment de la ligne des Cévennes par Brioude utilisée jusqu'alors.

V.1.1992 à 1998 : la remise en peinture du viaduc.

Depuis le lancement de l'ouvrage, il y a eu seulement du petit entretien (rivers et boulons). Cependant selon le cahier des charges de la SNCF, le viaduc doit être repeint tous les 15 ans. A ce titre, les opérations ont eu lieu en 1947, 1957, 1973. A cette date, le viaduc a englouti 22 385 tonnes de peinture grise anti-corrosion. La plus remarquable des remises en peinture est celle de 1992, initialement prévue de mai 1992 à août 1994 et adoptant une coloration rouge. Cette mise en peinture se terminera en 1998 à cause de soucis budgétaires. Le chantier dura donc 6 ans contre 1 an pour les peintures précédentes. Il coûtera plus de 13 millions de francs. Ce sont plus de 38 tonnes de peinture qui ont été nécessaires pour recouvrir les 51 000 m² du viaduc. Cette dernière couche a une durée de vie de 25 ans en raison des conditions de mise en œuvre.

V.2. Les moyens pour l'entretien

Il faut noter que Eiffel, dans la conception du viaduc avait prévu une échelle hélicoidale dans chacune des piles permettant de faciliter l'accès pour l'entretien. Egalement dans les différents tabliers, un passage a été conçu dans les entrailles du géant pour permettre l'entretien. La totalité de ce dispositif est si bien dissimulé que l'aspect esthétique du viaduc n'est pas altéré.

V.3. Juillet 2001, l'illumination du viaduc.

Evoquée dès mars 1984 à l'occasion du centenaire du viaduc, l'illumination fut l'objet d'un premier essai effectué en octobre 1998. Le frein majeur fut le coût estimé à 100 000 francs par an. Le 6 juillet 2001 ce sont 350 projecteurs qui sont installés et permettent l'illumination du géant d'acier. Deux contraintes ont été imposées pour la mise en lumière : l'une de la Direction Régionale des Affaires Culturelles.(DRAC), de ne pas percer l'ouvrage et l'autre de la part de la SNCF pour l'entretien, l'accessibilité et la durée de vie des lampes. Le coût du projet s'élève à 2 000 000 de francs.

En 2006, la sécurité du viaduc est plus que jamais posée. En effet à la suite d'un déraillement d'un train de voyageurs survenu le 25 février 2006, une partie de la ligne a été fermée temporairement par la SNCF qui « ne peut plus en assurer la sécurité ». Après la fermeture du trafic aux voyageurs, c'est le fret qui, à son tour se voit stoppé. Grâce aux actions cumulées de différents militants, la portion ré-ouvre mais en limitant la vitesse à 40 km/h sur le viaduc.

V.4.2010 : D'importants travaux à Garabit

Pensé pour une durée de vie de 100 ans à sa livraison, le viaduc aura 130 ans en 2014 et nécessite donc de nombreux travaux. Grâce à une surveillance régulière (une fois par an), on a remarqué des fissures visibles sur la pile n°1 et grâce à des appareils de radiographie, il a été décelé des fissures invisibles à l'œil nu sur plusieurs autres piles, plus précisément au niveau des chevêtres. Des mesures ont été prises quant à la réduction de vitesse de 40 à 10 km/h. Le renforcement des âmes des chevêtres est donc entrepris au moyen de plaques d'acier supplémentaires assemblées grâce aux méthodes de l'époque : rivets posés à chaud.

VI. Le Viaduc en quelques chiffres

Garabit en quelques chiffres			
Durée du chantier	Chiffres	Unité	Conversion
Partie Béton	2	années	
Partie structure métallique	2	années	
Caractéristiques			
Portée de l'arche principale	165	mètres	
Hauteur max	124	mètres	
Longueur	565	mètres	
Largeur	20	mètres	
Fondations utilisant du granit blanc	20 000	m ²	
Métaux acheminés			
Fer forgé	3 169	tonnes	
Acier	41	tonnes	
Fonte	23	tonnes	
Nombre de rivets posés	678 768	rivets	
Valeur totale du Viaduc			
Coût total des maçonneries	750 000	francs	2 625 000,00 €
Coût total des métaux	2 350 000	francs	8 225 000,00 €
Total	3 100 000	francs	10 850 000,00 €
Travaux et entretiens			
Surface traitée	51 000	m ²	
Poids des peintures utilisées	40	tonnes	
Poids des abrasifs utilisés	3 100	tonnes	
Coût maintenance 2004	9 000	euros	
Coût maintenance 2005	8 000	euros	
Prix des illuminations			
Coût de l'opération d'installation	300 112	euros	
Coût annuel de l'illumination (électricité) 2005	7 279,64	euros	
Coût annuel de l'illumination (électricité) 2006	5 358,80	euros	

Tableau 2 : Coûts de fabrication du viaduc

La conversion des francs en euros c'est fait par rapport au franc de l'époque. Au XIXème siècle, 1 franc était égal à 3,5 euros.

VII. Sources

VII.1. Ouvrage

- VERGNE ROCHES, Patricia. *Le Viaduc de Garabit Chef d'œuvre de Gustave Eiffel*.
Ed. La vie du Rail, PARIS, 2012.
ISBN : 978-2-915034-71-4
- DEYDIER, Eylie, *Le viaduc de Garabit, son histoire*
Ed. Le serpent qui pense, BORDEAUX, 1960
- MARREY, Baptiste. *La Vie et l'œuvre extraordinaire de Monsieur Gustave Eiffel*
Ed. Graphite, ROUEN, 1984.
- VINCENOT, Henri. *L'Age du Chemin de fer*
Ed. Denoël, PARIS, 1980
- TRIN, A. *Les Chemins de fer du Cantal*
Ed. Gobert, AIX-EN-PROVENCE, 1983, rééd. 1987, 2005

VII.2. Emission télévisée

- Des Racines Et des Ailes, *Le Viaduc de Garabit*, émission du 21 avril 2007
- BERLING, Charles, *Sur les Traces de Gustave Eiffel*.
HB production avec la participation de France 5, 20 mai 2009

VII.3. Sites internet

- WIKIMEDIA FOUNDATION, *Wikipedia : Le viaduc de Garabit*
31 janvier 2013, Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Viaduc_de_Garabit
- GARABIT, *Le Viaduc de Garabit*
Disponible sur : <http://www.garabit.com/viaducgarabit/viaduc.htm>
- APPLICATION SERVICE CREATION, *Le Viaduc de Garabit*
Disponible sur : <http://www.margeride-truyere.com/fr,1,2739.html>
- SYNDICAT MIXTE DU LAC DE GARABIT GRANDVAL, *Le Viaduc de Garabit Eiffel*
Janvier 2011, disponible sur : <http://www.garabit-viaduc-eiffel.com/>

CALCUL DES TABLIERS ET PILES

VIII. Les tabliers

Le viaduc de Garabit est constitué d'un tablier qui n'est pas continu sur la longueur. Il est constitué de 3 parties distinctes (Figure 10 : Explication des tabliers Figure 10)

- Le premier tablier du côté Marvejols qui s'appuie sur 6 appuis. Il comprend 5 travées (2 extrêmes de 51.8 m et 3 intermédiaires de 55.5 m) pour former une longueur de 270.34 m.
- Un tablier central composé de 3 travées pour une longueur total de 73.92 m.
- La dernière du côté Neussargues composé de 2 travers, qui donne une longueur de 103.84m.

Chaque tablier peut se dilater librement de chaque côté et, pour permettre les déplacements produits par les variations de température, il a été prévu sur les culées un jeu de 250mm pour le tablier Marvejols et 100mm pour le côté Neussargues. En plus de ce jeu, à l'autre extrémité, on retrouve un jeu de 100mm. Ce qui nous donne le schéma si dessous.

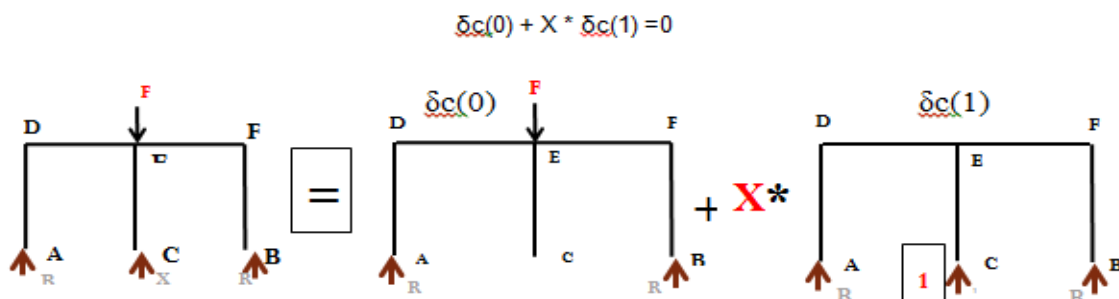


Figure 10 : Explication des tabliers

Maintenant pour pouvoir appréhender les calculs, nous avons dû faire une application pour comprendre le théorème de la force unitaire sur 3 et 5 appuis en utilisant les intégrales de Mohr.

VIII.1. Application de la force unitaire sur 3 appuis

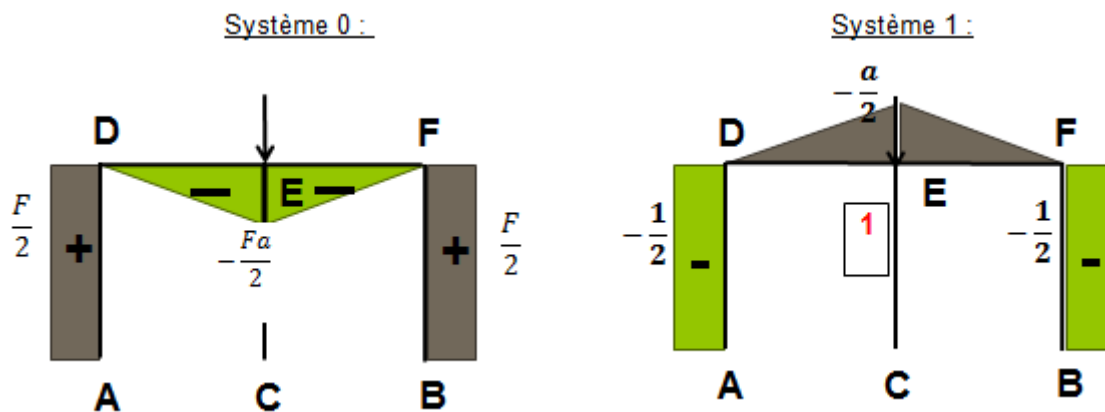
Décomposition d'un système sur 3 appuis. On décompose le système en deux



On décompose le système en deux :

- Le premier supprimant une réaction sur le point C, $\delta_c(0)$: déplacement en C du au syst0me de charge (0).
- Le deuxième en appliquant une force de 1 au point C, $\delta_c(1)$: déplacement en C du au système de charge (1).

On regarde ensuite les efforts dans chaque système si on applique une force F sur le système.



Résolution du système

On applique la formule du déplacement unitaire (Tableau 3: Application du calcul)

$$\delta_{0,1} = \int_0^l \frac{Nr_{0.1} * Nf_{1.1}}{ES} + \dots + \int_0^l \frac{Mr_{0.1} * Mr_{1.1}}{ES}$$

Pour résoudre le système il faut bien différentier les inerties et le Module de Young des poteaux et des barres dans le.

barre	N0	N1	M0	M1	Lbarre i	M0*M1*L	M1*M1*L	N0*N1*L	N1*N1*L
AD	$\frac{F}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	L	0	0	$\frac{-FL}{4}$	$\frac{L}{4}$
EC	0	1	0	0	L	0	0	0	L
FB	$\frac{F}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	L	0	0	$\frac{-FL}{4}$	$\frac{L}{4}$
DE	0	0	$\frac{-Fa}{2}$	$\frac{a}{2}$	a	$\frac{1)Fa^3}{12}$	$\frac{-a^3}{12}$	0	0
EF	0	0	$\frac{-Fa}{2}$	$\frac{a}{2}$	a	$\frac{-Fa^3}{12}$	$\frac{-a^3}{12}$	0	0
					Somme/ EI (ES)	$\frac{-Fa^3}{6EI}$	$\frac{-a^3}{6EI}$	$\frac{-FL}{2ES}$	$\frac{-3L}{2ES}$

Tableau 3: Application du calcul

(1) Pour le calcul de $M_0 \cdot M_1 \cdot L$ on est obligé d'utiliser les intégrales de Mohr (cf annexe). On choisit donc la correspondance entre les diagrammes du système réel $\delta c(0)$ et le système fictif $\delta c(1)$. Ce qui nous donne un coeff de 1/3 à appliquer, soit

$$\frac{-Fa}{2} * \frac{a}{2} * a * \frac{1}{3} = \frac{-Fa^3}{12}$$

On sait également que $K = \frac{F}{x}$ le déplacement (la flèche) $x = \frac{F_0 \cdot L}{E \cdot S}$ ce qui nous donne $K = \frac{ES}{L}$.

On ajoute ensuite le déplacement réel et fictif du même système.

$$\delta c(0) = \frac{-Fa^3}{6EI} + \frac{-FL}{2ES} = -F \left(\frac{a^3}{6EI} + \frac{1}{2K} \right) \quad \delta c(1) = \frac{a^3}{6EI} + \frac{3}{2K}$$

$$X = - \frac{\delta c(0)}{\delta c(1)} = \frac{-F \left(\frac{a^3}{6EI} + \frac{1}{2K} \right)}{\frac{a^3}{6EI} + \frac{3}{2K}}$$

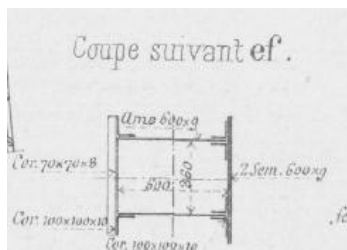
Nous avons ainsi le déplacement et la force reprise par le poteau du milieu. Pour pouvoir appliquer ces calculs sur les tabliers et pile du viaduc Coté Neussargues (car sur 3 appuis) nous avons dû :

- Prendre dans un premier temps une charge répartie au lieu d'une charge ponctuelle.
- Calculer l'inertie du tablier
- Calculer la raideur des 2 différentes piles (un appui étant sur une culée).
- Modéliser le modèle sur des piles de différentes hauteurs

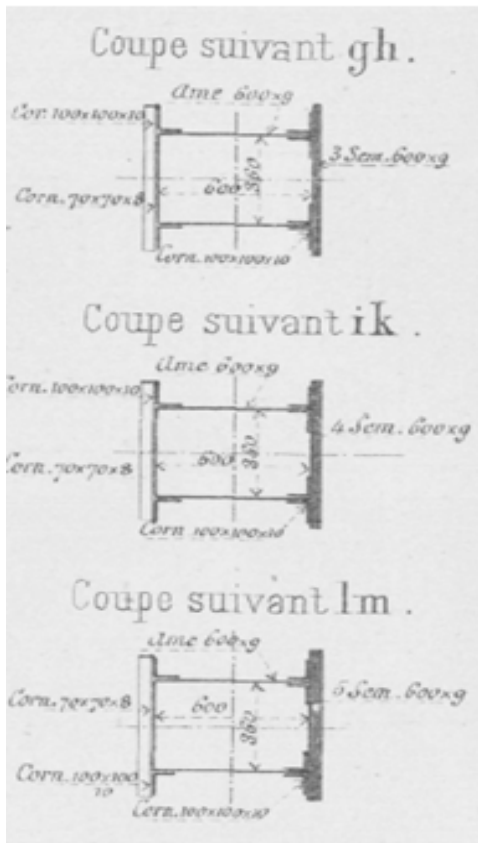
IX. Calcul des différentes raideurs des piles.

IX.1. Calcul de la raideur de la grande pile coté Neussargues.

Il nous a fallu regarder sur les planches et dans le mémoire comment était construit un arbalétrier d'une pile. Nous avons pu constater qu'une pile était constituée de 4 profils différents (Figure 11)



EF 6007,2 mm			
	Aire unitaire	Nombre	Total
Ame 600*9	5400	2	10800mm ²
Cornière 100*100*10	1900	6	11400mm ²
Cornière 70*70*8	1056	1	1056mm ²
Semelle 600*9	5400	2	10800mm ²
			34056mm ²



GH 10499,9 mm			
	Aire unitaire	Nombre	Total
Ame 600*9	5400	2	10800mm ²
Cornière 100*100*10	1900	6	11400mm ²
Cornière 70*70*8	1056	1	1056mm ²
Semelle 600*9	5400	3	16200mm ²
			39456mm ²

IK 19516,4 mm			
	Aire unitaire	Nombre	Total
Ame 600*9	5400	2	10800mm ²
Cornière 100*100*10	1900	6	11400mm ²
Cornière 70*70*8	1056	1	1056mm ²
Semelle 600*9	5400	4	21600mm ²
			44856mm ²

LM 24407,5 mm ²			
	Aire unitaire	Nombre	Total
Ame 600*9	5400	2	10800mm ²
Cornière 100*100*10	1900	6	11400mm ²
Cornière 70*70*8	1056	1	1056mm ²
Semelle 600*9	5400	5	27000mm ²
			50256mm ²

Figure 11 : vue des sections qui constitue un arbalétrier avec les calculs des inerties

Le métal utilisé pour la structure était du fer puddlé. Le puddlage est un ancien procédé d'affinage de la fonte consistant à la décarburer dans un four à l'aide de scories oxydantes pour obtenir du fer puddlé à partir de fonte. Son module de Young est de 175000Mpa. On peut ainsi obtenir la raideur de chaque portion :

$$K = \frac{Em \cdot S}{L}$$

k1 =	992109,469 N/mm
k2 =	657606,263 N/mm
k3 =	402215,573 N/mm
k4 =	360331,865 N/mm

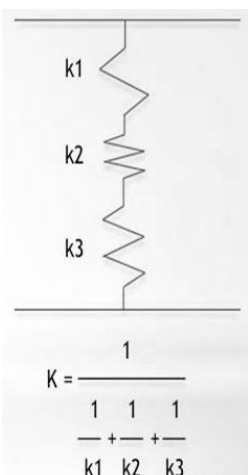


Figure 13 :

explication pour un montage en série

On adopte donc un montage en série (Figure 13) avec toutes les raideurs calculées précédemment, obtenons une raideur pour l'arbalétrier de :

$$= 128\,368.58 \text{ N/mm}$$

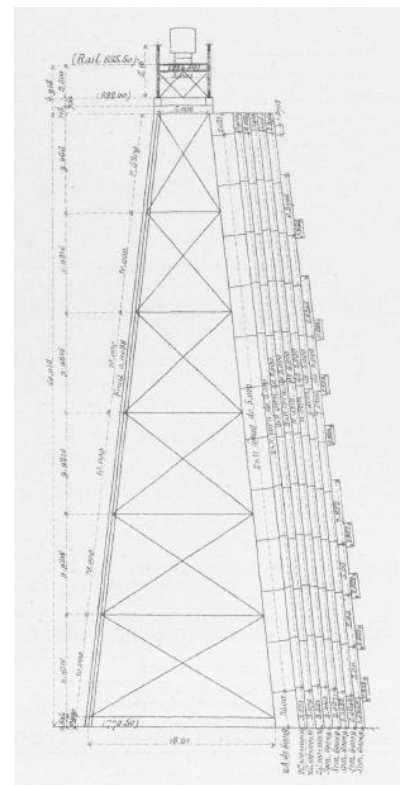


Figure 12 : dimension d'une pile

Maintenant que nous connaissons la raideur d'un arbalétrier, nous pouvons déterminer celle de la pile dans son ensemble.

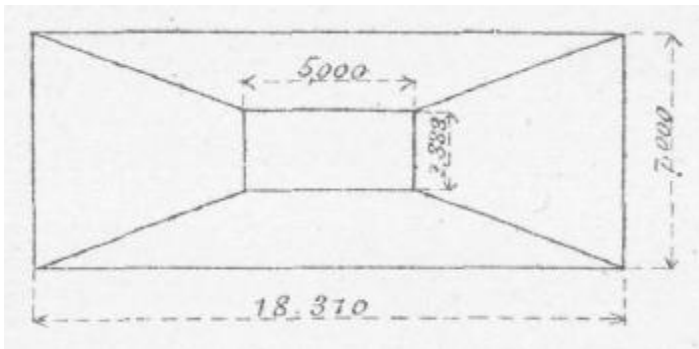


Figure 14 : vue de dessus d'une pile

Lorsqu'une force est appliquée au sommet de la pile, elle se décompose en 4 forces égales. Grâce aux mesures fournies par le mémoire et au théorème de Thalès, on peut déterminer l'angle des arbalétriers. (Figure 12 : dimension d'une pile et Figure 14 : vue de dessus d'une pile)

L'angle que fait l'arbalétrier avec la verticale est de $6,75^\circ$. On peut donc calculer la force qui traverse l'arbalétrier. Si la force est unitaire, elle est de 0,2517 N. Cela nous permet de trouver le déplacement occasionné par la force dans chaque arbalétrier. On rétablit le déplacement total de la structure et ainsi on trouve la raideur de la pile 5 : $k = 513\,474,31 \text{ N/mm}$.

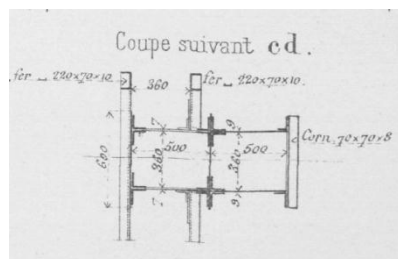
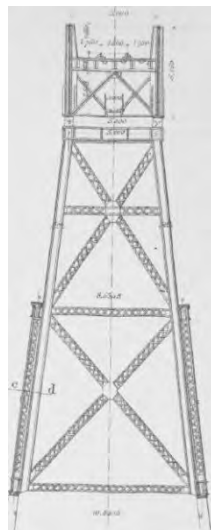
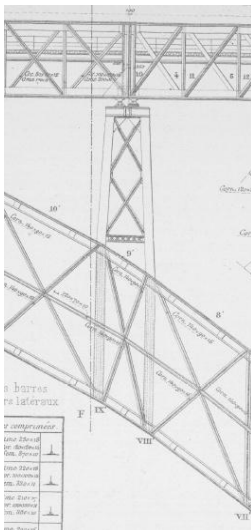


Figure 15 : plan d'une petite pile de l'arc

petite pile 9400 mm			
	Aire unitaire	Nombre	Total
Ame 500*9	4500	2	9000mm ²
Cornière 100*100*10	1900	6	11400mm ²
Cornière 70*70*8	1056	1	1056mm ²
Semelle 600*9	5400	1	5400mm ²
			26856mm ²

Cette pile (Figure 15 : plan d'une petite pile de l'arc) est située sur l'arc du côté de Neussargues. Comme il est mentionné précédemment, nous ne tenons pas compte des déformations de l'arc dans cette partie. Nous obtenons donc une raideur $K = 499\,976,7 \text{ N/mm}$

IX.2. Calcul de l'inertie du tablier

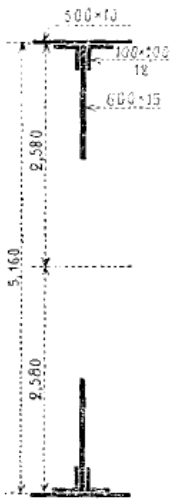


Figure 16 : profil d'une poutre du tablier

En cherchant dans le mémoire de la construction du viaduc, nous avons lu que Gustave Eiffel a utilisé la section des poutres constantes comme le système de base ci-contre. Nous avons, calculé l'inertie d'une grosse poutre en soustrayant les volumes de vide (Figure 16 : profil d'une poutre du tablier) :

$$I_{poutre} = \frac{1}{12} * (0.5 * 5.18^3 - 0.285 * 5.16^3 - 0.176 * 5.136^3 - 0.024 * 4.96^3 - 0.015 * 3.96^3)$$

$$I_{poutre} = 0.219648 \text{ m}^4$$

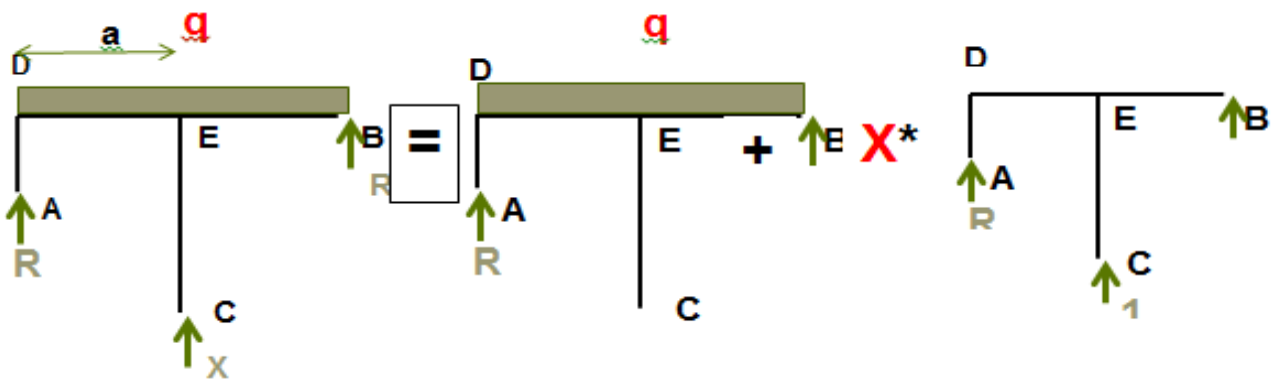
Le tablier étant constitué de poutre (une de chaque côté du tablier) on doit multiplier par deux l'inertie. On obtient donc

$$I_{tablier} = 3.056 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4$$

Sur certaine travée, des semelles sont rajoutées, mais ne sont pas prises en compte dans l'inertie des poutres constantes.

IX.3. Modélisation pour applique la force unitaire sur le viaduc

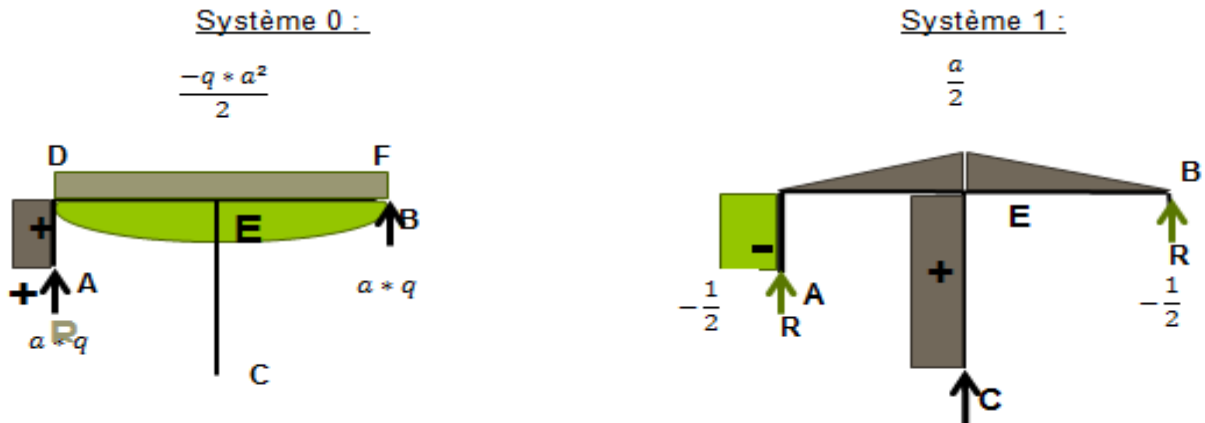
Maintenant que nous avons calculé tous les différents éléments nécessaires, nous pouvons appliquer le théorème de la force unitaire sur le viaduc de Garabit. Pour cela, nous avons adapté le théorème pour la configuration du tablier coté Neussargues, c'est-à-dire avec les différences d'altitude au niveau des appuis.



On décompose le système en deux :

- Le premier en supprimant une réaction sur le point C, $\delta_c(0)$: déplacement en C du au système de charge (0).
- Le deuxième en appliquant une force de 1 au point C, $\delta_c(1)$: déplacement en C du au système de charge (1).

On regarde ensuite les efforts dans chaque système en appliquant une charge répartie sur le système.



Données pour résoudre le problème:

- Longueur a = 51800mm
 - Il est indiqué dans le mémoire, que les charges appliquées lors des tests, sont de 3440kg/m soit une charge de 47.088N/mm.
 - Hauteur de la pile A= 9400 mm
 - Hauteur de la pile C=60736 mm
 - Hauteur de la pile B= 0 mm
 - Inertie du tablier=3.056 mm⁴
 - Module de l'acier = 58.86 N/ mm⁴
- $EI_{du\ tablier} = 1.8 * 10^{13} N$

barre	N0	N1	M0	M1	Lbarre i	M0*M1*L	M1*M1*L	N0*N1/Kpile	N1*N1/Kpile
AD	1748063,52	-0,5	0	0	9400	0	0	-1,748137909	5,00021E-07
EC	0	1	0	0	60736	0	0	0	7,79007E-06
FB	1748063,52	-0,5	0	0	0	0	0	-1,74806E-10	5E-17
DE	0	0	-63174202560	25900	51800	-2,5309E+19	1,15827E+13	0	0
EF	0	0	-63174202560	25900	51800	-2,5309E+19	1,15827E+13	0	0
					Somme/EI	-2813577,885	1,287631875	-1,748137909	8,29009E-06

On obtient une réaction de :

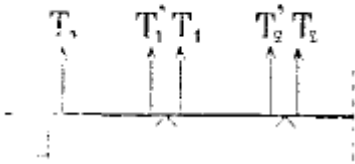
$$X = - \frac{\delta c(0)}{\delta c(1)} = \frac{-(2813579.63)}{1.288} = 2\ 185.067\ kN$$

Pour les 2 tabliers, on ne multiplie pas par L/EI, car nous avons déjà intégré la raideur K de la pile qui correspond.

En comparant avec les résultats de Eiffel, on observe un rapport 4 (3.9999). Nous pouvons justifier cette différence.

Tout d'abord, dans le mémoire, il dit qu'il travaille sur une moitié de tablier (coupé dans la longueur). Il n'utilise l'inertie que d'une poutre calculé ci-dessus. Un rapport 2 doit donc être intégré.

10 — 1^{re} travée



Ensuite, au niveau de ces résultats, il obtient deux résultantes (une pour les travées de chaque côté de la pile). Voir dessin ci-contre.

Et donc $T_1' = 55\,685\text{kg}$, il y aura la même force sur T_1 . Il y a encore un rapport 2 qui doit être pris en compte.

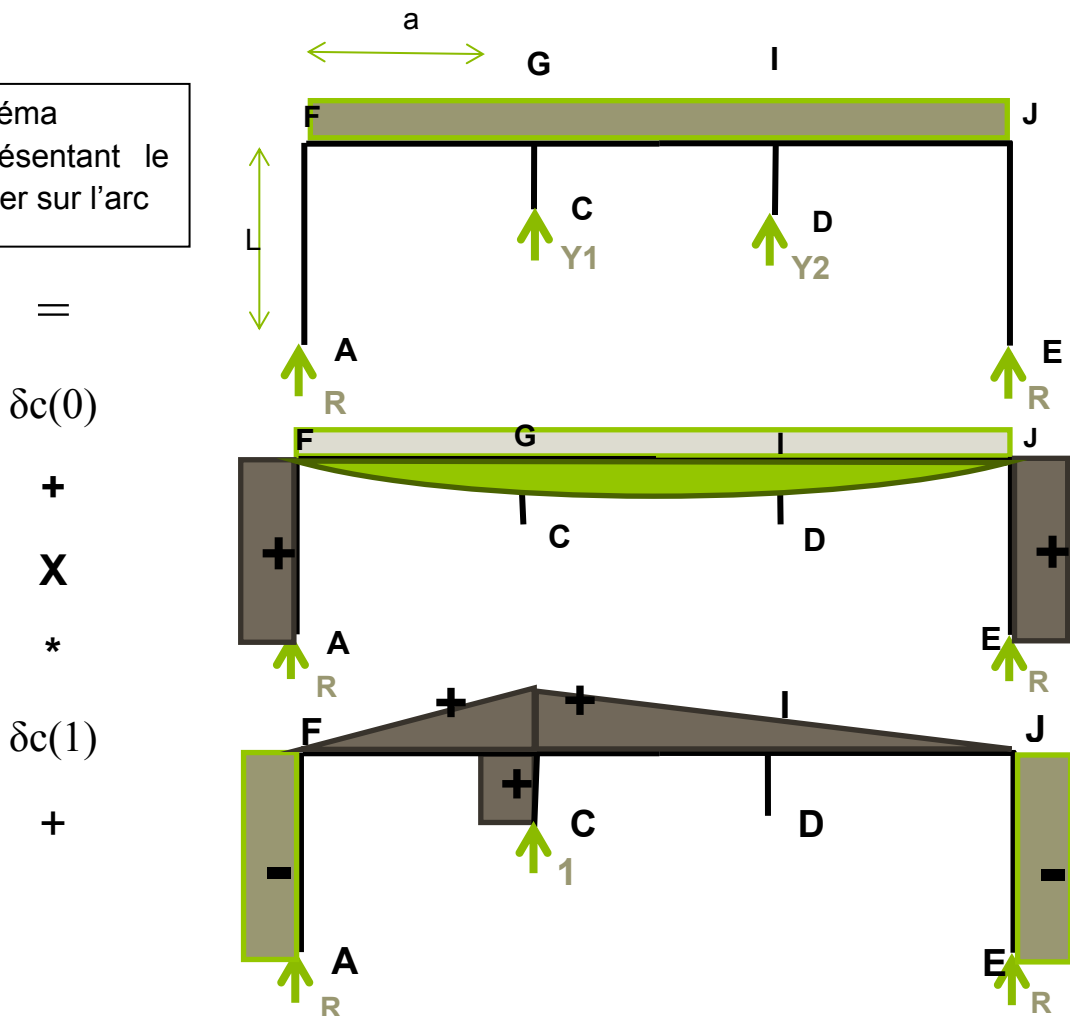
Nous considérons donc que notre résultat est en accord avec ceux de Mr Eiffel. Pour les déplacements, nous avons refait le calcul pour une surcharge de 4800kg par mètre courant comme les essais effectués.

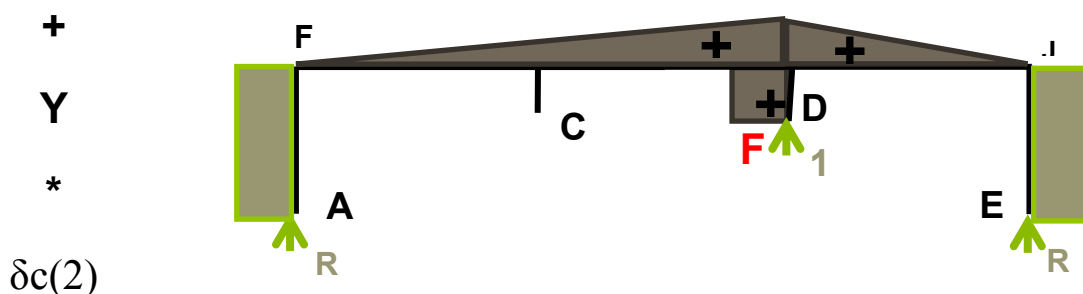
Nous obtenons un déplacement de : -17.02mm.

Maintenant que nous avons fait les calculs du côté Neussargues, nous utilisons le même théorème mais pour le tablier central, et donc passons à un système de 3 appuis à 4 appuis.

Décomposition du système sur 4 appuis

Schéma représentant le tablier sur l'arc





On remarque que le modèle est symétrique au centre, donc que les déplacements seront les mêmes. On peut conclure que X et Y seront les mêmes. Ensuite on applique la formule du déplacement unitaire avec les formules de Mohr (Tableau 4 : Aide pour appliquer les intégrales de Mohr **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

barre	N0	N1	N2	M0		M1		M2	
				1	2	1	2	1	2
AF	1160248,32	0,666666667	0,333333333	0	0	0	0	0	0
CG	0	1	0	0	0	0	0	0	0
DI	0	0	1	0	0	0	0	0	0
EJ	1160248,32	0,333333333	0,666666667	0	0	0	0	0	0
FG	0	0	0	0	8588518605	0	16426,66667	0	8213,333333
GI	0	0	0	28588518605	8588518605	16426,66667	8213,333333	8213,333333	16426,66667
IJ	0	0	0	28588518605	0	8213,333333	0	16426,66667	0

Tableau 4 : Aide pour appliquer les intégrales de Mohr

Lbarre i	N0*N1/Kpile	N1*N1/Kpile	N2*N1/Kpile	N0*N2/Kpile	N2*N2/Kpile
	M0*M1*L	M1*M1*L	M2*M1*L	M2*M0*L	M2*M2*L
	1,547069853N/mm	8,8893E-07N/mm	4,44E-07N/mm	0,773535N/mm	2,22E-07N/mm
	0N/mm	0,0000002N/mm	0N/mm	0N/mm	0N/mm
	0N/mm	0N/mm	0N/mm	0N/mm	2E-07N/mm
	0,773534927N/mm	2,22233E-07N/mm	4,44E-07N/mm	1,54707N/mm	8,89E-07N/mm
Somme/EI	2,32060478N/mm	1,31116E-06N/mm	8,89E-07N/mm	2,320605N/mm	1,31E-06N/mm
24640	4,82137E+18	2,21625E+12	1,10812E+12	1,92855E+18	5,54062E+11
24640	5,30351E+18	3,87843E+12	3,87843E+12	2,08926E+18	2,21625E+12
24640	2,41069E+18	5,54062E+11	1,10812E+12	3,8571E+18	2,21625E+12
Somme/EI	696783,0799	0,369567083	0,338769826	437722,704	0,277175313

Tableau 5 : Résultat après application

Pour les raideurs des petites piles intérieures, nous n'avons pas trouvé sur les plans les coupes nécessaires pour obtenir la section qui les constitue. Cependant nous pouvons observer que vu la faible hauteur l'inertie est assez grande. Pour les piles extérieures, nous les avons déjà calculées précédemment. Nous avons donc effectué le calcul (Tableau 5 : Résultat après application).

En appliquant les formules vues sur l'application sur 3 appuis, nous obtenons une force qui vient s'appliquer sur l'arc de 72 441 kg et Gustave Eiffel 71 456 kg. Soit un déplacement de 1.42 mm.

IX.4. Tablier coté Marvejols

Nous avons ensuite réalisé une feuille de calcul sur la dernière partie du tablier, coté Marvejols avec la même technique mais sur 5 appuis. Ce tablier est en fait sur 6 appuis donc cette application n'est pas exploitable pour le viaduc. Le tablier a quand même été calculé mais avec la théorie de Clapeyron comme Gustave Eiffel dans le mémoire. Nous retrouvons donc la même chose que lui pour les résultats.

X. Modélisation des piles sur Cadwork

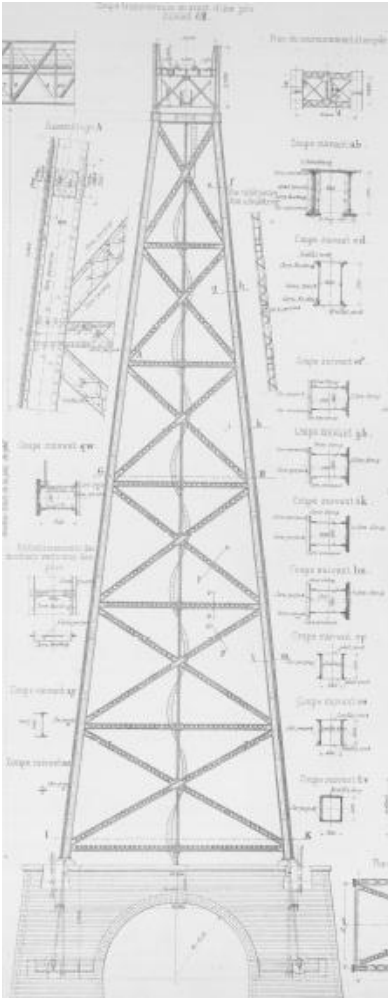


Figure 17 : Planche d'Eiffel concernant la pile

Redessiner le viaduc de Garabit sur un logiciel tel que Cadwork nous sert à extraire les fibres neutres de chacune des barres pour ensuite les transférer sur un logiciel de dimensionnement tel qu'Acord Bat. Pour modéliser les différentes pièces de la pile sur Cadwork, il a fallu s'inspirer des plans qui nous ont été fournis (Figure 17 : Planche d'Eiffel concernant la pile).

X.1. Stratégie de dessin

Pour commencer, nous avons pris le temps de comprendre les planches d'Eiffel pour établir une stratégie qui nous a permis de dessiner rapidement la pile sur Cadwork. L'étape d'analyse des planches s'est révélée être difficile étant donné que tous les dessins sont faits à la main avec les conventions de l'époque. De plus, nous découvrons un matériau que nous ne connaissions presque pas, qui a ses propres techniques, et qu'il a fallu s'approprier.

La stratégie la plus logique a été celle de dessiner seulement un quart de la pile pour ensuite copier en symétrie les éléments dessinés.

Cadwork demandant une grande puissance pour fonctionner, il était impossible pour nous de dessiner l'intégralité de la structure, les ordinateurs à notre disposition n'étant pas assez puissants. Nous avons alors décidé de modéliser uniquement l'étage inférieur pour ensuite copier l'axe neutre des différentes sections (avec un petit rappel de section aux extrémités des fibres neutres) dans les tronçons supérieurs (Figure 20 : Représentation des fibres neutres). Le fait de dessiner sur cadwork nous a permis en même temps d'en apprendre plus sur les techniques de conception des ouvrages d'art en métal.

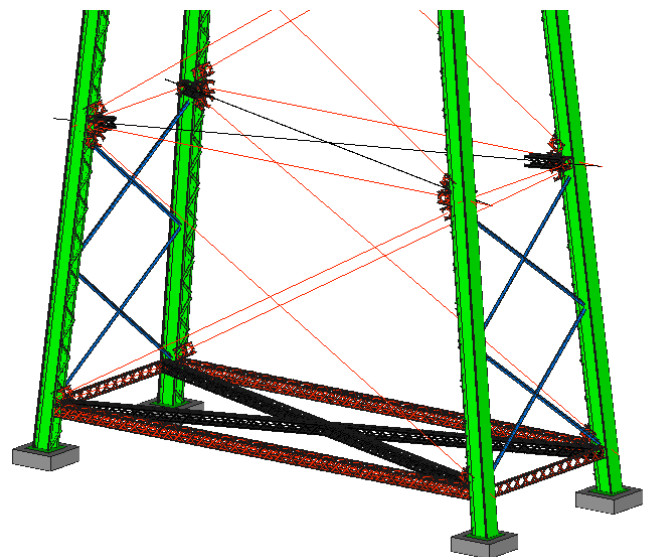


Figure 18 : Représentation des fibres neutres

X.2. Problèmes rencontrés avec Cadwork

Le dessin sur cadwork n'a pas été sans difficulté. Le principal problème rencontré a été de faire face aux deux inclinaisons simultanées des arbalétriers. Il a été impossible pour nous de travailler dans un plan standard, ce qui compliquait grandement le dessin.

Par ailleurs, sur les planches en notre possession, les cotes des différentes positions des assemblages étaient manquantes, il a donc fallu faire des hypothèses quant au positionnement de ces derniers sur les arbalétriers.

Les plans étant d'époque et de surcroît ne connaissant pas du tout le matériau, la découverte a été totale vis-à-vis des différentes sections des poutres. Cela a nécessité des recherches au préalable pour se renseigner sur les profils usuels en construction acier.

XI. Transfert vers Acord Bat

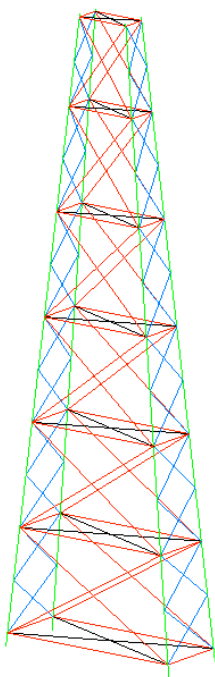


Figure 19 : Transfert de la structure vers Acord Bat

Une fois le dessin sur cadwork terminé, il a suffi d'isoler toutes les lignes d'axe neutre pour les convertir en axe et ainsi transférer l'intégralité de la structure dans un logiciel de calcul tel qu'Acord Bat (cf. Figure 21 : Transfert de la structure vers Acord Bat).

Cependant, une fois dans Acord Bat, il a fallu redessiner la quasi intégralité des pièces. En effet, les arbalétriers étant dessinés en une seule pièce, nous avons dû le recréer en passant par tous les points situés sur sa longueur, pour éviter une erreur du logiciel. Cette opération a pris un certain temps parce que l'arbalétrier a des sections différentes selon sa longueur. Nous avons donc pris en compte cet élément dans le tracé de ce dernier.

Le modèle étant créé, nous avons pu assigner des sections aux différents éléments. Cependant, les sections n'étant pas référencées dans le catalogue du logiciel, nous avons calculé au préalable les inerties, les modules élastiques, les sections, les sections réduites d'effort tranchant et le moment de torsion pour que le logiciel puisse s'imaginer la section demandée.

XII. Calcul des moments d'inertie

XII.1. Calcul des centres de gravités et d'inertie pour les cornières

Le centre de gravité des cornières présentes sur différentes sections n'étant pas évident, nous l'avons d'abord calculé.

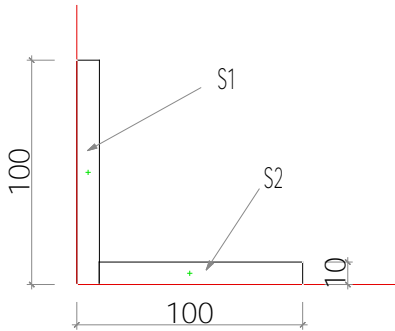


Figure 20 : Calcul de la cornière 100*100*10

Pour commencer, la cornière a été divisée en deux sections remarquables, S1 et S2 (cf. Figure 22).

A la suite de cela, nous avons défini les centres de gravité de ces deux sections rectangulaires (X'_G et Y'_G) ainsi que les section (S)

Puis nous avons redéfini les nouveaux moments statiques de S autour de Ox' et Oy' (m_x' et m_y') par le calcul suivant : $m_x' = X'_G * S$ ou $m_y' = Y'_G * S$.

Une fois toutes ces données calculées, il a été possible de calculer le centre de gravité de la cornière en effectuant le quotient de m_y' par S pour obtenir $X'_{G(S)}$ et inversement pour $Y'_{G(S)}$.

Le calcul de a_i et b_i (le décalage du centre de gravité de la section par rapport au centre de gravité effectif de la cornière) est calculé par la différence entre le centre de gravité de la cornière et le centre de gravité de la section.

L'étape suivante consiste à calculer les inerties selon la grande et la petite inertie, puis utilisation du théorème d'Huygens pour déplacer les inerties propres et obtenir le centre d'inertie de la cornière.

On obtient le Tableau 6

Centre de gravité Cornière 100*100*10							
	X'_G (mm)	Y'_G (mm)	b_s (mm)	h_s (mm)	S (mm ²)	m_y' (mm ³)	m_x' (mm ³)
S1	5	50	10	100	1000	5000	50000
S2	55	5	90	10	900	49500	4500
					1900	54500	54500
a_i (mm)	b_i (mm)	I_{xiGi} (mm ⁴)	I_{yiGi} (mm ⁴)	I_{xiyiGi} (mm ⁴)	I_{xG} (mm ⁴)	I_{yG} (mm ⁴)	I_{xyG} (mm ⁴)
23,68	-21,32	833333	8333	0	1287696	569275	-504848
-26,32	23,68	7500	607500	0	512348	1230769	-560942
					1800044	1800044	-1065789

Tableau 6 : Calcul du centre de gravité de la cornière 100*100

XII.2. Centre de gravité et d'inertie des arbalétriers

Nous avons calculé les centres d'inerties des cornières avant de calculer ceux des arbalétriers parce que les arbalétriers sont composés de cornières. C'est ainsi que nous utilisons les résultats précédents afin de calculer les centres d'inerties des arbalétriers.

Nous avons fait quatre calculs d'inerties pour les arbalétriers, étant donné qu'en fonction de sa hauteur, la section de l'arbalétrier varie, avec une composition de 2 à 5 semelles.

Pour les calculs, nous avons repris la même démarche que celle utilisée dans les calculs d'inertie de la cornière. A cette dernière on ajoute les calculs de moments élastiques W_{ely} (Z positif), W_{ely} (Z négatif), W_{elz} (Y positif), W_{elz} (Y négatif), nécessaires pour Acord Bat. Ils sont calculés par : $W_{elz} = (X'_{G(S)} - X'_G) * S$. Bien entendu, On prendra les valeurs de Y pour calculer W_{ely} .

On obtient les résultats suivants :

Centre de gravité							
	$X'_{G(S)}$ (mm)	$Y'_{G(S)}$ (mm)	b_s (mm)	h_s (mm)	S (mm ²)	m_y (mm ³)	m_x (mm ³)
S1	300	4,5	600	9	5400	1620000	24300
S2	300	13,5	600	9	5400	1620000	72900
S3	300	22,5	600	9	5400	1620000	121500
S4	300	31,5	600	9	5400	1620000	170100
S5	300	40,5	600	9	5400	1620000	218700
S6	82,32	73,7	-	-	1900	156400	140000
S7	517,68	73,7	-	-	1900	983600	140000
S8	115,5	345	9	600	5400	623700	1863000
S9	484,5	345	9	600	5400	2616300	1863000
S10	82,32	616,32	-	-	1900	156400	1171000
S11	517,68	616,32	-	-	1900	983600	1171000
					45400	13620000	6955500

Produit d'inertie au centre de gravité									
	S (mm ²)	a_i (mm)	b_i (mm)	$I_{x_i x_i}$ (mm ⁴)	$I_{y_i y_i}$ (mm ⁴)	$I_{x_i y_i}$ (mm ⁴)	I_{xG} (mm ⁴)	I_{yG} (mm ⁴)	I_{xyG} (mm ⁴)
S1	5400	0	148,70	36450	162000000		119447358	162000000	0
S2	5400	0	139,70	36450	162000000		105430647	162000000	0
S3	5400	0	130,70	36450	162000000		92288736	162000000	0
S4	5400	0	121,70	36450	162000000		80021625	162000000	0
S5	5400	0	112,70	36450	162000000		68629314	162000000	0
S6	1900	217,6842105	79,52	1800044	1800044	1065789	13814754	91834233	33955524
S7	1900	-217,6842105	79,52	1800044	1800044	-1065789	13814754	91834233	-33955524
S8	5400	184,5	-191,80	162000000	36450		360641058	183853800	-191085512
S9	5400	-184,5	-191,80	162000000	36450		360641058	183853800	191085512
S10	1900	217,6842105	-463,11	1800044	1800044	1065789	409296362	91834233	-190476897
S11	1900	-217,6842105	-463,11	1800044	1800044	-1065789	409296362	91834233	190476897
							317166742	486000000	0

Calculs des moments élastiques				
	W_{ey} (z positif)	W_{ey} (z négatif)	W_{ez} (y positif)	W_{ez} (y négatif)
S1	803006		0	0
S2	754406		0	0
S3	705806		0	0
S4	657206		0	0
S5	608606		0	0
S6	151089		413600	
S7	151089			-413600
S8		-1035694	996300	
S9		-1035694		-996300
S10		-879911	413600	
S11		-879911		-413600
	3831209	-3831209	1823500	-1823500

$X'_{G(S)}$	300
$Y'_{G(S)}$	153,20

Tableau 7 : Arbalétrier à cinq semelles

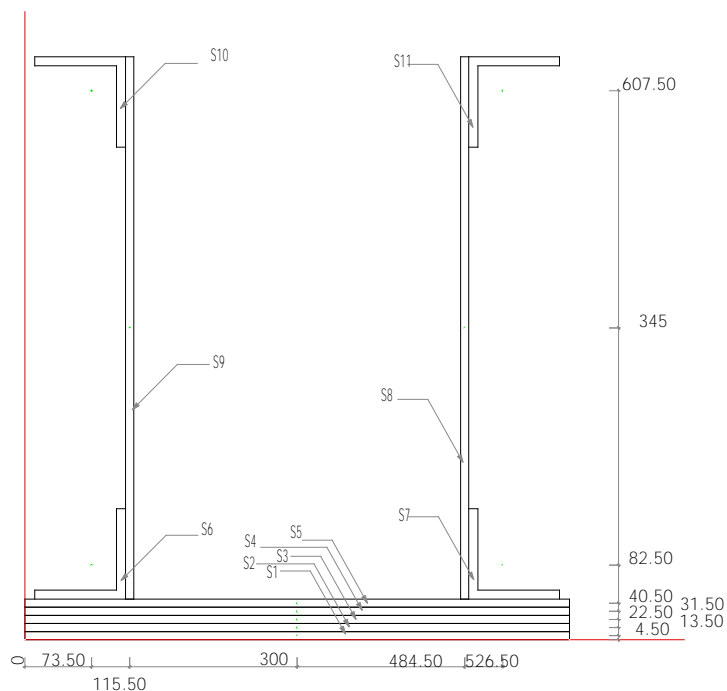


Figure 21 : Schématisation de l'arbalétrier

XII.3. Centre de gravité et moments d'inertie des Treillis

Les calculs restent les mêmes nous nous contenterons donc de fournir uniquement les résultats des treillis diagonaux. Les résultats des autres sections seront écartés pour ne pas surcharger le rapport.

Centre de gravité								
		X'_g (mm)	Y'_g (mm)	b_i (mm)	h_i (mm)	S (mm ²)	m_y (mm ³)	m_x (mm ³)
Cornières	Bas gauche	149,20	28,80	70	70	1179	175910	33953
	Bas droite	550,80	28,80	70	70	1179	649391	33953
	Haut gauche	149,20	387,20	70	70	1179	175910	456512
	Haut droite	550,80	387,20	70	70	1179	649391	456512
Plat	Bas	350	4	700	8	5600	1960000	22400
	Haut	350	412	700	8	5600	1960000	2307200
						10316	1650600	980928

Produit d'inertie au centre de gravité										
		S (mm ²)	a_i (mm)	b_i (mm)	I_{xiGi} (mm ⁴)	I_{yiGi} (mm ⁴)	I_{xiyiGi} (mm ⁴)	I_{xG} (mm ⁴)	I_{yG} (mm ⁴)	I_{xyG} (mm ⁴)
Cornières	Bas gauche	1179	200,80	179,20	533853	533853	-313160	38395623	48070803	42111279
	Bas droite	1179	-200,80	179,20	533853	533853	-313160	38395623	48070803	-42737600
	Haut gauche	1179	200,80	-179,20	533853	533853	-313160	38395623	48070803	-42737600
	Haut droite	1179	-200,80	-179,20	533853	533853	-313160	38395623	48070803	42111279
Plat	Bas	5600	0,00	204,00	29867	228666667		233079467	228666667	0
	Haut	5600	0,00	-204,00	29867	228666667		233079467	228666667	0
								153582492	192283212	-1252642

Calcul des moments élastiques			
$W_{e,y}$ (z positif)	$W_{e,y}$ (z négatif)	$W_{e,z}$ (y positif)	$W_{e,z}$ (y négatif)
211280		236741	
211280			-236741
	-211280	236741	
	-211280		-236741
1142400		0	0
	-1142400	0	0
422559	-422559	473481	-473481

$X'_{G(S)}$	350
$Y'_{G(S)}$	208

Tableau 8 : Treillis diagonal

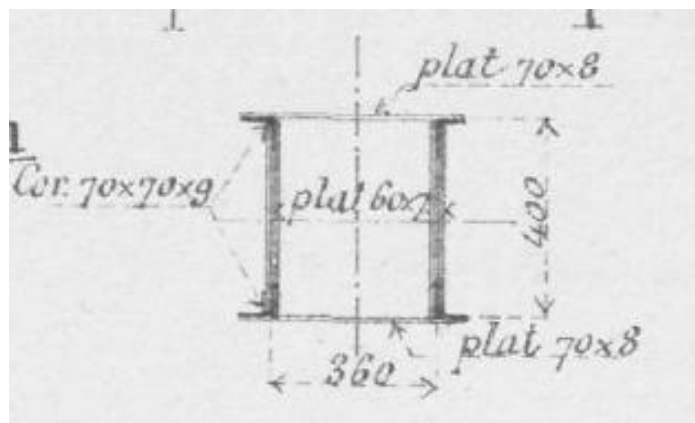


Figure 22 : Coupe du treillis diagonal

XIII. Modélisation Acord Bat

Les différents centres de gravité calculés précédemment nous ont servis à dessiner les fibres neutres de tous les éléments pour importer le modèle de cadwork à Acord.

S'en suit l'étape de re-modélisation des barres, évoquée précédemment. Puis on ajoute les différentes sections grâce aux valeurs calculées ci-dessus. Seuls les couples de torsion J n'ont pas été calculés. Nous avons uniquement pris les valeurs de 4 fois celle d'une cornière (cette valeur a été trouvée dans la littérature). Pour ce qui est des sections réduites d'effort tranchant, nous avons fait l'hypothèse de prendre $5/6$ de la section. Bien que cette valeur ne soit pas tout à fait exacte, nous nous rapprochons plus de la réalité que si nous n'avions rentré aucune valeur.

Dans notre modélisation, chaque pièce est modélisée avec des relaxations en bout. Ainsi, les arbalétriers sont en un seul morceau comme il est possible de le constater dans la figure ci-dessous.

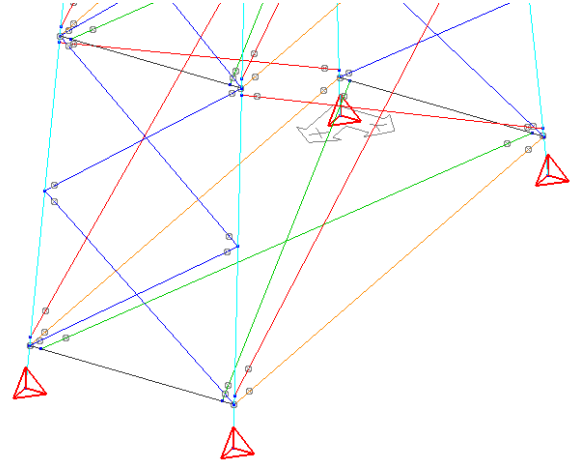
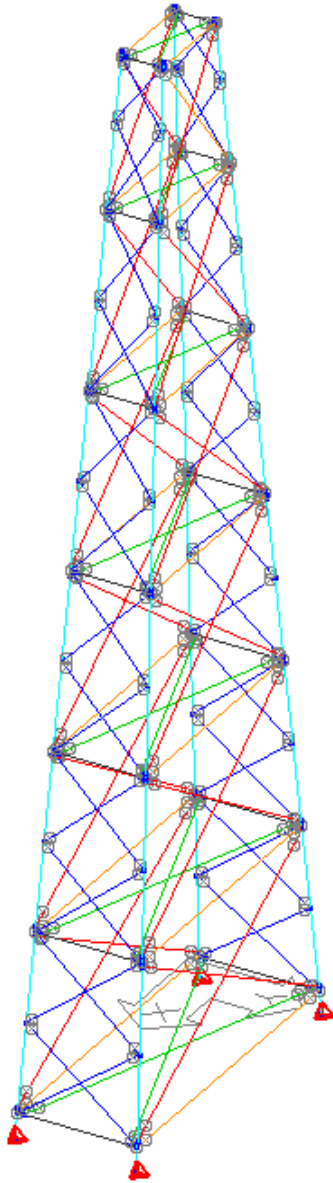


Figure 23 : Représentation des relaxations sur Acord Bat

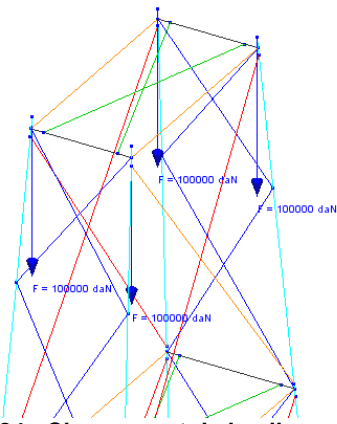


Figure 24 : Chargement de la pile

Pour vérifier que la raideur de la pile que nous avons calculé correspondait bien à la raideur fournie par le logiciel, nous avons choisi d'appliquer une force aléatoire d'une valeur de 100 tonnes au point haut de chaque arbalétrier (cf Figure 26).

XIII.1. Problèmes rencontrés avec Acord Bat.

Principalement à cause du manque de temps, nous n'avons pas pu réaliser une modélisation Acord parfaite, qui permette d'exploiter des résultats. En effet, les résultats que nous obtenons sont aberrants vu que seules les parties hautes de la pile travaillent comme on peut le voir

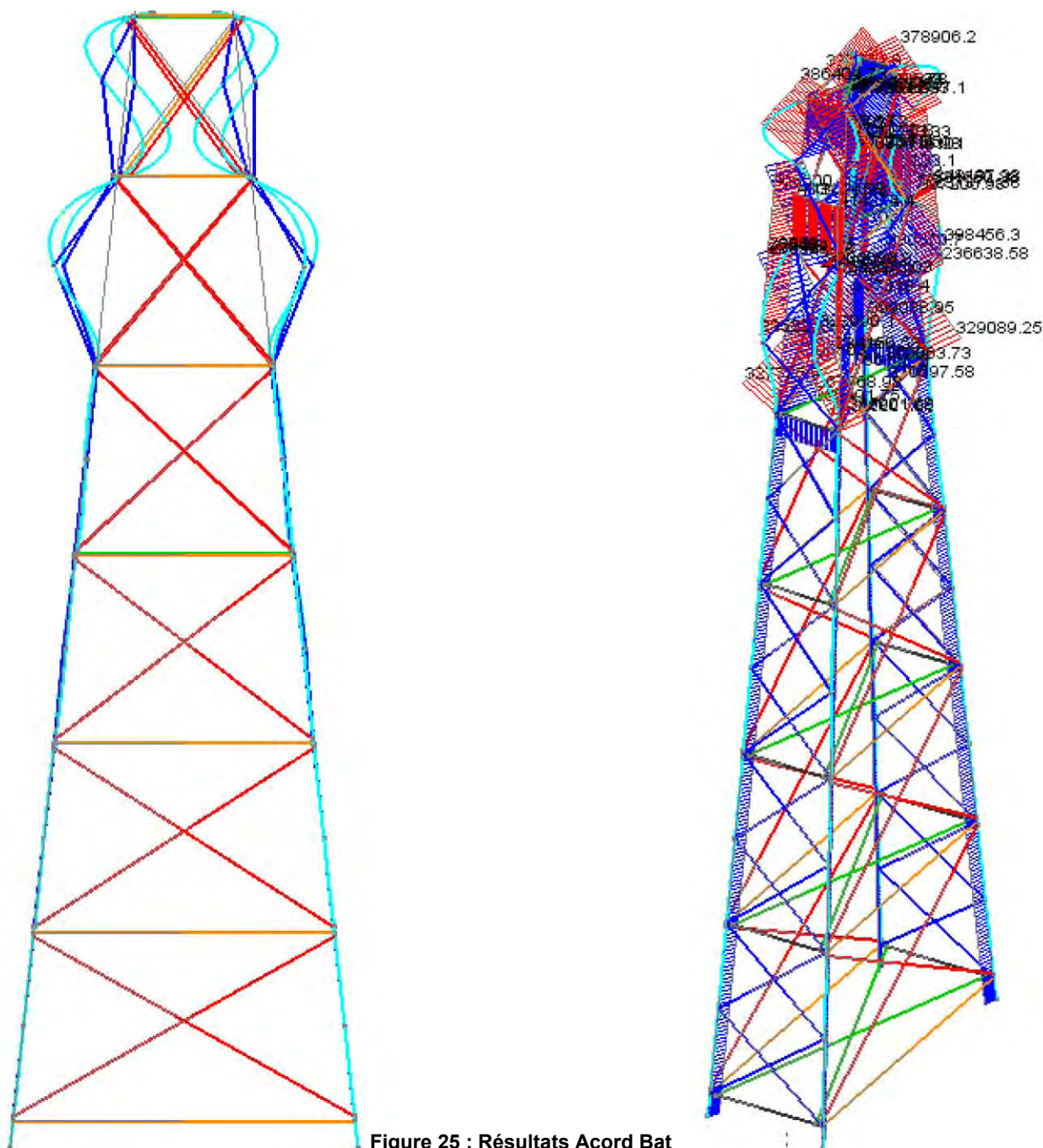


Figure 25 : Résultats Acord Bat

Nous en avons conclu que nous avons fait une erreur de modélisation, mais à l'heure actuelle, nous n'avons malheureusement pas trouvé d'explication à ce problème d'où une certaine frustration.

CONCLUSION

Nous avons passé beaucoup de temps et dépensé beaucoup d'énergie pour ce projet de fin d'étude. Malgré ce point hebdomadaire avec monsieur Bocquet, nous n'avons pas réussi à remplir tous les objectifs qui étaient demandés. Nous avons mis beaucoup plus de temps que prévu sur le dessin et les calculs, car à chaque fois que nous débloquions un problème, nous retombions sur un autre. Par ailleurs nous nous sommes rendu compte que notre niveau en RDM n'était pas du tout suffisant pour ce projet, c'est pourquoi la remise à niveau nous a pris beaucoup de temps

Cependant, nous avons tout de même appris beaucoup de chose sur ce projet, notamment sur Gustave Eiffel, et sur la partie calcul, où nous avons dû appliquer des théorèmes que ne nous connaissions pas. Nous avons également dû avoir une réelle démarche dans notre travail qu'un ingénieur doit avoir. Nous entendons par là, qu'avant de se lancer nous avons du bien réfléchir sur la manière de faire ce projet pour gagner du temps.

Nous restons également encore impressionnés par Gustave Eiffel, ces ingénieurs et dessinateurs de l'époque. La technologie de l'ordinateur n'existant pas, tout devait se faire à la main et nous avons pu remarquer que la différence entre leurs résultats et les notre sont infime. Aujourd'hui peut de personne pourraient faire la même chose avec si peu de moyen.

Notre plus grand regret reste celui de ne pas avoir pu terminer ce projet pour lequel nous nous sommes passionnés pendant de nombreuses semaines, vu que lors des dernières semaines nous nous sentions vraiment proche du but et commençons à solutionner tous nos problèmes.

Nous espérons un jour pouvoir aller sur le site de Garabit pour voir de plus près ce géant d'acier.

ABSTRACT

The Garabit Viaduct is a railway structure located in the Cantal, built in 1884 by Gustave Eiffel. This 122m high and 565m long viaduct enables to cross the Tuyere's gorges. This achievement can be seen as a technological feat because the possibilities at that time were lower (animals we were still used to bring the different structural elements on the site). As for the dimensioning made by Gustave Eiffel and his team, it was also done with the resources available at that time: Castigliano's theorems, Mohr's integrals, unit loads on different supports.

With two bibliographical researches conducted by our two pairson the Garabit viaduct construction and on the life of Gustave Eiffel, we tried at first to understand how the steel giant had been built, and then we analyzed hypothesis for its dimensioning. To understand its dimensioning, we had to train first, on simpler systems before applying these theorems to the viaduct.

After these steps, we were able to redesign, from Eiffel's report and original plans, a pile, a piece of deck, and the central arch on the Cadwork software called. It was then possible to have the neutral fibers of all elements and transfer them directly to dimensioning software to compare the results obtained by Mr. Eiffel and results generated by this software and obtained by our sales.

We then examined the pieces that could be replaced by wood in this extraordinary structure, by implementing a calculation proper to our own material.

This theoretical project, allowed us to deepen our skills in RDM, and to compare the technical capabilities of different ages. Gustave Eiffel, who seemed intellectually inaccessible before this study, is slightly less today.



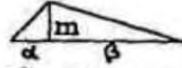

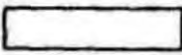

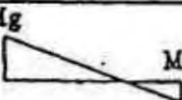
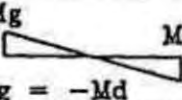
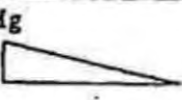
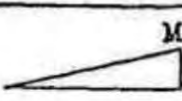
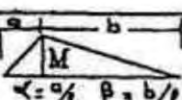
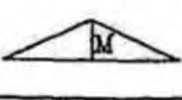


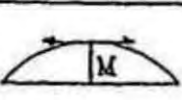


Key words : viaduct, Garabit, sizing, Eiffel, wood, structure.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : LE VIADUC DE MARIA PIA, FRANCHISSANT LE DOURO	9
FIGURE 2 : LE VIADUC DE MARIA PIA AUJOURD'HUI	9
FIGURE 3 : PONT DE SERVICE	10
FIGURE 4 : UNE ESTACADE	10
FIGURE 5 : LES MAÇONNERIES	11
FIGURE 6 : TRAVAIL DES MOELLONS A LA BOUCHARDE	11
FIGURE 7 : MONTAGE DE LA PREMIERE PILE.....	12
FIGURE 8 : MONTAGE DU TABLIER SIMULTANEMENT AU MONTAGE DES PILES.....	12
FIGURE 9 : PHASE DE MONTAGE DE L'ARC	13
FIGURE 10 : EXPLICATION DES TABLIERS.....	18
FIGURE 11 : VUE DES SECTIONS QUI CONSTITUE UN ARBALETRIER AVEC LES CALCULS DES INERTIES	21
FIGURE 12 : DIMENSION D'UNE PILE.....	21
FIGURE 13 : EXPLICATION POUR UN MONTAGE EN SERIE.....	21
FIGURE 14 : VUE DE DESSUS D'UNE PILE.....	22
FIGURE 15 : PLAN D'UNE PETITE PILE DE L'ARC	22
FIGURE 16 : PROFIL D'UNE POUTRE DU TABLIER.....	23
FIGURE 17 : PLANCHE D'EIFFEL CONCERNANT LA PILE.....	28
FIGURE 20 : REPRESENTATION DES FIBRES NEUTRES	28
FIGURE 21 : TRANSFERT DE LA STRUCTURE VERS ACORD BAT.....	29
FIGURE 22 : CALCUL DE LA CORNIERE 100*100*10	30
FIGURE 23 : SCHEMATISATION DE L'ARBALETRIER	33
FIGURE 24 : COUPE DU TREILLIS DIAGONAL	34
FIGURE 25 : REPRESENTATION DES RELAXATIONS SUR ACORD BAT.....	35
FIGURE 26 : CHARGEMENT DE LA PILE	35
FIGURE 27 : RESULTATS ACORD BAT.....	36
TABLEAU 1 : LES OUVRAGES DE LA SOCIETE DE GUSTAVE EIFFEL.....	8
TABLEAU 2 : COUTS DE FABRICATION DU VIADUC.....	16
TABLEAU 3 : APPLICATION DU CALCUL.....	19
TABLEAU 4 : AIDE POUR APPLIQUER LES INTEGRALES DE MOHR	26
TABLEAU 5 : RESULTAT APRES APPLICATION.....	26
TABLEAU 6 : CALCUL DU CENTRE DE GRAVITE DE LA CORNIERE 100*100	30
TABLEAU 7 : ARBALETRIER A CINQ SEMELLES.....	32
TABLEAU 8 : TREILLIS DIAGONAL	34

ANNEXES

XIV. Annexe 1 : Intégrales de Mohr

Introduire M et m avec leur SIGNE			 <i>alpha et beta sont des rapports</i>	
	$1/2 Mmg$	$1/2 Mmd$	$1/2 Mm$	$1/2 Mm$
	$1/6 mg(2Mg+Md)$	$1/6 md(Mg+2Md)$	$1/6 m[Mg(1+\beta) + Md((1+\alpha))]$	$1/4 m(Mg+Md)$
	$1/6 mg(2Mg+Md)$	$1/6 md(Mg+2Md)$	$1/6 m[Mg(1+\beta) + Md((1+\alpha))]$	$1/4 m(Mg+Md)$
 $Mg = -Md$	$1/6 Mgm$	$-1/6 Mgmd$	$1/6 Mgm(1-2\alpha)$	0
	$1/3 Mgm$	$1/6 Mgmd$	$1/6 Mgm(1+\beta)$	$1/4 Mgm$
	$1/6 Mdm$	$1/3 Mdmd$	$1/6 Mdm(1+\alpha)$	$1/4 Mdm$
 <i>alpha = a/l, beta = b/l</i> <i>alpha et beta sont des rapports</i>	$1/6 Mmg(1+\beta)$	$1/6 Mmd(1+\alpha)$	$1/3 Mm$	$1/12 Mm(3-4\alpha^2)/\beta$ valable pour $\alpha < \beta$
	$1/4 Mmg$	$1/4 Mmd$	$1/12 Mm(3-4\alpha^2)/\beta$ valable pour $\alpha < \beta$	$1/3 Mm$
	$1/4 Mgm$	$1/12 Mdmd$	$1/12 Mdm(1+\beta+\beta^2)$	$7/48 Mgm$
	$1/12 Mdm$	$1/4 Mdmd$	$1/12 Mdm(1+\alpha+\alpha^2)$	$7/48 Mdm$
	$1/3 Mmg$	$1/3 Mmd$	$1/3 Mm(1+\alpha\beta)$	$5/12 Mm$
	$5/12 Mgm$	$1/4 Mgmd$	$1/12 Mgm(5-\alpha-\alpha^2)$	$17/48 Mgm$
	$1/4 Mdm$	$5/12 Mdmd$	$1/12 Mdm(5-\beta-\beta^2)$	$17/12 Mdm$