

<b>Université Grenoble-Alpes UFR PhITEM</b>		<b>HIMDI Lina</b>
<b>Spécialité : M2 GC</b>	Tuteur Entreprise : <b>ACCART Christophe</b>	Tuteur UGA: <b>BRIFFAUT Mathieu</b>
<b>Composition du jury</b>	<b>BRIFFAUT Mathieu</b>	<b>BERNARD Rossignol</b>

Rapport de stage de fin d'études :

# Calcul, modélisation et vérification du pont de L'INGRANDES



UFR PhITEM



UNIVERSITÉ  
Grenoble  
Alpes

**ARTCAD**

## Résumé

Dans le cadre de mon stage de fin d'études, j'ai intégré la société ARTCAD qui est spécialisée en ouvrage d'art, pour une durée de 6 mois. Ce rapport présente l'ensemble des missions que j'ai pu réaliser, plus précisément le procédé de calcul permettant de vérifier la portance d'un pont à travées mixtes nommé « INGRANDES ». L'étude est réalisée en plusieurs étapes, depuis la phase analyse des plans d'archives, modélisation, calcul jusqu'à la vérification des pièces constituant l'ouvrage.

## Abstract

As part of my end-of-study internship, I joined the ARTCAD Company, for a period of 6 months. This report presents all the missions that I was capable to carry out, more precisely the calculation process allowing to verify the lift of a bridge with mixed spans named "INGRANDES". The study is based on many stages, from the analysis phase of archive plans, modeling, and calculation up to verification of the components of the structure.

## REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à remercier Christophe ACCART, tuteur entreprise et gérant de la société ARTCAD, de m'avoir permis d'intégrer son entreprise pour effectuer mon stage. Je veux également le remercier pour les projets intéressants sur lesquels il m'a permis de travailler et pour les connaissances qu'il a pu me transmettre.

Ensuite, je souhaite remercier François MATHON et Fabrice PUJAT, chefs de projet et associés de la société, pour leur encadrement tout au long de mon stage et pour la confiance qu'ils m'ont accordée en me confiant des études sur des projets intéressants qui m'ont permis d'acquérir de nouvelles compétences et de confirmer mon choix de projet professionnel.

Je tiens également à remercier, Jonathan RAMALHEIRO, ingénieur d'études, qui m'a accompagné au quotidien dans mes différentes missions. J'ai apprécié son aide précieuse et ses conseils fructueux.

Merci à eux tous pour leurs disponibilités malgré leur planning chargé.

Je remercie également, Aurélie MOCZYGEBA qui, par sa gentillesse et sa disponibilité, m'a permis d'obtenir de l'aide logistique et administrative lorsque j'en avais besoin.

Merci à tous pour la bonne ambiance qui règne votre entreprise. Elle m'a permis d'évoluer dans un cadre de travail agréable favorisant la motivation et le dynamisme tout en conservant la rigueur requise pour la bonne conduite des projets et la réussite de l'entreprise.

## SOMMAIRE

### Résumé

### Abstract

### REMERCIEMENT

### INTRODUCTION ..... 4

### CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL DU PROJET ..... 5

I. Présentation de l'organisme d'accueil : ARTCAD .....	6
1) Domaine d'activités et compétences .....	6
2) Organigramme de la société ARTCAD .....	6
II. Cadre du projet .....	7
1. Thème général et problématique .....	7
2. Plan de mission du pont de l'Ingrandes .....	9
III. Historique du pont de l'INGRANDES .....	11
IV. Géométrie du pont de l'INGRANDES .....	12
V. Matériaux : .....	14
VI. Texte de référence .....	15

### CHAPITRE 2 : CALCUL DE LA PORTANCE DU PONT DE L'INGRANDES ..... 16

I. Préparation du modèle .....	17
1) Géométrie du pont de l'INGRANDES : .....	17
II. Modélisation des charges sur SCIA .....	19
1) Vérification du poids propre de la structure modélisée .....	19
III. Equilibrage des tensions .....	23
1) Vérification des tensions fournies par HC Pyrénées .....	24
2) Calcul des tensions pour équilibrer les câbles.....	26
3) Passage aux 1,32 G .....	26
4) Insertion des poids propres équivalents .....	27
5) Itération sur chaque type de travées .....	27
6) Calcul manuel des tensions au droit des câbles de retenue .....	28
7) Lancement du calcul du modèle entier sur SCIA.....	30
8) Vérification des déplacements .....	30
IV. Actions sur la structure.....	31
1) Charges permanentes .....	31

2) Vent .....	31
3) Variation de la température.....	31
3.1 Variation uniforme « Règlement Français ».....	31
3.2 Gradient thermique « Règlement Français » .....	32
4) Surcharges sur trottoir .....	32
5) Surcharges routières .....	32
5.1 Calcul d'A (L) avec limitation de tonnage. ....	32
5.2 Calcul de charge roulant B pour 12t.....	32
V. Modélisation des surcharges routières sur SCIA.....	34
1) Modélisation des charges A(l) .....	34
2) Charges roulables B limitation à 12t et à 19t .....	35
VI. Calcul des combinaisons d'actions.....	37
VII. Méthode de justification de la portance du pont.....	37
1) Poutres de rigidité - entretoises - longerons - encorbellement passerelle.....	38
2) Câbles .....	38
3) Suspentes .....	38
4) Chaussée.....	39
5) Selles mobiles- Rouleaux.....	39
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>41</b>
<b>ANNEXE A - Calcul des sections équivalentes .....</b>	<b>43</b>
<b>ANNEXE B – Métré (poids/mètre linéaire) .....</b>	<b>44</b>
<b>ANNEXE C-Calcul des poids des câbles (kg/ml) .....</b>	<b>46</b>
<b>ANNEXE D – Calcul des charges routières A(l) .....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEXE – PLANS-.....</b>	<b>48</b>
<b>Liste des figures</b>	
Figure 1 : organigramme de la société ARTCAD .....	7
Figure 2 : projets réalisés durant le stage .....	7
Figure 3 : code couleur utilisé pour les éléments des poutres maîtresses.....	8
Figure 4 : vue d'ensemble des ponts de Lézardrieux.....	8
Figure 5: vue 3D des axes et des câbles de Lézardrieux .....	9
Figure 6 : Plan de mission de calcul du pont de l'INGRANDES .....	10
Figure 7 : plan de situation de l'INGRANDES .....	11
Figure 8 : visualisation des éléments du pont suspendu de l'INGRANDES.....	13
Figure 9 : bielles d'about .....	14

Figure 10 : selle des appuis de rive .....	14
Figure 11 : attache des suspentes sur les pièces de pont .....	14
Figure 12 : contreventement dans les travées BAUDIN .....	14
Figure 13: superstructure et tablier travée BAUDIN.....	14
Figure 14 : superstructure et tablier - travée ARNODIN-.....	14
Figure 15 : profilé Zorès - travées ARNODIN –.....	14
Figure 16 : coupe transversale de la travée ARNODIN .....	17
Figure 17 : vue en plan des travées BAUDIN .....	18
Figure 18 : vue en plan des travées ARNODIN .....	19
Figure 19 : procédé de calcul de l'équilibrage des tensions.....	24
Figure 20 : schéma représentatif des tensions et poussées calculées pour la travée de rive BAUDIN .	29
Figure 21:schéma représentatif des tensions et poussées calculées pour la pile centrale.....	29
Figure 22: schéma représentatif des tensions et poussées calculées pour la travée de rive ARNODIN	30
Figure 23 : système de chargement 12t (à gauche) et 19t(à droite).....	33
Figure 24 : vue en plan du parcours des camions de 12t.....	36
Figure 25: coupe transversale d'une travée BAUDIN pour des camions de 12t.....	36

## Liste des tableaux

Tableau 1 : information concernant les câbles qui constituent le pont de l'INGRANDES.....	12
Tableau 2 : détails des éléments constituant le pont de l'INGRANDES .....	13
Tableau 3 : légende pour modélisation du pont sur SCIA.....	17
Tableau 4: Comparaison des éléments modélisés et non modélisés pour travée BAUDIN .....	19
Tableau 5 : Comparaison des éléments modélisés et non modélisés pour travée ARNODIN .....	20
Tableau 6 : valeurs des charges pour une travée BAUDIN.....	20
Tableau 7 : valeurs des charges pour une travée ARNODIN .....	20
Tableau 8 : comparaison des valeurs du métré avec celles calculées.....	21
Tableau 9 : écart entre les poids du métré et le poids calculé par SCIA .....	22
Tableau 10: vérification de la suspension .....	22
Tableau 11 : valeurs des charges de la suspension pour les travées BAUDIN .....	22
Tableau 12: valeurs des charges de la suspension pour les travées ARNODIN .....	22
Tableau 13 : vérification des valeurs du métré et du logiciel.....	23
Tableau 14: données fournies par HC Pyrénées.....	25
Tableau 15:vérification de l'équilibrage .....	26
Tableau 16 : valeurs prises pour le calcul sous G .....	26
Tableau 17 : valeurs prises pour le calcul de 1,32 G.....	27
Tableau 18: valeurs finales des tensions insérées et une vérification des efforts calculés par SCIA sur les câbles .....	28
Tableau 19: récapitulatif des valeurs de tensions finales insérées sur SCIA.....	31
Tableau 20 : formule de A(l) en fonction du niveau de limitation .....	32
Tableau 21: calcul du coefficient dynamique pour 12t .....	33
Tableau 22 : calcul du coefficient dynamique pour 19t .....	34
Tableau 23 : configuration de chargement pour le système de charge répartie A(l).....	34
Tableau 24 : exemple de cas de charge de calcul pour les travées étudiées .....	35
Tableau 25 : valeurs des coordonnées à insérer sur SCIA pour tracer le parcours des charges de 12t	37
Tableau 26 valeurs des coordonnées à insérer sur SCIA pour tracer le parcours des charges de 19t ..	37

## INTRODUCTION

Dans le cadre de ma formation d'ingénieur à l'Université Grenoble Alpes, j'ai été amenée à effectuer un stage d'une durée de 6 mois à compter de Février. C'est une opportunité qui m'a permis d'appliquer concrètement toutes les connaissances acquises tout au long de ma formation académique sur des réels projets, ainsi que de me projeter dans le monde du travail et de faire un bilan sur mon projet professionnel.

Ce stage a été effectué au sein du bureau d'études ARTCAD, spécialisé dans le domaine du génie civil et des ouvrages d'art. En effet, j'ai toujours été passionnée par ce domaine très varié et nécessitant des connaissances vastes (béton armé, acier, géotechnique, routes...).

Ayant effectué plusieurs stages dans des bureaux d'études, j'ai effectué des missions de calcul et modélisation des structures, et donc cette expérience au sein d'ARTCAD affirme mon choix de projet professionnel.

Mes missions au sein du bureau ARTCAD ont été variées et nombreuses, j'ai eu l'occasion de travailler sur diverses parties de pont (tablier, suspension...), et sur différents types de pont (suspendu, haubané, passerelle...). Pour cela, j'ai pu réaliser des modèles d'ouvrages, des calculs RDM, et des tableurs calcul sous EXCEL.

Ce rapport fait l'objet d'une vérification de la portance d'un pont à travées mixtes nommé «INGRANDES». Plusieurs autres projets ont été réalisés en parallèle mais y seront présentés brièvement.

Dans une première partie, je présenterai l'entreprise ARTCAD, ensuite je détaillerai l'étude réalisée pour le pont de l'Ingrandes. Finalement, je ferai un bilan personnel et professionnel sur le déroulement du stage.

L'étude du pont de l'Ingrandes est réalisée en plusieurs phases : la première repose sur une analyse détaillée de la géométrie de la structure pour ensuite la modéliser sur un logiciel spécialisé dans le calcul non linéaire « SCIA engineer », et enfin de s'assurer de la correspondance entre le poids propre de la structure modélisée et la réalité. La seconde phase consiste sur un calcul des tensions permettant un déplacement quasi nul de la membrure inférieure de la poutre de rigidité. Finalement, insérer toutes les actions auxquels est soumis l'ouvrage afin de calculer les combinaisons et enfin en tirer des résultats et donc vérifier la portance de l'ouvrage.

# CHAPITRE 1 : CONTEXTE GENERAL DU PROJET

- 
- **Objectif visé** : Mise en situation des projets et des missions réalisés.
  - **Descriptif** : Il s'agit de contextualiser le projet:
    - Présentation de l'organisme d'accueil
    - Présentation du projet en question
    - Le thème général du projet et la problématique
    - Plan de mission du déroulement de stage





## I. Présentation de l'organisme d'accueil : ARTCAD

### 1) Domaine d'activités et compétences

Depuis 1991, la société ARTCAD exerce ses compétences tout particulièrement dans des missions de maîtrise d'œuvre, de conception, de réalisation, de réparation et d'expertise d'ouvrage d'art courants et exceptionnels du génie civil.

- **Inspection d'ouvrages,**
- **Pathologies, renforcements et réparation** d'ouvrages,
- **Conception** d'ouvrages à réaliser : études préliminaires, avant projets, projets,
- **Préparation** de documents de consultation d'entreprises, élaboration de cahier des charges,
- **Assistance technique** lors de l'analyse des offres des entreprises ou en cours d'exécution
- **Contrôle** des études d'exécution,
- **Supervision et réception** des ouvrages,
- **Expertise** des ouvrages,
- **Etudes d'exécution** (ouvrages neufs, réparations, renforcements).

Les structures traitées sont variées :

- Ponts routes, viaducs, ponts rails
- Passerelles
- Ouvrages de soutènement,
- Ouvrages de protection contre le bruit,
- Ouvrages fluviaux ou maritimes
- Génie civil industriel

La part de la réparation d'ouvrages représente largement plus de 50% du chiffre d'affaires annuel, le reste relevant des ouvrages neufs.

ARTCAD intervient sur tout le territoire, ainsi que dans les DOM-TOM et si besoin à l'étranger, et a comme spécialité les ouvrages suspendus et haubanés. Elle intervient aussi sur des opérations intégrant des particularités, tels que les monuments historiques, les opérations de vérinages, les modifications des fonctionnalités des ouvrages.

ARTCAD détient la certification de l'OPQIBI, organisme indépendant, dans différents domaines, on note : direction de l'exécution des travaux, étude de fondations complexes, diagnostic en ouvrages d'art

### 2) Organigramme de la société ARTCAD

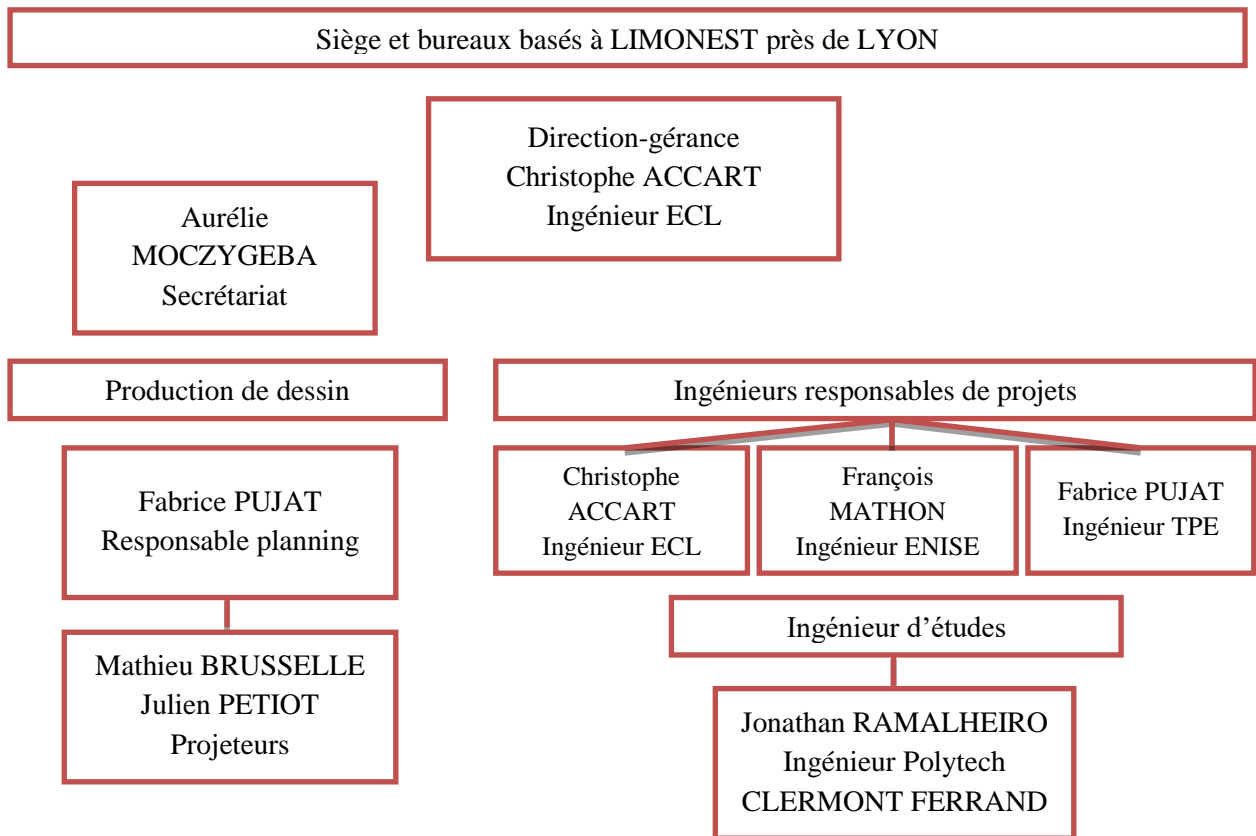


Figure 1 : organigramme de la société ARTCAD

## II. Cadre du projet

### 1. Thème général et problématique

Mon stage s'est étalé sur une durée de 6 mois. Occupant le poste d'ingénieur études, en étant toujours supervisée par un des chefs de projet et conseillée et aidée par un ingénieur d'études, j'ai pu réaliser plusieurs tâches et accomplir un ensemble d'enrichissement.

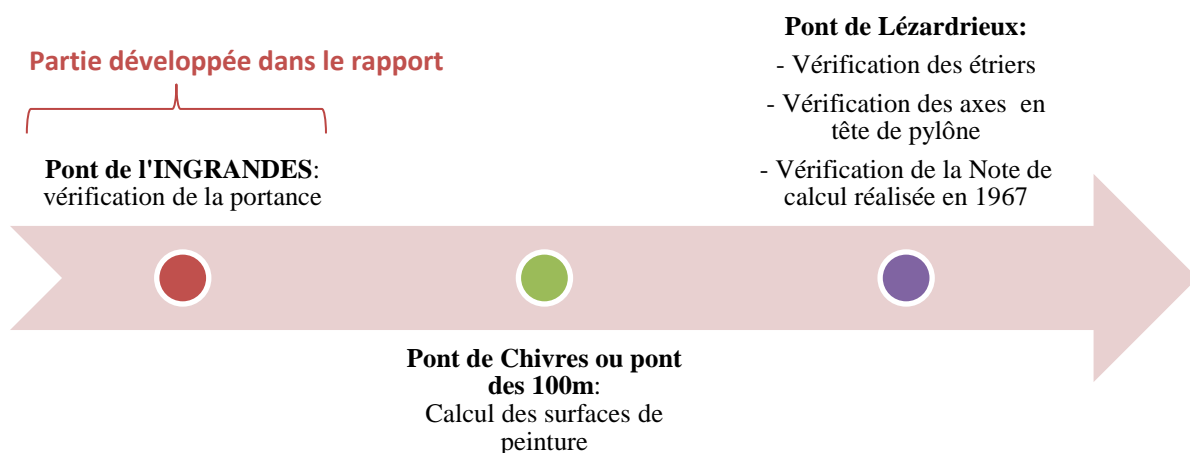


Figure 2 : projets réalisés durant le stage

A cause de la crise sanitaire qu'a subi la France, le calcul du projet de l'INGRANDES a été suspendu vu que le logiciel ne peut être manipulé à distance. Durant cette période, j'ai été amenée à réaliser deux autres projets qui ne seront pas détaillés dans le présent rapport mais présentés brièvement dans cette partie :

- **Pont de Chivres ou pont des 100m:**

Le « pont des 100 mètres » est un ouvrage à treillis de type Warren. L'ouvrage mesure 145m de long et franchit la Saône au niveau de la commune de Chivres. Il est composé de 4 travées, de 33m pour les travées de rive et 39,50m pour les travées intermédiaires. La dernière remise en peinture de l'ouvrage date de 1991.

Avant tout, il a été nécessaire d'analyser les plans d'archives afin de calculer les surfaces de peinture. Le défi majeur était d'éviter de calculer la même surface plusieurs fois, d'où la nécessité de fixer un code couleur pour les pièces afin de faciliter le calcul, tel que le montre la figure ci-dessous.

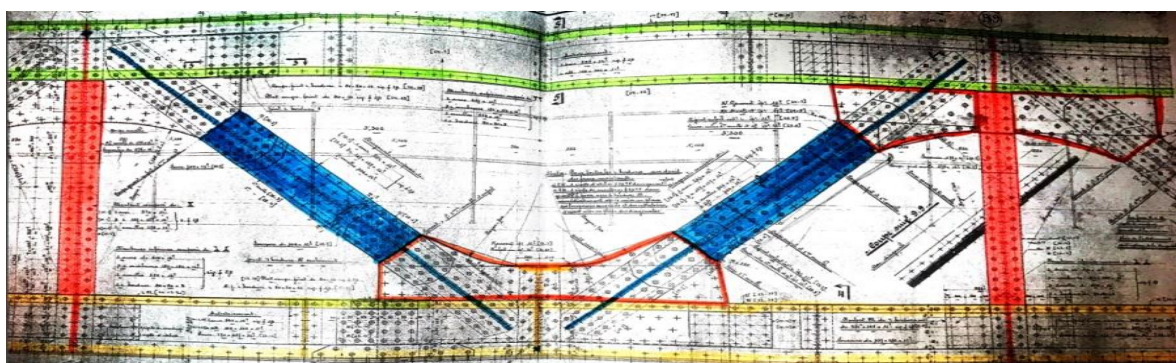


Figure 3 : code couleur utilisé pour les éléments des poutres maîtresses

- **Pont de Lézardrieux:**

Le pont de LEZARDRIEUX ou « pont Saint-Christophe » franchit « Le Trieux » en trois travées haubanées de portées 20,175 m – 111,85 m – 20,175 m avec deux nappes (amont et aval) à triangulation centrale type « GISCLARD ». Ses câbles sont de même type que ceux du pont d'Ingrandes (à torsion alternative).

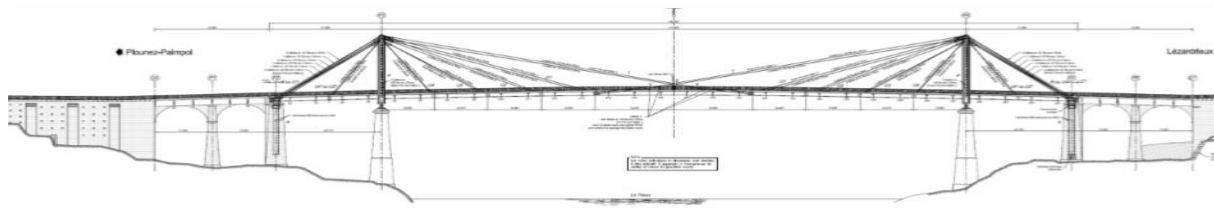


Figure 4 : vue d'ensemble des ponts de Lézardrieux

La vérification des étriers a été faite en se basant sur des tableurs Excel fournis par ARTCAD. D'autre part, la vérification des axes en tête de pylône a nécessité une modélisation sur le logiciel ROBOT afin d'en tirer les moments, et efforts tranchants pour les insérer ensuite sur le tableur Excel fourni par

ARTCAD. Les axes sont modélisés sous forme de poutre de section circulaire appuyée et les câbles comme étant des efforts concentrés.

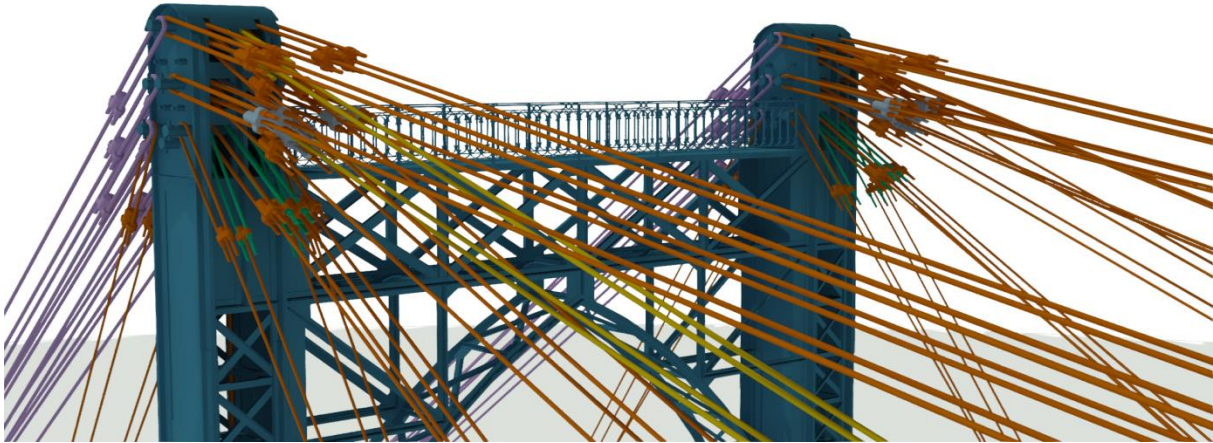


Figure 5: vue 3D des axes et des câbles de Lézardrieux

La vérification de la note de calcul permet d'abord d'examiner la géométrie sur les plans et la comparer à la réalité, critiquer les cas de surcharges considérés sont bien les plus défavorables (notamment en position) et enfin approuver que la démarche de justification est cohérente.

On s'intéressera principalement à la dalle de ROBINSON, c'est un type particulier qui englobe une tôle en sous face ayant servi de coffrage et connecté au béton par des arceaux.

- **Pont de L'INGRANDES :**

Le pont de l'INGRANDES s'inscrit parmi les anciens ouvrages en France, il relie la commune d'Ingrandes à celle du Mesnil-en-vallée (Maine et Loire) par la route départementale RD6 dans les pays de la Loire.

Il s'agit d'un pont suspendu à travées multiples avec des piles réalisées en maçonnerie. Construit par l'entreprise Arnodin, il est achevé en 1922, puis reconstruit deux fois par l'entreprise Baudin-Châteauneuf en 1941, puis en 1948.

Le but de ce projet est de **définir toutes les hypothèses utiles pour les calculs de portance du pont suspendu d'Ingrandes.**

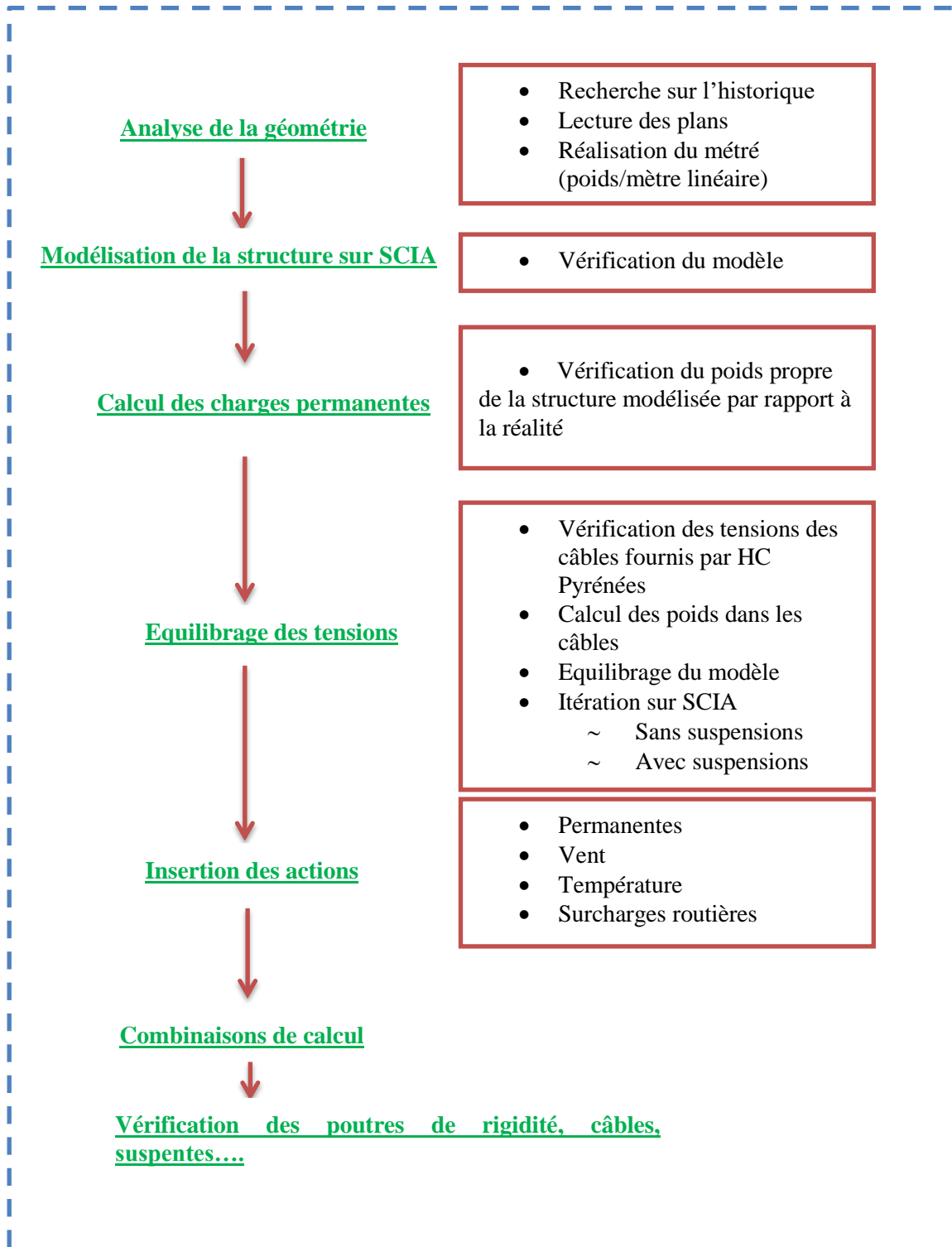
La particularité de ce projet, est le fait qu'il soit un pont ancien et donc ses plans d'archives peuvent contenir des éléments qui ne sont plus utilisés à l'heure actuelle, et parfois par manque d'informations.

## 2. Plan de mission du pont de l'Ingrandes

Afin de vérifier la portance du pont, plusieurs étapes de calcul ont été réalisées comme l'indique le schéma ci-dessous, elles seront détaillées dans la suite du rapport.

Dans le cadre de la participation aux rendus de l'entreprise, une note d'hypothèse et de réglage ont été réalisées, comprenant tous les éléments de calcul depuis l'analyse de la géométrie jusqu'à la vérification de la portance du pont.

**Objectif :** Vérification de la portance du pont suspendu de l'Ingrandes



### III. Historique du pont de l'INGRANDES

Le pont suspendu d'Ingrandes a été construit en 1867 sur la RD 6 afin de franchir la Loire.



Figure 7 : plan de situation de l'INGRANDES

Toutefois, il a subi de nombreuses réparations tout au long de sa durée de vie. Afin de mieux comprendre l'ouvrage et ses particularités géométriques, ci-dessous les principales réparations et reconstructions qui ont modifié ses caractéristiques.

- 1867-1868 : Construction de l'ouvrage et mise en service
  - 1922-1924 : Restauration de l'ouvrage par la société Arnodin. Ces réparations comprennent notamment :
    - Remplacement des câbles porteurs et des câbles de tête
    - Ajout des haubans en about de travée
    - Addition et remplacement des câbles de retenue
    - Remplacement des suspentes
    - Remplacement du tablier
    - Mise en place d'un platelage bois
  - 1936 : Remplacement de culots fissurés par Baudin
  - 1940 : Destruction des deux travées (T7 et T8) côté Ingrandes par fait de guerre.
  - 1941 : Reconstruction des travées détruites par Baudin (nouveaux culots en acier et non plus en fonte, récupération des câbles d'un pont voisin) avec suppression des haubans sur ces travées.
  - 1944 : Destruction d'une grande partie de l'ouvrage par la guerre. Les travées 2 à 4 et 7 et 8 devront être remises en état et les travées 5 et 6 reconstruites.
  - 1947 : Remise en état des travées 2 à 4, 7 et 8 par l'entreprise Baudin  
Reconstruction des travées T5 et T6 par l'entreprise Baudin  
Ces travaux comprennent notamment :
    - Reconstruction de T5 et T6 dans les mêmes dispositions que T7 et T8 (1940)
    - Suppression des haubans des travées 5 et 6
    - Limitation de tonnage à 9t
- L'ouvrage est désormais constitué de deux parties dissemblables : les travées 1 à 4 rénovées en 1922 par Arnodin et les travées 5 à 8 reconstruites par Baudin suite à la guerre.
- 1972 : Remplacement d'une partie de la suspension (suspentes et câbles porteurs).

- 1974 : Pose d'un platelage métallique avec des caissons Arnodin sur les travées 1 à 4. Pose d'un platelage prototype PMAA sur les travées Baudin. Réparations/renforcements du tablier et des anciennes poutres de rigidité. Limitation de tonnage à 12t.
- 1979 : Remplacement de la suspension par Baudin Châteauneuf. Ces travaux comprennent notamment :
  - Remplacement des câbles de retenue
  - Remplacement des câbles porteurs amont et aval des travées 1, 3 et 4, ainsi que les étriers et les suspentes.
  - Remplacement des câbles porteurs amont des travées 6 à 8, ainsi que la nappe aval de la travée 7
- 1980 : Remplacement complet de la suspension des travées 1, 3 et 4.
- 1985 : Renforcement des poutres de rigidité au niveau de la membrure des travées Baudin
- 1986 : Renforcement des poutres de rigidité des travées Arnodin
- 2008 : Réparation et remise en peinture de la suspension.

## IV. Géométrie du pont de l'INGRANDES

Cet ouvrage est composé de 8 travées. Il est actuellement limité en tonnage à 12t et en vitesse à 30km/h.

Sa largeur hors tout est de 6,22m, et sa largeur utile est de 5,78m. Elle est composée de 2 trottoirs de 0,49m et d'une chaussée de 4,80m.

Sa particularité est qu'il est constitué de deux parties dissemblables. Les travées 1 à 4, sont les travées dites « Arnodin » construites en 1923 avec suspension mixte (travées suspendues et haubanées). Les travées 5 à 8 suspendues dites « Baudin » construites en 1947 (pas de hauban).

Par analogie, les valeurs des flèches moyennes sont les suivantes :

- Flèche travées 1 à 4 : ..... 5,89 m
- Flèche travées 5 à 8 : ..... 5,69 m

La description des câbles de l'ouvrage existant est donnée ci-dessous :

	Nombre	φ (mm)
câble de retenue	2 nappes x 4 câbles	60,7
câble porteur	2 nappes x 2câbles	65,5
câble de tête	2 nappes x 2câbles	60,7
haubans	2x2x3x 1 câble	35

**Tableau 1 : information concernant les câbles qui constituent le pont de l'INGRANDES**

Les suspentes de l'ouvrage sont espacées de 1,50m. Sur les travées 1, 3 et 4, elles sont au nombre de 28 et de diamètre 25mm. Sur la travée 2, elles sont au nombre de 28 et de diamètre 30mm. Enfin sur les travées 5 à 8, elles sont au nombre de 40 et de diamètre 40mm. Elles sont fixées en partie haute par des chevalets couplés à des étriers.

Toutes les selles sont mobiles, excepté celle sur le pylône P4 (central) qui est fixe suite au bétonnage de ses parties mobiles.

Concernant le tablier, il n'existe pas de plan à jour de l'ouvrage. En effet, l'ouvrage a subi beaucoup de renforcements, réparations ou changements d'éléments au cours de sa vie.

Ci-dessous, un récapitulatif de la géométrie du tablier faite à partir de l'inspection détaillée de 2007.



Figure 8 : visualisation des éléments du pont suspendu de l'INGRANDES

	Travées BAUDIN	Travées ARNODIN
Poutre de rigidité	Montants : cornière en L Membrure supérieure : 2 cornières en L renforcées par des plats suite aux incidents de déversement. Membrure inférieure : 2 cornières en L avec âme métallique.	Montants : deux profilés en U Diagonales : deux bi-articulées, Membrure supérieure : jumelant deux profilés en U et un profilé Zorès. Membrure inférieure : jumelant deux profilés en U
Pièces de pont	Profilé IPE	Ame métallique avec 4 cornières.
Longerons	Un longeron central en HEA et deux latérales en IPN	Un longeron central composé d'une âme métallique et deux cornières en semelle
Platelage	Platelage métallique breveté de la société Baudin Châteauneuf. Il est constitué de panneaux comportant des tubes rectangulaires jointifs, solidarisés par des câbles de précontrainte.	Caisson Arnodin (transversalement, au nombre de 16) fixés aux pièces de pont par boulonnage.
Contreventement	-	Cornières 70 x 70 disposées en croix de Saint-André.
Appuis	Les poutres de rigidité sont appuyées à leurs extrémités sur des bielles fixées dans les maçonneries des piles. Elles autorisent les mouvements horizontaux mais bloquent les mouvements verticaux. Ces bielles ont été mises en place en 1980 par l'entreprise Baudin Châteauneuf. Les déplacements latéraux du tablier sont empêchés par des coulisseaux fixés sur les pièces de pont.	
Trottoirs	en tôle striée.	

Tableau 2 : détails des éléments constituant le pont de l'INGRANDES

Ci-joint des images réelles des éléments précités dans le tableau, prises lors de la dernière inspection en 2007.





Figure 9 : bielles d'about



Figure 10 : selle des appuis de rive



Figure 11 : attache des suspentes sur les pièces de pont



Figure 12 : contreventement dans les travées BAUDIN



Figure 13: superstructure et tablier travée BAUDIN



Figure 14 : superstructure et tablier - travée ARNODIN-

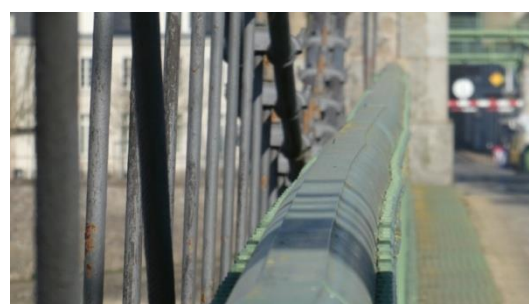


Figure 15 : profilé Zorès - travées ARNODIN –

## V. Matériaux :

Pour toutes les parties en acier, la masse volumique est prise égale à 7.85 t/m<sup>3</sup>.

Pour toutes les parties en béton, la masse volumique du béton est prise égale à 2,5 t/m<sup>3</sup>.

Sans note de calculs d'archives et conformément au guide Céréma « Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art » pour un ouvrage construit entre 1920 et 1960,

nous considérons de l'acier Ac 42 pour la charpente métallique, les suspentes et étriers, matériaux équivalent à du S235 actuel avec une résistance élastique de 235 MPA.

## VI. Texte de référence

Nous ferons usage de la réglementation actuelle, c'est-à-dire des Eurocodes et plus particulièrement ceux listés ci-dessous, et des guides Cerema qui s'y réfèrent.

- Eurocode 3 et AN

Nous utiliserons le guide Céréma (anciennement SETRA) suivant :

- Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art

Nous utilisons également les documents suivants :

- Circulaire « les ouvrages à portance limitée »
- Dossier d'archives
- Document SETRA/LCPC « les ponts suspendus en France »
- Fascicule 61 titre II

# CHAPITRE 2 : CALCUL DE LA PORTANCE DU PONT DE L'INGRANDES

- 
- **Objectifs visés** :
    - **Enrichissement technique**
    - **Manipulation du logiciel SCIA**
    - **Equilibrage du pont**
    - **Inventaire et calcul rigoureux des charges routières**
  - **Descriptif** : Préparer le modèle sur SCIA, il sera question d'inventorier et calculer rigoureusement les charges auxquelles notre ouvrage est soumis et les modéliser sur le logiciel afin de faire les vérifications nécessaires pour valider sa portance.
  - **Aboutissement** : Fiche Excel (calcul RDM, calcul des charges...)



## I. Préparation du modèle

SCIA Engineer est un logiciel de calcul destiné aux analyses statiques et dynamiques de structure et leurs vérifications vis-à-vis des normes. L'ensemble de l'ouvrage est modélisé à l'aide de la version 17.0.

### 1) Géométrie du pont de l'INGRANDES :

Les éléments sont modélisés avec leur section réelle et positionnés à leur centre de gravité. L'ensemble des éléments de la structure est modélisé par des éléments filaires.

Pour faciliter la modélisation, une longueur moyenne a été prise pour les 4 travées BAUDIN et une autre pour les 4 travées ARNODIN. En se basant sur les données fournies par le géomètre, la longueur moyenne est :

- Travées BAUDIN : **63.2 m**
- Travée ARNODIN : **61.13 m**

Le schéma ci-dessous montre un exemple d'épure prise en compte pour les travées ARNODIN.

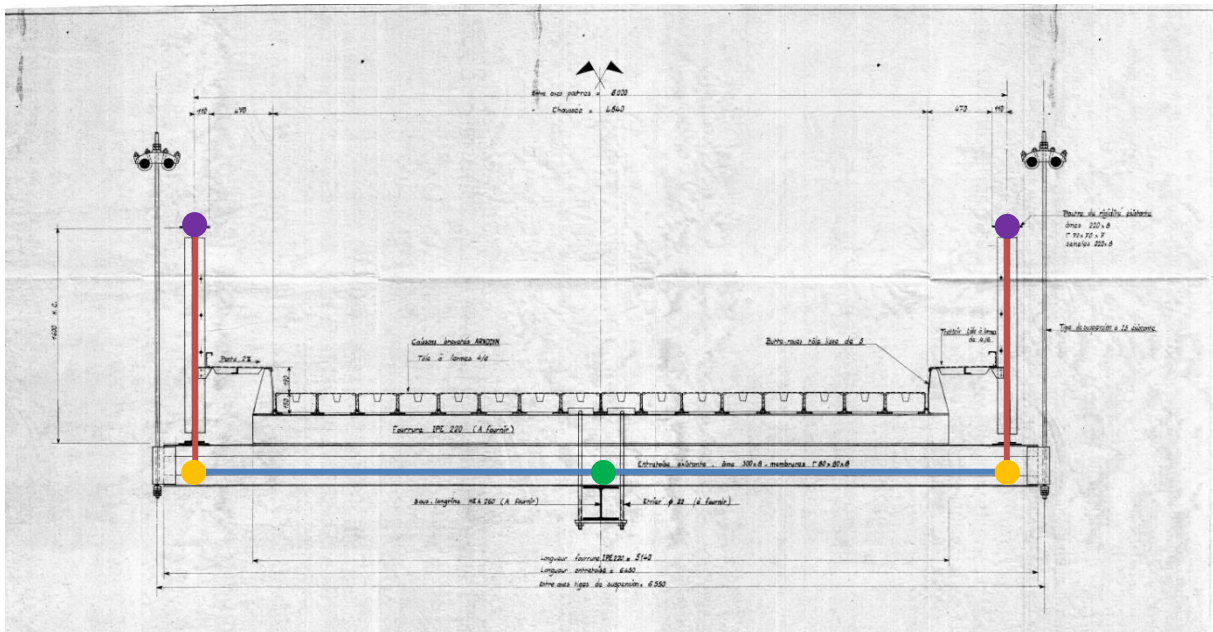


Figure 16 : coupe transversale de la travée ARNODIN

Légende de la figure 1 :

●	Longeron
●	Membrure inférieure
●	Membrure supérieure
—	Montant
—	Pièce de pont

Tableau 3 : légende pour modélisation du pont sur SCIA

L'ensemble des plans utilisés sont en **ANNEXE PLANS**.

Pour faciliter le repérage des éléments, une création de calque s'avère nécessaire pour chaque section modélisée.

Tous les éléments constituant la poutre de rigidité seront modélisés, en créant une section adéquate pour chaque élément. Concernant les profilés Zorès situés sur la membrure supérieure des travées ARNODIN, elles seront prises en étant des charges vues leur faible contribution au fonctionnement de la structure.

Le platelage métallique pour les travées BAUDIN et les caissons pour les travées ARNODIN seront pris comme charge vu leur impact sur la fonctionnalité de l'ouvrage.

Les câbles de tête, porteurs et de retenue, sont modélisés par un seul câble par nappe, qui représente une section équivalente de l'ensemble des câbles constituant l'amont et l'aval. (ANNEXE A). Il est nécessaire de rentrer la pré-tension qui est calculée à partir de l'équilibrage de l'ouvrage ainsi que le poids linéaire projeté perpendiculairement au câble. Les suspentes sont modélisées par des éléments non linéaires fonctionnant en traction seule.

Les câbles de tête sont modélisés par un arc parabolique en se basant sur la flèche fournie par le géomètre, tel que précisé dans la partie III.

Les pylônes ne sont pas modélisés, seuls les appuis des selles qui seront pris en compte. Les selles sont positionnées en tête de pylône et assurent la continuité de la suspension au droit des appuis. Elles sont modélisées en fonction des possibilités réelles de la mobilité de chacune. En se basant sur le rapport de la dernière inspection, on remarque que toutes les bielles permettent une translation suivant x, sauf celle située au centre qui est bloquée dans toutes les directions.

Les bielles situées aux abouts de chaque travée ont été modélisées grâce aux plans et aux photos réalisés lors de la dernière inspection. On remarque qu'elles autorisent les mouvements horizontaux mais bloquent les mouvements verticaux.

Les assemblages ne seront pas modélisés et seront pris en compte avec une majoration de 6% des poids calculés.

On obtient le modèle suivant :

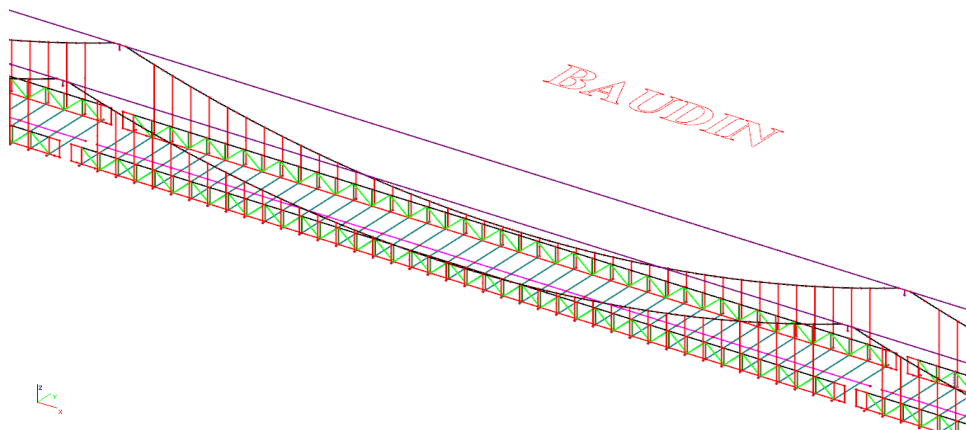


Figure 17 : vue en plan des travées BAUDIN

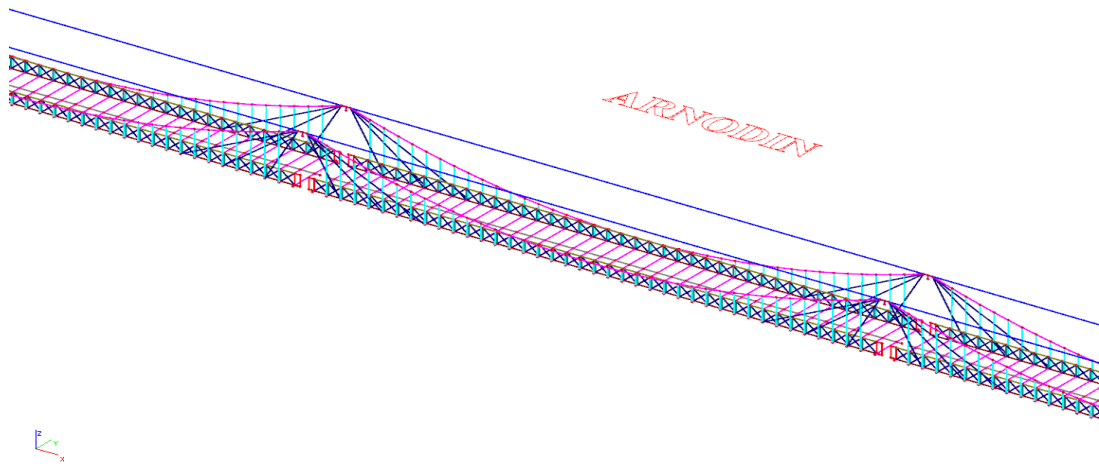


Figure 18 : vue en plan des travées ARNODIN

## II. Modélisation des charges sur SCIA

### 1) Vérification du poids propre de la structure modélisée

Avant insertion des charges, il est nécessaire de vérifier le poids propre calculé en métré (**ANNEXE B**) avec celui du logiciel .Le but de cette partie est de s'assurer que le poids du modèle correspond parfaitement à celui calculé sur le métré, et donc être le plus proche possible de la réalité. Tout d'abord, il a été nécessaire de détecter les éléments modélisés de ceux non modélisés sur le logiciel pour chaque type de travée. Le tableau ci-dessous récapitule ceci :

Travées BAUDIN		
Eléments	Modélisé	Non modélisé
Pièce de pont	x	
Contreventement		x
Revêtement		x
Platelage métallique		x
Garde de corps		x
Trottoir		x
Poutre de rigidité	x	
Longrine	x	

Tableau 4: Comparaison des éléments modélisés et non modélisés pour travée BAUDIN

Travées ARNODIN		
Eléments	Modélisé	Non modélisé
Pièce de pont	x	
Revêtement		x
Caissons		x
Support caisson		x
Garde de corps		x

Trottoir		x
Poutre de rigidité	x	
Profilé Zorès		x
Longeron	x	
Longrines latérales	x	

Tableau 5 : Comparaison des éléments modélisés et non modélisés pour travée ARNODIN

Ensuite, il faut déterminer la valeur de chaque charge et surtout la manière dont elle sera modélisée. Il est à noter que ce calcul est fait pour un tronçon de 1.5 m de travée.

Travées BAUDIN		
Eléments non modélisés	Type de charges	valeurs
Contreventement	ponctuelle	0.0729 t
Revêtement ECF	surfaccique	0.072 t/m <sup>2</sup>
Platelage métallique	surfaccique	0.0913t/m <sup>2</sup>
Garde de corps	ponctuelle	0.114 t
Trottoir	ponctuelle	0,048 t

Tableau 6 : valeurs des charges pour une travée BAUDIN

Travées ARNODIN		
Eléments non modélisés	Type de charges	valeurs
Revêtement ECF	surfaccique	0.072 t/m <sup>2</sup>
Caissons	surfaccique	0.1008 t/m <sup>2</sup>
Support caisson	linéaire	0,0262 t/m
Garde de corps	ponctuelle	0,06 t
Trottoir	ponctuelle	0,048 t
Profilé Zorès	linéaire	0,015 t/m

Tableau 7 : valeurs des charges pour une travée ARNODIN

- Le poids des contreventements, des supports de caisson, des profilés Zorès correspond aux valeurs données par le catalogue en mètre linéaire.
- Les contreventements sont modélisés par des charges ponctuelles au droit des jonctions des pièces de pont avec les montants conformément au plan **1940-Restauration 2 travées RD demi élévation**, la charge étant donnée en t/ml sera multipliée par la longueur d'une barre de contreventement pour enfin déduire la charge ponctuelle aux abouts.
- Les gardes de corps sont modélisés par une charge ponctuelle sur les montants de la poutre de rigidité.
- Les trottoirs sont modélisés par deux charges ponctuelles, une reposant sur le montant et l'autre sur les bords du trottoir conformément au plan **1985-Poutre Baudin**.
- Le platelage métallique et les caissons sont modélisés par une charge surfaccique représentant leur poids par unité de surface.
- Le revêtement a un poids volumique de 2,4t/m<sup>3</sup> qui sera multiplié par une épaisseur de 3cm pour en déduire la charge surfaccique à modéliser.
- Les profilés Zorès seront modélisés sur toute la longueur de la membrure supérieure de la poutre de rigidité des travées Arnodin.

Après avoir inséré les charges sur le modèle SCIA, il faut lancer le calcul et comparer le poids propre obtenu par le métré à celui calculé par le logiciel, pour chaque cas de charge. Le métré réalisé pour les travées ARNODIN et BAUDIN est donné en **ANNEXE B**.

Pour faciliter la comparaison, le tableau ci-dessous récapitule les résultats :

Cas de charges	Poids du métré	Poids calculé par SCIA	Ecart $\Delta$	
BAUDIN	Structure		<b>31.723 t</b>	
	contreventement	10 croix de contreventement de 9.89m de long de 0.146t. =0.146x10= <b>1.46t</b>	<b>1.458 t</b>	<b>0.002 t</b>
	revêtement ECF	2.4x63.2x4.8x0.03 <b>21.842 t</b>	<b>21.842 t</b>	<b>0 t</b>
	platelage métallique	0.393 t x 41 travées de 1.5m= <b>16.113 t</b>	<b>16.381 t</b>	<b>0.268 t</b>
	garde de corps	0.228t x 41 travées de 1.5m= <b>9.348 t</b>	<b>9.348 t</b>	<b>0 t</b>
	trottoir	0.195t x 41 travées de 1.5m= <b>7.99 t</b>	<b>8.064 t</b>	<b>0.069 t</b>
	$\Sigma$	1.3 t/m x 63.2m= <b>82.16 t</b>	<b>88.816 t</b>	
ARNODIN	Structure		<b>30.532 t</b>	
	revêtement ECF	2.4x61.13x4.84x0.03 <b>21.302 t</b>	<b>21.303 t</b>	<b>0.001 t</b>
	caissons	0.732t x 40 travées de 1.5m= <b>29.28</b>	<b>29.883 t</b>	<b>0.603 t</b>
	support caisson	0.135 t x 41 pièces de pont= <b>5.535 t</b>	<b>5.521 t</b>	<b>0.014 t</b>
	garde de corps	0.120t x 40 travées de 1.5m= <b>4.8 t</b>	<b>4.8t</b>	<b>0 t</b>
	trottoir	0.195t x 40 travées de 1.5m= <b>7.8 t</b>	<b>7.872 t</b>	<b>0.072 t</b>
	profilé Zorès	0.044t x 40 travées de 1.5m= <b>1.76 t</b>	<b>1.8 t</b>	<b>0.04 t</b>
	$\Sigma$	1.73 t/m x 61.13m= <b>105.6</b>	<b>101.711 t</b>	

Tableau 8 : comparaison des valeurs du métré avec celles calculées

Ensuite, il faut calculer la somme des poids en se basant sur le métré et sur le modèle SCIA pour chaque type de travée.

Après avoir déterminé la différence de poids existante entre la modélisation et celle du métré, on ajoutera ce pourcentage d'écart au poids propre automatique du logiciel autant que coefficient pour le calcul des combinaisons. Cet écart vient du fait que plusieurs éléments n'ont pas été modélisés tel que les assemblages, les plaques de fourrure ...



Travées BAUDIN	<b>31.723 t x B + 57.093 t = 82.16 t</b> ⇒ <b>B= 0,79 &lt; 1 → on prend 1 plus sécuritaire</b>
Travées ARNODIN	<b>30.532 t x A +71.179 t = 105.6 t</b> ⇒ <b>A= 1.12 → ΔΣ = 3,9t → à répartir sur les deux poutres 0,032 t/ml</b>

Tableau 9 : écart entre les poids du métré et le poids calculé par SCIA

La variation est différente pour les 2 types de travées, ce qui pose problème vu que le logiciel n'admet qu'un seul coefficient pour le calcul des combinaisons, et ce qu'on propose donc est d'insérer la variation existante pour les travées ARNODIN autant que charge **linéaire égale à 0.032 t/ml**, et d'admettre un coefficient égal à **1** qui servira pour le calcul des combinaisons.

De la même manière, on va vérifier le poids des suspensions, celui calculé dans le métré avec celui trouvé par le logiciel SCIA. Et donc, comme première approche, on distinguera ce qui a été modélisé et on insérera la partie non modélisée sous forme de charges.

Travées BAUDIN et ARNODIN		
Eléments	Modélisé	Non modélisé
Les suspentes	X	
Les câbles de tête	X	
Les câbles de retenue	X	
Les câbles porteurs	X	
Chevalet		X
Etrier		X

Tableau 10: vérification de la suspension

Ensuite, il faut déterminer la valeur de chaque charge et surtout la manière dont elle sera modélisée. Il est à noter que ce calcul est fait pour un tronçon de 1.5 m de travée.

Travées BAUDIN		
Eléments non modélisés	Type de charges	valeurs
Chevalet	ponctuelle	0.0125 t
Etrier	ponctuelle	0.0015 t

Tableau 11 : valeurs des charges de la suspension pour les travées BAUDIN

Travées ARNODIN		
Eléments non modélisés	Type de charges	valeurs
Chevalet	ponctuelle	0.0125 t
Etrier	ponctuelle	0.0015 t

Tableau 12: valeurs des charges de la suspension pour les travées ARNODIN

Dans le cadre d'une étude plus sécuritaire, on ne prendra plus G pour le calcul mais plutôt 1.32G, et donc une surestimation du poids, et celui-ci sera comparé avec le  $G_{max}$  (nommé  $Q_{max}$ ) calculé dans le métré.

Travées BAUDIN	Travées ARNODIN
<u>Métré : tablier +suspension</u> $G_{max} : 1.071 \times 2 \times 61.13 = \mathbf{130.94 \text{ t}}$ <u>SCIA : tablier +suspension</u> Résultante au droit des appuis : $R=172.149 \text{ t}$ $\Rightarrow G_{max} = R/1.32 = \mathbf{130.41 \text{ t}}$	<u>Métré : tablier +suspension</u> $G_{max} : 0.869 \times 2 \times 63.2 = \mathbf{109.84 \text{ t}}$ <u>SCIA : tablier +suspension</u> Résultante au droit des appuis : $R=152.82 \text{ t}$ $G_{max} = R/1.32 = \mathbf{115.77 \text{ t}}$

Tableau 13 : vérification des valeurs du métré et du logiciel

L'écart entre la valeur trouvée par le métré et celle du logiciel SCIA est négligeable.

**Remarque :**

Vu que le modèle représente parfaitement ce qu'il y a sur le métré et s'approche au maximum du modèle réel, on peut enfin procéder aux vérifications des câbles et suspentes et calculer leurs tensions d'équilibre.

### III. Equilibrage des tensions

Le réglage des tensions d'un pont suspendu a pour but de vérifier que le profil au long de l'ouvrage à l'heure d'aujourd'hui représente exactement celui de sa construction.

En théorie, l'opération de réglage est une opération simple puisque, les longueurs des câbles et des suspentes étant fixées, il suffirait d'appliquer à chaque élément la tension déterminée par le calcul pour obtenir le profil en long du tablier défini au départ.

Outre le cas où la suspension est dérégulée, il convient de procéder à un réglage chaque fois que l'on apporte une modification quelconque à la structure (changement de suspentes, remplacement d'un platelage, changement d'appareils d'appui...)

Par ailleurs, tout changement de câbles doit être suivi d'au moins deux réglages : le premier à la fin du chantier, le deuxième après un an ou dix-huit mois de service, de façon à compenser les différences de tensions et les déréglements engendrés par le fluage des câbles.

Pour réaliser l'équilibrage, on a besoin d'insérer sur le logiciel à l'aide de la fonctionnalité non linéarité, une tension et un poids propre.

La méthode de vérification prise en compte pour réaliser l'équilibrage des tensions des câbles se présume dans le schéma ci-dessous :

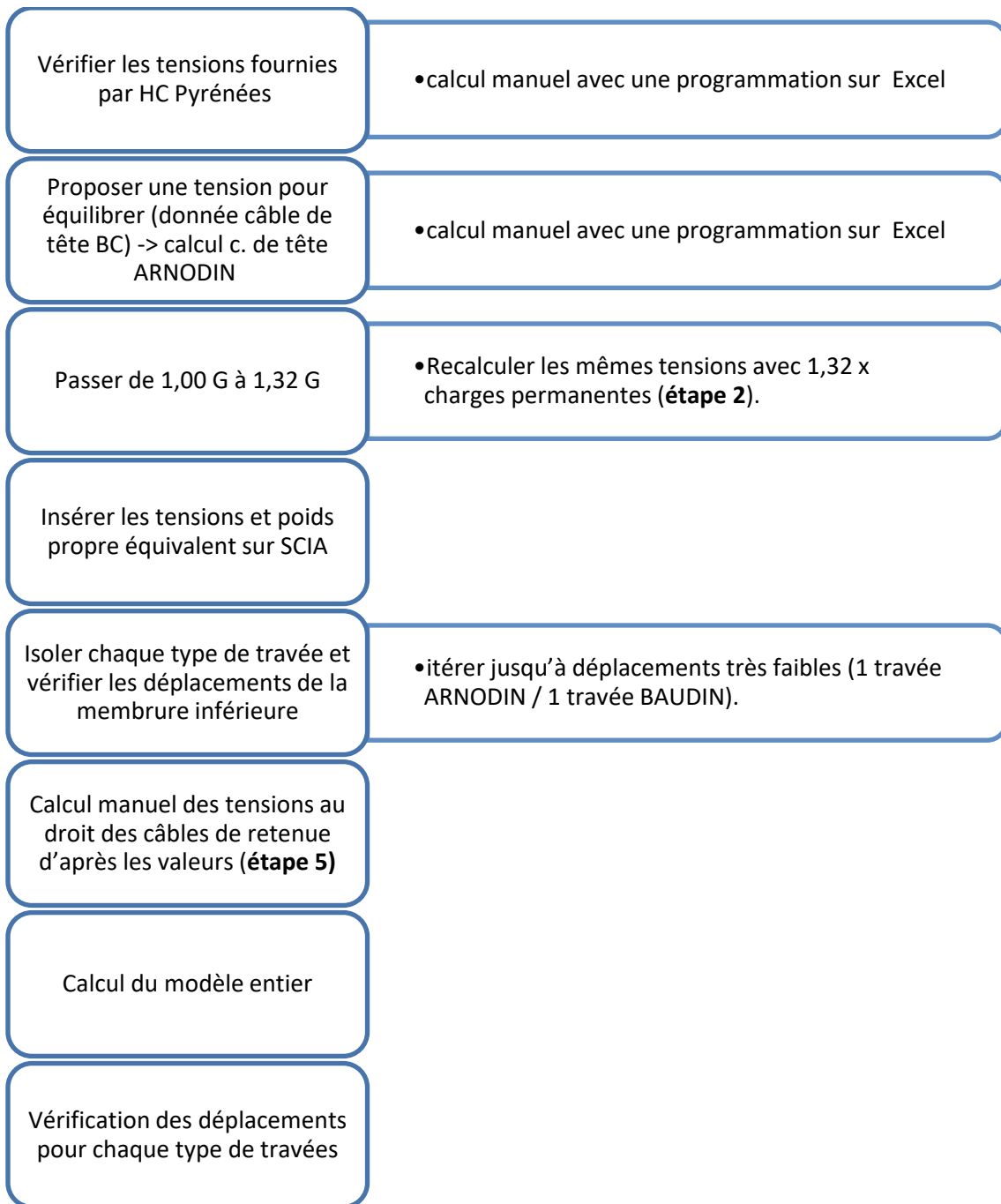


Figure 19 : procédé de calcul de l'équilibrage des tensions

### 1) Vérification des tensions fournies par HC Pyrénées

Dans un premier lieu, et en se référant aux documents fournis par HC Pyrénées, on retrouve des valeurs de tensions pour chaque type de câble, ce réglage a été réalisé en 2009.

Et donc, la première réflexion consiste à vérifier si les tensions fournies permettent un équilibrage, de telle manière à ce que dans la pile centrale, les efforts de poussées à droite (BAUDIN) soient égaux à ceux de gauche (ARNODIN).

Sachant que les mêmes tensions sont dans la partie amont et la partie aval, le raisonnement se fera donc par rapport aux types de travées (BAUDIN OU ARNODIN).

#### Données :

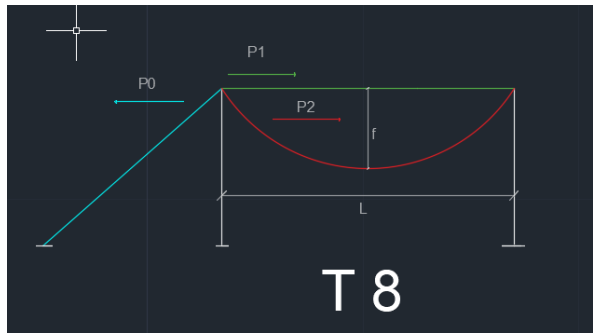
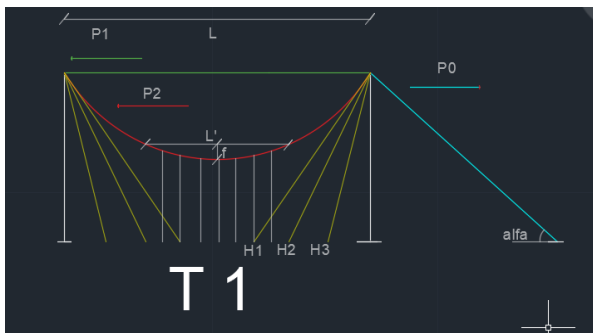
	Travée Arnodin RG	Travée Baudin RD
	Tension de réglage	
câble de tête	18	18
câble porteurs	35,5	35,5
câble de retenue	38	38
haubans(m)		
H1	0,24	
H2	4,59	
H3	5,71	

Tableau 14: données fournies par HC Pyrénées

**Calcul de l'équilibre**

Notations :

- **Poussée = projection horizontale de la tension.**
- **P<sub>1</sub> = poussée des câbles de tête**
- **P<sub>2</sub> = poussée des câbles porteur**
- **P<sub>0</sub> = poussée des câbles de retenue**

Travées BAUDIN (5 à 8)	Travées ARNODIN (1 à 4)
 <p style="text-align: center; font-size: 2em;"><b>T 8</b></p>	 <p style="text-align: center; font-size: 2em;"><b>T 1</b></p>
<p>- Sachant qu'on possède 2 câbles de tête sur chaque nappe, et donc la poussée liée aux câbles de tête est <b>P<sub>1</sub> = 18 x 2 = 36 t</b></p> <p>- La poussée des câbles porteurs est :</p> $P_2 = \frac{g * L^2}{8 * f}$ <p><b>g</b> est le poids propre total (tablier + suspension+ câble) calculé dans le mètre = <b>0,764 t/ml</b>  <b>L</b> est la longueur d'une travée BAUDIN = <b>63.21 m</b>  <b>f</b> est la flèche du câble porteur = <b>5.69 m</b></p> <p style="text-align: center;"><b>P<sub>2</sub> = 67.06 t</b></p>	<p>- Sachant qu'on possède 2 câbles de tête sur chaque nappe, et donc la poussée liée aux câbles de tête est <b>P<sub>1</sub> = 18 x 2 = 36 t</b></p> <p>- La poussée des câbles porteurs est :</p> $P_2 = \frac{g * L'^2}{8 * f}$ <p><b>g</b> est le poids propre total (tablier + suspension+ câble) calculé dans le mètre = <b>0,958 t/ml</b>  <b>L</b> est la longueur d'une travée BAUDIN = <b>61.13 m</b>  <b>f</b> est la flèche du câble porteur = <b>5.89 m</b></p> <p style="text-align: center;"><b>P<sub>2</sub> = 68,69 t</b></p> <p>- La poussée au niveau des haubans est calculée en deux parties :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Poids repris par le hauban en partie haute  <math>G_{H1-haut} = g' * Lg</math>  <b>g'</b> représente le poids du tablier seul = <b>0,3375 t/ml</b>  <b>Lg</b> longueur à la base du hauban <b>H<sub>1</sub> = 0.75 m</b>  <b>G<sub>H1-bas</sub> = 0,25 t</b></li> </ul>

<p>-La poussée des câbles de retenue <math>P_0=36 \text{ t} + 67.06\text{t} = \mathbf{103.06 \text{ t}}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poids repris par les haubans en partie basse  <math>G_{H1\text{-haut}} = P_{H1\text{-bas}} + pp \text{ H}_1 \times \text{Longueur de H}_1</math>  <math>G_{H1\text{-haut}} = P_{H1\text{-bas}} + 0.006 \text{ t/ml} \times 14,298 \text{ m}</math>  <math>G_{H1\text{-haut}} = \mathbf{0,34 \text{ t}}</math></li> <li>Poussée au niveau des haubans est :  <math display="block">P_{H1} = \frac{G_{H1\text{-bas}}}{\tan \alpha}</math> <math display="block">P_{H1} = \mathbf{0.58 \text{ t}}</math> </li> </ul> <p><b>Idem pour les haubans H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub></b>  <math>P_{H2} = \mathbf{1.46 \text{ t}}</math> et <math>P_{H3} = \mathbf{0.67 \text{ t}}</math></p> <p>-La poussée des câbles de retenue <math>P_0=36 \text{ t} + 68.69 \text{ t} + 0.25 \text{ t} + 0.58 \text{ t} + 1.46 \text{ t} + 0.67 \text{ t} = \mathbf{107.40 \text{ t}}</math></p>
<p>L'écart est de : <b>4.34 t</b></p>	

Tableau 15: vérification de l'équilibrage

### 2) Calcul des tensions pour équilibrer les câbles

Pour trouver un équilibre dans la pile centrale (écart =0), le principe d'équilibrage choisi est :

- Calcul de la poussée en tête BAUDIN (câble de tête +porteur)
- Déduire la tension dans les câbles de retenue BAUDIN.
- Modifier la tension des câbles de tête ARNODIN de telle manière à avoir un écart nul.

A l'aide d'un tableur Excel fourni en ANNEXE, on procède à une itération et on trouve les résultats suivants :

		Tension sous G (t) par travée	
<b>BAUDIN</b> (5 à 8)	c. de tête		36
	c. porteur		71,27
	c. de retenu		126,46
	suspentes		-
<b>ARNODIN</b> (1 à 4)	c. de tête		31,66
	c. porteur		71,29
	c. de retenu		126,46
	suspentes		-
	<b>H1</b>		0,58
	<b>H2</b>		1,46
	<b>H3</b>		0,67

Tableau 16 : valeurs prises pour le calcul sous G

### 3) Passage aux 1,32 G

Ce passage permet d'avoir une surestimation du poids, et donc être plus sécuritaire dans le calcul.

		Tension sous G (t) par travée	
BAUDIN (5 à 8)	c. de tête		47,52
	c.porteur		94,1
	c. de retenu		166,9
	suspentes		-
ARNODIN (1 à 4)	c. de tête		41,8
	c.porteur		94,1
	c. de retenu		166,9
	suspentes		-
	H1		0,77
	H2		1,92
	H3		0,89

Tableau 17 : valeurs prises pour le calcul de 1,32 G

**Remarque :**

Le passage à 1.32 G s'avère nécessaire pour but de faire les calculs avec une optimisation maximale du poids, en effet si les câbles arrivent à supporter 1.32 G qui représente le poids maximal possible, ils seront dans le cas le plus défavorable. Dans le cas contraire, si on équilibre les câbles à 1.00 G et dans le cas d'une surcharge lors de la vie de l'ouvrage, ce dernier n'est pas sécuritaire.

**4) Insertion des poids propres équivalents**

SCIA, ne prend en compte en linéarité le poids propre du câble que s'il représente la composante perpendiculaire à ce dernier.

Afin de faciliter le calcul , on mesurera l'angle des câbles porteurs à l'aide du logiciel , et puis on subdivisera les angles en 4 grandes familles pour les travées BAUDIN et 3 grandes familles pour les travées ARNODIN composées de plusieurs angles approximativement égaux, chacune d'elle se caractérisera par un angle moyen BAUDIN (18,64° , 16,34° , 14,01° , 11,40°) et ARNODIN (16,41° , 13,90° , 11,90°) qui permettra une projection de la composante, cette dernière sera insérée au logiciel.

Concernant les câbles de tête vu qu'ils sont horizontaux, pas besoin de faire une projection.

Les câbles de retenue, et les haubans auront une projection vis-à-vis de leur angle d'inclinaison.

L'ANNEXE C récapitule les poids insérés dans le modèle

**5) Itération sur chaque type de travées**

Afin de faciliter les calculs sur le logiciel et d'optimiser le temps de calcul, on vérifiera pour une travée ARNODIN et une travée BAUDIN, les déplacements de la poutre de rigidité. On procède à plusieurs itérations.

Le but est d'itérer jusqu'à l'obtention de déplacements très faibles. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs finales qui permettent l'obtention de déplacements très faibles.

		Tension insérée sur SCIA	Effort N calculé par SCIA			KN
BAUDIN (5à8)	c. de tête	475,2	278,46	278,46	0	
	c.porteur	1050	1076,14	1074,7	1,44	
ARNODIN (1 à 4)	c. de tête	417,9	325,02	325,02	0	
	c.porteur	1330	1015,41	1018,3	-2,89	
	H3	57,1	38,33	37,45	0,88	
	H2	45,9	24,43	23,06	1,37	
	H1	10,2	5,49	5,46	0,03	
		extrémité gauche	extrémité droite	Ecart négligeable		

Tableau 18: valeurs finales des tensions insérées et une vérification des efforts calculés par SCIA sur les câbles

**Remarque :**

La colonne des efforts N calculés par SCIA permet d'avoir une idée sur les tensions trouvées par SCIA après lancement du calcul, et de s'assurer que les câbles de la partie amont et aval n'ont pas un grand écart.

6) Calcul manuel des tensions au droit des câbles de retenue

Ce calcul nous permettra de déduire la poussée des câbles de retenue.

Calcul de la réaction au droit des appuis (les selles) suivant la direction x par le logiciel SCIA :

- BAUDIN :  $R_x=1013,67$  KN
- ARNODIN :  $R_x=1004,47$  KN

Ces résultats représentent la poussée des câbles de tête, on déduit les tensions dans les câbles de retenue :

⊕ **Côté BAUDIN :**

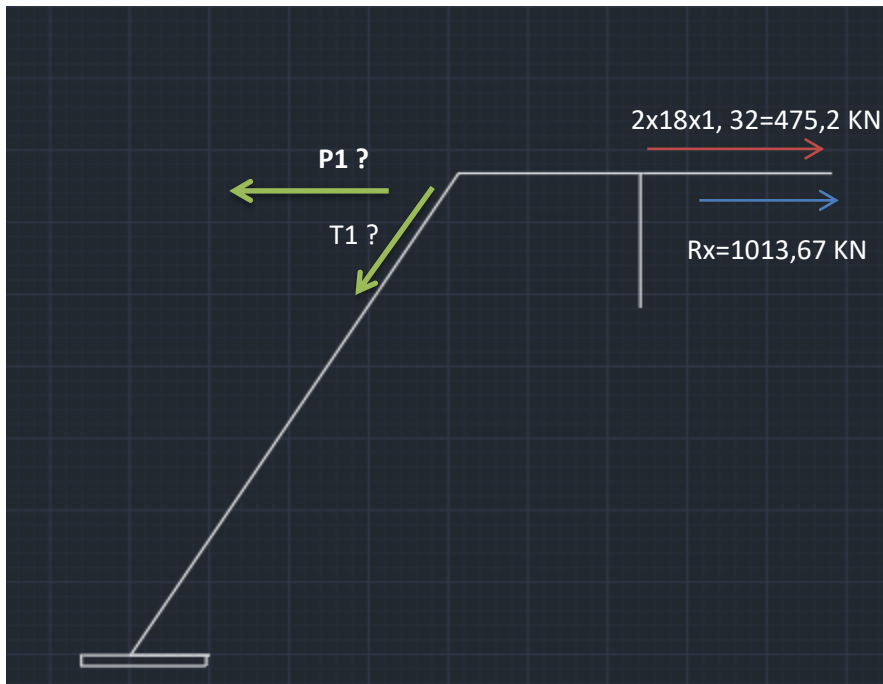


Figure 20 : schéma représentatif des tensions et poussées calculées pour la travée de rive BAUDIN

$$P1 = 475,2 \text{ KN} + 1013,67 = 1488,87 \text{ KN}$$

$$T1 = \frac{1488,87 \text{ KN}}{\cos(35,42)} = 1827 \text{ KN}$$

⊕ Pile centrale :

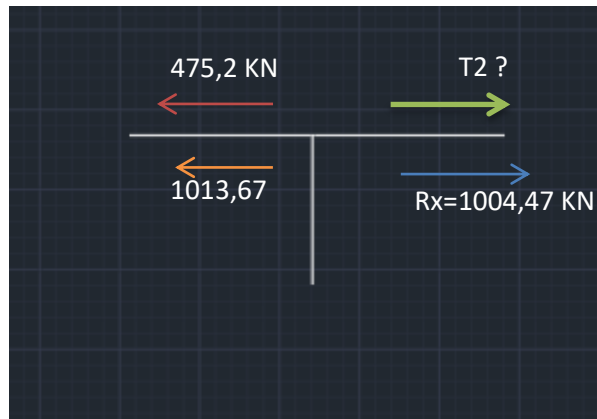


Figure 21: schéma représentatif des tensions et poussées calculées pour la pile centrale

$$T2 + 1004,47 = 475,2 + 1013,67$$

$$T2 = 484,4 \text{ KN}$$

⊕ Côté ARNODIN :



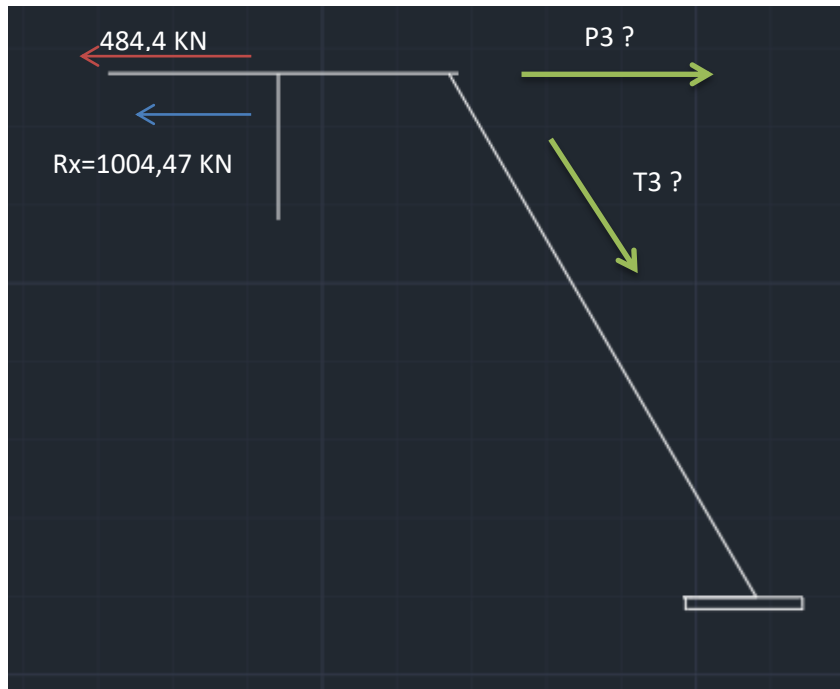


Figure 22: schéma représentatif des tensions et poussées calculées pour la travée de rive ARNODIN

$$P3 = 4848,4 + 1004,47 = 1488.87 \text{ KN}$$

$$T3 = \frac{1488.87 \text{ KN}}{\cos(35,42)} = 1827 \text{ KN}$$

### 7) Lancement du calcul du modèle entier sur SCIA

Lancer le calcul sur SCIA des 8 travées du pont de l'INGRANDES.

### 8) Vérification des déplacements

Les valeurs de tensions à retenir sont celles qui permettront d'avoir un déplacement quasi-nul et donc un équilibrage du pont sous son poids propre. Le tableau ci-dessous présume les valeurs de tensions finales avec une justification.

	BAUDIN		ARNODIN	
<b>Câble de tête</b>	18 x2x1,32 = <b>475,2 KN</b>	Garder la même tension fournie par Hc Pyrénées avec une majoration de 1,32 G	15,83 x2x1,32= <b>417,9 KN</b>	Prendre la valeur calculée pour trouver un équilibrage (voir étape2)
<b>Câble porteur</b>	<b>1050 KN</b>	Equilibrage puis itération pour avoir un déplacement minimal.	<b>1330 KN</b>	Equilibrage puis itération pour avoir un déplacement minimal.
<b>Câble de retenue</b>	<b>1827 KN</b>	Calcul manuel (étape 6)	<b>1827 KN</b>	Calcul manuel (étape 6)
<b>haubans</b>			<b>H1=10,2 KN</b> <b>H2=45,9 KN</b> <b>H3=57,1 KN</b>	Equilibrage puis itération pour avoir un

			déplacement minimal, on remarque que les valeurs fournies par HC Pyrénées donnent un déplacement quasi nul
--	--	--	--

Tableau 19: récapitulatif des valeurs de tensions finales insérées sur SCIA

**Remarque :**

**Déplacement :**

**BAUDIN :**  $U_z = 1,5$  cm

**ARNODIN :**  $U_z = 1,1$  cm et  $U_x = 0,4$  cm (droit des haubans)

## IV. Actions sur la structure

### 1) Charges permanentes

Les charges permanentes de l'ouvrage sont les suivantes :

- Travées Arnodin (T1 à T4) (tablier + suspension)      **0.958t/m.l**
- Travées Baudin (T5 à T8) (tablier + suspension)      **0.756t/m.l**

L'**ANNEXE B** donne le détail du métré.

### 2) Vent

Le vent n'est pas pris en compte dans le calcul général de l'ouvrage car il n'est pas dimensionnant en action principale pour les ponts suspendus.

### 3) Variation de la température

Une variation uniforme de température est appliquée aux éléments suivants de la structure :

- Suspentes
- Câbles
- Poutres de rigidité
- Entretoises et longerons

#### 3.1 Variation uniforme « Règlement Français »

Au règlement français, les ponts suspendus sont calculés avec les valeurs de variation uniforme suivantes :

- $\Delta T$  positif = + 30°C
- $\Delta T$  négatif = - 30°C

### 3.2 Gradient thermique « Règlement Français »

Non pris en compte.

#### 4) Surcharges sur trottoir

Pour les vérifications globales, nous considérons une charge répartie de **150kg/m<sup>2</sup>**.

#### 5) Surcharges routières

D'après le bulletin officiel du ministère de l'équipement et du logement et du ministère des transports – Fascicule spécial N°72-21 bis-, le tablier laisse passage à une chaussée de **largeur utile de 5.78m**. Ainsi, la largeur roulable est de **4.8m**. Celle-ci correspond parfaitement à la largeur chargeable vu qu'il n'existe aucun dispositif de retenue.

- La largeur chargeable est :  $4.8 - 2 \times 0 = 4.8 \text{ m}$ .
- Le nombre de voie chargée :  $ENT \left( \frac{4.8}{3} \right) = 1$
- La largeur d'une voie est :  $\frac{4.8}{1} = 4.8 \text{ m}$ .
- La classe du pont est déduite à partir de la largeur roulable et donc : **CLASSE 3** (chaussée inférieure à 5,50m).
- Les deux coefficients de majoration sont :  $a_1=0.9$  et  $a_2= 0.6$ , en se référant à la classe du pont.

L'ouvrage est soumis aux charges A(l) et au système B sauf les essieux tandem B<sub>t</sub> car ce type de charge ne s'applique pas pour un pont de 3ème classe.

Les véhicules définis pour les ouvrages à portance limitée seront étudiés aussi.

Pour faciliter les calculs, une fiche EXCEL a été réalisée.

#### 5.1 Calcul d'A (L) avec limitation de tonnage.

Pour chaque niveau de limitation, on trouve une intensité de charge répartie correspondante.

Niveau de limitation	Intensité de la charge répartie
3.5 t	$A(l) = 450 + \frac{8000}{1+2} [\text{kg/m/voie}]$
12 t	$A(l) = 450 + \frac{37000}{1+9} [\text{kg/m/voie}]$
19 t	$A(l) = 450 + \frac{75000}{1+10} [\text{kg/m/voie}]$

Tableau 20 : formule de A(l) en fonction du niveau de limitation

Cette charge doit être multipliée par  $a_1=0,9$  et  $a_2= 0,6$ .

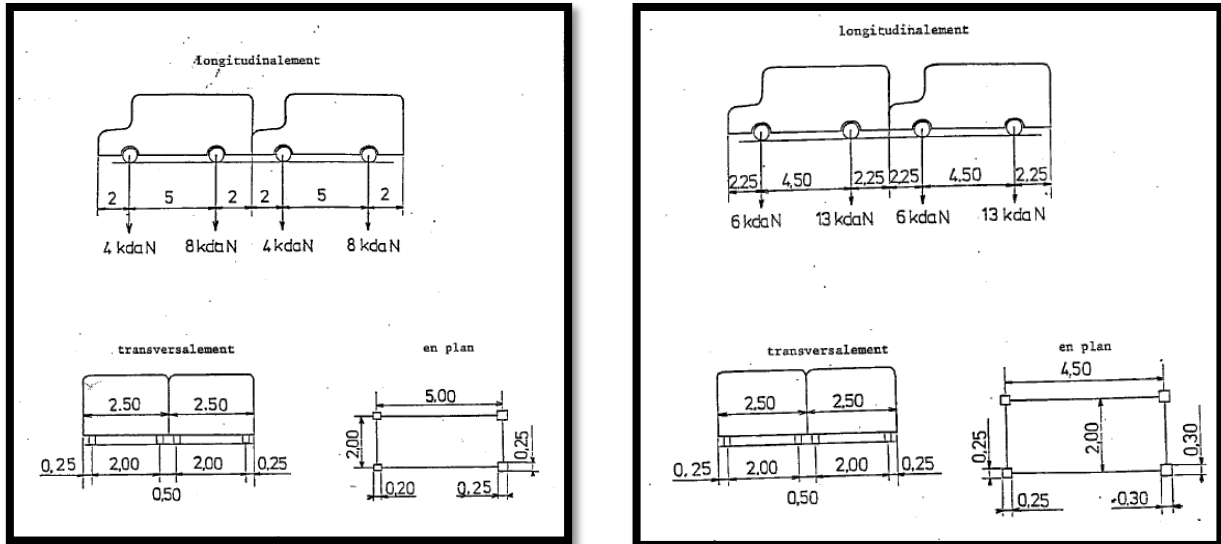
La charge A(l) dépend de la longueur et sera donc calculée au cas par cas en fonction des configurations étudiées.

Les valeurs détaillées sont données en **ANNEXE D**

#### 5.2 Calcul de charge roulable B pour 12t

Cette charge correspond aux camions types. Pour notre cas, il s'agit bien d'un pont suspendu et donc le cas le plus défavorable à étudier correspond à ce que les camions soient entièrement collés. En effet, c'est dans ce cas-là, que les suspentes, les câbles ainsi que les poutres de rigidité sont les plus sollicités. Nous nous intéresserons à la charge de 12t vu que c'est la limite de tonnage présente dans le pont, et donc c'est la charge maximale que le pont est censé reprendre.

Figure 23 : système de chargement 12t (à gauche) et 19t(à droite)



Les charges sont pondérées par un coefficient  $b_c=1$  pour une file considérée, ainsi qu'un coefficient d'amplification dynamique  $\delta_{dyn}$ . On distingue deux types : un coefficient dynamique global pour les câbles et poutre de rigidité, et un coefficient dynamique local pour la couverture (dalle, pièces de pont, longerons), tel que :

$$\delta_{dyn} = \frac{0.4}{1 + 0.2L} + \frac{0.6}{1 + 4 \frac{G}{S}}$$

L = largeur roulable

S =charge maximale dépendant du nombre de camions que peut supporter la chaussée multiplié par le coefficient  $b_c$

G = charge permanente

	limitation à 12t			
	global		local	
	L travée(m)	63,2	L entre poutre(m)	6
nombre de camions	2		1	
charges en tonnes	12	t	12	t
S	24	t	12	t
G	54,92	t/ml	5,21	t/ml
$\delta_{dyn}$	1,09		1,40	

Tableau 21: calcul du coefficient dynamique pour 12t

$\delta_{dynglobal} = 1.09$

$\delta_{dynlocal} = 1.40$

Pour une charge 12t, le cas accidentel représente les 19t.

	<b>Acc 19t (1 seul camion)</b>			
	global		local	
	L travée(m)	61,13	L entre poutre(m)	6
nombre de camions	1		1	
charges en tonnes	19	t	19	t
S	19	t	19	t
G	53,12	t/ml	5,21	t/ml
$\delta_{dyn}$	1,08		1,47	

Tableau 22 : calcul du coefficient dynamique pour 19t

## V. Modélisation des surcharges routières sur SCIA

### 1) Modélisation des charges A(l)

Les charges A(l) sont modélisées en charge surfacique sur l'ensemble du tablier pour les travées BAUDIN et ARNODIN, en mettant en évidence chaque cas à part qui servira dans une combinaison précise par la suite.

Nous appliquons la charge A(l) de manière à créer les efforts les plus défavorables dans les poutres de rigidité en s'appuyant sur le guide « Les ponts suspendus en France » du LCPC/SETRA qui définit les configurations suivantes :

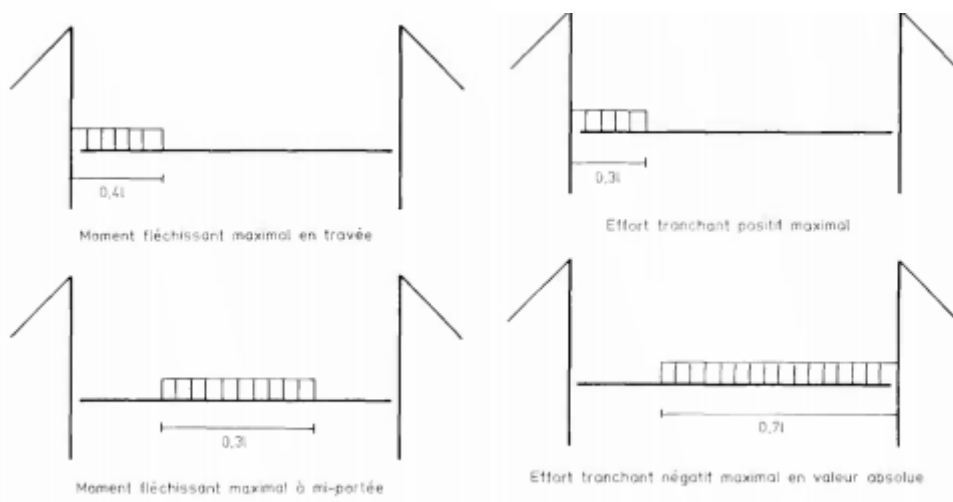


Tableau 23 : configuration de chargement pour le système de charge répartie A(l)

A ces 4 configurations ci-dessus, s'ajoute le cas où toute la travée est chargée.

Ces 5 configurations définies sont étudiées pour les travées 1, 2, 4, 5, 7 et 8.

Ainsi s'ajoutent également les cas ci-dessous pour maximiser les efforts dans les câbles :

- Travées 1 à 4 chargées
- Travées 5 à 8 chargées

- Travée 1,3 et 4 chargées
- Travées 5,6 et 8 chargées

Les cas étudiés pour le système de charge A sont résumés dans les tableaux suivants.

	Travée(s) chargée(s)	%	De L =	à L =	Variation uniforme de temp (°C)	Représentation de la charge A(I) sur la travée étudiée
Cas 1	T1	40%	0	0,4L	+30	
Cas 2	T1	30%	0	0,3L	+30	
Cas 3	T1	30%	0,35L	0,65L	+30	
Cas 4	T1	70%	0,3L	L	-30	
Cas 5	T1	100%	0	L	+30	
Cas 6	T2	40%	0	0,4L	+30	
Cas 7	T2	30%	0	0,3L	+30	
Cas 8	T2	30%	0,35L	0,65L	+30	
Cas 9	T2	70%	0,3L	L	-30	
Cas 10	T2	100%	0	L	+30	
Cas 11	T4	40%	0	0,4L	+30	
Cas 12	T4	30%	0	0,3L	+30	
Cas 13	T4	30%	0,35L	0,65L	+30	
Cas 14	T4	70%	0,3L	L	-30	
Cas 15	T4	100%	0	L	+30	
Cas 16	T1 T3 T4	100%	0	L	+30	
Cas 17	T1 T2 T3 T4	100%	0	L	-30	

Tableau 24 : exemple de cas de charge de calcul pour les travées étudiées

## 2) Charges roulables B limitation à 12t et à 19t

Les charges roulantes type « camion » (système B du fascicule 61 titre 2) sont appliquées avec leurs surfaces d'impact non diffusées.

Etant donné la symétrie de l'ouvrage et des travées, les charges ne se déplacent que sur la moitié des deux premières travées.

Ce type nécessite le traçage d'un parcours sur les travées.

Plusieurs configurations transversales sont à étudier :

- Excentré le plus possible vers la poutre amont
- Mettre un essieu directement sur les longerons
- Excentré le longerons entre les deux essieux

Il est donc nécessaire de déterminer la position la plus défavorable par un calcul RDM simple d'une poutre isostatique sur deux appuis avec deux charges concentrées représentant la charge des essieux selon le type de camion (12t ou 19t). On trouve que le cas le plus défavorable est de rapprocher les charges vers les bordures de trottoir.

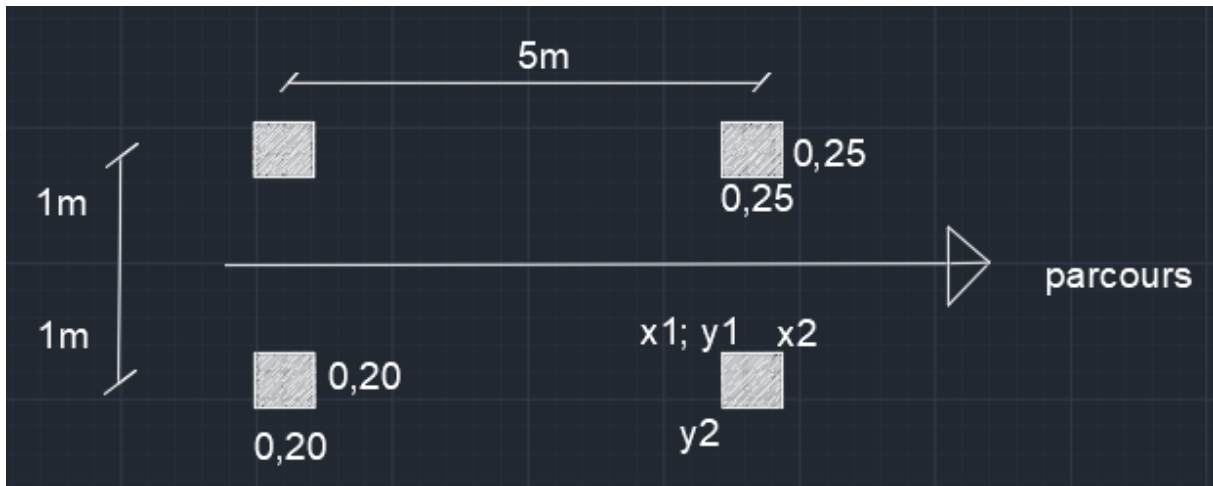


Figure 24 : vue en plan du parcours des camions de 12t

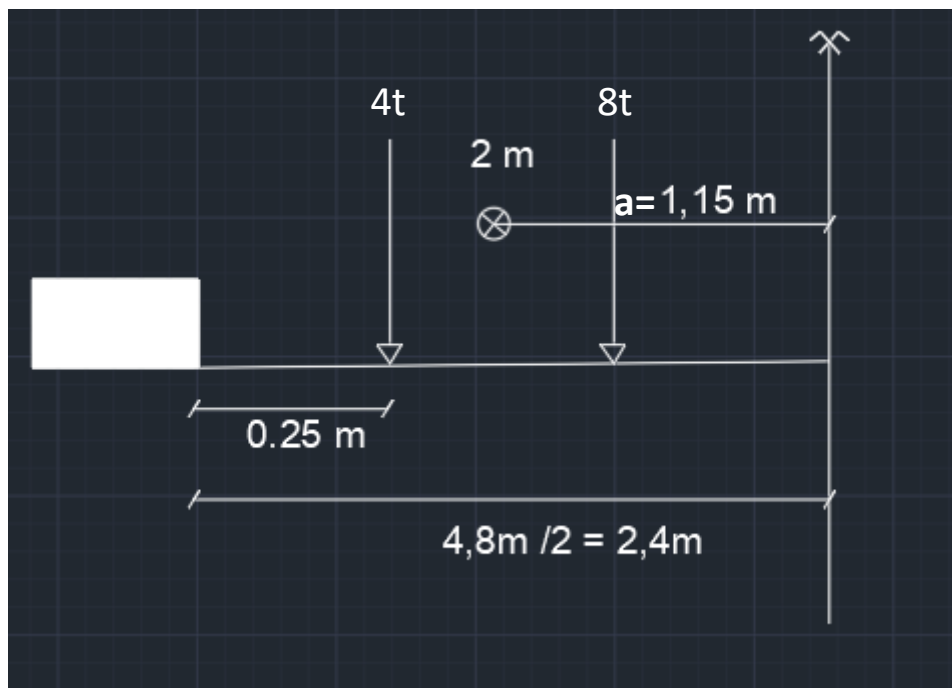


Figure 25: coupe transversale d'une travée BAUDIN pour des camions de 12t

- D'après le fascicule 61, on a des bordures (trottoir hachuré en blanc sur la figure 1) et donc on a une distance de **0.25m** entre ces derniers et la charge d'essieu de **4t**.
- Ce cas d'étude est réalisé pour une travée BAUDIN et de la même manière on calcule pour une travée ARNODIN, la valeur de **a** sera égal à **1,17 m**.
- Un essieu arrière reprend **4t** et un essieu avant reprend **2t**.
- La charge reprise par l'essieu arrière est de :  $\frac{2t}{0.2 \times 0.2} = 50 \frac{t}{m^2} = \mathbf{500 \text{ KN/m}^2}$
- La charge reprise par l'essieu devant est de :  $\frac{4t}{0.25 \times 0.25} = 64 \frac{t}{m^2} = \mathbf{640 \text{ KN/m}^2}$
- Les coordonnées  $x_1, y_1, x_2, y_2$  :

Coordonnées	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>
Charges				
500 KN/m <sup>2</sup>	<b>0 m</b>	1-(0,2/2)= <b>0,9m</b>	<b>0,2 m</b>	1+ (0,2/2)= <b>1,1 m</b>
640 KN/m <sup>2</sup>	5 + (0,2/2) - (0,25/2)= <b>4,975m</b>	1- (0,25/2)= <b>0,875 m</b>	5+ (0,2/2) + (0,25/2) = <b>5,225 m</b>	1 + (0,25/2) = <b>1,125 m</b>

Tableau 25 : valeurs des coordonnées à insérer sur SCIA pour tracer le parcours des charges de 12t

- On procède de la même manière pour les charges de 19t.

Coordonnées	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>
Charges				
500 KN/m <sup>2</sup>	<b>0 m</b>	1- (0,25/2)= <b>0,875m</b>	<b>0,25 m</b>	1+ (0,25/2)= <b>1,125 m</b>
640 KN/m <sup>2</sup>	4,5 + (0,25/2) - (0,3/2)= <b>4,475m</b>	(0,3/2) = <b>0,85 m</b>	4,5+ (0,25/2) + (0,3/2) = <b>4,775 m</b>	1+ (0,3/2)= <b>1,15 m</b>

Tableau 26 valeurs des coordonnées à insérer sur SCIA pour tracer le parcours des charges de 19t

## VI. Calcul des combinaisons d'actions

En réalité, du fait de la non linéarité des équations des ponts suspendus, il n'est pas exact de sortir tous les coefficients de pondérations et les appliquer après calculs comme pour un ouvrage dont le comportement est linéaire, ce qu'autorise le document SETRA-LCPC en effectuant les calculs ELS et en les multipliant par 4/3.

Les combinaisons ELU à étudier pour l'obtention des efforts sont, d'après le fascicule 61 titre V :

$$1,2 \times [1,1G+1,33 Qr+1,33 Tr +1,25 \Delta T]$$

- **G** : charges permanentes
- **Qr** : charges routières : « charge répartie A et système B »
- **Tr** : charge du trottoir
- **ΔT** : variation de température

### Remarque :

Le coefficient dynamique local et global déjà calculés (partie 5.2) sont multipliés également aux charges routières de type B.

Le choix d'une valeur positive ou négative de la température est basé sur le retour d'expérience des projets de ponts suspendus déjà réalisés par le bureau d'études et qui permettent de donner la valeur la plus défavorable pour chaque cas étudié

## VII. Méthode de justification de la portance du pont

Après avoir lancé le calcul, il est nécessaire de faire un ensemble de calculs pour justifier que les efforts dans les éléments structurels ne dépassent pas les limites.



Le calcul est très lourd et nécessite des heures de calcul (+ de 4 heures de calcul), il a fallu corriger à chaque fois qu'une combinaison ne passe pas et permet une divergence de calcul. Malheureusement, et pour des raisons du travail à distance, le calcul sur le logiciel a été suspendu jusqu'à reprise normale du travail.

Malgré cela, il s'avère nécessaire de détailler la méthode de calcul qui va être faite, normalement, après avoir approuvé le calcul sur le logiciel SCIA.

### 1) Poutres de rigidité - entretoises - longerons - encorbellement passerelle

Ces éléments sont justifiés par le logiciel SCIA grâce à son contrôle unité. Ce dernier permet de justifier d'une part la résistance des pièces :

- Résistance à l'effort normal :  $N_{Ed} < N_{c, Rd}$
- Résistance aux moments :  $M_{x,Ed} < M_{x,Rd}$ ,  $M_{y,Ed} < M_{y,Rd}$  et  $M_{z,Ed} < M_{z,Rd}$
- Résistance aux tranchants :  $V_{y,Ed} < V_{y,Rd}$  et  $V_{z,Ed} < V_{z,Rd}$
- Résistance combinée :  $\sigma_{vonmises,Ed} < f_y$

D'autre part leur stabilité :

- Flambement :  $N_{Ed} < N_{b,Rd}$  selon EN 1993-1-1 article 6.3.1.1
- Déversement :  $N_{Ed} < N_{b,Rd}$  selon EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 et 6.3.2.2
- Contrôle de flexion composée avec compression d'après l'EN 1993-1-4 article 6.3.3 et formules (6.61) et (6.62).

Seule la stabilité des membrures supérieures des poutres de rigidité est étudiée par post traitement.

Les assemblages seront vérifiés selon l'EN 1993-1-1. Nous vérifions, en fonction des sollicitations propres à chaque élément :

- la résistance au cisaillement
- la résistance en pression diamétrale
- la résistance à la traction

L'ensemble des assemblages de l'ouvrage sont rivetés.

### 2) Câbles

Les câbles sont justifiés en comparant leurs sollicitations ELU à leur limite élastique  $f_y$ . Les sollicitations sont extraites des résultats du modèle SCIA.

### 3) Suspentes

Les suspentes sont vérifiées sous l'hypothèse de la défaillance d'une poutre de rigidité. On applique alors l'hypothèse d'articulations au droit de chaque suspente et les efforts présents dans une pièce de pont passent directement dans la suspente, sans effet de répartition.

Dans l'hypothèse de la poutre de rigidité remplissant son rôle, les calculs aux grands déplacements permettent d'accéder aux efforts dans les suspentes.

Nous considérons le cas de rupture brutale de suspente, sous forme d'ELUA, ce cas n'ayant pas été considéré à la conception ni au cours de la vie de l'ouvrage.

Ce calcul sert pour la vérification des suspentes en cas de rupture d'une d'entre elles, pour éviter toute rupture en chaîne. Dans ce cas, la suspente étudiée reçoit la moitié de la charge de la suspente voisine brisée, avec un coefficient dynamique  $\delta$  qui vaut 2 dans le cas d'un calcul manuel ou logiciel.

Le surplus de charge est considéré comme une charge accidentelle et la combinaison ELUA devient :

$$\text{ELUA} : 1.2 \times [1,1 G + Q_{acc}]$$

Avec  $Q_{acc}$  prise dans le cas d'un calcul manuel égale à :

$$Q_{acc} = \delta \times \{0.5 G + 0.5 [Q_r + T_r]\}$$

La valeur  $Q_{acc}$  est relative à la suspente qui vient de se briser. Les variables la précédant dans les premiers crochets sont relatives à la suspente étudiée, adjacente à celle qui vient de se briser.

Ces calculs sont traités par un tableur interne ARTCAD.

#### 4) Chaussée

Nous ne justifions pas le platelage de l'ouvrage dans cette note.

En effet, les deux systèmes de platelage, l'un pour les travées Baudin et l'autre pour les travées Arnodin, ont été dimensionnés spécifiquement pour reprendre les charges routières des règlements français.

Nous ne nous attacherons donc pas à les justifier de nouveau.

#### 5) Selles mobiles- Rouleaux

Les rouleaux des selles mobiles sont vérifiés selon la pression d'Hertz.

Les calculs sont faits en considérant un défaut de pose de 20mm. Ils sont vérifiés à l'ELU et à l'ELS.

Nous vérifions également les valeurs des déplacements des selles à l'ELS.

## CONCLUSION

Ce projet de fin d'étude, m'a beaucoup aidé à mettre en pratique toutes les connaissances acquises durant ma formation académique, d'approfondir mes connaissances en se basant sur des documents techniques, d'appliquer des nouveaux et anciens règlements, et de mettre en évidence quelques principes de base qui doivent être pris en considération dans le calcul des ponts.

Réaliser de diverses missions m'a permis d'enrichir mes connaissances techniques sur les ponts ainsi que d'utiliser des règlements de calcul tels que les Fascicules ou les guides SETRA qui permettent une explication des Eurocodes plus détaillée pour les ponts.

Modéliser un pont suspendu a été un grand challenge, en vue de l'utilisation d'un nouveau logiciel « SCIA » mais surtout de pouvoir détecter les erreurs et pouvoir critiquer les résultats obtenus.

La particularité du pont de l'INGRANDES, c'est le fait qu'il a subi plusieurs modifications au fil des années et donc se référer au plan adéquat n'était pas toujours facile. Aussi, sa grande portée qui a engendré un calcul lourd et donc nécessitant des heures de calcul sur SCIA.

Le fait de réaliser des missions et de participer à la réalisation de rendus pour l'entreprise m'ont permis de me sentir impliquée et responsable. Ce qui représente un tremplin pour l'insertion dans la vie professionnel.

Pour conclure, j'ai beaucoup apprécié ce stage car les projets sur lesquels j'ai pu travailler m'ont permis d'enrichir mes connaissances sur les ouvrages d'art. J'ai également pu me rendre compte de la diversité des missions et des ouvrages sur lesquels peut être amené à travailler un ingénieur en bureau d'études ouvrages d'art. Cette diversité n'a fait que confirmer mon choix quant à mon projet professionnel de m'orienter vers un poste d'ingénieur en bureau d'études spécialisé dans les ouvrages d'art.

## BIBLIOGRAPHIE

- Eurocodes :
  - EN 1993-1-1 article 6.3.2.1 et 6.3.2.2
  - EN 1993-1-4 article 6.3.3 et formules (6.61) et (6.62).
- Guide Céréma « conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art »
- Profilés et Aciers Marchands
- Circulaire « les ouvrages à portance limitée »
- Rapport Ingrandes\_Relevés topographiques
- Dossier d'archives :
  - Inspection détaillée 2007
  - Document HC Pyrénées :
    - relevés sur l'ouvrage
    - égalisation des tensions dans les suspentes
    - réglage des tensions dans les câbles
    - remplacement des étriers travaux de maintenance sur l'ouvrage
- Document SETRA/LCPC « les ponts suspendus en France »
- Fascicule 61 CONCEPTION, CALCUL ET ÉPREUVES DES OUVRAGES D'ART titre 2  
PROGRAMMES DE CHARGES ET ÉPREUVES DES PONTS-ROUTES
- Google maps : visualisation des ponts

## **ANNEXES**

**ANNEXE A - Calcul des sections équivalentes**

**ANNEXE B – Métré (poids/mètre linéaire)**

**ANNEXE C -Calcul des poids des câbles (kg/ml)**

**ANNEXE D – Calcul des charges routières A(l)**

**ANNEXE – PLANS-**

## ANNEXE A - Calcul des sections équivalentes

câbles de retenue									
Travées	Nbre de retenue		$\phi$ retenue	S/ câble	S/ nappe	P/ câble	P/nappe	Diamètre eq	$\rho$
			mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	kg/ml	kg/ml	mm	kg/m <sup>3</sup>
1 à 4	8	2 nappes x 4 câbles	60,7	2096,5	<b>8386</b>	17,66	<b>70,64</b>	<b>103,33</b>	<b>8423,6</b>
5 à 8	8	2 nappes x 4 câbles	60,7	2096,5	<b>8386</b>	17,66	<b>70,64</b>	<b>103,33</b>	<b>8423,6</b>

câbles porteurs									
Travées	Nbre des câbles porteurs		$\phi$ porteur	S/ câble	S/ nappe	P/ câble	P/nappe	Diamètre eq	$\rho$
			mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	kg/ml	kg/ml	mm	kg/m <sup>3</sup>
1 à 4	4	2 nappes x 2 câbles	65,5	2438,5	<b>4877</b>	20,54	<b>41,08</b>	<b>78,80</b>	<b>8423,2</b>
5 à 8	4	2 nappes x 2 câbles	65,5	2438,5	<b>4877</b>	20,54	<b>41,08</b>	<b>78,80</b>	<b>8423,2</b>

câbles de tête									
Travées	Nbre de câbles de tête		$\phi$ de tête	S/ câble	S/ nappe	P/ câble	P/nappe	Diamètre eq	$\rho$
			mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	kg/ml	kg/ml	mm	kg/m <sup>3</sup>
1 à 4	4	2 nappes x 2 câbles	60,7	2096,5	<b>4193</b>	17,66	<b>35,32</b>	<b>73,07</b>	<b>8423,6</b>
5 à 8	4	2 nappes x 2 câbles	60,7	2096,5	<b>4193</b>	17,66	<b>35,32</b>	<b>73,07</b>	<b>8423,6</b>

haubans									
Travées	Nbre des haubans		$\phi$ haubans	S/ câble	S/ nappe	P/ câble	P/nappe	Diamètre eq	$\rho$
			mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	kg/ml	kg/ml	mm	kg/m <sup>3</sup>
1 à 4	12	2x2x3x 1 câble	35	712,5	<b>712,5</b>	6	<b>6</b>	<b>30,12</b>	<b>8421,1</b>
5 à 8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## ANNEXE B – Métré (poids/mètre linéaire)

		Charges permanentes (t)		pour 1,50 m									
				TRAVEE :		TRAVEES 5 A 8 (SUSPENDUES)							
	désignation	nombre	poids linéique t/m	poids surfacique t/m²	poids volumique t/m³	section/L ong m² ou m	largeur m	épaisseur m	valeurs caractéristiques Q en t				
									Qnom	coeff	min	max	
									coeff	Qmin	coeff	Qmax	
Couverture	Revêtement enrobé à froid	1			2,4	1,5000	4,800	0,030	0,518	0,80	0,415	1,40	0,726
	tubes rect 180x80 ep 5mm	88			7,85	0,4500	0,180	0,005	0,280	0,96	0,269	1,06	0,297
	tubes rect 140x80 ep 5mm	8			7,85	0,4500	0,140	0,005	0,020	0,96	0,019	1,06	0,021
	tubes 100x80 ep 5mm	8			7,85	0,4500	0,100	0,005	0,014	0,96	0,014	1,06	0,015
	L80x80x8	2	0,00963			1,5000			0,029	0,96	0,028	1,06	0,031
	plat 200x6	1			7,85	2,8300	0,200	0,006	0,027	1,96	0,052	2,06	0,055
	UAP 130	1	0,016			1,5000			0,024	0,96	0,023	1,06	0,025
	garde corps tige 6 torrns 19 fils 6mm	684			7,85	0,000028	1,500		0,228	0,96	0,219	1,06	0,241
	Trottoir - gousset ep8 trottoir	2			7,85	0,0421		0,008	0,005	0,96	0,005	1,06	0,006
	Trottoir - support L60x60x6	4	0,00542			1,5000			0,033	0,96	0,031	1,06	0,034
	Trottoir - support U 100X50	2	0,01060			1,5000			0,032	0,96	0,031	1,06	0,034
	Trottoir - Tole striée 6/8	2			7,85	1,5000	0,490	0,006	0,069	0,96	0,066	1,06	0,073
	Trottoir - Tôle verticale 300x8	2			7,85	1,5000	0,300	0,008	0,057	0,96	0,054	1,06	0,060
Pièce de pont	poutre reconstituée âme 300x8	1			7,85	1,5000	0,300	0,008	0,028	0,96	0,027	1,06	0,030
	membre L80x80x8	4	0,00963			1,5000			0,058	0,96	0,055	1,06	0,061
	Contreventement L70x70	0,50	0,00738			4,2400			0,016	0,96	0,015	1,06	0,017
	Gousset attache ctvt sur PdP	0,25			7,85	0,6000	0,300	0,008	0,003	0,96	0,003	1,06	0,003
Poutre de rigidité	Membre supérieure L70x70x7	4	0,007			1,5000			0,044	0,96	0,043	1,06	0,047
	Semelle membre sup	2			7,85	1,5000	0,220	0,008	0,041	0,96	0,040	1,06	0,044
	Ame membre supérieure	2			7,85	1,5000	0,220	0,008	0,041	0,96	0,040	1,06	0,044
	Renfort membre supérieure	4			7,85	1,5000	0,080	0,012	0,045	0,96	0,043	1,06	0,048
	Attache renfo L50x50x5 L110 e 670	6	0,00377			0,1100			0,002	0,96	0,002	1,06	0,003
	Membre inférieure L70x70x7	4	0,00738			1,5000			0,044	0,96	0,043	1,06	0,047
	Ame membre inférieure	2			7,85	1,5000	0,220	0,008	0,041	0,96	0,040	1,06	0,044
	Semelle membre sup	2			7,85	1,5000	0,220	0,008	0,041	0,96	0,040	1,06	0,044
	Montant L60x60x6	4	0,00542			1,4600			0,032	0,96	0,030	1,06	0,034
	Fourrure montant 60x8	2			7,85	1,4600	0,060	0,008	0,011	0,96	0,011	1,06	0,012
	Renfort montant	2				0,1379		0,008	0,002	0,96	0,002	1,06	0,002
	support renfort corniere 120x80x8 L140	2	0,012			0,1400			0,003	0,96	0,003	1,06	0,004
	fourrure diagonale 60x8	1			7,85	2,1213	0,060	0,008	0,008	0,96	0,008	1,06	0,008
	diagonale L60x60x6	4	0,005			2,1213			0,046	0,96	0,044	1,06	0,049
Longeron	Longrine centrale âme 300x8	1			7,85	1,5000	0,300	0,008	0,028	0,96	0,027	1,06	0,030
	Semelles - cornières L 80x80x8	4	0,00963			1,5000			0,058	0,96	0,055	1,06	0,061
	Fourrure sur semelle sup 8mm L168	1			7,85	1,5000	0,168	0,008	0,016	0,96	0,015	1,06	0,017
	gousset d'attache contreventment sur long.	0,25			7,85	0,4500	0,450	0,008	0,003	0,96	0,003	1,06	0,003
Suspension	Cable de tête phi 60,7	4	0,017660			1,5000			0,106	0,96	0,102	1,06	0,112
	Câbles porteurs phi 65,5	4	0,020540			1,5300			0,126	0,96	0,121	1,06	0,133
	suspentes phi 40 mm	2			7,85	0,0013	2,990		0,059	0,96	0,057	1,06	0,063
suspension attache	manchon	0							0,000	0,96	0,000	1,06	0,000
		0							0,000	0,96	0,000	1,06	0,000
	chevalet	2			7,85	0,3500	0,065	0,070	0,025	0,96	0,024	1,06	0,027
	étriers phi 16	4			7,85	0,4000	0,0002		0,003	0,96	0,002	1,06	0,003
		0							0,000	0,96	0,000	1,06	0,000
<b>Soit pour un mètre linéaire de ferme (tablier et suspension)</b>									<b>0,756</b>		<b>0,707</b>		<b>0,869</b>





## ANNEXE C-Calcul des poids des câbles (kg/ml)

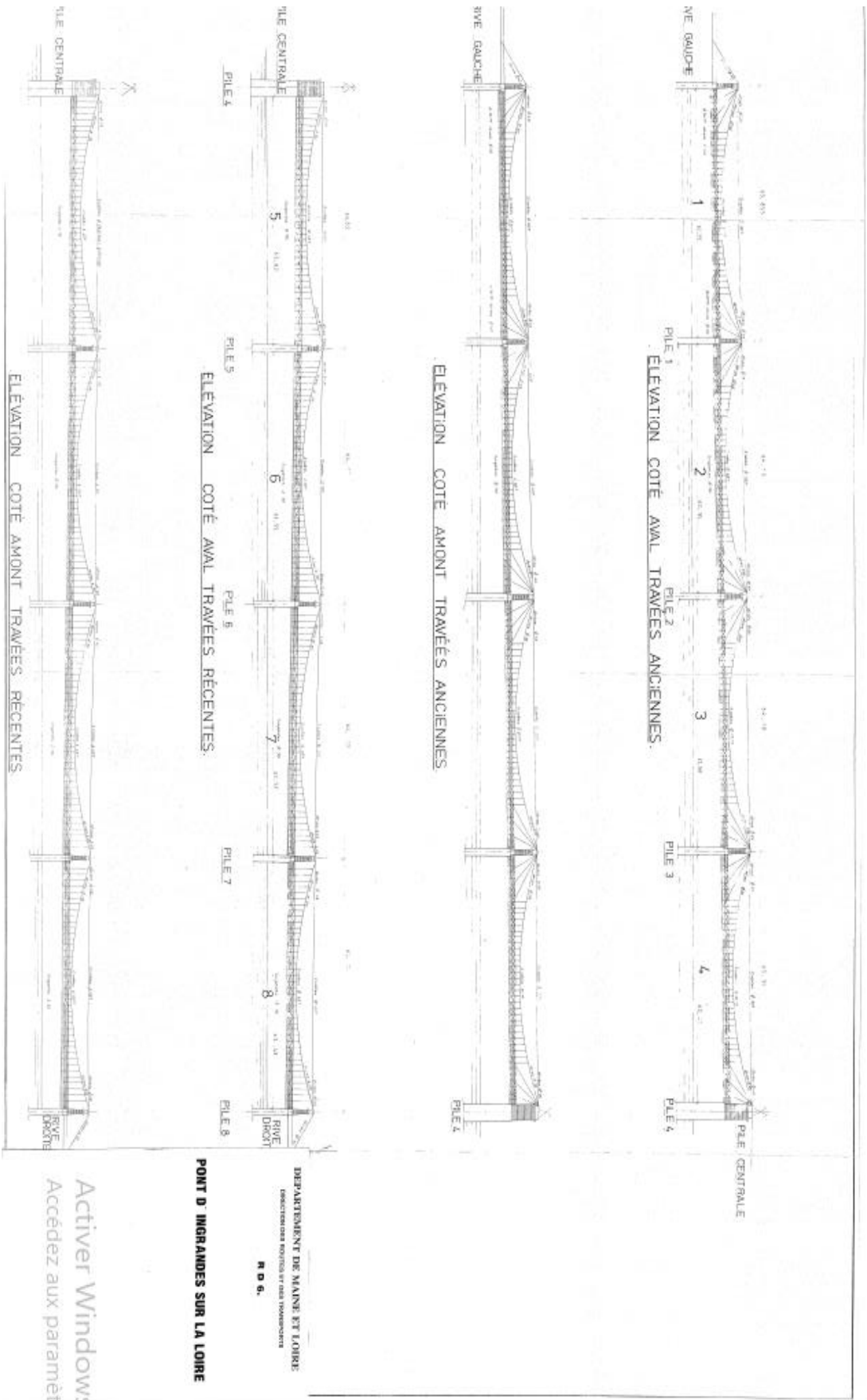
Travée	Amont ou Aval	Nbre	S/ câble	S/ nappe	φeq	P/ câble	P/nappe	Angle d'inclinaison (°)													
								porteur Baudin-RD				porteur Arnodin-RG-			retenue	haubans					
								18,64	16,34	14,01	11,40	16,41	13,90	11,90	35,42	30,28	42,38	64,38			
1 à 4	Porteur RG	2	2438,5	4877	78,80	20,54	41,08	43,35	42,81	42,34	41,91										
1 à 4	Porteur travée inter RG	2	2438,5	4877	78,80	20,54	41,08	43,35	42,81	42,34	41,91										
1 à 4	retenue RG	4	2096,5	8386	103,33	17,66	70,64								86,68						
5 à 8	Porteur travée inter RD	2	2438,5	4877	78,80	20,54	41,08					42,82	42,32	41,98							
5 à 8	porteur RD	2	2438,5	4877	78,80	20,54	41,08					42,82	42,32	41,98							
5 à 8	retenue RD	4	2096,5	8386	103,33	17,66	70,64											86,68			
1 à 4	câble de tête RG	2	2096,5	4193	73,07	17,66	<b>35,32</b>														
1 à 4	câble de tête travée inter RG	2	2096,5	4193	73,07	17,66	<b>35,32</b>														
5 à 8	câble de tête travée inter RD	2	2096,5	4193	73,07	17,66	<b>35,32</b>														
5 à 8	câble de tête RD	2	2096,5	4193	73,07	17,66	<b>35,32</b>														
1 à 4	Haubans RG	1	712,5	<b>712,5</b>	<b>30,12</b>	6	6												6,95	8,12	13,88
1 à 4	Haubans travée inter RG	1	712,5	<b>712,5</b>	<b>30,12</b>	6	6												6,95	8,12	13,88
			mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm	kg/ml	kg/ml												kg/ml		

		Poids sous 1,32 G (kg/ml)			
BAUDIN (5à8)	porteur RD	57,23	56,51	55,89	55,32
	Porteur travée inter RD	57,23	56,51	55,89	55,32
	retenue RD	114,42			
	câble de tête travée inter RD	46,62			
	câble de tête RD	46,62			
ARNODIN (1 à 4)	Porteur RG	56,53	55,86	55,42	
	Porteur travée inter RG	56,53	55,86	55,42	
	retenue RG	114,42			
	câble de tête RG	46,62			
	câble de tête travée inter RG	46,62			
	Haubans RG	9,17	10,72	18,32	

## ANNEXE D – Calcul des charges routières A(I)

<b>3- Calcul de la masse A(I) pour limitation 12t</b>							
		<b>BAUDIN</b>				<b>ARNODIN</b>	
longueur de travée	A'(I)	<b>962,47</b>	kg/m/voie	longueur de travée	A'(I)	<b>977,59</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>577,48</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>586,55</b>	kg/m/voie
0,3*L	A'(I)	<b>1773,32</b>	kg/m/voie	0,3*L	A'(I)	<b>1803,38</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>1063,99</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>1082,03</b>	kg/m/voie
0,4*L	A'(I)	<b>1529,35</b>	kg/m/voie	0,4*L	A'(I)	<b>1556,06</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>917,61</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>933,64</b>	kg/m/voie
0,7*L	A'(I)	<b>1144,97</b>	kg/m/voie	0,7*L	A'(I)	<b>1164,41</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>686,98</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>698,65</b>	kg/m/voie
4*L	A'(I)	<b>591,33</b>	kg/m/voie	4*L	A'(I)	<b>595,95</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>354,80</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>357,57</b>	kg/m/voie
3*L	A'(I)	<b>636,30</b>	kg/m/voie	3*L	A'(I)	<b>642,32</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>381,78</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>385,39</b>	kg/m/voie
<b>4- Calcul de la masse A(I) pour limitation 19t</b>							
		<b>BAUDIN</b>				<b>ARNODIN</b>	
longueur de travée	A'(I)	<b>1474,59</b>	kg/m/voie	longueur de travée	A'(I)	<b>1504,41</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>884,75</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>902,64</b>	kg/m/voie
0,3*L	A'(I)	<b>3039,78</b>	kg/m/voie	0,3*L	A'(I)	<b>3096,53</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>1823,87</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>1857,92</b>	kg/m/voie
0,4*L	A'(I)	<b>2575,85</b>	kg/m/voie	0,4*L	A'(I)	<b>2626,94</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>1545,51</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>1576,17</b>	kg/m/voie
0,7*L	A'(I)	<b>1832,74</b>	kg/m/voie	0,7*L	A'(I)	<b>1870,70</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>1099,65</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>1122,42</b>	kg/m/voie
4*L	A'(I)	<b>735,39</b>	kg/m/voie	4*L	A'(I)	<b>744,67</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>441,23</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>446,80</b>	kg/m/voie
3*L	A'(I)	<b>825,75</b>	kg/m/voie	3*L	A'(I)	<b>837,82</b>	kg/m/voie
	A(I)	<b>495,45</b>	kg/m/voie		A(I)	<b>502,69</b>	kg/m/voie

ANNEXE – PLANS-





1986: detail montent poutenky course 2.2

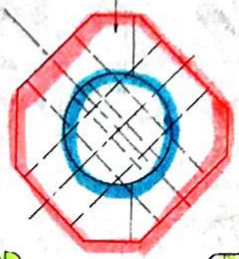
not a standard

2000

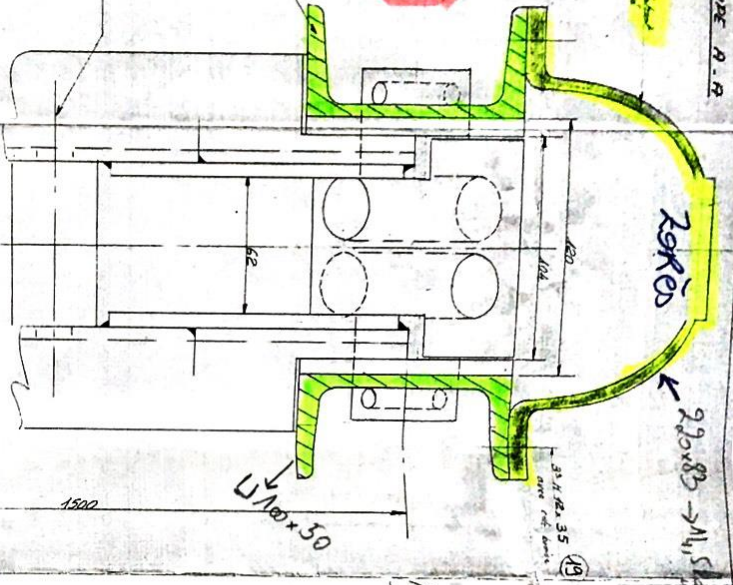
29000 → 14150

ELEVATION

ARABIDIN

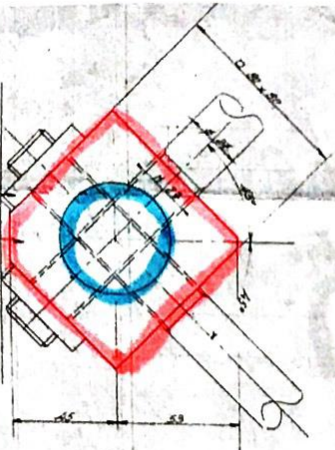


montent poutenky  
course 2.2



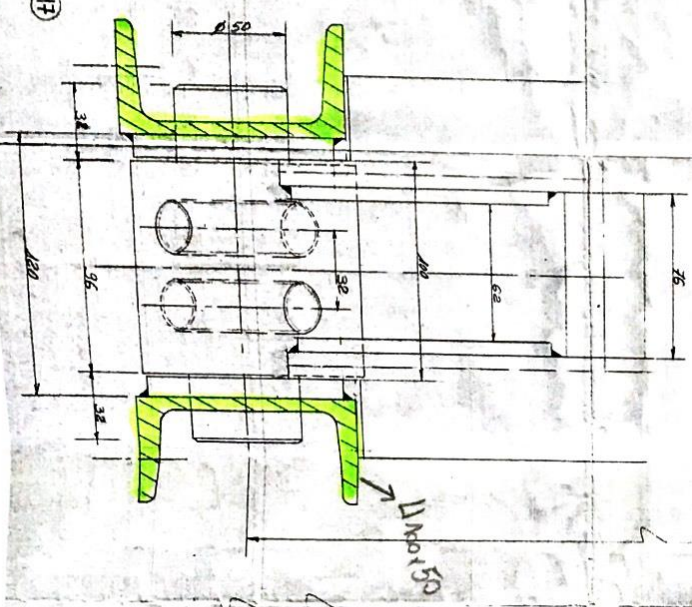
18) 2.5 dia. 400

19) 3 1/2 dia. 35

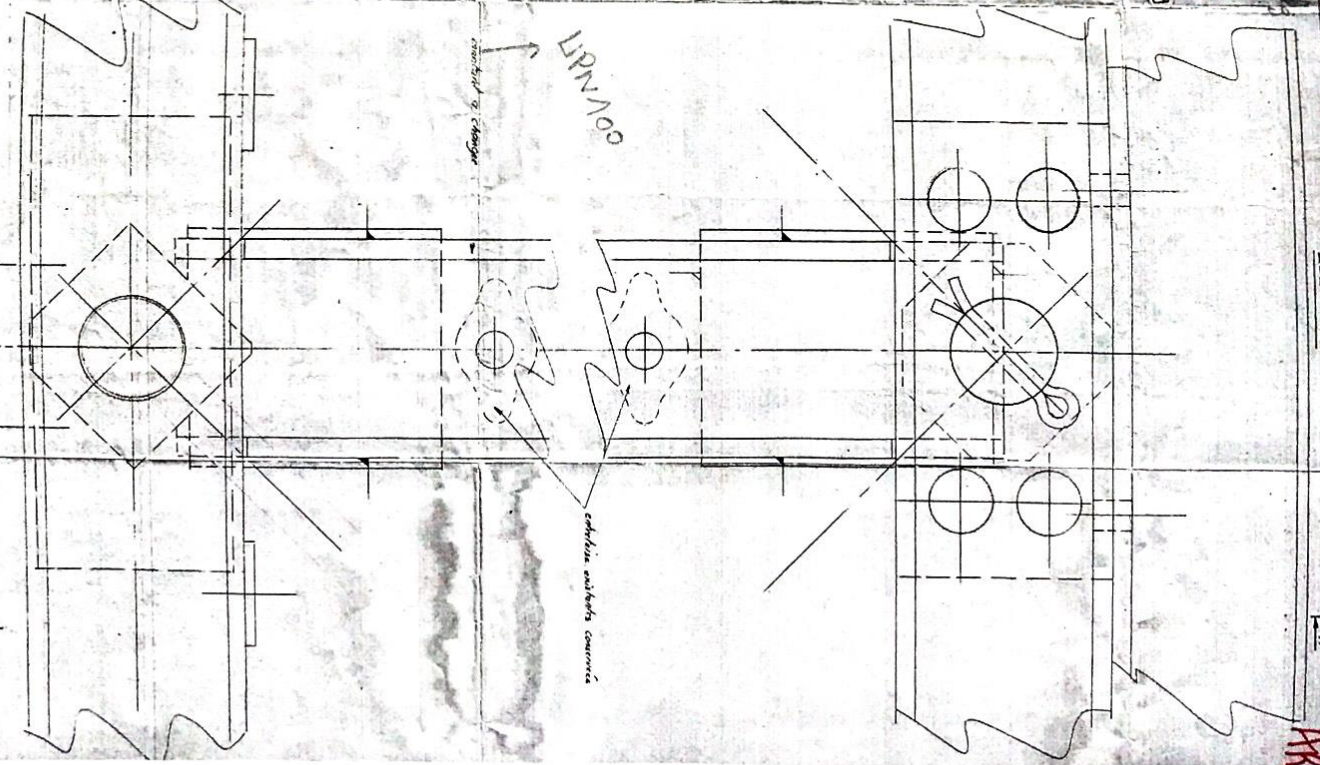


13) 2.5 dia. 400

montent poutenky  
course 2.2



17) 2.5 dia. 400



montent poutenky  
course 2.2

U/No x 50

montent poutenky  
course 2.2

19) 3 1/2 dia. 35

montent poutenky  
course 2.2

