

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرنسيس جاتسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering

Francis Jeanson



Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Matériaux & Structures

Thème

**Conception et étude d'un viaduc du PK46+489.700 au
PK47+440.300 sur la liaison autoroutière reliant le
port de Béjaia à l'autoroute Est-Ouest au niveau
d'Ahnif avec la programmation de la superstructure**

Présenté par :

Ismail Oussama
Boudjit Ferial

Encadré par :

Dr. Zourgui Hemaidi Nadjib

Promotion 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تشكرات - REMERCIMENTS

مصداقا لقول ربنا عز وجل في محكم التنزيل: ﴿ مَا أَصَابَكَ مِنْ حَسَنَةٍ فَمِنَ اللَّهِ وَمَا أَصَابَكَ مِنْ سَيِّئَةٍ فَمِنْ نَفْسِكَ وَأَرْسَلْنَاكَ لِلنَّاسِ رَسُولًا وَكَفَى بِاللَّهِ شَهِيدًا ﴾ النساء: 04

فالحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه كما ينبغي لجلال وجهه وعظيم سلطانه، أن منّ علينا بتعلّم هذا العلم، ووفّقنا للمضي فيه، ونسأله أن ينفعنا بما علّمنا، وينفع بنا ويستعملنا، ويكتبنا ممن قام بتأدية فرض الكفاية، وأن يخلص نوابنا. وإن أنعم علينا بهذا العلم الدنيوي، الذي هو أساس من أساسات البناء الحضاري ونهضة الأمة، فقد أنعم علينا بنعمة الإسلام، وهدانا إلى تعاليمه الراقية، وتوجيهاته السامية، فكم مررنا بصعوبات شديدة، وكم اجتزنا عواقب عسيرة، وكم انقطع النفس مع طول المسير إلى نيل هذه الرتبة الشريفة، فلم يكن توكلنا إلا على الله، ولم يكن توفيقنا إلا به سبحانه، امثالاً لأوامره، واقتداء بسنة نبيه ﷺ وهديه ونصحه للأمة.

ومصداقا لقول نبينا ﷺ الذي لا ينطق عن الهوى: "من لا يشكر الناس لا يشكر الله"

ولكن كلمات الشكر لا تكفي مهما كثرت حروفها، في حق أمي الغالية، منبع قوتي ونزهة روحي وشمعة المحراب، أعلى من الذهب النُّضار، مربية الأجيال، لولا النقص الذي طبع الله عليه البشر لوصفتها بالكمال، ولا أنسى أبي، مدرسة لا تُمحي دروسها والعبر، بوصلة في النصح والتوجيه، وكلامه أعلى الدرر، المهندس الخلق، قدوتي ونموذج حياة أتبعه بشغف وحب وعزيمة، كقمر يضيء ظلمة الليل البهيم إذا ادلهم، طالما رتب على كنفه المرهق، فيكون كضياء الفجر بعد غبّس الليل وغلّسه، فاللهم جازهما خير الجزاء، وارحمهما كما ربياني صغيرا، ومهما كبرت، بقيت الصغير في أعينهما الرحيمة.

يقال: "المُعَلِّمُ ثَلَاثُ الْآبَوَيْنِ"، فيجيب بي أن أتقدم بالشكر الجزيل والعرفان الكبير وإقرار الجميل، كل أساتذتي الذين علّموني ووجهوني، وساعدوني وحفّزوني، من المدرسة القرآنية، إلى مدرسة جمعية العلماء المسلمين الجزائريين، إلى الابتدائية والمتوسطة والثانوية، وحتى المرحلة الجامعية، جزاهم الله كل خير، ولهم فضل عليّ لا أنساه ما حييت، وأثقل الله ميزان حسناتهم بما تفضلوا به علينا من علم لم يأتلوا فيه جهدا ولا طاقة، فأوفوا وصرّفوا كل عنايتهم في تعليمنا وتكويننا. وأخص بالذكر منهم الأساتذة: زورقي، لفقيير، حديد، حبيب، بن بختي، قاسيس، بريش، بلعورة، مسعودي، شامي، كحلوش... وكل من كان له فضل علينا!

كما لا ننسى ذكر الطاقم الإداري الذي يسهر بكل احترافية وتفانٍ على مصلحة الطلبة وتكوينهم الجيد، وأخص بالذكر السيد مصطفى زوقاري، والسيدة أمينة بوربية، ورشيدة محري.

شكرا لكل من كان له فضل علينا في ارتقاء سلم العلم، شكرا لأخي، شكرا لأخوالي وأعمامي، وخالاتي وعماتي، شكرا لكل العائلة التي كانت سندا ودعما، شكرا لخطيبيتي - زميلتي في هذا المشروع، شكرا لأصدقائي ورفقاء درب العلم، لازال الطريق طويلا، ولا زلنا نمضي فيه عسى أن يكون بابا من أبواب نجاتنا وفلاحنا في الآخرة. نسأل الله أن يخلص نوابنا ويثبتنا عليها ويسد خطانا لما يحبه ويرضاه. والسلام عليكم ورحمة الله تعالى وبركاته.

بقلم الطالب: أسامة إسماعيل

تشكرات - REMERCIMENTS

الحمد لله والشكر لله على أن وفقنا وقدرنا على إتمام هذا المشروع بفضلته،
أتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير لكل من علمني حرفاً،
لكل من حرص على توجيهي وترتيب أفكاري حينما كانت متناثرة .
أشكر كل أساتذتي في الابتدائي والمتوسط وحتى الثانوي،
أشكر زملائي في جمعية OXY_JEUNES على كل ما علموني إياه وأشكر خصيصاً الإيكولوجيين الصغار على تعليمهم لي
قيم حياتية مهمة .
أشكر أساتذتي في المدرسة العليا للأشغال العمومية على كل مجهوداتهم المبذولة لتقديمهم لنا جل ما يقدرون عليه.
كما أشكر الطاقم الإداري الذي يسهر على حسن سير الأقسام.
ونشكر رئيس قسم الطرق والمنشآت الدكتور نجيب حمايدي زورقي على كل التسهيلات التي قدمها لنا طيلة هذه السنة
ونتمنى له التوفيق والسداد.

وأخيراً نشكر كل من سيقراً عملنا هذا المتواضع

بقلم الطالبة: فريال بوجيت

إهداء - Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على خير معلم الناس الخير نبينا ورسولنا وحبينا محمد صلى الله عليه وعلى آله وصحبه أجمعين ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين ثم أما بعد:

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والشكر له على توفيقه وسداده.

أهدي هذا العمل:

إلى أمتنا الغالية الجريحة، وصية رسولنا صلى الله عليه وسلم،
إلى فلسطين الحبيبة، إلى أرواح الأبرياء، إلى كل طفل حطموا طفولته، إلى كل امرأة خسرت فلذة كبدها، إلى كل رجل شهم
استشهد دفاعاً عن عرضه وأرضه وشرفه ودينه،

إلى والدي الغالية، طيبة قلبي، جبرت الكسر وشعبت الصدع ورمت الرث ولمت الشعث وترقت الفتق وجمعت الشتات
واستجاشت مكنون القوى وخزائن العزيمة لمواصله الطريق. أدام الله ضياء وجهك ونقاء قلبك، عظيمة في تضحياتك التي تعجزنا
على ردّ مقدار حبة من خردل منها، أعاننا الله على النهوض بواجب الإنعام والمواهب والنفائس والعطايا والمنن التي تفضلت علينا
بها دوماً، لم يحبسك ضعف ولا مرض ولا تعب على تأديتها...

إلى والدي الغالي، أبي، كريم الطبع والخليقة، طيب السجية والشمائل، المهندس الخلق الدمث السمح، زكي الذكر،
أدامك الله مرضياً وقدوة حسنة، أحذو حذوك وأتلو تلوك، آخذ مأخذك وأسلك منهجك، أدامك الله لنا منهجاً ونموذجاً، نفتني أترك
ونتخلق بأخلاقك ونتحلى بحللتك...

إلى خطيبي، زميلتي في هذا المشروع، ورفيقة دربي فيما تبقى من العمر إن شاء الله على يد الخير واليمن، قيض الله لك جزيل
الفوائد وجميل العوائد وأحسن النفائس وأرفع المواهب، وأكمل النعم وأجلى الإحسان وأتم المنائح، وأسمى العطايا وأوفر
المنى...

إلى أستاذنا وموجهنا، وشيخنا ودكتورنا نجيب حمايدي زورقي، بوصلة الطريق، بعيد الصيت عليّ الرتبة رفيع المنزلة، يرمى
بالأبصار ويقصد بالأمال، وإليه تشد الرحال، وجهنا إلى طلب الأمور العالية، والعمل لبلوغ المراتب السنية والسعي وراء الدرجات
الرفيعة والأقدار الشريفة والتحلي بالرتب الجليلة، والسمو إلى المكارم والصعود إلى فروع العز والرقى إلى ذرى المجد، أدام الله
سوابغ نعمك وقرائن آلائك، جعلك الله ذخراً وفخراً وسنداً، بارك الله لك في علمك ونفعك به واستعملك لنفع غيرك، وثبت الله
أساسك وقوى قواعدهك ووطد أركانك ودعائمك...

إلى عائلتي،

إلى جددي، وجدتي، رحمهم الله جميعاً.

إلى كل أساتذتي، ومشايخي، وأصحابي وزملائي.

وقفنا الله وإياكم جميعاً.

الطالب: أسامة إسماعيل

إهداء - Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم، والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين، سيدنا وحبينا وقدوتنا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين، ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين، ثم أما بعد:

أهدي هذا العمل الذي تم بعون الله وفضله:

إلى والديّ اللذان مهما تحدثت أو فعلت ما وفّيتهما -ولو بمقدار ذرة- من فضلهما عليّ...

إلى والدي الذي حرص منذ صغري على تأديبي وتربيتي وترغيبني في اتباع سبل المعرفة ولم يتوقف يوماً عن تشجيعي.

إلى والدي التي لطالما سهرت معي تخفف عني آلامي بكلماتها الموسمية ودعواتها اللامتناهية.

إلى أخواتي: زهرة، سارة، رانية...

اللواتي كنّ ولازلن يربتن عليّ كتفي ويدفعنني للاستمرار والتقدم نحو الأمام، مهما تكررت العثرات ومهما كانت العقبات.

إلى زميلي، خطيبي ومرافقي في هذا المشروع، أشكره على صبره وحسن عونه.

إلى عائلتي الكبيرة...

إلى عائلة أُمّي...

إلى كل من ترك فينا أثراً طيباً...

إلى كل أخواتي في الله وصديقاتي في المدرسة والمقرأة...

إلى صديقتي ملاك التي لم تتخلّ عني يوماً طيلة هذه الفترة...

إلى كل من زرع فينا أملاً جديداً حينما ظننا أنها النهاية...

إلى الطيبة "بوربية أمينة"...

إلى معلمنا وموجهنا، الدكتور نجيب حمايدي زورقي، الذي كان مرجعاً لنا لكل مشكلة تلقيناها.

الطالبة: فريال بوجيت

ملخص

يتضمن هذا العمل في إطار مشروع نهاية الدراسة ونيل شهادة مهندس دولة في الأشغال العمومية، يتضمن هذا المشروع تصميم ودراسة جسر علوي بين النقطتين الكيلومتريتين PK46+489.700 و PK47+440.300 على الطريق السريع الذي يربط ميناء بجاية بالطريق السريع شرق-غرب عند مستوى أحنياف على طول 950.60 م. يتم تنظيم هذا التقرير في ستة فصول: يعرض الفصل الأول بحثاً تقديمياً عن البرمجة في ميدان الهندسة المدنية والأشغال العمومية ولغة بايثون، ثم تنتقل في الفصل الثاني إلى عرض عام حول المشروع، ثم تنتقل في الفصل الثالث إلى اقتراح ثلاثة تصاميم مختلفة ثم المقارنة بينها في دراسة تحليلية متعددة المعايير، لانتقاء أفضل تصميم، ثم نقوم بعرض برنامج بلغة بايثون ملخصاً لدليل التصميم العرضي لروافد الجائز الصندوقي، قبل المرور إلى عرض خصائص المواد وفرضيات الحساب. الفصل الرابع مخصص لتقييم الحمولات المطبقة (الدائمة والمتغيرة) على المنشأ العلوي للجسر، مع عرض برنامج بلغة بايثون لحساب الحمولات الدائمة والمتغيرة للجسور الصندوقية. ثم تنتقل في الفصل الخامس إلى دراسة الهيكل العلوي للمشروع، بما في ذلك دراسة الخرسانة مسبقة الإجهاد (حبال الإنشاء - البناء الكابولي المتوازن) ثم تنتقل إلى دراسة (حبال استمرارية سيق الإجهاد)، ثم نقوم بدراسة لتقييم ضياع الإجهادات المسبقة ومقارنتها مع القيمة المفترضة مسبقاً. تنتقل بعد نهاية الدراسة الطولية، إلى الدراسة العرضية للمنشأ وحديد التسليح العادي (التسليح الكامن)، و تنتقل في الفصل السادس والأخير إلى الدراسة الزلزالية للمنشأ ودراسة بعض معدات الجسر.

الكلمات المفتاحية: جسر؛ امتداد متتالي؛ إجهاد مسبق؛ برمجة بايثون.

Résumé

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, ce travail présente une conception et étude d'un pont surélevé entre les points kilométriques PK46+489.700 et PK47+440.300 sur l'autoroute reliant le port de Béjaïa à l'autoroute Est-Ouest au niveau de AHNIF, sur une longueur de 950,60 m

Ce rapport est structuré en six chapitres : le premier chapitre présente une recherche introductive sur la programmation en génie civil et travaux publics, ainsi que le langage Python. Le deuxième chapitre offre une vue d'ensemble du projet. On passe par la suite dans le troisième chapitre - à une proposition de trois conceptions différentes, suivies d'une comparaison analytique multicritères pour sélectionner la meilleure conception, et présente un programme en Python résumant le guide de conception transverse des poutres caisson, avant de passer aux caractéristiques des matériaux et aux hypothèses de calcul. Le quatrième chapitre est consacré à l'évaluation des charges appliquées (permanentes et variables) sur la superstructure du pont, avec un programme en Python pour le calcul des charges permanentes des ponts caisson. Le cinquième chapitre se concentre sur l'étude de la superstructure du projet, y compris l'étude du béton précontraint (câbles de construction - construction en porte-à-faux équilibré), l'étude des câbles de continuité précontraints, l'évaluation des pertes de précontrainte et leur comparaison avec les valeurs initialement supposées. Après l'étude longitudinale, nous passons à l'étude transversale de la structure et du ferrailage ordinaire (armature passive). Le sixième et dernier chapitre aborde l'étude sismique de la structure et l'étude de certains équipements du pont.

Mots-clés : Pont ; porte-à-faux successif ; précontrainte ; programmation Python

Abstract

As part of this final year project, this work presents the design and study of an overpass between kilometer points PK46+489.700 and PK47+440.300 on the highway connecting the port of Béjaïa to the East-West Highway at AHNIF, over a length of 950.60meters.

This report is organized into six chapters: the first chapter presents introductory research on programming in civil engineering and public works, as well as the Python language. The second chapter provides an overview of the project. The third chapter proposes three different designs, followed by a multi-criteria analytical comparison to select the best design, and presents a Python program summarizing the transverse design guide for box girder beams, before discussing the material properties and calculation assumptions. The fourth chapter is dedicated to the evaluation of applied loads (permanent and variable) on the bridge's superstructure, with a Python program for calculating the permanent loads of box girder bridges. The fifth chapter focuses on the study of the project's superstructure, including the study of prestressed concrete (construction cables - balanced cantilever construction), the study of continuity prestressed cables, the evaluation of prestress losses, and their comparison with the initially assumed values. After the longitudinal study, we move on to the transverse study of the structure and the ordinary reinforcement (passive reinforcement). The sixth and final chapter addresses the seismic study of the structure and the study of some bridge equipment.

Keywords: Bridge; successive cantilever; prestress; Python programming.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE :	1
CHAPITRE I : LA PROGRAMMATION EN GENIE CIVIL.....	2
I.1. INTRODUCTION :	2
I.2. LES LANGAGES DE PROGRAMMATION UTILISÉS	3
I.3. L'INTERVENTION DE LA PROGRAMMATION EN GÉNIE CIVIL.....	4
I.4. Conclusion.....	4
CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET	5
II.1. INTRODUCTION.....	5
II.2. PRESENTATION DU PROJET.....	5
II.3. LES DONNEES DU PROJET	6
II.3.1. DONNEES FONCTIONNELLES.....	6
II.3.2. DONNEES NATURELLES	7
II.4. CONCLUSION :.....	7
CHAPITRE III : CONCEPTION DE L'OUVRAGE ET HYPOTHESES DE CALCUL	8
III.1. INTRODUCTION.....	8
III.2. PRESENTATION DES VARIANTES :	9
III.2.1. La Variante N 01 : Pont à poutres précontraintes du type VIPP	9
III.2.2. La Variante N 02 : Pont Mixte Bipoutre.	12
III.2.3. La Variante N 03 : Pont Caisson En Béton Précontraint à Section Variable.	15
III.3. ANALYSE MULTICRITERE DES VARIANTES :	22
III.3.1. CONCLUSION :.....	22
III.4. PROGRAMMATION D'UNE APPLICATION DE CONCEPTION TRANSVERSALE.....	23
III.4.1. INTRODUCTION :	23
III.4.2. PRESENTATION DE PROGRAMME :.....	23
III.4.3. LE CODE DE PROGRAMME EN PYTHON	26
III.5. HYPOTHESES DE CALCUL.....	33
III.5.1. NORMES ET REGLES DE CALCUL.....	33
III.5.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX :	33
III.5.3. LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES ARMATURES :	34

CHAPITRE IV : EVALUATION DES CHARGES ET SURCHARGES	36
IV.1. INTRODUCTION.....	36
IV.2. LES ACTIONS PERMANENTES (G) :	36
IV.2.1. Charges Permanentes CP	36
IV.2.2. Les compléments de charges permanentes CCP :	37
IV.2.3. Le Poids Total du Tablier	37
IV.3. SURCHARGES ROUTIERES	38
IV.3.1. Système De Charge A Considérer :.....	38
IV.3.2. La Largeur Roulable et La Largeur Chargeable :	38
IV.3.3. Nombre de Voies et Largeur de Voie :	40
IV.3.4. Système de Charge A :.....	41
IV.3.5. Système de charge B :	44
IV.4. CHARGES MILITAIRES (CONVOIS MC120) :	49
IV.5. CHARGES EXCEPTIONNELLES (D240) :	50
IV.6. COEFFICIENT DE MAJORATION DYNAMIQUE :	50
IV.7. AUTRES SURCHARGES :	52
IV.7.1. Surcharge Sur Trottoirs :	52
IV.7.2. Effort De Freinage :	52
IV.7.3. Action Dues Au Vent	52
IV.7.4. Les Actions Thermiques :.....	54
IV.8. CONCLUSION :.....	54
IV.9. PROGRAMMATION D'UNE APPLICATION DE CALCUL DE POIDS PROPRE.....	55
IV.9.1. INTRODUCTION :	55
IV.9.2. PRESENTATION DU PROGRAMME :	55
IV.9.3. PRESENTATION DU CODE PYTHON	61
IV.10. PROGRAMMATION D'UNE APPLICATION DE CALCUL DES SURCHARGES ROUTIERES	75
IV.10.1. INTRODUCTION :	75
IV.10.2. PRESENTATION DU PROGRAMME :	75
IV.10.1. EXPLICATION DU CODE PYTHON	81

CHAPITRE V : ETUDE DU TABLIER	90
V.1. INTRODUCTION :	90
V.2. DISPOSITION DE STABILITE DES FLEAUX :	90
V.2.1. Les phases de construction d'un fléau :	90
V.2.2. Les Charges A Prendre En Compte :	92
V.2.3. Les combinaisons d'action en construction :	94
V.2.4. Evaluation des Efforts :	94
V.3. ETUDE DE LA PRECONTRAINTTE :	96
V.3.1. ETUDE DE LA PRECONTRAINTTE DE FLEAU :	96
V.3.2. ETUDE DE LA PECONTRAINTTE DE CONTINUITE :	105
V.3.3. EVALUATION DES PERTES DE LA PRECONTRAINTTE :	113
V.4. ETUDE TRANSVERSALE	120
V.4.1. ÉVALUATION DES EFFORTS TRANSVERSAUX	120
V.4.2. FERRAILLAGE	126
CHAPITRE VI : ETUDE SISMIQUE	129
VI.1. INTRODUCTION	129
VI.2. Méthodes Utilisées Pour L'estimation De la Force Sismique :	130
VI.2.1. Méthode Monomodale	130
VI.2.2. Méthode Specrtale Multimodale	132
VI.3. LES EQUIPEMENTS	136
VI.3.1. Les Appareils d'Appuis	136
VI.3.2. Joints de Chaussée	139
VI.3.3. L'Etanchéité	140
CONCLUSION GENERALE	142

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE II

Figure II. 1: Vue par satellite de la situation de l'ouvrage. _____	5
Figure II. 2: Tracé en plan de l'ouvrage. _____	6
Figure II. 3: Profil en Long _____	6
Figure II. 4: Profil en Travers _____	7

CHAPITRE III

Figure III. 1: Morphologie générale d'un pont à poutres en béton précontraint. _____	9
Figure III. 2: Morphologie Générale D'un Pont Mixte _____	12
Figure III. 3: Distribution des portées d'un pont simple construit par encorbellement. _____	16
Figure III. 4: Les Dimensions Des Différents Eléments Constitutifs D'un Caisson Courant Monocellulaire ____	18
Figure III. 5: Fenêtre Principale du Programme de Conception Transversale _____	23
Figure III. 6: Démonstration de Message Affiché à l'Utilisateur _____	24
Figure III. 7: Les Recommandations des Valeurs de Hp et Hc _____	24
Figure III. 8: Remplissage des Données dans La Fenêtre Principale _____	25
Figure III. 9: La Deuxième Fenêtre des Dimensions de la Section Transversale _____	25
Figure III. 10: Classes de Justification de la Précontrainte _____	35

CHAPITRE IV

Figure IV. 1: Numérotation des Voussoirs _____	36
Figure IV. 2: Largeur Roulable et Largeur Chargeable. _____	39
Figure IV. 3: Chargement des Voies A(I). _____	42
Figure IV. 4: Cas de Chargement Longitudinalement _____	43
Figure IV. 5: Système B _c . _____	45
Figure IV. 6: Système B _r . _____	47
Figure IV. 7: Système de charge B _t . _____	48
Figure IV. 8: Système de charge M _{C120} _____	49
Figure IV. 9: Système de charge D ₂₄₀ . _____	50
Figure IV. 10: La Fenêtre Principale de Programme de Calcul des Charges Permanentes. _____	55
Figure IV. 11: Fenêtre d'Insertion Des Sections Des Voussoirs _____	56
Figure IV. 12: Le Message D'erreur En Cas De Manque Des Données Nécessaires. _____	56
Figure IV. 13: Insertion des Valeurs des Sections Moyennes des Voussoirs _____	57
Figure IV. 14: La Fenêtre d'Insertion des CCP. _____	57
Figure IV. 15: Aperçu de la Fenêtre Après l'Insertion des CCP. _____	58
Figure IV. 16: La Fenêtre d'Enregistrement du Fichier d'Output. _____	58
Figure IV. 17: Le Fichier de OUTPUT _____	60
Figure IV. 18: La fenêtre principale _____	75
Figure IV. 19: La fenêtre des données _____	76
Figure IV. 20: Les Données Affichées sur la fenêtre _____	76

Figure IV. 21: Fenêtre de message d'erreur	77
Figure IV. 22: Fenêtre de Tableau des Résultats	77
Figure IV. 23: Fenêtre de Tableau des Résultats après remplissage des données	78
Figure IV. 24: Le Button Note de Calcul	78
Figure IV. 25: Le Fichier Exporté Page 01	79
Figure IV. 26: Le Fichier Exporté Page 02	80

CHAPITRE V

Figure V. 1: Cheminement de la réalisation d'un fléau	91
Figure V. 2: Modèle de Calcul de Fléau	94
Figure V. 3: Model de Calcul de Fléau sur « Robot Structural Analysis ».	95
Figure V. 4: Disposition Des Câbles De Fléau Au Niveau De VSP Et Position Des Ancrages.	100
Figure V. 5 :Tracé En Plan Des Câbles De Fléau	101
Figure V. 6:Tracé En Elévation Des Câbles De Fléau	102
Figure V. 7: Tracé En Plan et en Elévation des Câbles de Fléau	104
Figure V. 8: Disposition des Câbles de Continuité De Travée Principale Au Niveau de VSP.	107
Figure V. 9: Tracé En Elévation Et En Plan Des Câbles Des Continuités Pour La Travée Principale.	108
Figure V. 10: Disposition des câbles de continuité de travée principale au niveau de VSP.	110
Figure V. 11: Tracé En Elévation Et En Plan Des Câbles Des Continuités Pour La Travée de Rive.	112
Figure V. 12: Frottement Le Long Du Câble Lors De La Mise En Tension.	113
Figure V. 13:La Section de VSP et La Section Equivalente	120
Figure V. 14: La Section de VSC et La Section Equivalente	121
Figure V. 15: Le Model de la section VSP équivalente	121
Figure V. 16: Le Model De La Section VSC Equivalente.	122
Figure V. 17: Sections à Justifier selon le Guide SETRA 2003.	123
Figure V. 18: Diagramme des Moments dans VSP - Combinaison Bt à ELS.	123
Figure V. 19: Diagramme des Moments dans VSP - Combinaison Bt à ELU.	124
Figure V. 20:Diagramme des Moments dans VSC - Combinaison Bt à ELS.	124
Figure V. 21: Diagramme des Moments dans VSC - Combinaison Bt à ELU.	124
Figure V. 22:Ferraillage de Voussoir sur Pile.	128
Figure V. 23: Ferraillage de Voussoir à la Clef.	128

CHAPITRE VI

Figure VI. 1: Spectre de réponse élastique Sae/g (T) - composante horizontale.	133
Figure VI. 2:Spectre de réponse élastique Sae/g (T) - composante verticale.	134
Figure VI. 3 : Le Domaine d'utilisation des différents appareils d'appuis	136
Figure VI. 4: Composition d'un Appareil d'Appuis à Pot	137
Figure VI. 5: Les Conditions d'Appuis Probables.	138

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

Tableau II. 1: Dimensions de Profil en Travers	6
--	---

CHAPITRE III

Tableau III. 1: La gamme de portée de quelques types de ponts	8
Tableau III. 2: Tableau Récapitulatif du Prédimensionnement de la Première Variante.	10
Tableau III. 3: Tableau Récapitulatif Du Pré Dimensionnement De La Variante Mixte (Poutre Principale)	13
Tableau III. 4: Tableau récapitulatif du pré dimensionnement de la variante mixte (Entretoise)	13
Tableau III. 5: La Répartition des Travées de la Variante 3	16
Tableau III. 6: Tableau Récapitulatif du Prédimensionnement de la troisième variante	20
Tableau III. 7: Analyse Multicritère Des Variantes	22
Tableau III. 8: Les Caractéristiques du Béton	33
Tableau III. 9: Les Caractéristiques des Armatures Passives	34
Tableau III. 10: Les Caractéristiques des Armatures Actives	34

CHAPITRE IV

Tableau IV. 1: Estimation Du Poids Total De Tablier.	37
Tableau IV. 2: Estimation du poids du aux CCP	37
Tableau IV. 3: Poids Total du Tablier	37
Tableau IV. 4: Les Différentes Classes des Ponts	40
Tableau IV. 5: Coefficient a_1 Selon RCPR	41
Tableau IV. 6: Coefficient v_0 Selon RCPR	42
Tableau IV. 7: Valeurs de A(L) sur le Tablier	44
Tableau IV. 8: Caractéristique de Système B _c	45
Tableau IV. 9: Valeur du Coefficient b_c .	46
Tableau IV. 10: Les Valeurs de Chargement B _c .	46
Tableau IV. 11: Caractéristiques de Système B _t .	47
Tableau IV. 12: Valeurs du Coefficient b_t	48
Tableau IV. 13: Valeurs de B _t .	49
Tableau IV. 14: Caractéristiques de Système Mc ₁₂₀	49
Tableau IV. 15: Valeurs de Coefficients de Majoration Dynamique	51
Tableau IV. 16: L'effort de freinage F(KN) de système A .	53
Tableau IV. 17: Le Gradient Thermique Selon RCPR	54

CHAPITRE V

Tableau V. 1: Les Charges Intervenant Dans La Phase Construction. _____	93
Tableau V. 2: Combinaison d'Action en Phase Construction. _____	94
Tableau V. 3: Estimation Du Nombre De Câbles De Fléau Pour Chaque Section. _____	98
Tableau V. 4: Contraintes Des Fibres Extrêmes Dans La Phase De Construction. _____	99
Tableau V. 5: Allure Du Tracé En Plan Des Câbles De Fléau. _____	103
Tableau V. 6: Allure Du Tracé En Elévation Des Câbles De Fléau. _____	103
Tableau V. 7: Estimation Du Nombre De Câbles De Continuité De Travée Principale _____	106
Tableau V. 8: Allure Du Tracé En Plan Des Câbles De Continuité De Travée Principale. _____	106
Tableau V. 9: Allure Du Tracé En Elévation Des Câbles De Continuité De Travée Principale. _____	107
Tableau V. 10: Estimation du Nombre de câbles de continuité de travée de rive _____	109
Tableau V. 11: Allure Du Tracé En Plan Des Câbles De Continuité De Travée De Rive. _____	110
Tableau V. 12: Allure Du Tracé En Elévation Des Câbles De Continuité De Travée De Rive. _____	111
Tableau V. 13: Pourcentages (%) des pertes de tension moyennes des câbles de fléau. _____	119
Tableau V. 14: Combinaisons des Charges Appliquées. _____	122
Tableau V. 15: Les Effort Dans Les Sections de VSP. _____	125
Tableau V. 16: Les Effort Dans Les Sections de VSC. _____	125
Tableau V. 17: Ferrailage passif du VSP. _____	127
Tableau V. 18: Ferrailage passif du VSC. _____	127

CHAPITRE VI

Tableau VI. 1: La Masse des Piles Hors Fondations. _____	131
Tableau VI. 2: Les Réactions Pour Une Paire D'appareils D'appui A Pot. _____	138
Tableau VI. 3: Les Réactions Par Chaque Appareil d'Appui _____	138
Tableau VI. 4: Choix des appareils d'appuis commerciaux _____	138
Tableau VI. 5: Souffles des Joints W_d en Fonction du Biais de L'Ouvrage _____	140

LISTE DES ABREVIATIONS

PK	Point Kilométrique.
SETRA	Service d'études techniques des routes et autoroutes.
PI	Pression limite
E_m	Module pressiométrique
RPOA	Règles parasismiques applicable au domaine des ouvrages d'art.
VIPP	Viaduc à travées indépendante à poutres préfabriquées.
ELU	Etat limite ultime
ELS	Etat limite de service
E_p	Module d'Elasticité des câbles de Précontrainte.
E_s	Module d'Elasticité de l'acier.
F_{c28}	Résistance caractéristique de béton à la Compression à 28 jours.
f_e	Limite d'Elasticité de l'acier.
f_{peg}	Contrainte Elastique Garantie de Précontrainte.
f_{prg}	Contrainte de Rupture Garantie de Précontrainte.
F_{t28}	Résistance caractéristique de béton à la Traction à 28 jours.
F_{t28}	Résistance caractéristique de béton à la Traction à 28 jours.
HA	Haute Adhérence.
BAEL	Béton armé aux Etats limites.
BPEL	Béton précontrainte aux Etats limites.
CCP	Complément des charges permanentes.
VSC	Voussoir coulé Sur Cintre.
VSP	Voussoir sur Pile.
σ_{bc}	Contrainte de Compression admissible de Béton.
σ_{bt}	Contrainte de Traction admissible de Béton.
σ_{Inf}	Contrainte dans la fibre Inférieure la plus éloignée du centre de gravité de la section.
σ_s	Contrainte limite de l'acier.
σ_{Sup}	Contrainte dans la fibre Supérieure la plus éloignée du centre de gravité de la section.
ΔT	Variation uniforme de la température
Δθ	Gradient thermique.
ΔP	Pertes de tension dans les câbles de Précontrainte.
19T15s	19 Torons de 15,7 mm de diamètre



**INTRODUCTION
GENERALE**



INTRODUCTION GENERALE :

Dans le cadre d'un projet de fin d'étude, le rapport suivant est concrétisé afin d'obtenir le diplôme d'ingénieur d'état en travaux publics à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics (ENSTP) –Francis Jeanson – Alger.

L'Algérie trace un plan routier et ferroviaire qui a entré dans la phase d'exécution, ce plan a comme but de faciliter les déplacements et les échanges entre les pays du Maghreb. L'autoroute Est-Ouest sera le lien entre les ports qui se trouvent dans ces pays ainsi que l'Afrique avec la route transsaharienne.

Le présent mémoire consiste en conception et étude de l'ouvrage d'art qui se trouve sur la liaison autoroutière reliant le port de Bejaïa à l'autoroute Est-Ouest du PK46+489.700 au PK47+440.300 avec la programmation de la superstructure.

Ce travail est structuré en six (06) chapitres, intégrant toutes les spécificités nécessaires pour aboutir à un dimensionnement rigoureux.

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique qui définit la programmation dans le génie civil contenant un détail du programme Python utilisé dans ce présent mémoire ; Suivi par un deuxième dont on a présenté le projet et ses caractéristiques.

Le troisième chapitre se manifeste comme une proposition de trois variantes on justifiant par une analyse multicritère le choix de l'une parmi celles-ci ; ainsi que les différentes caractéristiques des matériaux utilisés, les normes et les hypothèses de calcul à considérer pour évaluer le moment fléchissant et l'effort tranchant, ainsi que les actions s'exerçant sur l'ouvrage.

Le quatrième chapitre se présente pour faire une évaluation des charges et surcharges qu'il faut tenir en compte dans les calculs.

L'étude du tablier est détaillée dans le cinquième chapitre là où on a fait une analyse détaillée de la précontrainte du fléau ainsi que la précontrainte de continuité des travées principales et celles des rives, suivie par une évaluation des pertes de précontrainte et finalisé par une étude transversale.

Finalement, Pour accomplir l'ouvrage dans toutes ces parties, nous avons touché à l'étude sismique de l'ouvrage dans le sixième chapitre.



CHAPITRE I

LA PROGRAMMATION EN

GENIE CIVIL



CHAPITRE I : LA PROGRAMMATION EN GENIE CIVIL

I.1. INTRODUCTION :

L'humanité a commencé - comme nous le croyons - lorsque Dieu a créé Adam, que la paix soit sur lui, et avant de le créer, Dieu a dit aux anges : «Je vais établir sur la terre un vicaire “Khalifa” ». L'un des objectifs du « Khalifa » sur terre était de le construire et le peupler. On retrouve cette signification dans d'autres versets du Saint Coran : « De la terre Il vous a créés, et Il vous l'a fait peupler (et exploiter) ».

L'objectif de peupler la terre, de construire des maisons, des bâtiments, des villes, des routes, des ponts, des tunnels, etc., était une loi universelle, et c'est le cœur de notre spécialisation en génie civil et travaux publics.

Le génie civil s'est considérablement développé depuis l'époque où les humains vivaient dans des grottes et les utilisaient comme habitations, et plaçaient des troncs d'arbres comme ponts pour traverser les rivières. Jusqu'au génie civil tel que nous le connaissons aujourd'hui, avec l'ensemble des sciences sur lesquelles il repose, avec les technologies et les disciplines et les règles de l'art qui se développent jour après jour.

Il y a quelques décennies, le béton armé, par exemple, ne disposait pas de règles de calcul comme on en trouve aujourd'hui, si l'on regarde la période qui sépare l'émergence des règles de BAEL (1991 révisé 1999) de l'année 1848 où Louis-Joseph Lambot a réalisé la première barque en ciment armé connue et l'a essayée sur le lac de Besse-sur-Issole. Nous parlons de règles de calcul relativement nouvelles. Si nous parlons, par exemple, de l'année 2010, la première année d'utilisation du RPOA en Algérie, on parle de seulement 14 ans, ce qui est une période très courte par rapport à l'histoire du génie civil.

Le génie civil est un domaine en évolution constante, car l'humain, depuis que Dieu l'a créé, a été en contact avec la nature et a essayé de construire et d'innover pour surmonter les obstacles dans le cadre de la loi universelle : construire et peupler la terre. Nous, en tant qu'ingénieurs, devons toujours suivre le rythme de cette évolution. Par exemple, dans notre école, nous avons eu des professeurs distingués, avec une longue histoire et parcours dans ce domaine, qui ont vécu l'époque où l'on dessinait des plans d'ingénierie à la main sur papier. Puis est arrivée la génération du dessin assisté par ordinateur, du programme SketchPad aux programmes d'AutoDesk (AutoCAD, ArchiCad...), et nous vivons aujourd'hui dans une nouvelle ère avec le BIM et la programmation.

En résumé, avec cette révolution technologique en constante évolution d'aujourd'hui, les frontières entre les disciplines d'ingénierie traditionnelles et l'informatique deviennent de plus en plus floues ! Le génie civil, une discipline et une profession ancrée dans des principes et des pratiques séculaires, ne fait pas exception. Alors que l'industrie de la construction subit une transformation numérique, les ingénieurs civils se retrouvent à la croisée des chemins entre leur expertise de base et le monde de la programmation. Voici pourquoi adopter la programmation informatique n'est plus une simple option, mais une nécessité pour les ingénieurs civils.

I.2. LES LANGAGES DE PROGRAMMATION UTILISÉS

Comme mentionné dans l'introduction de ce chapitre, la programmation s'est imposée comme une compétence indispensable pour les ingénieurs civils. Elle permet d'automatiser des tâches complexes de l'ingénierie, d'analyser des données de manière plus précise qu'avant, et d'optimiser les processus de conception et de construction. Les calculs structurels, la gestion de projet, la programmation offrent des outils puissants pour améliorer la précision et l'efficacité des travaux de génie civil et travaux publics.

Les ingénieurs civils d'aujourd'hui utilisent plusieurs langages de programmation pour répondre à différents besoins : MATLAB, Python, C++, etc. Dans notre mémoire, nous avons choisi d'utiliser Python, un langage de programmation polyvalent et accessible, largement utilisé en génie civil pour le traitement de données, la simulation et l'automatisation. Il dispose de bibliothèques spécifiques comme NumPy, SciPy et Pandas, qui facilitent les calculs numériques et l'analyse de données. Il existe également d'autres bibliothèques comme PyQt ou Tkinter pour les Interfaces Graphiques d'Utilisateur (GUI), Openpyxl pour la manipulation, création ou modification des fichiers Excel, et bien d'autres. Pour plus d'informations concernant le choix de Python ou les bibliothèques mentionnées, vous êtes invités à consulter notre rapport de stage d'Insertion intitulé «Programming Using Python In Civil Engineering Field» présenté par l'étudiant ingénieur ISMAIL Oussama en 2023.

Pour justifier notre choix d'utiliser Python dans le cadre de ce mémoire, il est utile de comparer ce langage à d'autres couramment utilisés en génie civil et travaux publics, tels que MATLAB, C++ et R.

➤ Python vs MATLAB

MATLAB est souvent utilisé pour des tâches mathématiques intensives et des simulations, avec une interface conviviale pour les utilisateurs non programmeurs. Cependant, MATLAB est propriétaire et coûteux, ce qui peut limiter son accessibilité. Python, en revanche, est open-source et gratuit, offrant une vaste gamme de bibliothèques qui rivalisent avec les fonctionnalités de MATLAB. De plus, Python est polyvalent, s'étendant au-delà des applications scientifiques pour inclure le développement web, l'automatisation, et plus encore.

➤ Python vs C++

C++ est un langage de programmation performant et puissant, souvent utilisé pour des applications nécessitant une grande vitesse et efficacité, comme les moteurs de simulation ou les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Cependant, C++ est complexe et présente une courbe d'apprentissage plus raide. Python, en revanche, est connu pour sa simplicité et sa lisibilité, ce qui en fait un excellent choix pour les ingénieurs civils qui n'ont pas nécessairement une formation en informatique. Python permet également un développement rapide, ce qui est crucial pour les projets nécessitant des solutions rapides et efficaces.

➤ Python vs R

R est un langage dédié principalement à l'analyse statistique et à la visualisation de données. Bien qu'il soit puissant pour ces tâches, R est moins polyvalent que Python. Python, avec ses bibliothèques comme Pandas, Matplotlib et Seaborn, offre des capacités d'analyse de données comparables à R, tout en permettant une intégration facile avec des outils de développement web, d'automatisation, et d'autres applications diverses.

I.3. L'INTERVENTION DE LA PROGRAMMATION EN GÉNIE CIVIL

La programmation joue un rôle central dans toutes les opérations de ce domaine. De la conception aux calculs structurels, et si l'on parle de stages supérieurs, la digitalisation des données et des expériences avec l'utilisation de l'IA et du Deep Learning peut faciliter la prise de décisions très complexes en un temps très court, ce qui représente un gain énorme en termes de temps et de qualité de décision.

Par exemple, la surveillance de l'état des structures (SHM) est un domaine émergent et critique de l'ingénierie. Des recherches récentes, comme l'article «A Self-Consistent Artificial Intelligence-Based Strategy for Structural Health Monitoring», montrent comment les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle (IA) associés aux techniques d'apprentissage automatique (ML) peuvent révolutionner le SHM.

Dans notre mémoire, nous avons essayé d'utiliser le langage de programmation Python pour automatiser quelques tâches, comme la conception transversale, l'évaluation de poids propre d'un pont, l'estimation des charges et surcharges, etc. Nous espérons que les étudiants ingénieurs qui nous succéderont continueront ce voyage en développant et en améliorant davantage ces programmes.

I.4. Conclusion

Le génie civil, en tant que discipline, continue d'évoluer en intégrant des technologies modernes et des méthodes de programmation avancées. Python, avec sa polyvalence, son accessibilité et sa large adoption, se révèle être un outil indispensable pour les ingénieurs civils souhaitant optimiser leurs processus et innover dans leurs projets. La transition vers une ingénierie numérique exige une adoption rapide et efficace des langages de programmation, et Python se positionne comme une solution de choix pour relever les défis contemporains du génie civil.



CHAPITRE II

PRÉSENTATION DU PROJET



CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET

II.1. INTRODUCTION

Afin de faire une conception adéquate d'un ouvrage, il est nécessaire de prendre en considération toutes des données qui sont en relation avec le projet (les données fonctionnelles, naturelles, sismologiques...)

Dans le présent chapitre, nous allons collecter les différentes informations liées à notre projet.

II.2. PRESENTATION DU PROJET

L'ouvrage d'art qui fait l'objet de cette étude se trouve près D'AKHENAK de la commune SEDDOUK. Et il se situe entre **PK46+489.700** et **PK47+440.300**, dans le projet de la pénétrante de Bejaïa vers AHNIF, avec une longueur de **950.60m** dont la superstructure est constituée d'un tablier supporté par des poutres en T de béton précontraint, de **26×36.1m**.

L'emplacement du projet est illustré par la carte suivante :

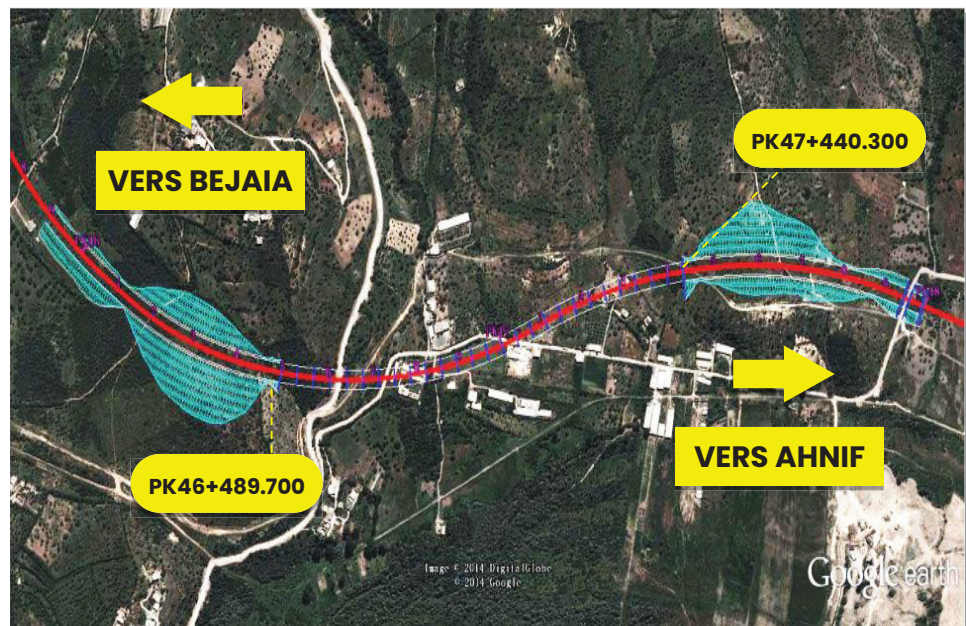


Figure II. 1: Vue par satellite de la situation de l'ouvrage.

II.3. LES DONNEES DU PROJET

II.3.1. DONNEES FONCTIONNELLES

- **Tracé en plan :** Il montre en évidence les longueurs des sections rectilignes ou arquées et la valeur des rayons de courbure dans les virages. L'ouvrage en plan a une longueur totale de 950.60 mètres.

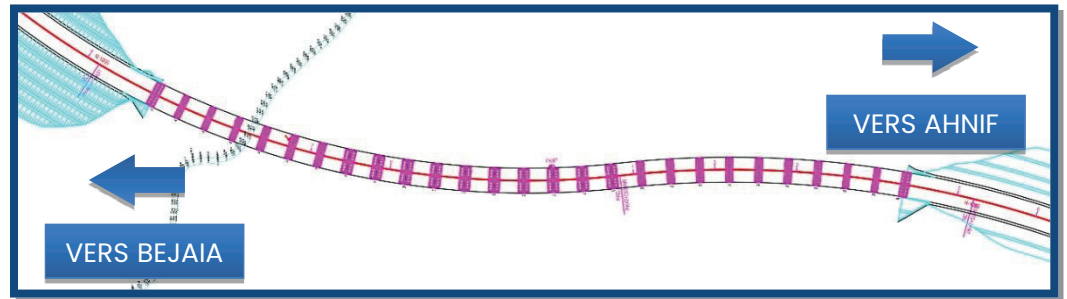


Figure II. 2: Tracé en plan de l'ouvrage.

- **Profil en long :** C'est la projection de l'axe de la route (Ligne Rouge), projetée sur un plan vertical avec le terrain naturel.

Le tracé longitudinal présente une pente de -2.59%

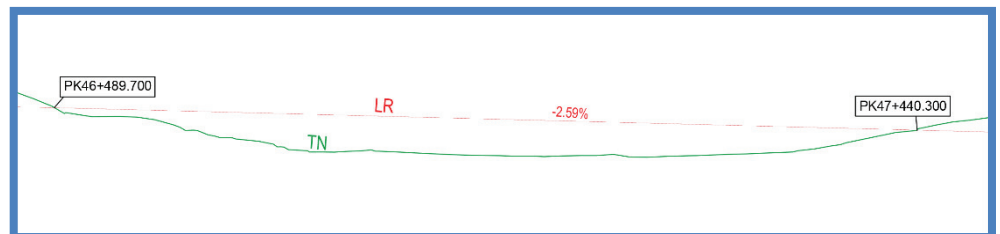


Figure II. 3: Profil en Long

- **Profil en travers :**

Tableau II. 1: Dimensions de Profil en Travers

Les Caractéristiques De L'ouvrage	La Largeur Totale Du Tablier [m]	La Largeur Roulable [m]	La Largeur Du Trottoir [m]	Le Divers
La valeur	16	14.50	0.75	2.5 %

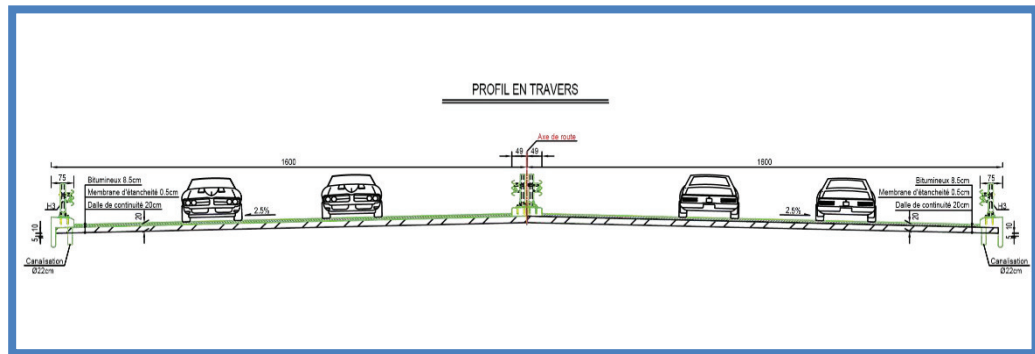


Figure II. 4: Profil en Travers

II.3.2. DONNEES NATURELLES

- **Topographie et géomorphologie :** Le relief dans la zone de la localisation du pont est représenté par des coteaux bas et de plaine alluviale plate. La pente pour le talus naturel est environs 25°. (Voir Annexe A – Géomorphologie).
- **Géologie de la région :** Le sol dans la zone de localisation du pont est de nature alluviale quaternaire, les terrains sont les marnes et grès, la structure stratigraphique est simple et continue
- **Formations lithologiques :** Le sol superficiel de la zone est composé d'une couche mince de l'argile peu plastique, sable et grave, sous lequel se trouvent les grès intensément-faiblement altérée et la marne. (Voir Annexe A – Lithologie).
- **La température :** La température moyenne annuelle est de 20° C.
- **La catégorie du terrain :** La valeur moyenne de la pression limite sur site $PI=1.23-1.95MPa$, la valeur moyenne du module pressiométrique, $Em=6.11-36.00MPa$. Donc le type de site est S3, site ferme. (ANNEXE A-exemple d'un essai pressiométrique-)
- **La sismicité :** Selon le RPOA, la classification du site vis-à-vis du zonage sismique est **IIa** (une zone de sismicité moyenne) voir la carte de zonage sismique de l'Algérie dans l'Annexe A. La route de la présente zone d'étude correspond au **Groupe 1**, le coefficient de l'accélération sismique pour l'étude des travaux **A=0.25g**. Voici le tableau suivant : ¹

II.4. CONCLUSION :

La première étape essentielle pour parvenir à une conception parfaitement adaptée aux contraintes spécifiques de la zone d'étude est la reconnaissance approfondie de celle-ci.

1 . Ministère Des Travaux Publics - Règles Parasismiques Applicables Au Domaine Des Ouvrages D'art (RPOA 2008) – Page 14– Article 3.1.2.



CHAPITRE III

**CONCEPTION DE L'OUVRAGE
& HYPOTHÈSES DE CALCUL**



CHAPITRE III : CONCEPTION DE L'OUVRAGE ET HYPOTHESES DE CALCUL

III.1. INTRODUCTION

Avant de construire un pont, il est essentiel de passer par une phase de conception et de prédimensionnement ce qui implique plusieurs étapes : l'analyse des charges, la sélection des matériaux, la conception de la structure et la vérification de sa capacité à supporter les charges prévues.

Lors de la sélection du type de structure à adopter, plusieurs facteurs clés sont pris en compte, notamment :

- La portée requise ;
- Les possibilités d'élanement ;
- Les contraintes du profil en long ;
- Les caractéristiques topographiques et géotechniques du site ;
- L'analyse économique, incluant le coût de la structure et des appuis ;
- Les considérations esthétiques.

La gamme de portée de quelques types de ponts : ¹

Tableau III. 1: La gamme de portée de quelques types de ponts

Type	Portées						
	35m	70m	90m	120m	150m	200m	300m
- Ponts en BP construits par encorbellements							
- Ponts en BP poussés							
- Ponts mixtes à poutres							
- Ponts mixtes à caissons							
- Ponts à dalle orthotrope à caissons							
- Ponts à haubans (acier ou béton)							

- **Variantes Proposées :** D'après une analyse des données, l'obstacle à franchir et la longueur de brèche, on a décidé d'éviter le nombre énorme de piles, donc on va éliminer toute proposition de portée inférieure à 30 mètres. On a commencé par ces trois variantes :
- Variante 1 : Pont à poutres précontraintes du type VIPP.
 - Variante 2 : Pont Mixte Bipoutre.
 - Variante 3 : Pont caisson en béton précontraint à section variable.

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 20– Article 1.3.

III.2. PRESENTATION DES VARIANTES :

III.2.1. La Variante N 01 : Pont à poutres précontraintes du type VIPP

Les ponts à poutres sous chaussée ont constitué une des premières applications de la précontrainte dans le domaine des ponts. Leur conception, initialement inspirée de celle des ponts à poutres en béton armé, fait largement appel à la préfabrication.

On distingue deux types de tabliers, selon la technique de précontrainte utilisée pour les poutres :

- Les ponts à poutres précontraintes par prés-tension qui occupent une gamme de portées allant de 10 à 35 mètres.
- Les ponts à poutres précontraintes par post-tension (VIPP) qui sont employés pour des portées comprises entre 30 et 50 mètres.

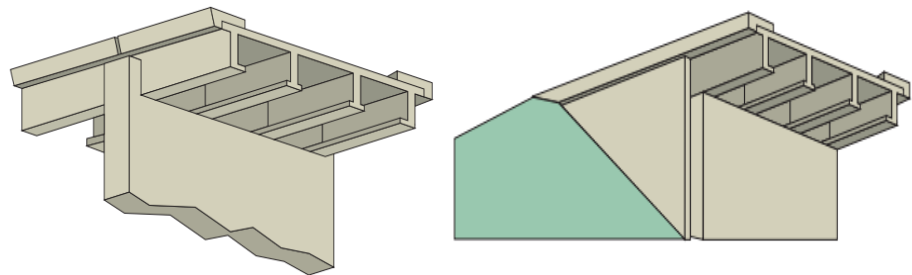


Figure III. 1: Morphologie générale d'un pont à poutres en béton précontraint.

III.2.1.1. Conception longitudinale :

Pour cette variante, on a proposé une projection d'un pont de 25 travées isostatiques avec 2 travées de rives de longueur de 30 mètres et 23 travées intermédiaires de longueur de 40 mètres.

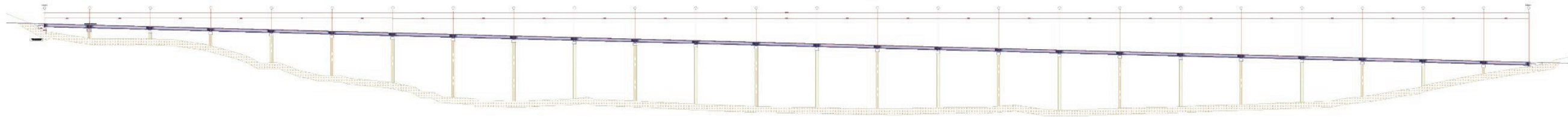
III.2.1.2. Conception transversale :

La conception transversale a été faite selon le guide SETRA [VIPP/1996].

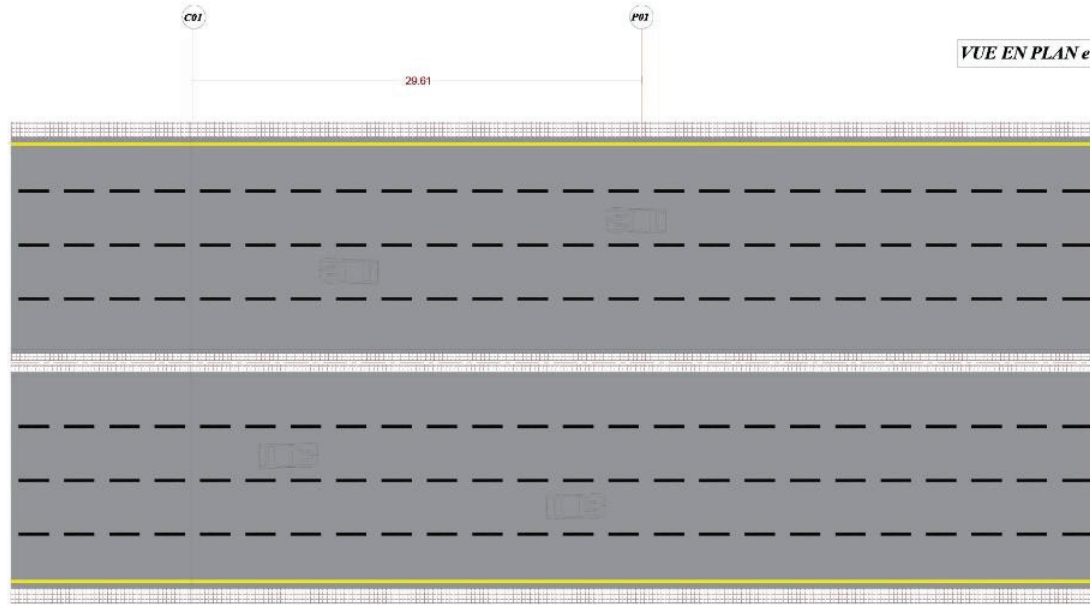
Tableau III. 2: Tableau Récapitulatif du Prédimensionnement de la Première Variante.

Eléments	Formule ou intervalle	Valeur retenue
La longueur totale de la poutre	25 à 40 m	30 m pour les poutres de rives ; 40 m pour les poutres intermédiaires.
La hauteur de la poutre	$L/22 < H_P < L/16$	200 cm
L'épaisseur de la dalle	$20 \text{ cm} \leq e \leq 30 \text{ cm}$	25 cm
La hauteur totale du tablier	$H_T = H_P + e$	225 cm
Entraxe des poutres	$140 \text{ cm} \leq \lambda \leq 200 \text{ cm}$	200 cm
Nombre de poutres	$N = (L_a / \lambda) + 1$	8
La largeur de la table de compression	$b \geq 0.6 H_P$	120 cm
Epaisseur de la table de compression	$12 \text{ cm} \leq e \leq 15 \text{ cm}$	12 cm
La largeur du talon	$60 \text{ cm} \leq L_T \leq 90 \text{ cm}$	80 cm
Epaisseur du talon	$10 \text{ cm} \leq e_T \leq 20 \text{ cm}$	20 cm
Epaisseur de l'âme	$18 \text{ cm} \leq b_0 \leq 25 \text{ cm}$	25 cm
Gousset de la table de compression	/	45°
Gousset du talon	/	45°

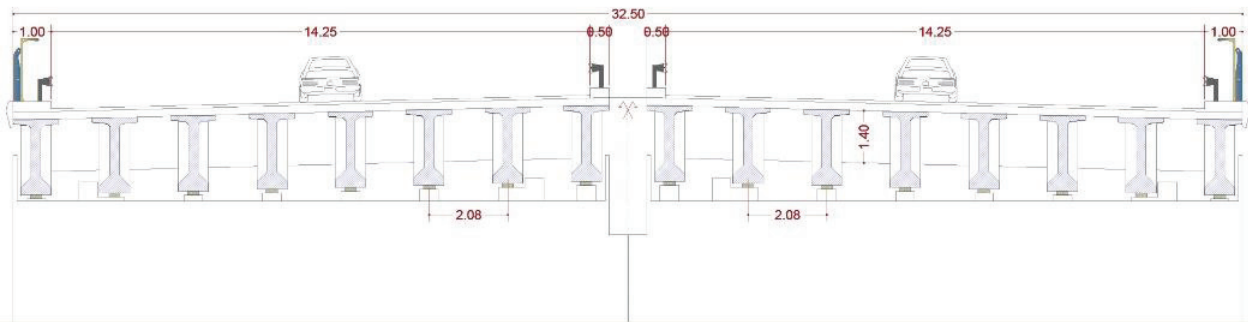
COUPE LONGITUDINALE ech:1/500



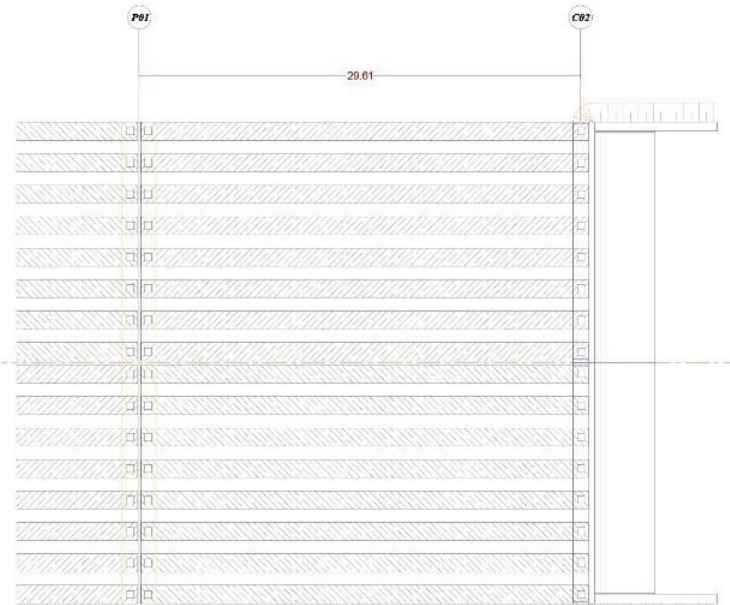
VUE EN PLAN ech:1/500



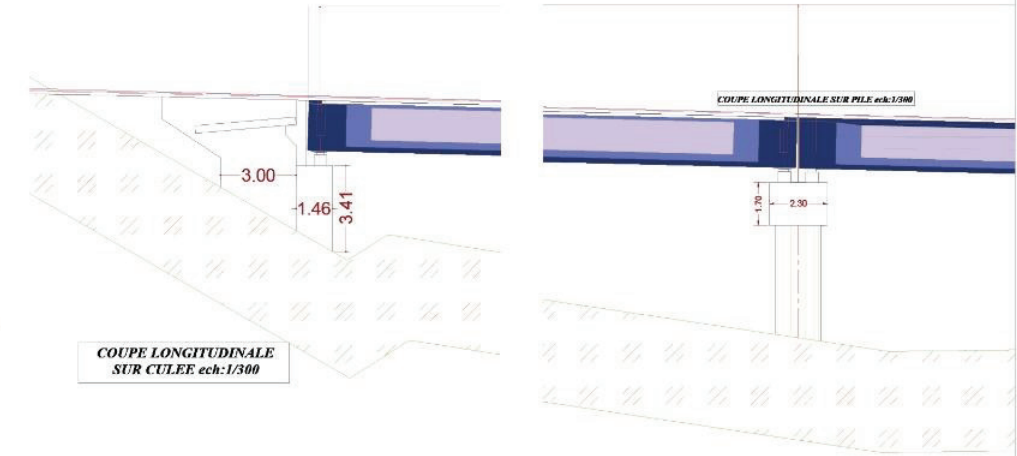
COUPE TRANSVERSALE SUR CULEE ech:1/200



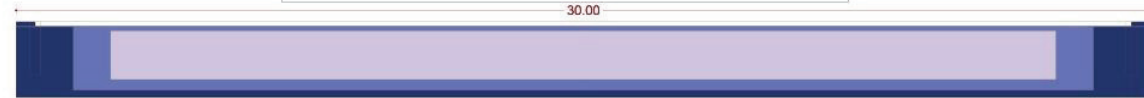
COUPE TRANSVERSALE SUR PILE ech:1/200



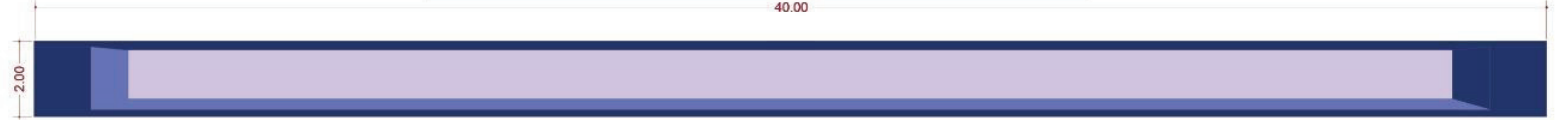
COUPE LONGITUDINALE SUR CULEE ech:1/300



COUPE LONGITUDINALE POUTRE DE RIVE ech:1/200



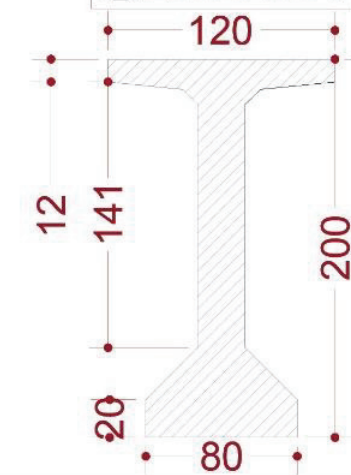
COUPE LONGITUDINALE POUTRE INTERMEDIAIRE ech:1/200



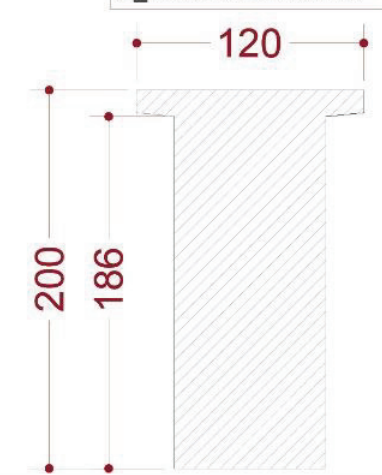
ENTRETOISE ech:1/40



S_MEDIANE ech:1/40



S_D'ABOUT ech:1/40



III.2.2. La Variante N 02 : Pont Mixte Bipoutre.

Les ponts mixtes bipoutres sont constitués de poutres métalliques principales fixées par des entretoises, ces éléments soutiennent une dalle de roulement en béton armé à l'aide des connecteurs.

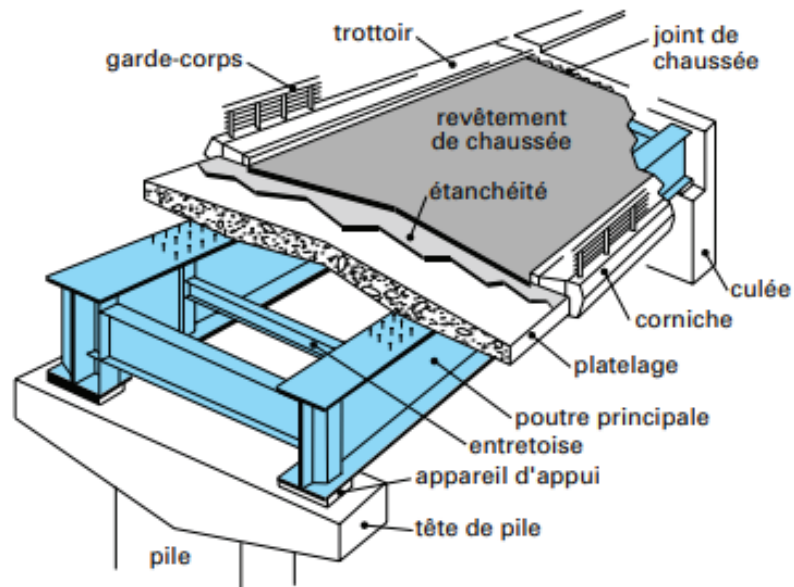


Figure III. 2: Morphologie Générale D'un Pont Mixte

III.2.2.1. Conception longitudinale :

Pour cette variante, on a proposé une projection d'un pont mixte bipoutre à hauteur constante qui se compose de 12 travées de 75 m pour chacune.

III.2.2.2. Conception transversale :

La conception transversale de cette variante a été faite à l'aide du guide de conception SETRA [PONT MIXTE].

➤ LES POUTRES :

Tableau III. 3: Tableau Récapitulatif Du Pré Dimensionnement De La Variante Mixte (Poutre Principale)

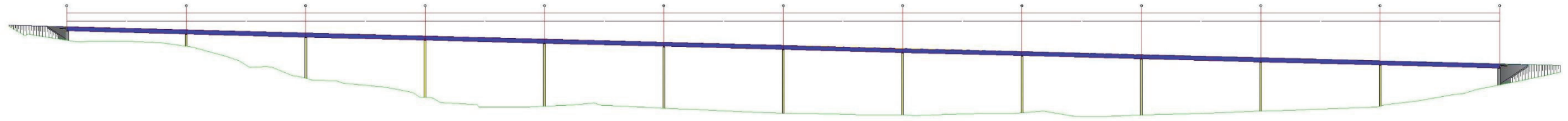
Elément	Formule ou intervalle	Valeur retenues (cm)
Epaisseur de la dalle en béton armé	24 cm à 26 cm	25
Hauteur de la poutre (constante)	$L / 28$	260
Largeur de la semelle inf b_{inf}	$40 \text{ cm} \leq b_{inf} \leq 100 \text{ cm}$	80
Largeur de la semelle sup b_{sup}	$50 \text{ cm} \leq b_{sup} \leq 120 \text{ cm}$	70
Epaisseur de la semelle inf	$2 \text{ cm} \leq t_{inf} \leq 15 \text{ cm}$	5
Epaisseur de la semelle sup	$2 \text{ cm} \leq t_{sup} \leq 15 \text{ cm}$	4
Épaisseur de l'âme	$t_w \geq 0.005 * d$	4
Hauteur de l'âme	$d = H - t_s - t_i$	250

➤ LES ENTRETOISES :

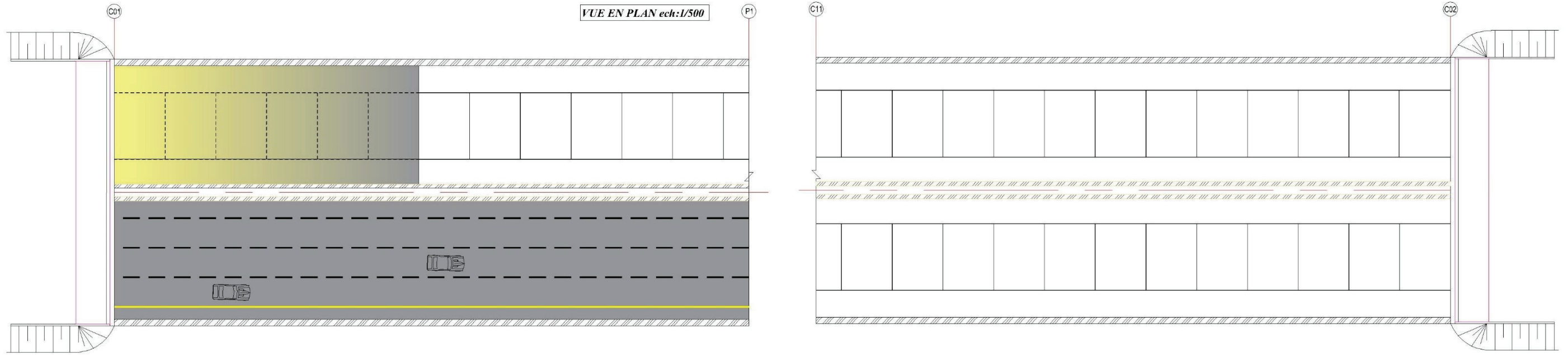
Tableau III. 4: Tableau récapitulatif du pré dimensionnement de la variante mixte (Entretoise)

Elément	Formule ou intervalle	Valeur retenues (cm)
La hauteur de l'entretoise	$L_t / 15 \leq H_m \leq L_t / 10$	60
Largeur de la semelle b_{en}	$22 \text{ cm} \leq t_w - t_{en} \leq 30 \text{ cm}$	20
Epaisseur de la semelle t_{en}	Environ de 2 cm	2
Epaisseur de l'âme	$1 \text{ cm} \leq t_w - t_{en} \leq 1.2 \text{ cm}$	2

COUPE LONGITUDINALE ech:1/500



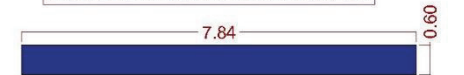
VUE EN PLAN ech:1/500



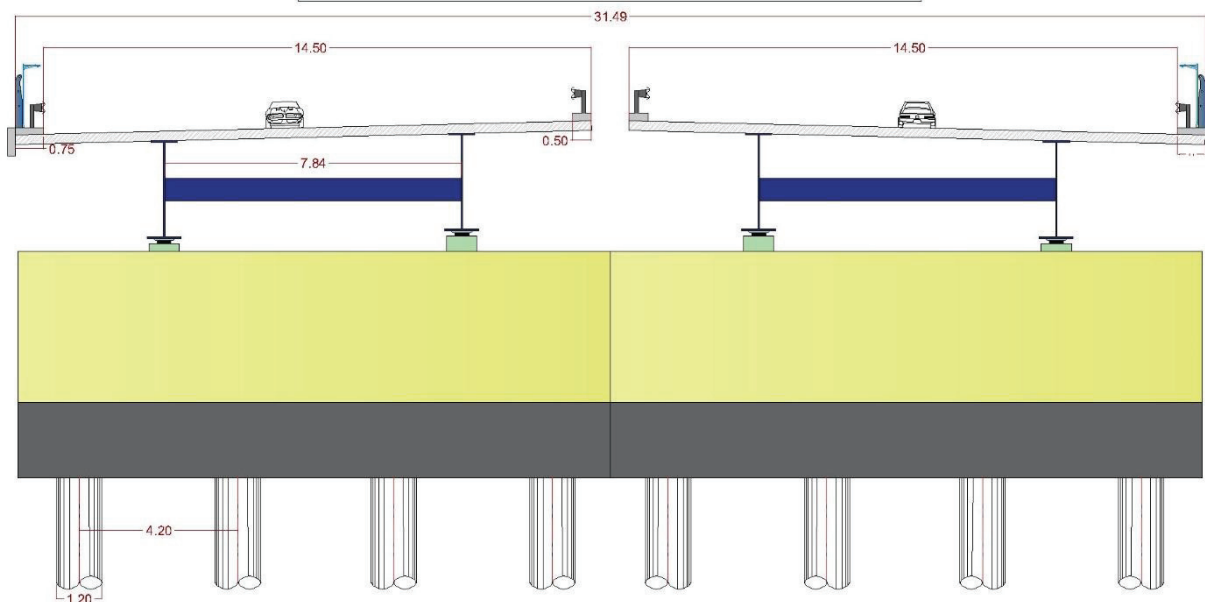
COUPE LONGITUDINALE SUR LA POUTRE ech:1/250



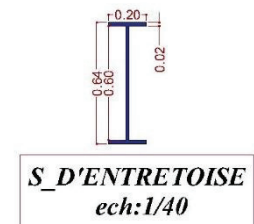
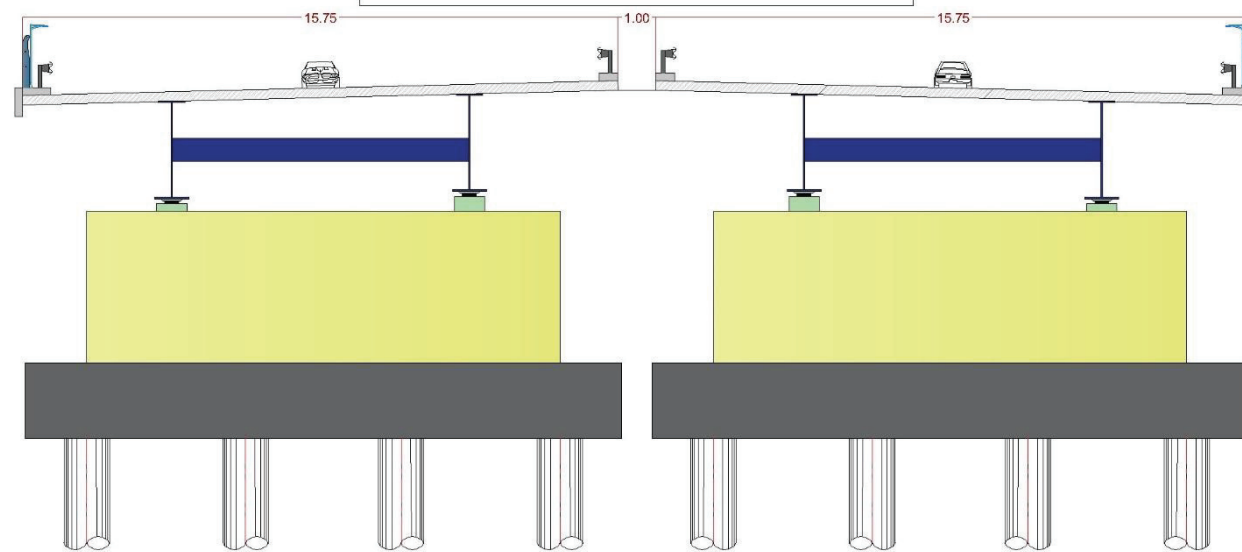
SECTION D'ENTRETOISE ech:1/150



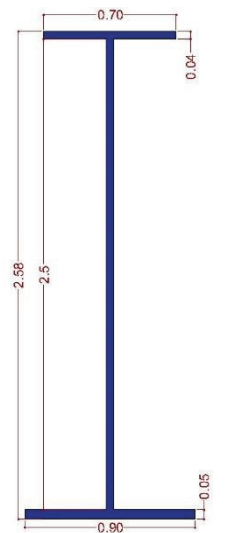
COUPE TRANSVERSALE SUR CULEE ech:1/200



COUPE TRANSVERSALE SUR PILE ech:1/200



S_D'ENTRETOISE ech:1/40



S_DE LA POUTRE PRINCIPALE ech:1/40

III.2.3. La Variante N 03 : Pont Caisson En Béton Précontraint à Section Variable.

Un pont en voussoirs est un pont qui se compose de plusieurs pièces dites voussoirs reliées entre elles successivement par une précontrainte ; Ces pièces peuvent être préfabriquées ou coulées sur place selon les moyens disponibles et les capacités de l'entreprise de réalisation.

III.2.3.1. Conception longitudinale :

La Conception a été faite à l'aide du guide de SETRA [Ponts en béton précontraint construits par encorbellement successifs/2003]. Le guide donne les notes suivantes :

- La gamme des portées envisageables est très large (entre 40 et 200 m, voire 300 m).
- La voie portée peut avoir n'importe quelle géométrie tant en plan qu'en long.
- Entre 60 et 100 m, le tablier de l'ouvrage peut-être de hauteur constante ou variable.
- La méthode peut être mise en œuvre quelles que soient les caractéristiques naturelles de la brèche (profondeur importante, versants abruptes, sols de très mauvaise qualité, site maritime, etc...).¹

III.2.3.1.1. Répartition Des Travées

Concernant la répartition des travées, le guide mentionne deux cas principaux qui sont :

- Cas d'un ouvrage composé de fléaux tous identiques :

Les ouvrages les plus simples comportent des travées principales toutes égales. Cette disposition permet de réaliser des fléaux tous identiques. ce qui simplifie la conception des matériels de ou de et améliore les rendements (Voir Figure III.3).²

- Cas d'un ouvrage composé de fléaux de longueurs différentes.

Les brèches à franchir comportent souvent des contraintes qui empêchent de projeter un ouvrage comme ceux que nous venons d'évoquer. Il faut alors construire des ouvrages comportant plusieurs types de fléaux.³

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 27– Article 2.1.

2 . Même Référence Précédente – Page 28– Article 2.2.1.

3 . Même Référence Précédente.



Figure III. 3: Distribution des portées d'un pont simple construit par encorbellement.¹

Selon les données de notre ouvrage (Profil en long), on a choisi la répartition des travées (conception longitudinale) suivante :

Tableau III. 5: La Répartition des Travées de la Variante 3

La Longueur de Travée Principale	130 m
La Longueur de Travée De Rive	76 m
Nombre des Travée	6 Principales + 2 de Rives

⚠ **Commentaires :** La Longueur de 130m a été choisi d'une manière de s'adapter à la largeur de tablier qui est 16m. La justification de la longueur de travée de rive qui est 76m qui est hors de $(0,6 \text{ à } 0,7) L$, c'est que le guide déclare que : « Les travées de rive ont généralement une longueur supérieure à celle d'un demi-fléau ». ² Donc notre choix qui est 76m est justifié car la longueur d'un demi-fléau est 65m.

III.2.3.1.2. Le Choix d'une Hauteur Variable

Le guide SETRA stipule que : « Au-delà de 100 m de portée, les quantités de béton et de précontrainte augmentent rapidement et une solution de hauteur constante est de plus en plus pénalisée par rapport à une solution de hauteur variable ». ³

Donc, on a choisi une conception à hauteur variable, le guide recommande deux types de hauteur variable :

- 1- Parabolique
- 2- Selon d'autres lois (linéaires, cubique... etc.)

La variation cubique atténuée légèrement les effets du poids propre et confère une allure un peu plus tendue qu'une variation parabolique. Toutefois, elle peut entraîner des problèmes d'insuffisance de hauteur près du quart des travées, en raison d'une variation de hauteur inadaptée à la répartition des moments fléchissants et des efforts tranchants. Étant donné que notre projet, avec une largeur de 16 m transversalement, est soumis à des charges et surcharges très importantes, nous avons opté pour une variation parabolique.

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 28– Article 2.2.1.

2 . Même Référence Précédente – Page 28– Article 2.2.1.

3 . Même Référence Précédente – Page 30– Article 2.2.1.

III.2.3.1.3. Les Hauteurs des Voussoirs sur Pile et à la Clef.

Le guide présente des formules pour la hauteur de voussoir sur pile et à la clef sont les suivantes :

$$\frac{l}{h_p} = 14 + \frac{l}{45}$$

$$\frac{l}{h_c} = 19 + \frac{l}{7}$$

Avec l : la portée principale en mètres.

Mais ces deux formules sont applicables pour un tablier sur appuis simples, donc ne sont pas dédiées à notre cas, notre projet nécessite des piles élancées, donc elles sont encastées et non pas simplement appuyées.

Le guide donc stipule : « Dans les cas courants, la hauteur sur pile h est comprise entre 1/16 et 1/18 de la portée de la travée considérée. La hauteur à la clef est en général comprise entre le 1/30 et le 1/35 de cette même distance, avec un minima de 2,20 m permettant un cheminement aisé dans le caisson. »¹

➤ La Hauteur de voussoir sur Pile :

$$\frac{l}{18} \leq h_p \leq \frac{l}{16}$$

$$\frac{130}{18} \leq h_p \leq \frac{130}{16}$$

$$7,22m \leq h_p \leq 8,125m \quad \text{On Prend } h_p = 7,5m$$

➤ La Hauteur de voussoir à la clef :

$$\frac{l}{35} \leq h_c \leq \frac{l}{30}$$

$$\frac{130}{35} \leq h_c \leq \frac{130}{30}$$

$$3,71m \leq h_c \leq 4,33m \quad \text{On Prend } h_c = 4m$$

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 30– Article 2.2.2.2.

III.2.3.2. Conception Transversale :

La conception transversale de cette variante a été faite à l'aide du guide de conception SETRA [Ponts en béton précontraint construits par encorbellement successifs/2003].

Les dimensions transversales d'un caisson courant monocellulaire : ¹

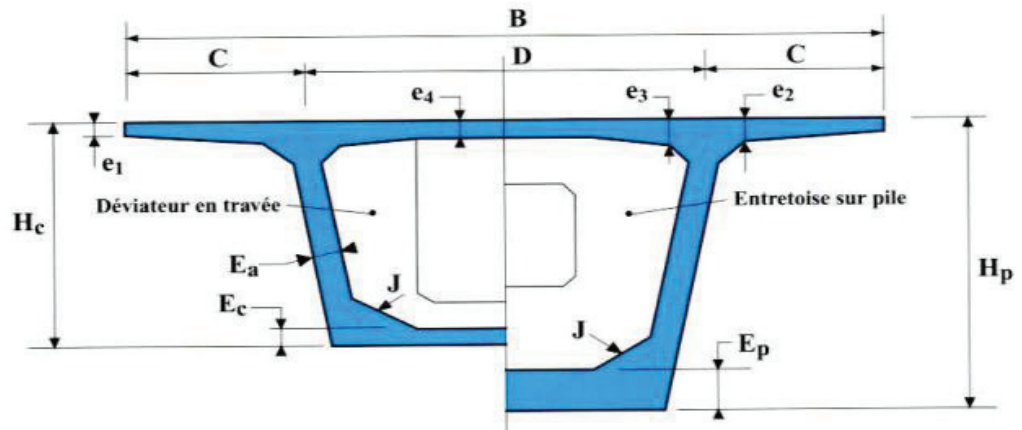


Figure III. 4: Les Dimensions Des Différents Eléments Constitutifs D'un Caisson Courant Monocellulaire

➤ Hourdis supérieurs :

$$C = \frac{B}{4} ; \text{ avec } B \text{ la largeur du caisson}$$

$$B = 16 \text{ m d'où } C = 4 \text{ m}$$

➤ Epaisseurs de l'hourdis supérieur :

- e_1 , dépend du dispositif de retenue choisis, dans notre cas on a choisi BN4 (Barrière Normale) d'où $e_1 = 24 \text{ cm}$
- e_2 , $1/7$ à $1/8$ de la largeur de l'encorbellement mesuré au début du gousset pour un hourdis en BA d'où $e_2 = 50 \text{ cm}$.
- $e_3 = 0.1 + D/25$; D : entraxe des âmes ($D = B - 2C = 8\text{m}$) ; on retient $e_3 = 42 \text{ cm}$

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 38– Article 1.3.

- $e_4 = \begin{cases} D/25 \text{ ou } D/30 \\ D/35 \text{ pour les caissons très larges précontraints transversalement, min}=20 \text{ cm} \end{cases}$

Ces épaisseurs doivent vérifiées les conditions suivantes :

- ✓ $e_2 - 0.1 < e_3$
- ✓ $e_3 > 1.5 e_4$

➤ **Hourdis inférieurs :**

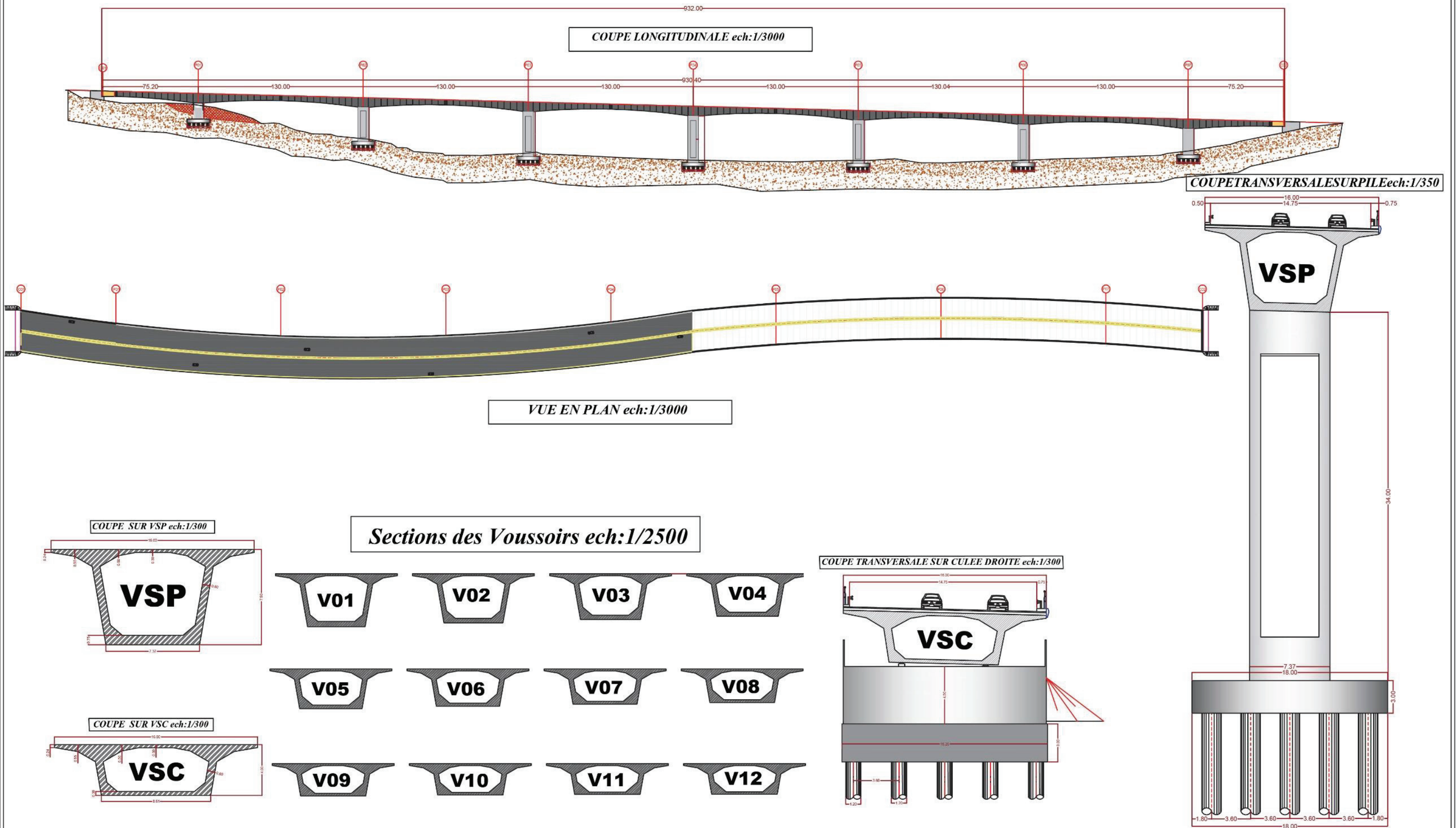
- **Épaisseur minimale à la clef :**
 E_c : de 18 cm à 22 cm.
- **Épaisseur minimale sur pile :**
 E_p : de 35 à 80 cm.

➤ **Les goussets :**

- Les goussets supérieurs : le contour des goussets est toujours rectiligne et présente un angle α sachant que $30^\circ < \alpha < 50^\circ$, et le contour extérieur est assez souvent circulaire.
- Les goussets inférieurs : $40^\circ < \beta < 50^\circ$

Tableau III. 6: Tableau Récapitulatif du Prédimensionnement de la troisième variante

Eléments		Valeur retenue (cm)
La largeur du voussoir B		1600
La hauteur des voussoirs	Hp	750
	Hc	400
La largeur de l'encorbellement		400
Entraxe des âmes		800
e1		24
e2		55
e3		50
e4		30
Epaisseur de l'âme		60
Inclinaison des âmes		10°
Gousset supérieur		30°
Gousset inférieur		45°
Epaisseur de l'hourdis inférieur	Ep	75
	Ec	30



III.3. ANALYSE MULTICRITERE DES VARIANTES :

Tableau III. 7: Analyse Multicritère Des Variantes

VARIANTE	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Variante 1 : Pont à poutres précontraintes du type VIPP.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Il ne requiert pas d'expérience particulière ni de main-d'œuvre de haute qualité. 2. Une utilisation efficace des coffrages pour une réutilisation optimale. 3. Expertise dans la préfabrication des poutres. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. L'augmentation du nombre d'appuis affecte à la fois l'esthétique et le cout global de la structure. 2. Leur méthode de construction n'est pas adaptée à notre terrain accidenté. 3. Des poutres très hautes peuvent entrainer un fluage à long terme.
Variante 2 : Pont Mixte Bipoutre.	<ol style="list-style-type: none"> 1. La capacité à enjamber de grandes portées. 2. La rapidité d'exécution. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La fatigue des assemblages et la corrosion de l'acier sont des phénomènes à prendre en compte. 2. Une main-d'œuvre qualifiée est particulièrement nécessaire pour les opérations de soudage. 3. Des coûts considérablement élevés. 4. Nécessité d'un entretien régulier.
Variante 3 : Pont voussoir en béton précontraint à section variable.	<ol style="list-style-type: none"> 1. La méthode de construction par encorbellements successifs offre la possibilité de traverser des rivières larges et des vallées très profondes ou accidentées. 2. La flexibilité de réalisation est favorisée par la capacité à accélérer la construction en augmentant le nombre de points de départ. 3. Ces ouvrages élancés présentent une qualité esthétique indéniable. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le poids revêt une importance capitale. 2. L'exécution requiert une main-d'œuvre qualifiée, en particulier pour la mise en tension des câbles de précontrainte. 3. Le processus est ralenti en raison du grand nombre de voussoirs, qui sont relativement courts par rapport à la longueur totale de l'ouvrage.

III.3.1.CONCLUSION :

Pour la continuité de ce mémoire, nous choisissons la variante qui présente le plus d'avantages avec le moins d'inconvénients dans tous les aspects de comparaison.

La variante bipoutre mixte pourrait être une solution appropriée pour ce franchissement, sauf si le délai d'approvisionnement des pièces métalliques pose un inconvénient majeur, bien que son coût puisse contredire ce choix, ainsi que l'esthétique de ce projet qui est stratégique.

La première option aurait également pu être plus rapide grâce à la maîtrise, mais elle demeure une solution théorique en raison de la difficulté d'accès au site et du nombre important d'appuis, qui fait un coût élevé.

Dans ce cas, **la construction par encorbellements successifs serait la plus appropriée**, compte tenu de la difficulté d'accès au site, on a choisi un type de voussoirs coulés sur place.

III.4. PROGRAMMATION D'UNE APPLICATION DE CONCEPTION TRANSVERSALE

III.4.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre décrit la conception et la programmation d'une application desktop de conception transversale des caissons en utilisant PyQt5 pour l'interface utilisateur graphique (GUI). Le logiciel suit les directives du guide SETRA 2003. Le code source présenté ci-dessous couvre l'initialisation de l'interface, la validation des entrées, les calculs nécessaires et l'affichage des résultats dans une fenêtre de dialogue.

III.4.2. PRESENTATION DE PROGRAMME :

La fenêtre principale de programme demande quelques données « inputs » à entrer par l'utilisateur :

Premièrement : La portée Principale en mètres :

Conception Transversale

ISMAIL Oussama
BOUDJIT Feriel

Entrez la portée principale [en m] OK

Entrez la hauteur de VSP [en m] Entrez la hauteur de VSC [en m]

Entrez la largeur du tablier [en m]

Cas de Garde Corps Cocher en cas des caissons très large précontraint transversalement
 Cas de Barrière Normale BN1 OUI
 Cas de Barrière Normale BN4

Concept !

Figure III. 5: Fenêtre Principale du Programme de Conception Transversale

La Valeur Entrée doit être un « float » ! c'est-à-dire un chiffre avec ou sans virgules, si l'utilisateur entre des caractères ou des lettres, rien ne s'affiche, grâce à une validation qu'on a ajouté à notre code.

Aussi, L'utilisateur doit entrer la valeur de la portée principale en premier lieu, sinon : il ne peut jamais remplir les autres champs, car l'intervalle des valeurs de Hauteur de VSP et VSC, dépendent de la valeur de la portée principale.

Figure III. 6: Démonstration de Message Affiché à l'Utilisateur

Après que l'utilisateur entre une valeur et clique sur le Button OK : des recommandations pour l'intervalle des valeurs de hauteur de VSP et VSC s'affichent, pour que l'utilisateur peut continuer à remplir les autres champs.

Figure III. 7: Les Recommandations des Valeurs de H_p et H_c

Dès que l'utilisateur remplit les champs et coche sur le choix de barrière et si le tablier est très large.

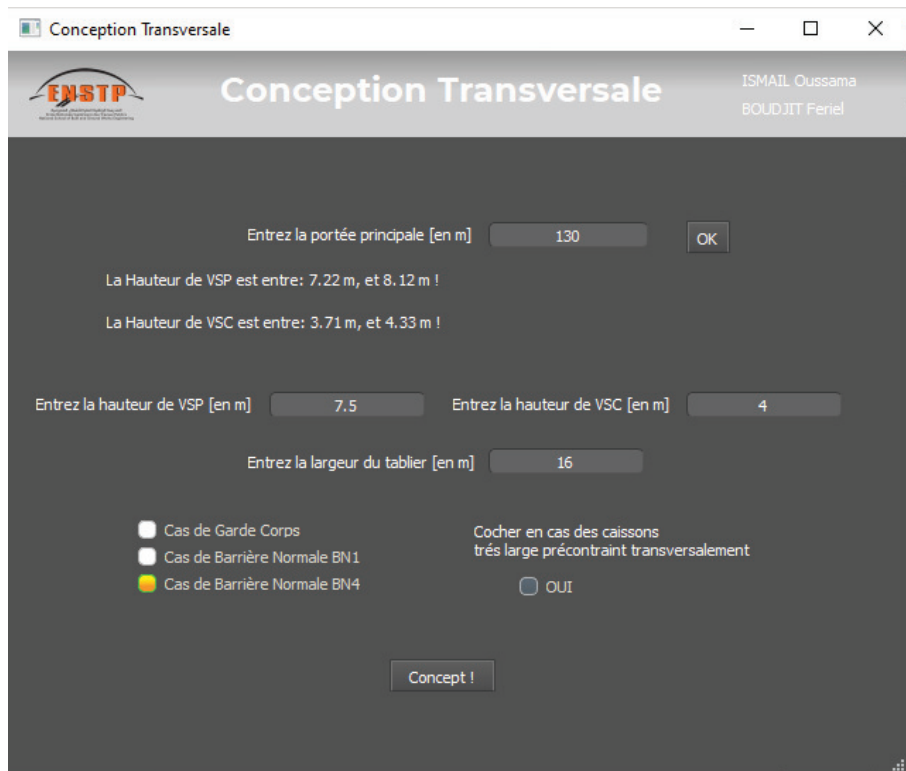


Figure III. 8: Remplissage des Données dans La Fenêtre Principale

L'Utilisateur peut cliquer sur le Button « Concept ! », et une autre fenêtre s'affiche qui contient les valeurs des dimensions transversales du caisson, ou des recommandations dans la colonne « NB » pour que l'utilisateur fait son choix dans l'intervalle recommandé par le guide SETRA 2003.

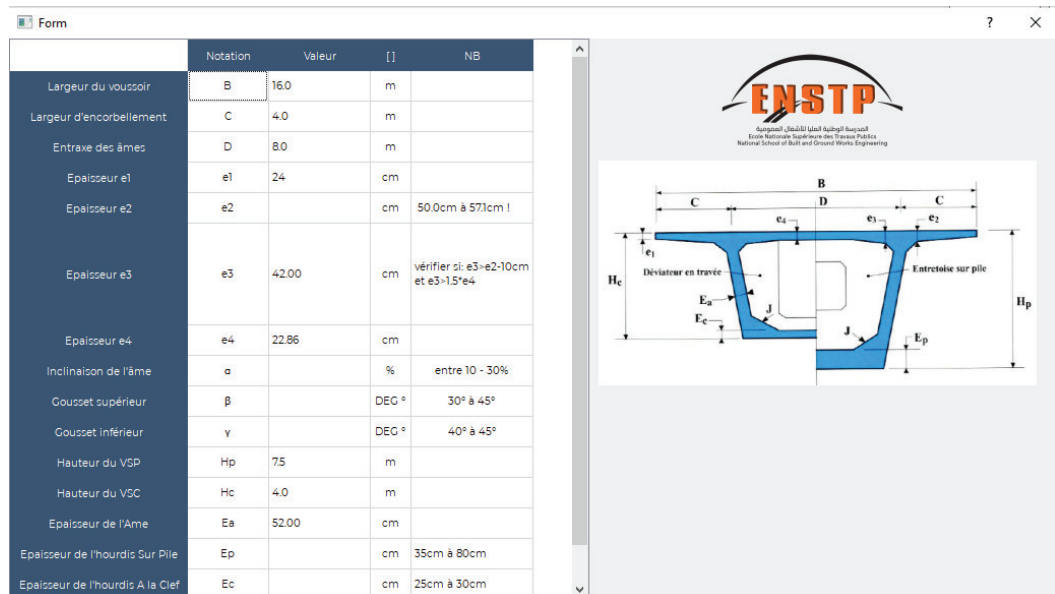


Figure III. 9: La Deuxième Fenêtre des Dimensions de la Section Transversale

III.4.3. LE CODE DE PROGRAMME EN PYTHON

Le code Python utilise le Framework PyQt5 pour créer une application de bureau avec une interface utilisateur graphique (GUI) permettant aux utilisateurs de saisir les dimensions des caissons et d'effectuer les calculs nécessaires selon le guide SETRA 2003. Voici une explication détaillée de chaque partie du code :

Importation des Modules

Le code commence par importer les modules nécessaires. `sys` est utilisé pour interagir avec l'environnement d'exécution du système. PyQt5 fournit les modules `QtWidgets`, `QtGui`, et `QtCore` pour créer des éléments d'interface graphique. Les modules `ResultconceptionT` et `conceptionT` contiennent les définitions de l'interface utilisateur générées par l'outil de conception Qt Designer.

```
import sys
from PyQt5 import QtWidgets, QtGui, QtCore
import ResultconceptionT
import conceptionT
from conceptionT import Ui_MainWindow
from ResultconceptionT import Ui_Form
```

On a développé le code des Interfaces Graphiques des deux fenêtres présentées précédemment en utilisant la bibliothèque PyQt5, et le « CSS » pour le design des éléments d'Interfaces.

Le Fichier `conceptionT.py` contient 356 lignes de programmation pour l'interface graphique de la fenêtre principale, les champs d'entrée (`QLineEdit`), les boutons (`QPushButton`), les textes (`QLabel`) les tableaux (`QTableWidgets`) et d'autres.

Le Fichier `ResultconceptionT.py` contient 606 lignes de programmation pour l'interface graphique de la deuxième fenêtre des résultats.

Initialisation de la Fenêtre Principale

La classe `MainWindow` hérite de `QMainWindow` et de `Ui_MainWindow` pour configurer l'interface utilisateur. Dans le constructeur (`__init__`), plusieurs actions sont effectuées :

- Validation des Entrées Numériques : Les champs de saisie (`inputSpan`, `inputHp`, `inputHc`, `inputB`) sont configurés pour accepter uniquement des valeurs numériques "float" grâce à `QDoubleValidator`.
- Alignement du Texte : Le texte dans les champs de saisie est centré.
- Connexions des Boutons : Les boutons sont reliés à leurs fonctions respectives à l'aide de `clicked.connect()`.
- Désactivation Initiale : Les champs `inputHp` et `inputHc` (les champs des hauteurs de VSP et VSC) sont désactivés au départ et des info-bulles sont ajoutées pour informer l'utilisateur.

```

class MainWindow(QMainWindow, Ui_MainWindow):
    def __init__(self):
        super(MainWindow, self).__init__()
        self.setupUi(self)

        self.inputSpan.setValidator(QtGui.QDoubleValidator())
        self.inputHp.setValidator(QtGui.QDoubleValidator())
        self.inputHc.setValidator(QtGui.QDoubleValidator())
        self.inputB.setValidator(QtGui.QDoubleValidator())

        self.inputSpan.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.inputHp.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.inputHc.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)
        self.inputB.setAlignment(QtCore.Qt.AlignCenter)

        self.conceptBTN.clicked.connect
        (self.perform_operations_and_open_window)
        self.OKbtn.clicked.connect(self.calculate_and_display)
        self.OKbtn.clicked.connect(self.on_ok_clicked)

        # Disable inputHp and inputHc initially
        self.inputHp.setEnabled(False)
        self.inputHc.setEnabled(False)

        # Set tooltip for disabled inputs
        self.inputHp.setToolTip("Cliquez sur OK!")
        self.inputHc.setToolTip("Cliquez sur OK!")

```

Méthodes de Gestion des Entrées

La fonction *on_ok_clicked* vérifie si la portée principale est entrée, sinon elle affiche un message d'avertissement. Si la portée est valide, les calculs sont effectués et les champs de saisie *inputHp* et *inputHc* sont activés par la fonction *enable_input_fields*.

```

def on_ok_clicked(self):
    input_span = self.inputSpan.text().strip()
    if not input_span:
        self.show_warning_message("Attention!", "Il faut
        Entrez la valeur de portée principale !")
    else:
        self.calculate_and_display()
        self.enable_input_fields()

def enable_input_fields(self):
    # Enable the input fields and clear the tooltips
    self.inputHp.setEnabled(True)
    self.inputHc.setEnabled(True)
    self.inputHp.setToolTip("")
    self.inputHc.setToolTip("")

```

Affichage des Messages d'Avertissement

La fonction *show_warning_message* affiche une boîte de dialogue avec un message d'avertissement personnalisé si l'utilisateur fait quelques choses faux !

```
def show_warning_message(self, title, message):
    # Show warning message window
    msg_box = QtWidgets.QMessageBox()
    msg_box.setWindowTitle(title)
    msg_box.setText(message)
    msg_box.setIcon(QtWidgets.QMessageBox.Warning)
    msg_box.setStyleSheet("QLabel{color: black;}
    QMessageBox{background-color: white;}")
    msg_box.exec_()
```

Calculs et Affichage des Résultats

La fonction *calculate_and_display* effectue les calculs nécessaires pour déterminer l'intervalle des valeurs pour les hauteurs des VSP et VSC en fonction de la portée principale (L_p). Les résultats sont affichés dans des étiquettes comme recommandations pour que l'utilisateur peut continuer à remplir les autres champs (*self.VSPproosal* et *self.VSCproposal*).

```
def calculate_and_display(self):
    # Get the input value
    input_SPAN = self.inputSpan.text()

    if input_SPAN: # Check if input is not empty
        Lp = float(input_SPAN)

        # Calculate Hp1 and Hp2 and Hc1 and Hc2
        Hp1 = Lp / 18
        Hp2 = Lp / 16
        Hc1 = Lp / 35
        Hc2 = Lp / 30

        # Prepare the output text
        output_text1 = f"La Hauteur de VSP est entre:
        {Hp1:.2f} m, et {Hp2:.2f} m !"
        output_text2 = f"La Hauteur de VSC est entre:
        {Hc1:.2f} m, et {Hc2:.2f} m !"

        # Set the text to the label
        self.VSPproosal.setText(output_text1)
        self.VSCproposal.setText(output_text2)
```

Méthode de Calcul et d'Affichage des Résultats

La méthode `perform_operations_and_open_window` effectue les étapes suivantes :

- Vérification des Champs : Vérifie que tous les champs de saisie (`inputHp`, `inputHc`, `inputB`) sont remplis et qu'une option de bouton radio est sélectionnée.
- Calculs : Effectue les calculs nécessaires pour les dimensions des caissons en utilisant les formules fournies. Les résultats des calculs incluent les dimensions et les épaisseurs observées.
- Ouverture de la Fenêtre de Résultats : Ouvre une nouvelle fenêtre (`ResultWindow`) pour afficher les résultats des calculs.

```
def perform_operations_and_open_window(self):
    # Check if all QLineEdit fields are filled
    if not (self.inputHp.text() and self.inputHc.text() and
self.inputB.text()):
# Display warning message if all QLineEdit fields are not
filled
        msg_box = QtWidgets.QMessageBox()
        msg_box.setWindowTitle("Erreur de saisie")
        msg_box.setText("Veuillez remplir tous les champs
avant de continuer.")
        msg_box.setIcon(QtWidgets.QMessageBox.Warning)
        msg_box.setStyleSheet("QLabel{color: black;}
QMessageBox{background-color: white;}")
        msg_box.exec_()
        return

    # Check if at least one QRadioButton is checked
    if not (self.RBTN1.isChecked() or self.RBTN2.isChecked()
or self.RBTN3.isChecked()):
# Display warning message if no QRadioButton is checked
        msg_box = QtWidgets.QMessageBox()
        msg_box.setWindowTitle("Erreur de saisie")
        msg_box.setText("Veuillez sélectionner une option
avant de continuer.")
        msg_box.setIcon(QtWidgets.QMessageBox.Warning)
        msg_box.setStyleSheet("QLabel{color: black;}
QMessageBox{background-color: white;}")
        msg_box.exec_()
        return

    # Read values from QLineEdit fields
    Lp=float(self.inputSpan.text())
    B = float(self.inputB.text())
    Hp = float(self.inputHp.text())
    Hc = float(self.inputHc.text())
```

```

# Perform calculations
C = B / 4
D = B - 2 * C

if Lp>70 and Lp<170:
    Ea= (Lp/500)+ 0.26
    Ea="{:.2f}".format(Ea*100)
else:
    Ea=(Lp/275) + 1.25*(B/Lp) - 0.125
    Ea = "{:.2f}".format(Ea*100)

Epobs= "35cm à 80cm"

e2i= (C/8)*100
e2j= (C/7)*100
e2obs= f" {e2i:.1f}cm à {e2j:.1f}cm !"

e4i= (D/25)*100
e4j=(D/30)*100
e4x= (D/35)*100
e4max=max(20 , e4x)
e4max = "{:.2f}".format(e4max)

e4=""
e4obs=""
if self.checkBox.isChecked():
    e4=e4max
    Ec_obs="25cm à 30cm"

else:
    e4obs = f" {e4i:.2f}cm ou {e4j:.2f}cm !"
    Ec_obs="18cm à 22cm"

e3= ((D/25) + 0.1)*100
e3="{:.2f}".format(e3)
e3obs="vérifier si: e3>e2-10cm et e3>1.5*e4"

# Initialize e1 and e1obs variables
e1 = ""
e1obs = ""

# Assign values based on the checked radio button
if self.RBTN1.isChecked():
    e1obs = "17cm à 18cm"
elif self.RBTN2.isChecked():
    e1 = 23
elif self.RBTN3.isChecked():
    e1 = 24

# Open the second window
self.result_window = ResultWindow(B, C, D, Hp, Hc, e1,
e1obs, e2obs, e3, e3obs, e4, e4obs, Ea,Epobs, Ec_obs)
self.result_window.show()

```

Classe pour la Fenêtre de Résultats

La classe *ResultWindow* hérite de *QDialog* et *Ui_Form*. Elle configure l'interface utilisateur de la fenêtre de résultats et utilise la méthode *populate_table* pour remplir un *QTableWidget* avec les résultats des calculs.

```
class ResultWindow(QWidgets.QDialog, Ui_Form):
    def __init__(self, B, C, D, Hp, Hc, e1, elobs, e2obs, e3,
e3obs, e4, e4obs, Ea, Epobs, Ec_obs):
        super(ResultWindow, self).__init__()

        self.setupUi(self)
        self.tableWidget.setColumnWidth(0, 80)
        self.tableWidget.setColumnWidth(2, 40)
        self.tableWidget.setColumnWidth(3, 120)
        self.tableWidget.setRowHeight(5, 100)
        #Populate the QTableWidget with the values of B, C, and D
        self.populate_table(B, C, D, Hp, Hc, e1, elobs, e2obs,
e3, e3obs, e4, e4obs, Ea, Epobs, Ec_obs)

    def populate_table(self, B, C, D, Hp, Hc, e1, elobs,
e2obs, e3, e3obs, e4, e4obs, Ea, Epobs, Ec_obs):
        self.tableWidget.setItem(0, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(B)))
        self.tableWidget.setItem(1, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(C)))
        self.tableWidget.setItem(2, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(D)))
        self.tableWidget.setItem(3, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(e1)))
        self.tableWidget.setItem(3, 3,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(elobs)))
        self.tableWidget.setItem(4, 3,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(e2obs)))
        self.tableWidget.setItem(5, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(e3)))
        self.tableWidget.setItem(5, 3,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(e3obs)))
        self.tableWidget.setItem(6, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(e4)))
        self.tableWidget.setItem(6, 3,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(e4obs)))
        self.tableWidget.setItem(10, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(Hp)))
        self.tableWidget.setItem(11, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(Hc)))
        self.tableWidget.setItem(12, 1,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(Ea)))
        self.tableWidget.setItem(13, 3,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(Epobs)))
        self.tableWidget.setItem(14, 3,
QWidgets.QTableWidgetItem(str(Ec_obs)))
```

Fonction Principale

La fonction `main` initialise l'application, crée une instance de `MainWindow` et lance la boucle principale de l'application avec `app.exec_()`. Cela permet de démarrer l'interface utilisateur graphique et de gérer les interactions utilisateur.

Conclusion

Ce chapitre a détaillé le code en Python pour la création d'une application desktop de conception transversale des caissons selon le guide SETRA 2003. Le logiciel permet de saisir les dimensions des caissons, d'effectuer les calculs nécessaires et d'afficher les résultats dans une interface utilisateur graphique conviviale. Le code utilise PyQt5 pour gérer l'interface utilisateur et effectue les calculs conformément aux spécifications du guide SETRA 2003.

III.5. HYPOTHESES DE CALCUL

III.5.1. NORMES ET REGLES DE CALCUL

- ✓ **Règles B.A.E.L 91 Modifiées 99** : Règles Techniques De Conception Et De Calcul Des Ouvrages Et Constructions En Béton Armé, Suivant La Méthode Des Etats Limites.
- ✓ **Règles B.P.E.L. 91 Modifié 99**: Règles Techniques De Conception Et De Calcul Des Ouvrages Et Constructions En Béton Précontraint, Suivant La Méthode Des Etats Limites.
- ✓ **RCPR 2010** : Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour Le Calcul Et Les Epreuves Des Ponts Routes.
- ✓ **RPOA 2008**: Règles Parasismiques Applicables Au Domaine Des Ouvrages D'art.
- ✓ **Fascicule 61 – Titre II du CPC** : « Programme De Charges et Epreuves Des Ponts-Routes » (Edition 1971).
- ✓ **Documents et Guides SETRA** : « Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes ».

III.5.2. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX :

Le choix des matériaux de construction revêt une importance capitale dans la conception d'un pont, car il impacte significativement sur ses dimensions. Dans ce cadre, nous examinons les caractéristiques du béton ainsi que celles des aciers actifs et passifs employés dans la construction de la structure.

Tableau III. 8: Les Caractéristiques du Béton

Elément structurel	Formule	Valeur retenue (MPa)		
		Superstructure	Infrastructure	
La résistance caractéristique à la compression	$f_{c_j} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} \times f_{c28}$	40	35	
La résistance caractéristique à la traction	$f_{t_j} = 0,6 + 0,06 \times f_{c28}$	3	2.7	
La contrainte admissible de compression (ELU)	$f_{bu} = \frac{0,85 * f_{c_j}}{\theta * \gamma_b}$	$\gamma_b = 1.15$	29.56	25.87
		$\gamma_b = 1.5$	22.67	19.83
La contrainte admissible de compression (ELS)	$f_{bc} = 0.6 \times f_{c28} (MP)$	24	21	
Module d'Young instantané	$E_{ij} = 11000 \times \sqrt[3]{f_{c_j}}$	37 600	34 200	
Module d'Young long-terme	$E_{vj} = 3700 \times \sqrt[3]{f_{c_j}}$	12 600	11 500	
Déformation transversale du béton	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	14461.50	13153.85	
Coefficient de poisson	/	0.3 [sans dimension]		

III.5.3. LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ARMATURES :

➤ Les Aciers Passifs :

Les armatures passives correspondent à celles utilisées dans le béton armé, mais elles ne sont sollicitées que lorsque les forces extérieures agissent sur elles.

Tableau III. 9: Les Caractéristiques des Armatures Passives

CARACTERISTIQUE		FORMULE		VALEUR RETENUE
Nuance des barres		/		FeE500
Diamètre Φ (mm)		/		8 à 40 mm
Limite élastique		/		500
Module de Young		/		200 GPa
Contrainte limite de traction des aciers	F.peu nuisible	$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s}$	S-Durable ou transitoire : $\gamma_s = 1.15$	434.78
			S-Accidentelle : $\gamma_s = 1$	500
	F.préjudiciable	$\sigma_s = \{0.5 \times f_e ; 110\sqrt{n * ftj} ; n=1.6\}$		250
	F.très préjudiciable	$\sigma_s = \{0.4 \times f_e ; 88\sqrt{n * ftj} ; n=1.6\}$		200

➤ Les Aciers Actifs :

Les armatures actives, fabriquées en acier à haute résistance, sont spécifiquement employées dans les structures en béton précontraint. Contrairement aux armatures passives, les armatures actives de précontrainte demeurent sous tension même en l'absence de forces externes. Elles sont généralement classées en différentes catégories telles que les fils, les barres et les torons. Les caractéristiques des armatures à prendre en compte dans le calcul sont mentionnées dans le tableau qui se suit :

Tableau III. 10: Les Caractéristiques des Armatures Actives

Caractéristique	Valeur
Type De Toron (T)	T15s
Diamètre De La Gaine Φ (mm)	15.7
Section D'un Toron A_p (mm ²)	150 mm²
Nombre De Toron Par Câble (Nt)	19
Section De Câble S (mm ²)	2850
Résistance Ultime F_{prg} (Mpa)	1860
Limite Elastique F_{peg} (Mpa)	1674
Contrainte A L'origine σ_{p0} (Mpa)	1488
Coefficient De Frottement Droit Φ (m-1)	0.002
Coefficient De Frottement De Courbure $F(Rd-1)$	0.18
Module D'élasticité E_p (Mpa)	190 000
Coefficient De Relaxation Maximal Des Câbles A 1000 h	2.5

Classe de justification de la précontrainte :

La classe II demeure la classe la plus utilisée, elle supporte les contraintes de traction dans le béton sans provoquer de fissures.

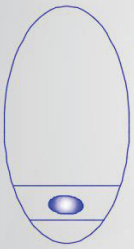
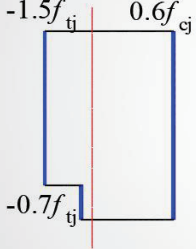
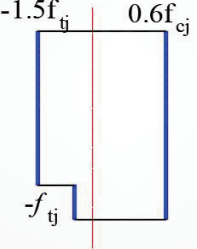
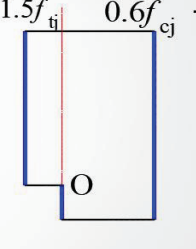
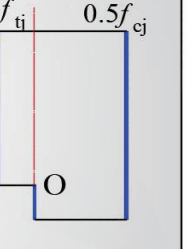
Classe	Exécution	Service		
		Rares	Fréquente	Quasi perm
<p><u>Classe II</u></p> 				

Figure III. 10: Classes de Justification de la Précontrainte



CHAPITRE IV

EVALUATION DES CHARGES ET

SURCHARGES



CHAPITRE IV : EVALUATION DES CHARGES ET SURCHARGES

IV.1. INTRODUCTION

L'ouvrage doit résister, tant en phase de service qu'en phase de construction, aux différentes actions appliquées, telles que les charges de la superstructure, les surcharges routières et exceptionnelles, les surcharges des trottoirs, ainsi que le propre poids de la superstructure. Nous analyserons dans ce chapitre les différentes charges et surcharges appliquées sur l'ouvrage. En utilisant le document technique RCPR.

Puisque notre projet s'agit de deux tabliers parallèles des mêmes longueur et courbure, notre étude se concentrera sur un seul tablier, car l'étude est plus ou moins similaire pour les deux ponts côte à côte.

IV.2. LES ACTIONS PERMANENTES (G) :

IV.2.1. Charges Permanentes CP

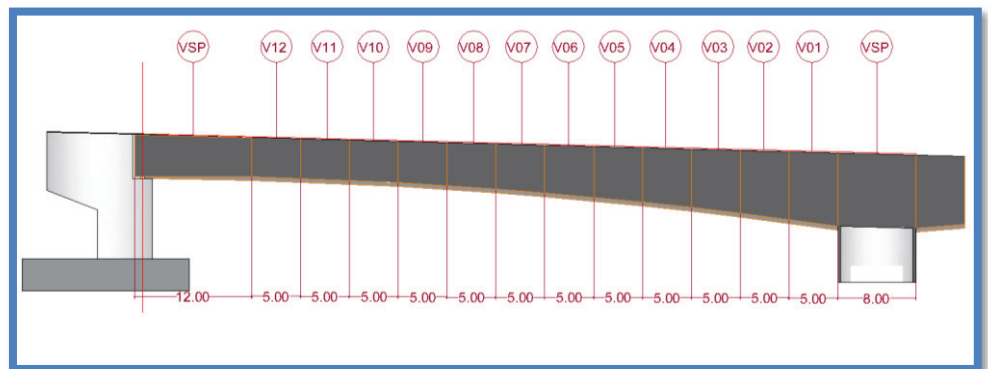


Figure IV. 1: Numérotation des Voussoirs

Tableau IV. 1: Estimation Du Poids Total De Tablier.

Vousoir	S _{moy} (m ²)	L _v (m)	V (m ³)	Poids (KN)
VSP	22.92	8	183.36	4584
V01	22.03	5	110.15	2753.75
V02	20.95	5	104.75	2618.75
V03	19.42	5	97.1	2427.5
V04	18.58	5	92.9	2322.5
V05	17.35	5	86.75	2168.75
V06	16.44	5	82.2	2055
V07	16.04	5	80.2	2005
V08	15.41	5	77.05	1926.25
V09	15.06	5	75.3	1882.5
V10	15.03	5	75.15	1878.75
V11	14.94	5	74.7	1867.5
V12	14.41	5	72.05	1801.25
VSC	14.41	2	28.82	720.5
VC	14.41	10	144.1	3602.5
Poids d'un demi VSP			2292 [KN]	
Poids d'un demi-fléau			27999.5 [KN]	
Poids des Clavages			5764 [KN]	
Poids des VC			7205 [KN]	
Poids du Tablier			404962 [KN]	

IV.2.2. Les compléments de charges permanentes CCP :

Tableau IV. 2: Estimation du poids du aux CCP

Elément	Densité(KN/m ³)	Section (m ²)	Poids(KN/ml)	Poids(KN)
Revêtement	24	1.28	30.72	28631.04
Trottoirs	25	0.3	7.5	6990
Corniches	25	0.1047	2.6175	2439.51
Garde-corps	/	/	0.35	326.2
Barrières BN4	/	/	1.3	1211.6

IV.2.3. Le Poids Total du Tablier

Tableau IV. 3: Poids Total du Tablier

Poids Total	
G_{CP} (KN)	404 962
G_{CCP} (KN)	39 598.35
G_{TOT}(KN)	444 560.35

IV.3. SURCHARGES ROUTIERES

IV.3.1. Système De Charge A Considérer :

Les charges qui vont être définies par la suite dans ce paragraphe s'appliquent aux ponts routiers qui soutiennent une ou plusieurs voies de circulation. Le CCTP détermine les méthodes de calcul ainsi que les caractéristiques des véhicules à prendre en compte qui sont :¹

- Système de charge A(l)
- Système de charge B (B_c , B_t , B_r)
- Système de charge militaire M_c 120
- Convoi exceptionnel D240
- Surcharges sur trottoirs S_t

IV.3.2. La Largeur Roulable et La Largeur Chargeable : 2

La largeur roulable est définie comme la largeur comprise entre dispositifs de retenue ou bordures : elle comprend donc outre la chaussée proprement dite toutes les surlargeurs éventuelles, telles que bande dérasée, bande d'arrêt, etc. Dans le cas où l'on prévoit un élargissement futur de la chaussée, il y a lieu de considérer celle-ci dans son état définitif (Voir la figure IV.2).

La largeur chargeable se déduit de la largeur roulable :

- ✓ En enlevant une bande de 0,50 m le long de chaque dispositif de retenue (glissière ou barrière) lorsqu'il en existe,
- ✓ En conservant cette même largeur roulable dans le cas contraire.

Si une chaussée est encadrée par deux bordures, la largeur chargeable est confondue avec la largeur roulable ; si elle est bordée d'un côté par un dispositif de retenue, de l'autre par une bordure, c'est une bande de 0,50 m qui doit être enlevée (voir figure IV.2³).

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 17.

2 . Référence Précédente – Page 17.

3 . Référence Précédente – Page 18

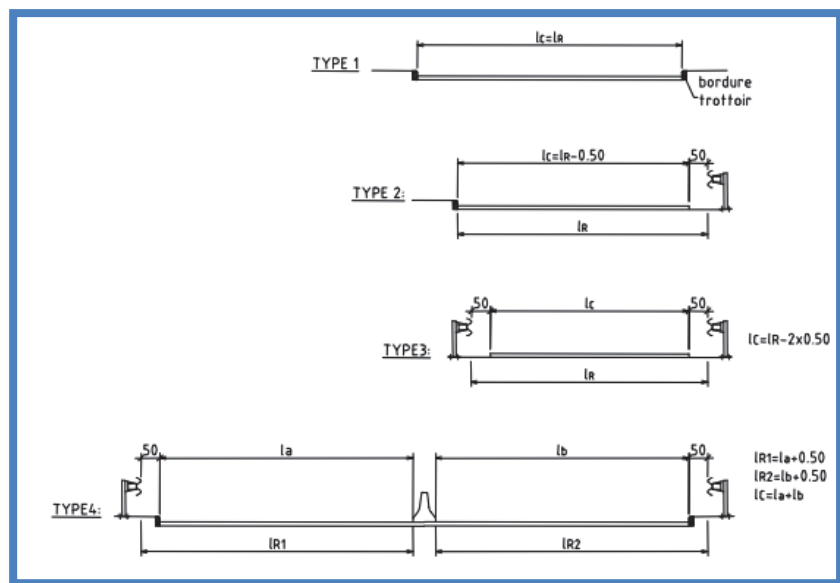


Figure IV. 2: Largeur Roulable et Largeur Chargeable.

Dans notre cas :

- La Largeur Roulable :

$$L_r = 16 - (1 + 0.5)$$

$$L_r = 14.5 \text{ m}$$

- La Largeur Chargeable :

$$L_C = L_r - 0.5 \times 2$$

$$L_C = 13.5 \text{ m}$$

- **Classe du pont** : Selon RCPR : les ponts routes sont rangés en trois classes selon l'importance de l'itinéraire et la largeur roulable.¹

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 18 - 19.

Tableau IV. 4: Les Différentes Classes des Ponts

Classe du Pont	Description
1 ère classe	Les ponts qui ont une largeur roulable $L_r \geq 7m$
	Les ponts supportant des bretelles d'accès à de telles chaussées
	Tous les ponts urbains ou en zone industrielle
	Les ponts de largeur roulable inférieure à 7 m, qui sont désignés par le CCP
2 ème classe	Les ponts qui ont une largeur roulable $5.5 m < L_r < 7m$
3 ème classe	Les ponts qui ont une largeur roulable $L_r \leq 5.5 m$

Dans notre ouvrage : la largeur roulable est de 14.5 m, donc il s'agit d'un pont de classe 1.

IV.3.3. Nombre de Voies et Largeur de Voie : ¹

Nombre de voies : par convention, le nombre de voies de circulation sur les chaussées est déterminé en prenant la partie entière du résultat de la division de leur largeur chargeable, exprimée en mètres, par 3.

$$N = \left[\frac{Lc}{3} \right]$$

$$N = \left[\frac{13.5}{3} \right]$$

$$N = 4 \text{ m}$$

Largeur de la chaussée : par convention, les voies de circulation sur une même chaussée ont des largeurs égales au quotient de la largeur chargeable par le nombre de voies.

$$V = \frac{Lc}{N}$$

$$V = \frac{13.5}{4}$$

$$V = 3.375 \text{ m}$$

¹ . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 18.

IV.3.4. Système de Charge A :

Pour les ponts comportant des portées unitaires atteignant au plus 200 m, la chaussée supporte une charge uniforme dont l'intensité est égale au produit de la valeur $A(l)$ donnée ci-après par les coefficients résultants de l'application du Tableau IV.4. ¹

La charge $A(l)$, exprimée en kilonewton par mètre carré (kN/m^2) est donnée en fonction de la longueur chargée, l , exprimée en mètres par la formule : ²

$$A(l) = 2,30 + \frac{360}{l + 12}$$

En fonction de la classe du pont et du nombre de voies chargées, la valeur de $A(l)$ est multipliée par les coefficients a_1 du tableau IV.5: ³

Tableau IV. 5: Coefficient a_1 Selon RCPR

Nombre de voies		1	2	3	4	>5
Classe de Pont	Première	1	1	0,9	0,75	0,7
	Deuxième	1	0,9	-	-	-
	Troisième	0,9	0,8	-	-	-

Lorsque la valeur de la charge répartie, trouvée après application des coefficients ci-dessus, est inférieure à $(4 - 0,002 l) \text{ kN/m}^2$, expression dans laquelle la longueur chargée « l » est exprimée en mètres, c'est cette dernière valeur qui doit être prise en compte. ⁴

La charge A_1 est obtenue par : ⁵

$$A_1 = \max\left\{ \begin{array}{l} a_1 A(l) \\ 4 - 0,002l \end{array} \right.$$

Pour obtenir la charge finale $A_2(l)$, le système $A_1(l)$ est multiplié par le coefficient a_2 décrit par : $a_2 = \frac{v_0}{v}$. ⁶

- v étant la largeur d'une seule voie.
- v_0 ayant les valeurs données par le tableau IV.6

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 19

2 . Même Référence Précédente.

3 . Même Référence Précédente.

4 . Référence Précédente - Page 20.

5 . Même Référence Précédente.

6 . Même Référence Précédente.

Tableau IV. 6: Coefficient v_0 Selon RCPR

Classe de Pont	v_0
Première	3,5 m
Deuxième	3,0 m
Troisième	2,75 m

➤ **Pour Notre Cas**

- Classe de Pont : Première Classe.
- Le Nombre de Voies = 4 voies.

Donc : en cas de 4 voies chargées :

$$a_1 = 0,75$$

- Classe de Pont : Première Classe.
- La valeur $v_0 = 3,5$ m
- La Largeur de la voie $v = 3,375$ m

Donc :

$$a_2 = 1,037$$

➤ **Cas de Chargement :**

Les figures IV.3 et IV.4 ci-dessous présente les différents cas de placement des surcharges sur notre tablier voussiers :

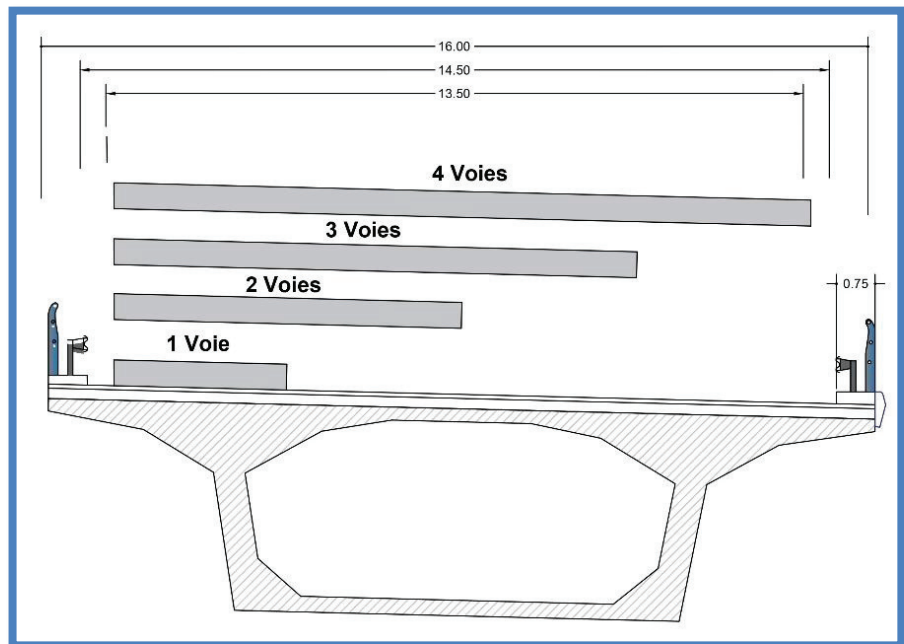


Figure IV. 3: Chargement des Voies A(I).

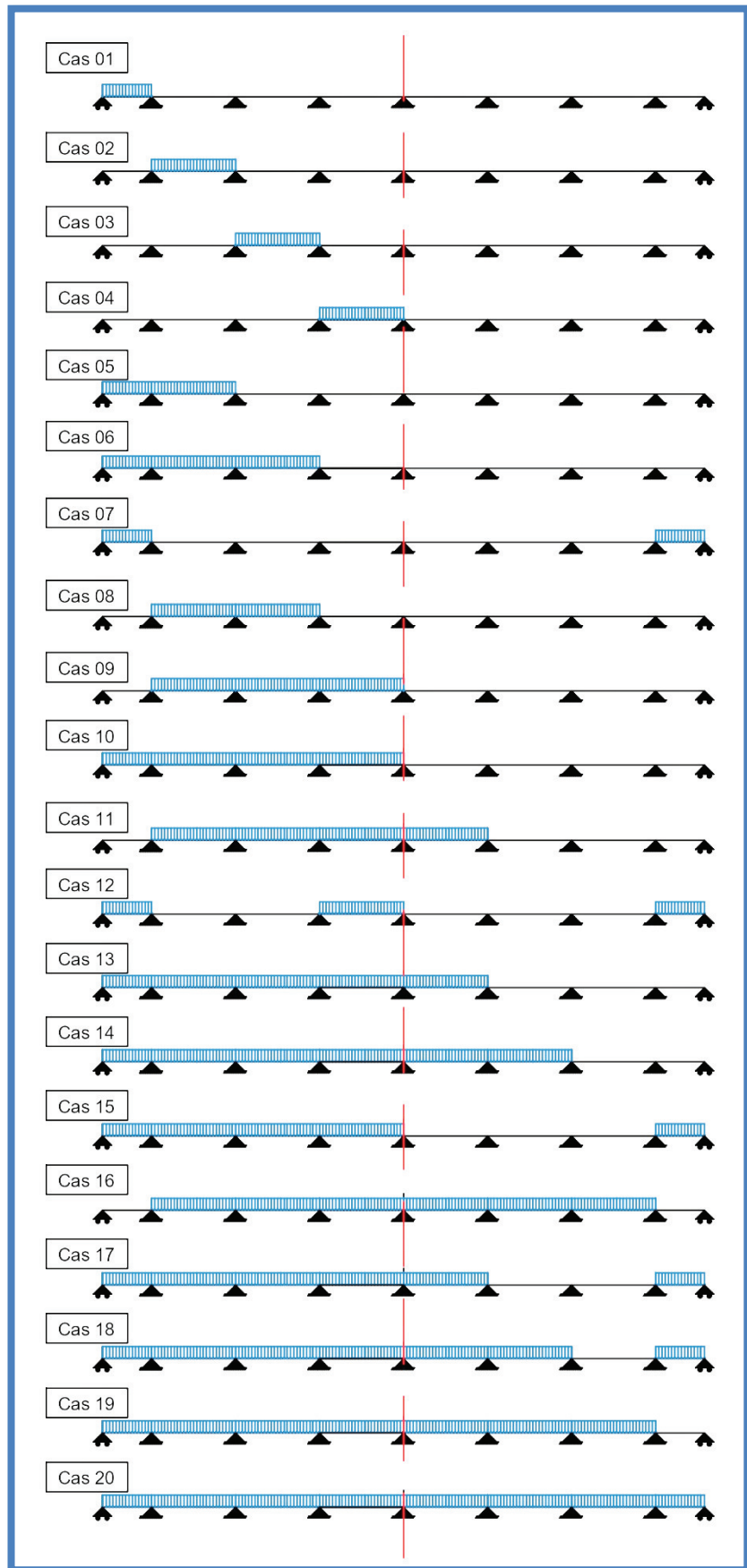


Figure IV. 4: Cas de Chargement Longitudinalement

➤ Résultats de charge A(l) :

Tableau IV. 7: Valeurs de A(L) sur le Tablier

Cas de Chargement	l [m]	A(L) [KN/m ²]	A ₂ [KN/m ²]	a ₁ x a ₂ x A(l) [KN/ml]			
			a ₁ x a ₂ x A(l)	1 voie	2 voies	3 voies	4 voies
Cas 1	76.00	6.391	4.97	16.78	33.55	50.33	67.10
Cas 2	130.00	4.835	3.76	12.69	25.38	38.08	50.77
Cas 3	130.00	4.835	3.76	12.69	25.38	38.08	50.77
Cas 4	130.00	4.835	3.76	12.69	25.38	38.08	50.77
Cas 5	206.00	3.951	3.07	10.37	20.74	31.12	41.49
Cas 6	336.00	3.334	2.59	8.75	17.51	26.26	35.01
Cas 7	152.00	4.495	3.50	11.80	23.60	35.40	47.20
Cas 8	260.00	3.624	2.82	9.51	19.02	28.54	38.05
Cas 9	390.00	3.196	2.49	8.39	16.78	25.16	33.55
Cas 10	466.00	3.053	2.37	8.01	16.03	24.04	32.06
Cas 11	520.00	2.977	2.32	7.81	15.63	23.44	31.26
Cas 12	282.00	3.524	2.74	9.25	18.50	27.76	37.01
Cas 13	596.00	2.892	2.25	7.59	15.18	22.78	30.37
Cas 14	726.00	2.788	2.17	7.32	14.64	21.95	29.27
Cas 15	542.00	2.950	2.29	7.74	15.49	23.23	30.97
Cas 16	780.00	2.755	2.14	7.23	14.46	21.69	28.92
Cas 17	672.00	2.826	2.20	7.42	14.84	22.26	29.68
Cas 18	802.00	2.742	2.13	7.20	14.40	21.60	28.79
Cas 19	726.00	2.788	2.17	7.32	14.64	21.95	29.27
Cas 20	932.00	2.681	2.09	7.04	14.08	21.12	28.15

IV.3.5. Système de charge B :

Le système de charges B comprend trois systèmes distincts dont il y a lieu d'examiner indépendamment les effets pour chaque élément des ponts :

- ✓ Le système B_c se compose de camions types (300 KN).
- ✓ Le système B_r se compose d'une roue isolée (100KN).
- ✓ Le système B_t se compose de groupes de deux essieux dénommés essieux tandems.

Les deux premiers systèmes B_c et B_r, s'appliquent à tous les ponts quelle que soit leur classe, le système B_t ne s'applique qu'aux ponts de première ou de deuxième classe. ¹

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 21.

IV.3.5.1. Système de charge B_c :

Un camion de type B_c comporte 3 essieux, tous à roue simple munies de pneumatiques et qui répond aux caractéristiques présentées ci-après (Voir Tableau IV.8 et Figure IV.5) ¹

Tableau IV. 8: Caractéristique de Système B_c

Caractéristiques	Valeur
Charge totale	300 KN
Charge portée par chacune des essieux arrière	120 KN
Charge portée par l'essieu avant	60 KN
Longueur de l'encombrement	10.5 m
Largeur d'encombrement	2.5 m
Distance des essieux arrière	1.5 m
Distance de l'essieu avant au premier essieu arrière	4.5 m
Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu	2 m
Surface d'impact d'une roue arrière	0.25x0.25 m ²
Surface d'impact d'une roue avant	0.20x0.20 m ²

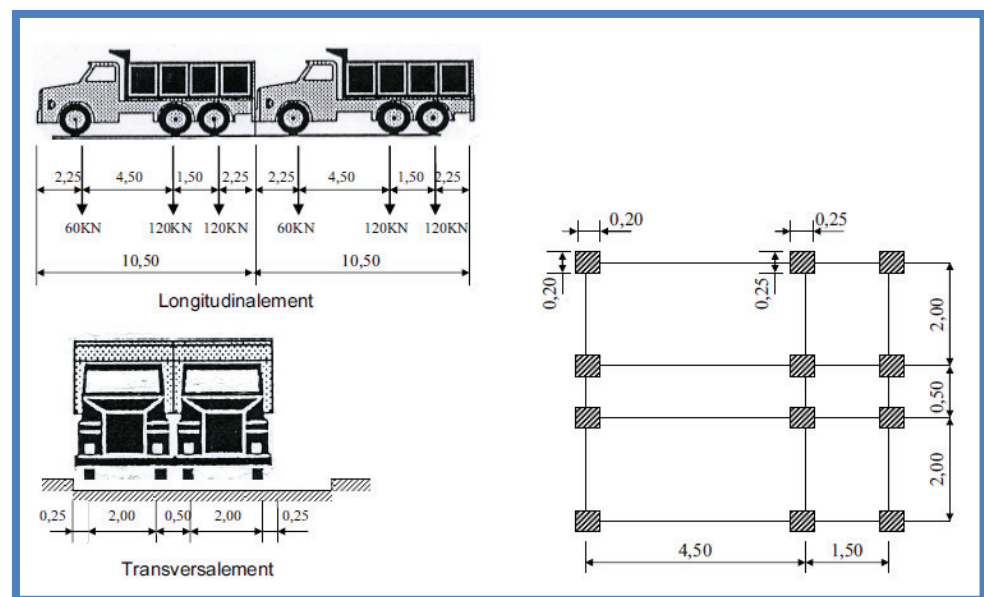


Figure IV. 5: Système B_c.

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 20 - 21.

Selon le RCPR, le nombre de files ou de convois de camions sur la chaussée ne dépasse pas le nombre de voies de circulation, et ils sont toujours positionnés dans la configuration la plus défavorable pour l'élément en question.

Le RCPR note qu'il convient naturellement de disposer moins de files que de voies de circulation si cela est plus défavorable, mais on ne doit pas disposer plus de files que de voies, même si cela est géométriquement possible. ¹

Donc on va charger que 4 files au maximum, car on a 4 voies, même si on peut charger plus de 4 files géométriquement. La formule de calcul est définie donc par :

$$B_c = 2 \times (300 \times N \times b_c)$$

Soit :

- N : le nombre de voies prises dans le calcul (4 voies).
- La valeur de **300** est en KN, c'est le poids d'un seul camion.
- La Multiplication par **2** c'est pour le cas de chargement longitudinal : deux camions.
- Le coefficient b_c dans notre cas égal à 0.8 (voir ci-dessous).

Le RCPR note qu'en fonction de la classe du pont et du nombre de files considérées, les valeurs des charges du système B_c prises en compte sont multipliées par les coefficients b_c (Voir Tableau IV.9). ²

Tableau IV. 9: Valeur du Coefficient b_c . ³

Classe Du Pont	Nombre De Voies Chargées				
	1	2	3	4	≥ 5
I	1.20	1.10	0.95	0.8	0.7
II	1.00	1.00	-	-	-
III	1.00	0.80	-	-	-

➤ Dans notre cas, les valeurs à prendre en compte sont :

Tableau IV. 10: Les Valeurs de Chargement B_c .

N° des voies	b_c	$B_c = 2 \times (300 \times N \times b_c)$ [KN]
1	1.2	720
2	1.1	1320
3	0.95	1710
4	0.8	1920

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 22.

2 . Même Référence Précédente.

3 . Référence Précédente – Page 23.

IV.3.5.2. Système de charge Br :

Le système Br se compose d'une roue isolée qui supporte une charge de 100 KN. La surface de contact entre la roue et la chaussée est rectangulaire et uniformément chargée, avec des dimensions de 0,6 millimètres de largeur et 0,3 millimètres de longueur. Cette zone peut être positionnée à n'importe quel emplacement sur la largeur de la chaussée afin de déterminer l'effet le plus critique. La configuration est représentée dans la figure suivante : ¹

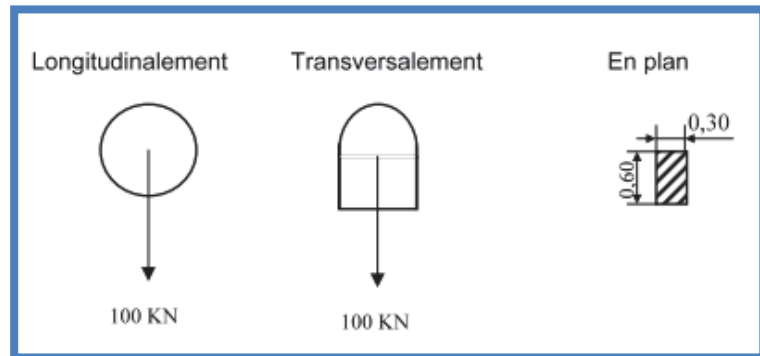


Figure IV. 6: Système Br.

IV.3.5.3. Système de charge Bt :

Le système Bt est constitué d'un tandem comprenant deux essieux, chacun équipé de deux roues simples munies de pneumatiques, avec les spécifications suivantes : ²

Tableau IV. 11: Caractéristiques de Système Bt. ³

Caractéristiques	Valeur
Charge supportée par chaque essieu	160 KN
Distance entre les deux essieux	1.35 m
Distance entre les axes des deux roues d'un même essieu	2 m

Chaque roue applique une pression uniforme sur la route, avec une zone d'impact rectangulaire de dimensions 0,6 millimètres de largeur et 0,25 millimètres de longueur. ⁴

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 23.

2 . Référence Précédente Page 24.

3 . Même Référence Précédente.

4 . Même Référence Précédente.

Lorsque deux roues sont alignées côte à côte, également appelées en tandem, elles doivent se déplacer le long d'une bande longitudinale de trois (03) millimètres de largeur. Cette configuration est expliquée dans l'illustration qui suit (Figure IV.7).¹

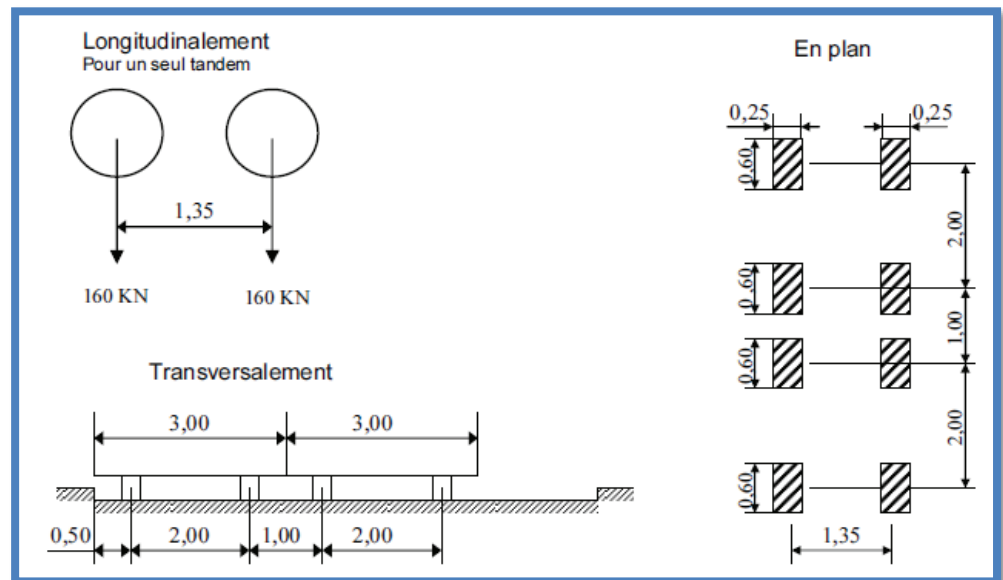


Figure IV. 7: Système de charge Bt.

La formule de calcul est définie par :

$$B_t = 2 \times (160 \times N \times b_t)$$

Soit :

- N : le nombre de voies prises dans le calcul (4 voies).
- La valeur de **160** est en KN, c'est le poids d'un seul essieu.
- La Multiplication par **2** c'est car un tandem se compose de deux essieux.
- Le coefficient b_t dans notre cas égal à 1.2 (voir ci-dessous).

Tableau IV. 12: Valeurs du Coefficient b_t ²

Classe Du Pont	b_t
I	1.2
II	1

Remarque :

- Longitudinalement, un seul tandem est disposé.
- Transversalement, si le pont ne comporte qu'une seule voie, on disposera d'un seul tandem, si le pont comporte 2 voies et plus, le nombre maximal de tandems disposés transversalement est de 2. Ils peuvent être contigus ou séparer pour produire l'effet le plus défavorable.

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 24.

2 . Même Référence Précédente.

➤ Dans notre cas, les valeurs à prendre en compte sont :

Tableau IV. 13: Valeurs de B_t .

Nombre de voies	B_t [KN]	b_t	$B_t \times b_t$ [KN]
1	320	1.2	384
2-3-4	640	1.2	768

IV.4. CHARGES MILITAIRES (CONVOIS MC120) : ¹

Un véhicule standard du système Mc_{120} est équipé de deux chenilles et présente les spécifications suivantes :

Tableau IV. 14: Caractéristiques de Système Mc_{120}

Caractéristiques	Valeur
Poids total	1100 KN
Distance entre les deux essieux	6.10 m
Largeur d'une chenille	1 m
Espacement entre les axes des deux chenilles	3.30 m

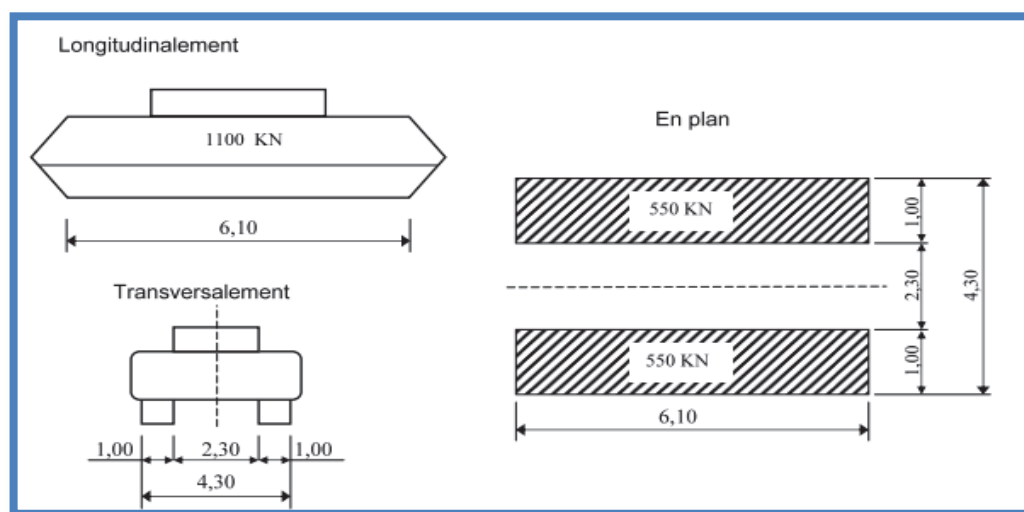


Figure IV. 8: Système de charge Mc_{120}

¹ . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 29 – Article 4.10.1.2.

IV.5. CHARGES EXCEPTIONNELLES (D240) : ¹

Le convoi type D240 comporte une remorque de trois éléments de quatre lignes à deux essieux de 2400 kilonewtons de poids total. Ce poids est supposé réparti au niveau de la chaussée sur un rectangle uniformément chargé de 3,20m de large et de 18,60m de long.

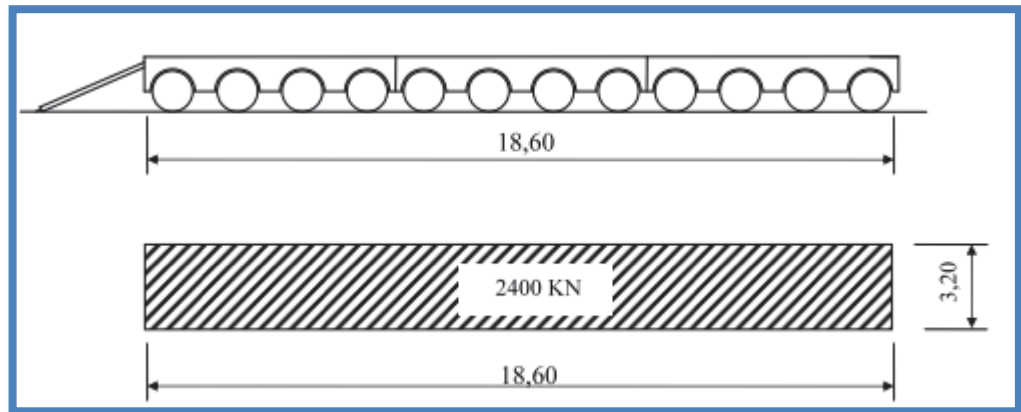


Figure IV. 9: Système de charge D240.

IV.6. COEFFICIENT DE MAJORATION DYNAMIQUE : ²

Le coefficient de majoration dynamique, noté δ , est utilisé pour majorer les systèmes de charge B et Mc120 lors du passage d'une analyse dynamique à une analyse pseudo-dynamique. Cela implique le remplacement des charges dynamiques par des charges statiques majorées par ce coefficient. En revanche, le système de charge D240 n'est pas sujet à cette majoration en raison de sa faible vitesse, et sa charge est directement considérée comme statique.

Le coefficient de majoration dynamique est défini par la formule suivante :

$$\delta = \frac{0.6}{1+4 \times \left(\frac{G}{S}\right)} + \frac{0.4}{1+0.2 \times L}$$

Avec :

L : représente la longueur de l'élément exprimée en mètres.

G : sa charge permanente (Poids propre + CPP).

S : sa surcharge maximale.

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 33 – Article 4.11.1.2.

2 . Référence Précédente – Page 25 – Article 4.6.

Tableau IV. 15: Valeurs de Coefficients de Majoration Dynamique

		S [KN]	1920	768	1100
Cas de Chargement	L [m]	G [KN]	Bc	Bt	Mc120
Cas 1	76.00	36251.70	1.0325	1.0279	1.6224
Cas 2	130.00	62009.49	1.0194	1.0167	1.6126
Cas 3	130.00	62009.49	1.0194	1.0167	1.6126
Cas 4	130.00	62009.49	1.0194	1.0167	1.6126
Cas 5	206.00	98261.19	1.0124	1.0106	1.6073
Cas 6	336.00	160270.68	1.0077	1.0066	1.6037
Cas 7	152.00	72503.40	1.0167	1.0143	1.6105
Cas 8	260.00	124018.98	1.0099	1.0085	1.6054
Cas 9	390.00	186028.47	1.0066	1.0057	1.6029
Cas 10	466.00	222280.18	1.0055	1.0048	1.6021
Cas 11	520.00	248037.96	1.0050	1.0043	1.6016
Cas 12	282.00	134512.90	1.0091	1.0078	1.6048
Cas 13	596.00	284289.67	1.0043	1.0037	1.6011
Cas 14	726.00	346299.16	1.0036	1.0031	1.6006
Cas 15	542.00	258531.88	1.0048	1.0041	1.6015
Cas 16	780.00	372056.95	1.0033	1.0029	1.6004
Cas 17	672.00	320541.37	1.0039	1.0033	1.6008
Cas 18	802.00	382550.86	1.0032	1.0028	1.6003
Cas 19	726.00	346299.16	1.0036	1.0031	1.6006
Cas 20	932.00	444560.35	1.0028	1.0024	1.6000

IV.7. AUTRES SURCHARGES :

IV.7.1. Surcharge Sur Trottoirs :

Nous imposons sur les trottoirs une charge uniforme de 1,5 kN/m² spécifiquement destinée à la circulation exclusive des piétons et des cyclistes, afin de garantir l'effet maximal prévu. ¹

IV.7.2. Effort De Freinage :

Les charges exercées sur les routes par les systèmes A et Bc peuvent engendrer des forces de freinage qui agissent sur la surface de la chaussée, dans n'importe quelle direction de circulation. Habituellement, ces forces ont une résultante qui se trouve sur l'axe longitudinal de la chaussée. ²

- Pour le système de charge Bc, l'effort de freinage peut atteindre 300kN, équivalent à son poids. Selon le RCPR, les coefficients b_c sont appliqués à cet effort, donc : ³

$$F(Bc) = Bc = 300 \text{ kN.}$$

- Pour le système de charge A, l'effort de freinage correspondant est donné (en kN) par : ⁴

$$Fr(A) = \frac{A \times S}{20 + 0.0035 \times S}$$

S : représente la surface chargée en m².

Les Résultats sont présentés dans le Tableau IV.15 (voir page suivante)

IV.7.3. Action Dues Au Vent⁵

Les efforts engendrés sont introduits dans les calculs comme des pressions horizontales statiques appliquées aux surfaces frappées. Leur intensité, assimilée à une valeur caractéristique, vaut :

- 2,00 kN/m² pour les ouvrages en service.
- 1,25 kN/m² pour les ouvrages en cours de construction.

Note : Les effets du vent et des charges d'exploitation ne sont pas cumulables au niveau des justifications.

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 35 – Article 4.12.3.
 2 . Référence Précédente– Page 26 – Article 4.7.
 3 . Même Référence Précédente.
 4 . Même Référence Précédente.
 5 . Référence Précédente – Page 14 – Article 3.2.1.

Tableau IV. 16: L'effort de freinage F(KN) de système A .

Cas de Chargement	A [KN/m ²]	S[m ²]	F [KN]
Cas 1	4.97	1026	216.18
Cas 2	3.76	1755	252.46
Cas 3	3.76	1755	252.46
Cas 4	3.76	1755	252.46
Cas 5	3.07	2781	287.45
Cas 6	2.59	4536	327.91
Cas 7	3.50	2052	263.93
Cas 8	2.82	3510	306.40
Cas 9	2.49	5265	340.53
Cas 10	2.37	6291	355.53
Cas 11	2.32	7020	364.66
Cas 12	2.74	3807	313.16
Cas 13	2.25	8046	375.80
Cas 14	2.17	9801	391.35
Cas 15	2.29	7317	368.07
Cas 16	2.14	10530	396.79
Cas 17	2.20	9072	385.35
Cas 18	2.13	10827	398.87
Cas 19	2.17	9801	391.35
Cas 20	2.09	12582	409.76

IV.7.4. Les Actions Thermiques :

Intitulé « Gradient Thermique », Le RCPR stipule : Il y a lieu de prendre en compte l'effet d'un même gradient thermique vertical tout le long de l'ouvrage. Il est admis une variation linéaire de température sur la hauteur de la section. Le module d'élasticité à considérer pour le béton est le module instantané.

Le gradient est positif si la température de la fibre supérieure du tablier est plus grande que celle de la fibre inférieure. Sauf indication contraire du CCTP, les valeurs numériques à prendre en compte pour le gradient thermique vertical sont données dans le tableau ci-après. ¹

D'après ce dernier (Voir Tableau IV.17), les valeurs numériques à prendre en compte pour le gradient thermique vertical pour notre cas sont : $\pm 12^{\circ}\text{C}$ en phase de construction et $\pm 7^{\circ}\text{C}$ en phase de service. Selon le RCPR, les températures extrêmes au niveau de la wilaya de Bejaia sont $+35^{\circ}\text{C}$ et -15°C . En envisageant une plage de températures de construction allant de 10°C à 25°C , nous allons appliquer une variation uniforme de température allant de $+25^{\circ}\text{C}$ à -40°C . ²

Tableau IV. 17: Le Gradient Thermique Selon RCPR³

	En Phase de Construction	En Service
	Gradient ($^{\circ}\text{C}$)	Gradient ($^{\circ}\text{C}$)
Type 01 (Tablier Métallique)	± 18	± 10
Type 02 (Tablier Mixte)	± 15	± 8
Type 01 (Tablier Béton)	± 12	± 7

IV.8. CONCLUSION :

Après avoir évalué les charges et les surcharges, l'objectif de ce chapitre a été atteint, pour ce fait on a essayé de mettre l'accent sur les différentes références du document utilisé (RCPR), tellement on a remarqué l'absence de cette information dans les mémoires précédents.

Cependant, ces charges et surcharges seront ensuite utilisées dans les sections suivantes pour calculer les forces exercées sur la structure. Tout ça a pour but d'évaluer le comportement mécanique de cette structure à étudier.

1 . Ministère des Travaux Publics - Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour le Calcul et Les Epreuves des Ponts Routes (RCPR) – Année 2010 – Page 12 – Article 3.1.2.2.

2 . Même Référence Précédente

3 . Même Référence Précédente

IV.9. PROGRAMMATION D'UNE APPLICATION DE CALCUL DE POIDS PROPRE

IV.9.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre présente une explication de plus ou moins détaillée du code Python utilisé pour développer une application de calcul du poids du tablier d'un pont caisson. L'application est construite en utilisant PyQt5 pour l'interface graphique d'utilisateur et permet aux utilisateurs d'entrer des données, d'afficher des tables de calcul, et de générer un rapport en format HTML, qui permet de l'exporter en format PDF.

IV.9.2. PRESENTATION DU PROGRAMME :

La fenêtre principale de programme demande quelques données « inputs » à entrer par l'utilisateur, comme le nombre des travées, la longueur de travée principale et de rive, la largeur du tablier, la longueur des voussoirs : VSP, VSC et Clavage, et finalement : la longueur des coulés sur cintres et le nombre des voussoirs courants entre le VSP et le VSC.

Figure IV. 10: La Fenêtre Principale de Programme de Calcul des Charges Permanentes.

Quand l'utilisateur entre toutes les valeurs, il peut appuyer sur le Button « Charges Permanentes », une autre fenêtre s'affiche, qui contient un tableau (élément QTableWidgetItem selon la bibliothèque PyQt5), avec un nombre des lignes correspondant au nombre des voussoirs entré, avec le VSP et VSC et VC. Avec les longueurs de chaque élément voussoir déjà entré.

L'utilisateur doit entrer les sections moyennes de chaque voussoir, il peut utiliser AutoCad pour extraire cette information en utilisant « Volume (MassProp) ». Nous voulions développer le programme pour qu'il extraie lui-même ces informations en y entrant simplement un fichier *dxf* ou *dwg* de la section concernée, mais c'était une tâche extrêmement difficile qui nécessite l'utilisation des API d'AutoCad (comme ObjectARX, AutoLISP), mais c'était une tâche supérieure à notre niveau actuel en programmation, et qui nécessitait un spécialiste expert, pour utiliser un API de AutoCad.

The screenshot shows a software window titled 'Form' with a header containing the text 'Calcul Des Charges Permanentes', the ENSTP logo, and the name 'Ismail Oussama - Boudjit Feriel'. Below the header is a table with two columns: 'Section' and 'Longueur'. The table contains the following data:

Section	Longueur
VSP	8.0
VST1	5.0
VST2	5.0
VST3	5.0
VST4	5.0
VST5	5.0
VST6	5.0
VST7	5.0
VST8	5.0
VST9	5.0
VST10	5.0
VST11	5.0
VST12	5.0
VSC	2.0
VC	10.0

At the bottom of the window, there is a 'Done' button.

Figure IV. 11: Fenêtre d'Insertion Des Sections Des Voussoirs

Donc l'utilisateur doit entrer manuellement les sections en m^2 , et cliquer sur le Button « Done », sinon un message d'erreur s'affiche :

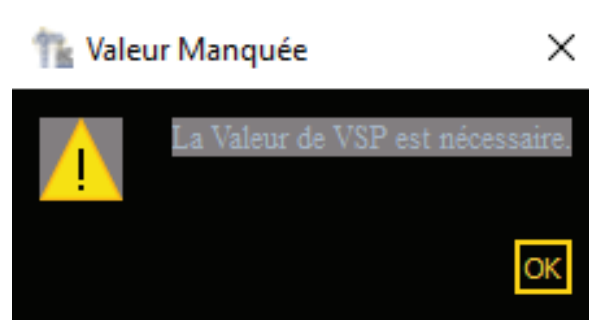



Figure IV. 12: Le Message D'erreur En Cas De Manque Des Données Nécessaires.

Après qu'on clique sur « Done », on peut cliquer sur le Button « CCP » dans la fenêtre principale, une nouvelle fenêtre s'affiche :

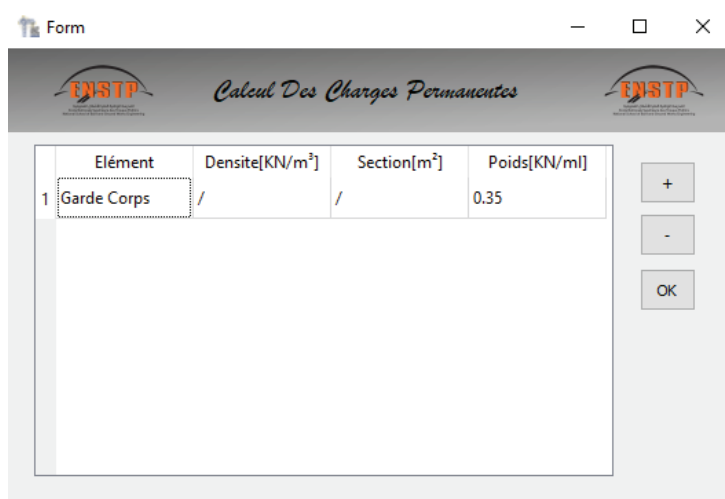


	Section	Longueur
VSP	22.92	8.0
VST1	22.03	5.0
VST2	20.95	5.0
VST3	19.42	5.0
VST4	18.58	5.0
VST5	17.35	5.0
VST6	16.44	5.0
VST7	16.04	5.0
VST8	15.41	5.0
VST9	15.06	5.0
VST10	15.03	5.0
VST11	14.94	5.0
VST12	14.41	5.0
VSC	14.41	2.0
VC	14.41	10.0

Done

Figure IV. 13: Insertion des Valeurs des Sections Moyennes des Voussoirs

Après qu'on clique sur « Done », on peut cliquer sur le Button « CCP » dans la fenêtre principale, une nouvelle fenêtre s'affiche :



Élément	Densité[KN/m³]	Section[m²]	Poids[KN/ml]
1 Garde Corps	/	/	0.35

+
-
OK

Figure IV. 14: La Fenêtre d'Insertion des CCP.

On peut ajouter les charges complémentaires permanentes en cliquant sur le bouton [+], ou supprimer une charge par le bouton [-]. Il y a des charges comme Garde-Corps et Barrières BN4 ou on peut entrer directement le Poids en KN/ml. Mais les autres charges comme Trottoirs et Revêtement et Corniches : on entre la densité et la section, le logiciel va calculer automatiquement le Poids en KN/ml.

Élément	Densité[KN/m ³]	Section[m ²]	Poids[KN/ml]
1 Garde Corps	/	/	0.35
2 Barrières BN4	/	/	1.3
3 Corniches	25	0.1047	2.62
4 Trottoirs	25	0.3	7.50
5 Revêtement	24	1.28	30.72

Figure IV. 15: Aperçu de la Fenêtre Après l'Insertion des CCP.

Après qu'on finit, on clique sur OK, la fenêtre va se fermer, on clique sur le bouton « Calculate » dans la fenêtre principale, une autre fenêtre pour enregistrer un fichier HTML va s'afficher, quand on enregistre notre fichier : il s'ouvre automatiquement

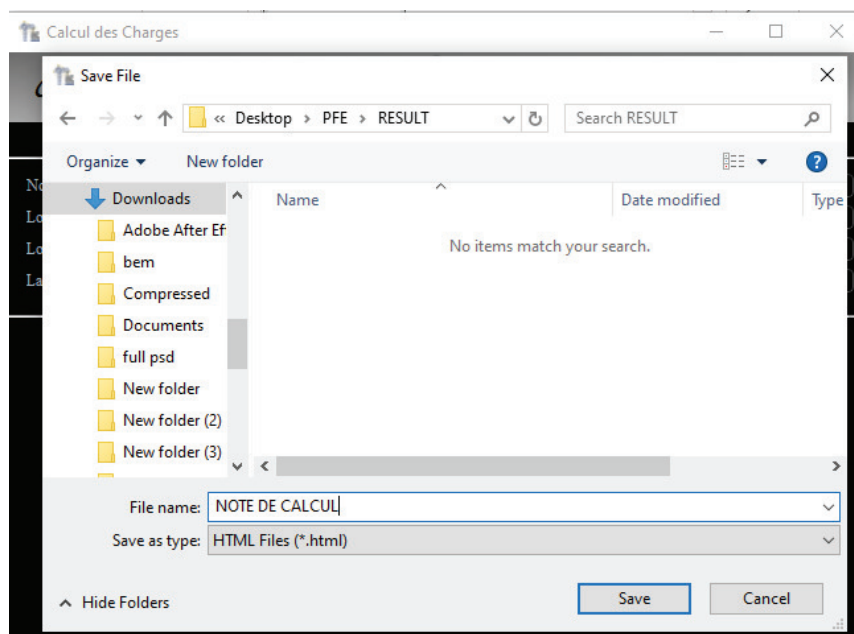


Figure IV. 16: La Fenêtre d'Enregistrement du Fichier d'Output.

La Figure Prochaine Montre que Le fichier HTML contient :

- ✓ Un Intitulé, Et Les Données De L'ouvrage.
- ✓ Un Tableau pour le calcul de Poids des voussoirs.
- ✓ Un Tableau récapultatif pour le Poids du tablier.
- ✓ Un Tableau pour les charges complémentaires permanentes.
- ✓ Un Tableau Finale pour le poids total du tablier en KN.

Finalement, on peut enregistrer le fichier HTML en format PDF par la méthode Imprimer vers PDF (Ctrl+P).



Developper: Oussama ISMAIL & Feriel BOUDJIT

Evaluation des Charges Permanentes

Les Donnees de L'Ouvrage

Nombre de Travees: 8 | Nombre de Voussoirs: 12 | La Portee Principale: 130 [m]

Travee de Rive: 76 [m] | Largeur de Tablier: 16 [m] | Longueur de VSP: 8 [m]

Longueur de VST: 5 [m] | Longueur de VSC : 2 [m] | Longueur Coulee Sur Cintres: 10 [m]

Evaluation du Poids Propre

Section	Longueur	Volume [m3]	Poids [KN]
VSP	8.0	183.36	4584.00
VST1	5.0	110.15	2753.75
VST2	5.0	104.75	2618.75
VST3	5.0	97.10	2427.50
VST4	5.0	92.90	2322.50
VST5	5.0	86.75	2168.75
VST6	5.0	82.20	2055.00
VST7	5.0	80.20	2005.00
VST8	5.0	77.05	1926.25
VST9	5.0	75.30	1882.50
VST10	5.0	75.15	1878.75
VST11	5.0	74.70	1867.50
VST12	5.0	72.05	1801.25
VSC	2.0	28.82	720.50
VC	10.0	144.10	3602.50

Poids du Tablier

Description	Poids [KN]
Poids d'un demi VSP	2292.00
Poids d'un demi fleau	27999.50
Poids des Clavages	5764.00
Poids des Coulees Sur Cintres	7205.00
Poids du Tablier	404962.00

Charges Complementaires Permanentes

Element	Densite [KN/m3]	Section[m2]	Poids	Poids Total [KN]
Garde Corps	/	/	0.35	326.200
Barrieres BN4			1.3	1211.600
Corniches	25	0.1047	2.62	2441.840
Trottoirs	25	0.3	7.50	6990.000
Revêtement	24	1.28	30.72	28631.040

Poids total du tablier

Poids des voussoirs	404962.00
Charges Complémentaires	39600.68
Poids Total du Tablier	444562.68

Figure IV. 17: Le Fichier de OUTPUT

IV.9.3. PRESENTATION DU CODE PYTHON

Le code est structuré en plusieurs classes principales qui représentent les différentes fenêtres et fonctionnalités de l'application. Voici un aperçu des classes principales :

- **MainWindow:** La fenêtre principale de l'application.
- **SecondWindow:** Une fenêtre secondaire pour entrer les détails des sections du tablier.
- **ThirdWindow:** Une fenêtre pour entrer les charges complémentaires permanentes.

Chaque classe a des responsabilités spécifiques et interagit avec les autres pour fournir une application complète et fonctionnelle

Importation des Modules Nécessaires

L'application utilise plusieurs modules de PyQt5 pour manipuler et fonctionnaliser l'interface utilisateur et gérer les interactions avec l'utilisateur.

```
import sys
from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow,
QWidget, QTableWidgetItem, QMessageBox, QFileDialog, \
    QStyledItemDelegate
from PyQt5.QtGui import QIntValidator, QDoubleValidator,
QDesktopServices, QIcon
from PyQt5.QtCore import Qt, QUrl
from Charges import Ui_MainWindow
from ChargesTable import Ui_Form
from CCP import Ui_Formccp
import os
```

Le Fichier Charges.py (770 Lignes), et ChagresTable.py (650 Lignes) contiennent le code des interfaces graphiques, en utilisant Python et bibliothèque PyQt5.

▪ Classe MainWindow

La classe *MainWindow* est le cœur de l'application, c'est la fenêtre principale de l'application. Elle permet à l'utilisateur de saisir des données et d'ouvrir des fenêtres secondaires pour des calculs supplémentaires.

Initialisation (__init__)

```
class MainWindow(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super(MainWindow, self).__init__()
        self.ui = Ui_MainWindow()
        self.ui.setupUi(self)
        self.setWindowIcon(QIcon('ico.png'))
```

- Initialisation de la fenêtre principale : La méthode `__init__` initialise la fenêtre principale de l'application.
- Chargement de l'interface utilisateur : `self.ui = Ui_MainWindow()` charge l'interface définie dans un fichier `.ui` (construit avec Qt Designer).
- Définition de l'icône de la fenêtre : `self.setWindowIcon(QIcon('ico.png'))` définit l'icône de la fenêtre.

Validation des Entrées

Des validateurs sont utilisés pour s'assurer que les utilisateurs entrent des valeurs numériques valides dans les champs de saisie (`QLineEdit`).

```
self.ui.Nbr_Trave.setValidator(QIntValidator())
self.ui.Nbr_Voussoirs.setValidator(QIntValidator())
self.ui.Long_P.setValidator(QDoubleValidator())
self.ui.Long_R.setValidator(QDoubleValidator())
self.ui.Largeur.setValidator(QDoubleValidator())
self.ui.LongVSP.setValidator(QDoubleValidator())
self.ui.LongVST.setValidator(QDoubleValidator())
self.ui.LongVSC.setValidator(QDoubleValidator())
self.ui.LongVC.setValidator(QDoubleValidator())
```

Connexion des Boutons aux Fonctions

```
self.ui.CPbtn.clicked.connect(self.open_second_window)
self.ui.calculateBTN.clicked.connect(self.generate_output)
self.ui.CCPbtn.clicked.connect(self.open_third_window)
```

Connexion des boutons aux fonctions : Les boutons de l'interface sont connectés à des méthodes spécifiques. Par exemple, le bouton Charges Permanentes (CPbtn) est connecté à la fonction `open_second_window` pour ouvrir la deuxième fenêtre.

Variables d'Initialisation

Des listes sont initialisées pour stocker les valeurs des tableaux et des données de la troisième fenêtre.

```
self.table_values = []
self.first_column_values = []
self.third_window_data = []
```

- **Fonction *open_second_window***

```
def open_second_window(self):
    try:
        Nvst = int(self.ui.Nbr_Voussoirs.text())
        Lvsp = float(self.ui.LongVSP.text())
        Lvst = float(self.ui.LongVST.text())
        Lvsc = float(self.ui.LongVSC.text())
        Lvc = float(self.ui.LongVC.text())
    except ValueError:
        QMessageBox.warning(self, "Invalid Input",
            "Please enter valid numerical values.")
        return

    # Ouvrir la Second Window
    self.second_window = SecondWindow(Nvst, Lvsp, Lvst,
        Lvsc, Lvc, self.table_values, self.first_column_values)
    self.second_window.show()
```

- Ouverture de la deuxième fenêtre : Cette méthode récupère les valeurs des champs de saisie, les convertit en types appropriés, puis ouvre une nouvelle fenêtre (*SecondWindow*) avec ces valeurs.
- Gestion des erreurs : Si les valeurs ne peuvent pas être converties, un message d'avertissement est affiché.

- **Fonction *open_third_window***

```
def open_third_window(self):
    self.third_window =
    ThirdWindow(self.third_window_data)
    self.third_window.show()
```

- Ouverture de la troisième fenêtre : Cette méthode initialise et affiche la troisième fenêtre (*ThirdWindow*), en passant les données actuelles comme paramètre.

- **Fonction *generate_output***

- Génération de la sortie : Cette méthode vérifie d'abord si les données du tableau sont disponibles. Si oui, elle extrait les valeurs des champs de saisie, calcule les longueurs, volumes et poids, puis génère un rapport HTML détaillé.
- Calculs : Les poids des différentes sections du pont sont calculés à partir des volumes et des densités, et un rapport est généré en format HTML.
- Enregistrement du fichier : Le rapport HTML est enregistré dans un fichier *Output.html* et une boîte de message informe l'utilisateur de la réussite de l'opération.

```

def generate_output(self):
    # Vérifier si il y a des valeurs dans les Tableaux
    if not self.table_values:
        QMessageBox.warning(self, "No Data", "No data
available to generate output.")
        return

    Nbr_Trave = float(self.ui.Nbr_Trave.text())
    Long_P = float(self.ui.Long_P.text())
    Long_R = float(self.ui.Long_R.text())
    Lbridge = (Nbr_Trave - 2) * Long_P + 2 * Long_R

    # Extraire les données de QLineEdit

    data = {
        "Nbr_Trave": self.ui.Nbr_Trave.text(),
        "Nbr_Voussoirs": self.ui.Nbr_Voussoirs.text(),
        "Long_P": self.ui.Long_P.text(),
        "Long_R": self.ui.Long_R.text(),
        "Largeur": self.ui.Largeur.text(),
        "LongVSP": self.ui.LongVSP.text(),
        "LongVST": self.ui.LongVST.text(),
        "LongVSC": self.ui.LongVSC.text(),
        "LongVC": self.ui.LongVC.text()
    }

    # Charger le HTML template
    with open("Template.html", "r") as file:
        html_template = file.read()

```

```

# Créer le contenu de HTML
header_html = "<h2>Les Donnees de L'Ouvrage</h2>"
data_html = "<div style='text-align: center;'"
data_html += "<p>Nombre de Travees: {} | Nombre de Voussoirs: {} | La
Portee Principale: {} [m]</p>".format(
    data["Nbr_Trave"], data["Nbr_Voussoirs"], data["Long_P"])
data_html += "<p>Travee de Rive: {} [m] | Largeur de Tablier: {} [m] |
Longueur de VSP: {} [m]</p>".format(
    data["Long_R"], data["Largeur"], data["LongVSP"])
data_html += "<p>Longueur de VST: {} [m] | Longueur de VSC : {} [m]
| Longueur Coulee Sur Cintres: {} [m]</p>".format(
    data["LongVST"], data["LongVSC"], data["LongVC"])
data_html += "</div>"

# Extraire Les Données des QTableWidgetItem
table_html = "<h2>Evaluation du Poids Propre</h2>"
table_html += "<table border='1' style='margin: 0 auto; text-align:
center;'"
table_html += "<tr><th>Section</th><th>Longueur</th><th>Volume
[m3]</th><th>Poids [KN]</th></tr>"

volumes = []
poids_values = []

for section, value in self.table_values:
    volume = value *
float(self.first_column_values[self.table_values.index((section, value))])
    poids = volume * 25

```

```

volumes.append(volume)
poids_values.append(poids)
table_html +=
"<tr><td>{}</td><td>{}</td><td>{: .2f}</td><td>{: .2f}</td></tr>".format (sec
tion, value, volume,poids)

table_html += "</table>"

# Calculer les valeurs
poids_demi_vsp = poids_values[0] / 2
poids_demi_fleau = sum(poids_values[1:-2]) + poids_demi_vsp
poids_clavages = int(data["Nbr_Trave"]) * poids_values[-2]
poids_coulees_cintres = 2 * poids_values[-1]
poids_tablier = poids_coulees_cintres + poids_clavages + (2 *
int(data["Nbr_Trave"]) - 2) * poids_demi_fleau

poids_tablier_html = ""
<h2>Poids du Tablier</h2>
<table border='1' style='margin: 0 auto; text-align: center;'>
  <tr><th>Description</th><th>Poids [KN]</th></tr>
  <tr><td>Poids d'un demi VSP</td><td>{: .2f}</td></tr>
  <tr><td>Poids d'un demi fleau</td><td>{: .2f}</td></tr>
  <tr><td>Poids des Clavages</td><td>{: .2f}</td></tr>
  <tr><td>Poids des Coulees Sur Cintres</td><td>{: .2f}</td></tr>
  <tr><td>Poids du Tablier</td><td>{: .2f}</td></tr>
</table>
"".format(poids_demi_vsp, poids_demi_fleau, poids_clavages,
poids_coulees_cintres, poids_tablier)

# Charges Complémentaires Permanentes
charges_complementaires_html = ""
<h2>Charges Complementaires Permanentes</h2>
<div style="text-align: center;">
<table border='1' style="margin: 0 auto;">
  <tr><th>Element</th><th>Densite
[KN/m3]</th><th>Section[m2]</th><th>Poids</th><th>Poids Total
[KN]</th></tr>
  ""
charges_complementaires_total = 0
for row_data in self.third_window_data:
  element = row_data[0]
  densite = row_data[1]
  section = row_data[2]
  poids = row_data[3]
  try:
    poids_total = float(poids) * Lbridge
    poids_total = '{: .3f}'.format(poids_total)
    charges_complementaires_total += float(poids_total)
  except ValueError:
    poids_total = 0
  charges_complementaires_html +=
f"<tr><td>{element}</td><td>{densite}</td><td>{section}</td><td>{poids}</t
d><td>{poids_total}</td></tr>"
  charges_complementaires_html += "</table></div>"

# Calculer le poids total
charges_complementaires_total = round(charges_complementaires_total,
2)
poids_tablier_rounded = round(poids_tablier, 2)

```

```

poids_total_tablier = round(poids_tablier_rounded +
charges_complementaires_total, 2)

# Ajouter la section "Poids total du tablier"
poids_total_html = f"""
<h2>Poids total du tablier</h2>
<table border='1' style='margin: 0 auto; text-align: center;'>
  <tr><td>Poids des
voussoirs</td><td>{poids_tablier_rounded:.2f}</td></tr>
  <tr><td>Charges
Complementaires</td><td>{charges_complementaires_total:.2f}</td></tr>
  <tr><td>Poids Total du
Tablier</td><td>{poids_total_tablier:.2f}</td></tr>
</table>
"""

# Insérer le contenu dans le HTML template
html_content = html_template.replace("<!-- Content goes here -->",
header_html + data_html +
table_html + poids_tablier_html + charges_complementaires_html +
poids_total_html)

# Enregistrer le fichier HTML final.
filename, _ = QFileDialog.getSaveFileName(self, "Save File", "", "HTML
Files (*.html)")
if filename:
    with open(filename, "w") as file:
        file.write(html_content)

# Ouvrir le fichier exporté
QDesktopServices.openUrl(QUrl.fromLocalFile(filename))

```

▪ Classe *SecondWindow*

La classe *SecondWindow* gère l'interface utilisateur permettant aux utilisateurs d'entrer les valeurs des sections moyennes des voussoirs du pont. Cette fenêtre permet aussi de modifier les valeurs et les enregistrer pour des calculs ultérieurs.

- Initialisation de la fenêtre : La méthode `__init__` initialise la fenêtre et charge l'interface utilisateur définie dans le fichier `.ui`.
- Définition de l'icône de la fenêtre : `self.setWindowIcon(QIcon('ico.png'))` définit l'icône de la fenêtre.

```

class SecondWindow(QWidget):
    def __init__(self, Nvst, Lvsp, Lvst, Lvsc, Lvc,
table_values, first_column_values):
        super(SecondWindow, self).__init__()
        self.ui = Ui_Form()
        self.ui.setupUi(self)
        self.setWindowIcon(QIcon('ico.png'))

```

- **Configuration du Tableau (QWidget)**

Définition du nombre de lignes :

Le tableau est configuré pour avoir (Nvst + 3) lignes, où Nvst représente le nombre de voussoirs, et les 3 lignes supplémentaires sont pour VSP, VSC, et VC.

```
self.ui.tableWidget.setRowCount(Nvst + 3)
```

Définition des étiquettes de lignes :

Les étiquettes des lignes sont définies pour inclure "VSP", une série de "VST" numérotés, "VSC", et "VC".

```
headers = ["VSP"] + [f"VST{i}" for i in range(1, Nvst + 1)] + ["VSC", "VC"]
self.ui.tableWidget.setVerticalHeaderLabels(headers)
```

Définition des colonnes :

Le tableau a deux colonnes avec les étiquettes "Section" et "Longueur".

```
self.ui.tableWidget.setColumnCount(2)
self.ui.tableWidget.setHorizontalHeaderLabels(["Section", "Longueur"])
```

Ajustement de Hauteur et Largeur des Cellules

Chaque ligne du tableau est configurée pour avoir une hauteur de 13 pixels.

Chaque colonne du tableau est configurée pour avoir une largeur de 200 pixels.

```
for row in range(self.ui.tableWidget.rowCount()):
    self.ui.tableWidget.setRowHeight(row, 13)
for col in range(self.ui.tableWidget.columnCount()):
    self.ui.tableWidget.setColumnWidth(col, 200)
```

Centrage du Texte

AlignDelegate est utilisé pour centrer le texte dans les cellules de la deuxième colonne.

```
self.ui.tableWidget.setItemDelegateForColumn(1,
AlignDelegate(self.ui.tableWidget))
```

- Remplissage du Tableau avec des Valeurs

Remplissage des étiquettes de section

Les cellules de la première colonne sont remplies avec les étiquettes des sections et le texte est centré.

```
for row in range(self.ui.tableWidget.rowCount()):
    section_item =
self.ui.tableWidget.verticalHeaderItem(row)
    if section_item:
        section = section_item.text()
        self.ui.tableWidget.setItem(row, 0,
QTableWidgetItem(section))
        self.ui.tableWidget.item(row, 0)
.setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
```

- Insertion des valeurs par défaut : Si aucune valeur n'est fournie (`table_values` est vide), des valeurs par défaut pour `Lvsp`, `Lvsc`, `Lvc`, et `Lvst` sont insérées dans la deuxième colonne.
- Chargement des valeurs existantes : Si des valeurs existent (`table_values` est non vide), elles sont insérées dans le tableau.

```
if not table_values:
    self.ui.tableWidget.setItem(0, 1, QTableWidgetItem(str(Lvsp)))
self.ui.tableWidget.item(0, 1).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
    self.ui.tableWidget.setItem(Nvst + 1, 1, QTableWidgetItem(str(Lvsc)))
self.ui.tableWidget.item(Nvst + 1, 1).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
    self.ui.tableWidget.setItem(Nvst + 2, 1, QTableWidgetItem(str(Lvc)))
self.ui.tableWidget.item(Nvst + 2, 1).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
    for i in range(1, Nvst + 1):
        self.ui.tableWidget.setItem(i, 1, QTableWidgetItem(str(Lvst)))
        self.ui.tableWidget.item(i, 1).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
else:
    for row, (section, value) in enumerate(table_values):
        self.ui.tableWidget.setItem(row, 0, QTableWidgetItem(section))
        self.ui.tableWidget.item(row, 0).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
        self.ui.tableWidget.setItem(row, 1, QTableWidgetItem(str(value)))
        self.ui.tableWidget.item(row, 1).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
```

- Insertion des Valeurs de la Première Colonne

- Chargement des valeurs existantes : Si des valeurs existent pour la première colonne (`first_column_values` est non vide), elles sont insérées.
- Nettoyage des cellules : Si aucune valeur n'existe, les cellules de la première colonne sont vidées.

```

if first_column_values:
    for row, value in enumerate(first_column_values):
        self.ui.tableWidget.setItem(row, 0, QTableWidgetItem(value))
        self.ui.tableWidget.item(row, 0).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)
else:
    for row in range(self.ui.tableWidget.rowCount()):
        self.ui.tableWidget.setItem(row, 0, QTableWidgetItem(""))
        self.ui.tableWidget.item(row, 0).setTextAlignment(Qt.AlignCenter)

```

▪ Connexion des Evènements

Connexion du bouton : Le bouton *pushButton* est connecté à la méthode *save_table_values*, qui permet de sauvegarder les valeurs du tableau.

```

self.ui.pushButton.clicked.connect(self.save_table_values)
self.table_values = table_values
self.first_column_values = first_column_values

```

▪ La Fonction *save_table_values*

- Sauvegarde des valeurs du tableau : La méthode *save_table_values* itère à travers les lignes du tableau pour récupérer et valider les valeurs des cellules. Si une valeur n'est pas valide ou manquante, un message d'avertissement est affiché.
- Validation des valeurs : Les valeurs sont converties en float pour s'assurer qu'elles sont numériques.
- Fermeture de la fenêtre : Après avoir sauvegardé les valeurs, la fenêtre est fermée.

```

def save_table_values(self):

    self.table_values.clear()
    self.first_column_values.clear()

    for row in range(self.ui.tableWidget.rowCount()):
        section_item = self.ui.tableWidget.verticalHeaderItem(row)
        value_item = self.ui.tableWidget.item(row, 1)
        first_column_item = self.ui.tableWidget.item(row, 0)

        if section_item and value_item and first_column_item:
            section = section_item.text()
            value = value_item.text()
            first_column_value = first_column_item.text()
            if value and first_column_value:
                try:
                    value = float(value)
                    self.table_values.append((section, value))
                    self.first_column_values.append(first_column_value)
                except ValueError:
                    QMessageBox.warning(self, "Invalid Value", "Please
enter valid numerical values.")
                    return
            else:

```

```

        QMessageBox.warning(self, "Valeur Manquée", f"La Valeur de
{section} est nécessaire.")
        return

self.close()

```

▪ Classe *AlignDelegate*

La classe *AlignDelegate* est utilisée pour centrer le texte dans les cellules d'une *QTableWidget*.

```

class AlignDelegate(QStyledItemDelegate):
    def initStyleOption(self, option, index):
        super(AlignDelegate, self).initStyleOption(option, index)
        option.displayAlignment = Qt.AlignCenter

```

- Héritage : *AlignDelegate* hérite de *QStyledItemDelegate*.
- Méthode *initStyleOption* : Cette méthode configure les options de style pour chaque élément de la table. En appelant *super().initStyleOption(option, index)*, la méthode parente est appelée pour initialiser l'option de style, puis *option.displayAlignment* est défini pour centrer le texte (*Qt.AlignCenter*).

▪ Classe *ThirdWindow*

La classe *ThirdWindow* gère l'interface utilisateur pour entrer les données liées aux éléments de pont tels que la densité, la section et le poids.

Initialisation (`__init__`)

```

class ThirdWindow(QWidget):
    def __init__(self, third_window_data):
        super(ThirdWindow, self).__init__()
        self.ui = Ui_Formccp()
        self.ui.setupUi(self)
        self.setWindowIcon(QIcon('ico.png'))

        self.third_window_data = third_window_data

```

- Initialisation de la fenêtre : La méthode `__init__` initialise la fenêtre et charge l'interface utilisateur définie dans le fichier `.ui`.
- Définition de l'icône de la fenêtre : `self.setWindowIcon(QIcon('ico.png'))` définit l'icône de la fenêtre.
- Chargement des données existantes : `self.third_window_data` stocke les données passées à la fenêtre.

Configuration du Tableau (*QTableWidgetccp*)

Définition du nombre de lignes et colonnes : Le tableau est configuré pour avoir une ligne et quatre colonnes avec les étiquettes "Elément", "Densité[KN/m³]", "Section[m²]", et "Poids[KN/ml]".

```
self.ui.QTableWidgetccp.setRowCount(1)
self.ui.QTableWidgetccp.setColumnCount(4)
self.ui.QTableWidgetccp.setHorizontalHeaderLabels(["Elément",
"Densite[KN/m³]", "Section[m²]", "Poids[KN/ml]"])
```

Connexion des Boutons

```
self.ui.plusBTN.clicked.connect(self.add_row)
self.ui.moinsBTN.clicked.connect(self.remove_row)
self.ui.OKCCPbtn.clicked.connect(self.save_table_data)
```

Connexion des événements de clic : Les boutons plusBTN, moinsBTN, et OKCCPbtn sont connectés aux méthodes add_row, remove_row, et save_table_data respectivement.

Connexion des Changements de Cellule

Connexion de l'événement de changement de cellule : L'événement *itemChanged* du tableau est connecté à la méthode *calculate_poids* pour recalculer le poids lorsque les valeurs de densité ou de section changent.

```
self.ui.QTableWidgetccp.itemChanged.connect(self.calculate_poids)
```

Chargement des Données Existantes

Chargement des données : La méthode *load_table_data* est appelée pour charger les données existantes dans le tableau.

```
self.load_table_data()
```

Fonction *add_row*

Ajout d'une ligne : Cette méthode ajoute une nouvelle ligne à la fin du tableau.

```
def add_row(self):
    row_count = self.ui.QTableWidgetccp.rowCount()
    self.ui.QTableWidgetccp.insertRow(row_count)
```

Fonction *remove_row*

Suppression de la ligne sélectionnée : Cette méthode supprime la ligne actuellement sélectionnée dans le tableau.

```
def remove_row(self):
    selected_row = self.ui.QTableWidgetccp.currentRow()
    if selected_row != -1:
        self.ui.QTableWidgetccp.removeRow(selected_row)
```

Méthode *save_table_data*

Sauvegarde des données : Cette méthode parcourt chaque ligne et colonne du tableau, extrait le texte des cellules, et stocke ces données dans `self.third_window_data`. Ensuite, la fenêtre est fermée.

```
def save_table_data(self):
    self.third_window_data.clear()
    for row in range(self.ui.QTableWidgetccp.rowCount()):
        row_data = []
        for column in
range(self.ui.QTableWidgetccp.columnCount()):
            item = self.ui.QTableWidgetccp.item(row, column)
            if item is not None:
                row_data.append(item.text())
            else:
                row_data.append('')
        self.third_window_data.append(row_data)
    self.close()
```

Méthode *load_table_data*

Chargement des données : Cette méthode insère les données existantes dans le tableau. Chaque ligne de `self.third_window_data` est insérée dans une nouvelle ligne du tableau.

```
def load_table_data(self):
    for row_data in self.third_window_data:
        row_position = self.ui.QTableWidgetccp.rowCount()
        self.ui.QTableWidgetccp.insertRow(row_position)
        for column, data in enumerate(row_data):
            self.ui.QTableWidgetccp.setItem(row_position,
column, QTableWidgetItem(data))
```

Méthode *calculate_poids*

Recalculation du poids : Cette méthode est appelée lorsqu'une cellule change. Si la colonne modifiée est celle de la densité ou de la section, le poids est recalculé en multipliant la densité par la section, et le résultat est affiché dans la colonne du poids. Les erreurs de conversion (*ValueError*) sont ignorées.

```

def calculate_poids(self, item):
    row = item.row()
    col = item.column()

    if col in [1, 2]:
        densite_item = self.ui.QTableWidgetccp.item(row, 1)
        section_item = self.ui.QTableWidgetccp.item(row, 2)
        poids_item = self.ui.QTableWidgetccp.item(row, 3)

        if densite_item and section_item:
            try:
                densite = float(densite_item.text())
                section = float(section_item.text())
                poids = densite * section
                poids_str = f"{poids:.2f}"
                if not poids_item:
                    poids_item = QTableWidgetItem(poids_str)
                    self.ui.QTableWidgetccp.setItem(row, 3,
poids_item)
            else:
                poids_item.setText(poids_str)
        except ValueError:
            pass

```

La dernière partie du code exécute l'application :

```

if __name__ == "__main__":
    app = QApplication(sys.argv)
    main_window = MainWindow()
    main_window.show()
    sys.exit(app.exec_())

```

Condition if `__name__ == "__main__"`:

Cette ligne vérifie si le script est exécuté directement (par exemple, en ligne de commande) et non importé en tant que module dans un autre script. Si le script est exécuté directement, le bloc de code suivant est exécuté.

Création de l'application `QApplication`

```
app = QApplication(sys.argv)
```

Cette ligne crée une instance de `QApplication`. `QApplication` gère l'ensemble de l'application, y compris l'initialisation des ressources de l'interface utilisateur, la gestion des événements et la boucle d'exécution principale. `sys.argv` est passé à `QApplication` pour permettre la gestion des arguments de ligne de commande.

Création de la fenêtre principale MainWindow

```
main_window = MainWindow()
```

Une instance de MainWindow est créée. Cette classe représente la fenêtre principale de l'application et contient toute la logique et les widgets définis précédemment.

Affichage de la fenêtre principale

```
main_window.show()
```

La méthode show() affiche la fenêtre principale à l'écran. Jusqu'à ce que cette méthode soit appelée, la fenêtre n'est pas visible.

Exécution de la boucle d'événements de l'application

```
sys.exit(app.exec_())
```

app.exec_() démarre la boucle d'événements de l'application, qui attend et gère les événements (comme les clics de souris et les pressions sur les touches) jusqu'à ce que exit() soit appelé. sys.exit() garantit que la sortie de app.exec_() (généralement un code de sortie) est transmise au système d'exploitation. Cela permet de signaler si l'application s'est terminée normalement ou s'il y a eu des erreurs.

IV.10. PROGRAMMATION D'UNE APPLICATION DE CALCUL DES SURCHARGES ROUTIERES

IV.10.1. INTRODUCTION :

Dans les prochaines pages, on va présenter une application desktop de calcul des surcharges routières, enfaite, on a développé la partie de calcul de système A, les autres système (Bc, Bt, Mc120, D240...etc) peuvent être développées de la même manière. On va essayer d'expliquer le code Python utilisé. L'application est construite en utilisant PyQt5 pour l'interface graphique d'utilisateur et permet aux utilisateurs d'entrer des données, d'afficher des tables de calcul, et de générer un rapport en format HTML, qui permet de l'exporter en format PDF.

IV.10.2. PRESENTATION DU PROGRAMME :

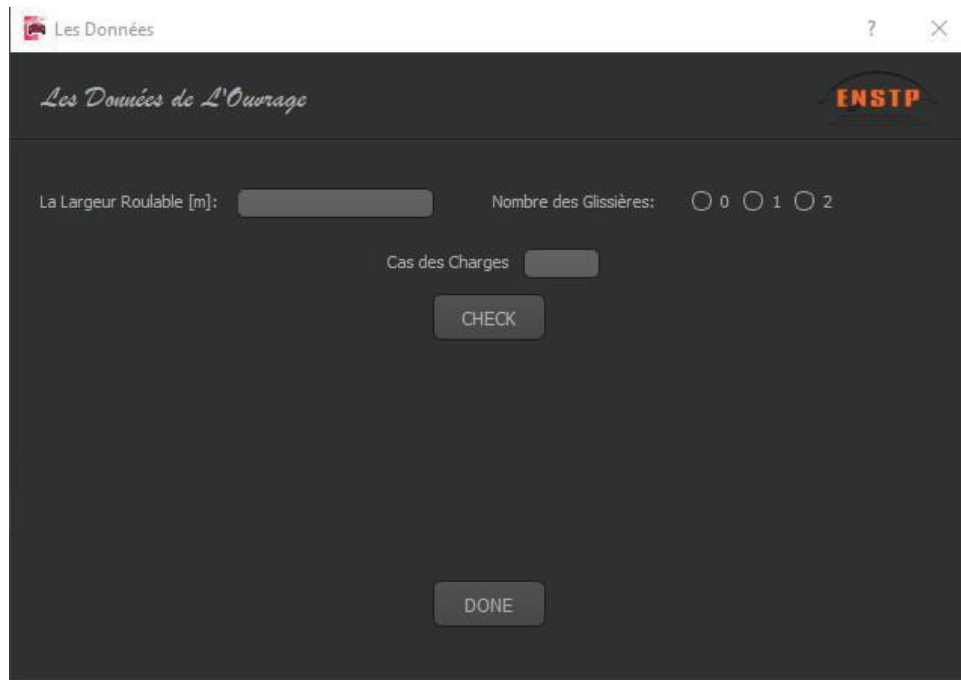
La fenêtre principale de programme contient trois boutons, le bouton « Les Données » affiche une fenêtre pour l'entrée des données, le deuxième bouton « Tableau des Résultats » affiche la fenêtre qui contient un tableau des résultats de système A(l) pour chaque cas de charge demandé, et le dernier bouton : « Note de Calcul » permet d'exporter une note de calcul de système A sous format word.

L'Interface graphique de ces trois fenêtres a été programmée à l'aide d'une bibliothèque s'appelle PyQt5. Et le design est fait en utilisant CSS (les couleurs, l'interaction...etc). il y a 1637 lignes (545+578+514) pour l'interface graphique.



Figure IV. 18: La fenêtre principale

En cliquant sur le bouton « Les Données » la fenêtre suivante va s'afficher :

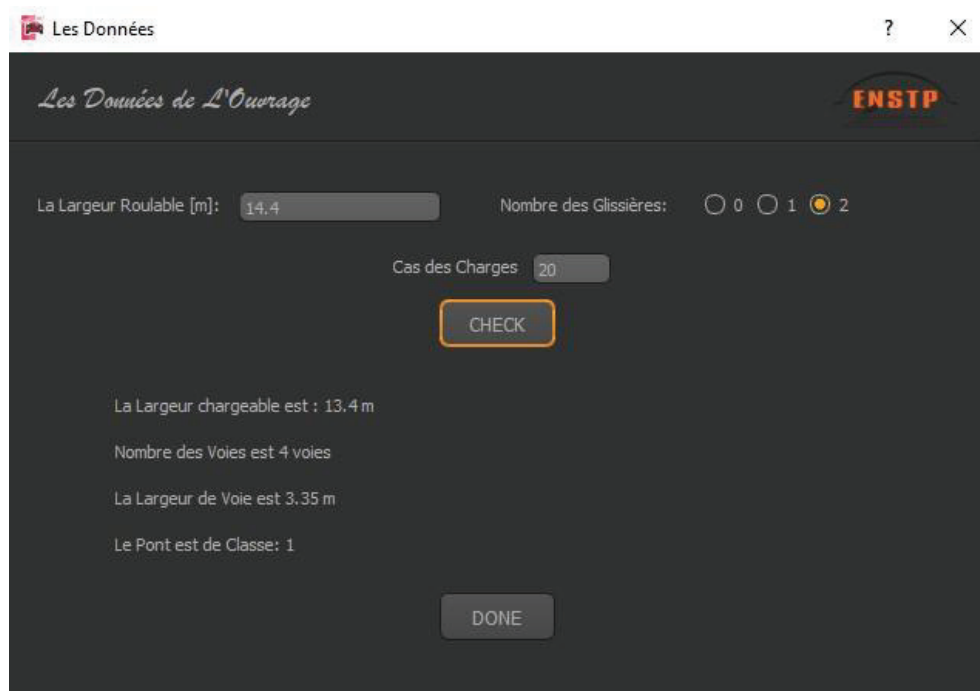


The screenshot shows a window titled "Les Données" with the ENSTP logo in the top right corner. The window contains the following elements:

- Header: "Les Données de L'Ouvrage" and ENSTP logo.
- Input field: "La Largeur Roulable [m]:" with a text box.
- Radio buttons: "Nombre des Glissières:" with options 0, 1, and 2.
- Input field: "Cas des Charges" with a text box.
- Buttons: "CHECK" and "DONE".

Figure IV. 19: La fenêtre des données

En entrant la largeur roulable en mètres, et cocher le nombre des glissières de sécurité, et entrez le nombre des cas des charges souhaité, l'utilisateur peut cliquer sur le bouton « CHECK » qui va afficher quelques données pour vérifier, avant de cliquer sur le bouton « DONE » qui va sauvegarder les résultats et fermer la fenêtre pour passer vers la deuxième fenêtre :



The screenshot shows the same "Les Données" window after the user has entered values and clicked "CHECK". The results are displayed below the input fields:

- Input field: "La Largeur Roulable [m]:" with the value "14.4".
- Radio buttons: "Nombre des Glissières:" with option 2 selected.
- Input field: "Cas des Charges" with the value "20".
- Buttons: "CHECK" (highlighted with an orange border) and "DONE".
- Results displayed below the buttons:
 - La Largeur chargeable est : 13.4 m
 - Nombre des Voies est 4 voies
 - La Largeur de Voie est 3.35 m
 - Le Pont est de Classe: 1

Figure IV. 20: Les Données Affichées sur la fenêtre

- ⚠ Note bien que les valeurs de ces données doit être numériques, on a donné l'importance à ça, en utilisant les « validators », l'utilisateur ne peut pas entrer aucun caractère sauf les numéros, « float » pour la largeur roulable, et « integer » pour le nombre des cas de charge, si l'utilisateur clique sur « CHECK » ou bien « DONE » en entrant une valeur non numérique, un message d'erreur va s'afficher :

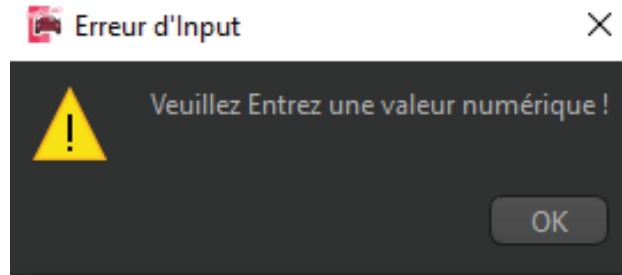


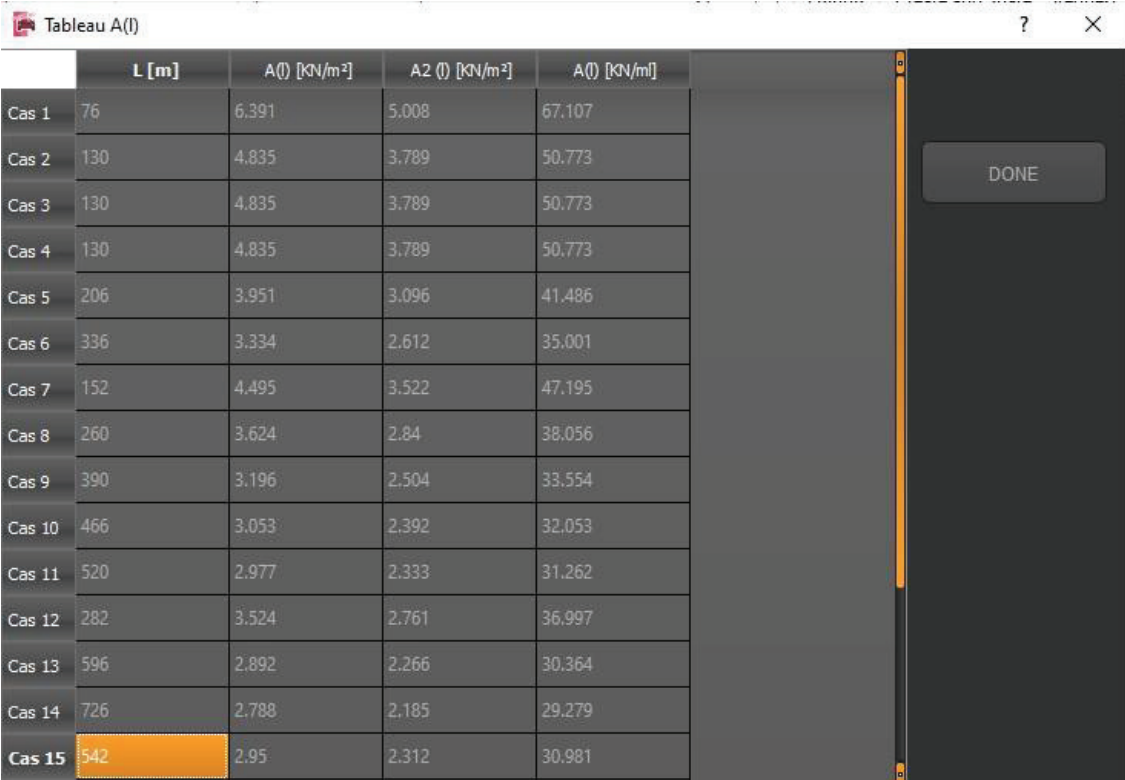
Figure IV. 21: Fenêtre de message d'erreur

La deuxième fenêtre s'affiche en cliquant sur le bouton « Tableau des Résultats » sur la fenêtre principale, la fenêtre contient un tableau de quatre colonnes, dont le nombre des lignes est dépend de nombre de cas de charges entré par l'utilisateur.

	L [m]	A(I) [kN/m²]	A2 (I) [kN/m²]	A(I) [kN/m]
Cas 1				
Cas 2				
Cas 3				
Cas 4				
Cas 5				
Cas 6				
Cas 7				
Cas 8				
Cas 9				
Cas 10				
Cas 11				
Cas 12				
Cas 13				
Cas 14				
Cas 15				

Figure IV. 22: Fenêtre de Tableau des Résultats

L'utilisateur doit entrer que la longueur chargée pour chaque cas de charge dans la première colonne (L[m]). Les autres colonnes vont être rempli automatiquement. A la fin, l'utilisateur peut cliquer sur « DONE » pour sauvegarder les résultats et fermer la fenêtre.



	L [m]	A(l) [kN/m²]	A2 (l) [kN/m²]	A(l) [kN/ml]
Cas 1	76	6.391	5.008	67.107
Cas 2	130	4.835	3.789	50.773
Cas 3	130	4.835	3.789	50.773
Cas 4	130	4.835	3.789	50.773
Cas 5	206	3.951	3.096	41.486
Cas 6	336	3.334	2.612	35.001
Cas 7	152	4.495	3.522	47.195
Cas 8	260	3.624	2.84	38.056
Cas 9	390	3.196	2.504	33.554
Cas 10	466	3.053	2.392	32.053
Cas 11	520	2.977	2.333	31.262
Cas 12	282	3.524	2.761	36.997
Cas 13	596	2.892	2.266	30.364
Cas 14	726	2.788	2.185	29.279
Cas 15	542	2.95	2.312	30.981

Figure IV. 23: Fenêtre de Tableau des Résultats après remplissage des données

En cliquant sur le bouton « Note de Calcul sur la fenêtre principale, un fichier en format MS Word va être créer et s'ouvrir automatiquement, les figures prochaines montrent une « proof of concept » en appliquant le logiciel sur notre projet :



Figure IV. 24: Le Button Note de Calcul

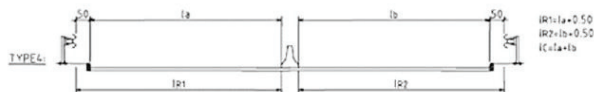
NOTE DE CALCUL SYSTÈME A

Les Données du Pont

La largeur roulable: 14.5 m

Nombre des Glissières de Sécurité: 2

La Largeur chargeable est : 13.5 m



Nombre des Voies est 4 voies

La Largeur de Voie est 3.375 m

Le Pont est de Classe: 1

Classe du Pont	Description
1 ère classe	Les ponts qui ont une largeur roulable $L_r \geq 7m$
	Les ponts supportant des brouettes d'accès à de telles chaussées Tous les ponts urbains ou en zone industrielle
2 ème classe	Les ponts de largeur roulable inférieure à 7 m, qui sont désignés par le CCP
2 ème classe	Les ponts qui ont une largeur roulable $5.5 m < L_r < 7m$
3 ème classe	Les ponts qui ont une largeur roulable $L_r \leq 5.5 m$

le coefficient α_1 : 0.75

le coefficient α_2 : 1.037037037037037

Nombre de voies		1	2	3	4	> 5
Classe de pont	Première	1	1	0.9	0.75	0.7
	Deuxième	1	0.9	-	-	-
	Troisième	0.9	0.8	-	-	-

Tableau 4.1 : coefficients α_1

Nombre de Cas de Charges: 20

Figure IV. 25: Le Fichier Exporté Page 01

Tableau des Résultats

L [m]	A(I) [KN/m ²]	A2 (I) [KN/m ²]	A(I) [KN/ml]
76	6.391	4.971	67.109
130	4.835	3.761	50.773
130	4.835	3.761	50.773
130	4.835	3.761	50.773
206	3.951	3.073	41.486
336	3.334	2.593	35.005
152	4.495	3.496	47.196
260	3.624	2.819	38.056
390	3.196	2.486	33.561
466	3.053	2.375	32.062
520	2.977	2.315	31.252
282	3.524	2.741	37.004
596	2.892	2.249	30.362
726	2.788	2.168	29.268
542	2.95	2.294	30.969
780	2.755	2.143	28.93
672	2.826	2.198	29.673
802	2.742	2.133	28.796
726	2.788	2.168	29.268
932	2.681	2.085	28.148

La Valeur maximale de A(I) est : 67.109 KN/m²



Crédit : ISMAIL OUSSAMA & BOUDJIT FERIEL

Figure IV. 26: Le Fichier Exporté Page 02

IV.10.1. EXPLICATION DU CODE PYTHON

Ce titre présente une explication de plus ou moins détaillée du code d'application de calcul de système A(l). Comme on a vu : l'application est divisée en trois principales interfaces : la fenêtre principale, la fenêtre des données et la fenêtre des tableaux.

➤ Structure du Code

Le code est structuré autour de trois classes principales :

- ✓ *MainWindow* : La fenêtre principale de l'application.
- ✓ *DataWidget* : La fenêtre de saisie des données.
- ✓ *TableWidget* : La fenêtre d'affichage des résultats sous forme de tableau.

Commençons par une vue d'ensemble de chaque composant.

➤ Classe MainWindow

Initialisation :

```
class MainWindow(QMainWindow, Ui_MainWindow):
    def __init__(self):
        super(MainWindow, self).__init__()
        self.setupUi(self)
        self.setWindowIcon(QIcon("Aicon.png"))
```

La classe *MainWindow* hérite de *QMainWindow* et de l'interface utilisateur générée *Ui_MainWindow*. Lors de l'initialisation, l'interface est configurée et l'icône de la fenêtre est définie.

Ouverture des Fenêtres DataWidget et TableWidget :

```
# Initialisation des fenêtres dataWidget et tableWidget
self.tableWidgetInstance = TableWidget()
self.dataWidget = DataWidget(self.tableWidgetInstance)

self.DATABtn.clicked.connect(self.openDataWidget)
self.TABLEbtn.clicked.connect(self.openTableWidget)
self.EXPORTbtn.clicked.connect(self.exportData)
```

Les instances des fenêtres *DataWidget* et *TableWidget* sont créées. Les boutons *DATABtn*, *TABLEbtn*, et *EXPORTbtn* sont connectés à leurs méthodes respectives pour ouvrir les fenêtres de données, de tableau et pour exporter les données.

Fonctions pour Ouvrir les Fenêtres

```
def openDataWidget(self):
    self.dataWidget.show()

def openTableWidget(self):
    self.tableWidgetInstance.show()
```

Ces fonctions affichent les fenêtres DataWidget et TableWidget, remarquons que ces fonctions sont appelées en cliquant sur les boutons DATAbtn et TABLEbtn (voir le paragraphe précédent).

Fonction pour Exporter les Données

```
def exportData(self):
    self.create_word_report()
    pass
```

Cette fonction est appelée en cliquant sur le bouton EXPORTbtn (qui est le troisième bouton), elle s'appelle la fonction *create_word_report* pour générer et exporter le rapport Word.

Création du Rapport Word

Configuration de la Page et Ajout de Contenu :

```
def create_word_report(self):
    doc = Document()

    # Ajouter le border du page
    section = doc.sections[0]
    sectPr = section._sectPr
    pgBorders = OxmlElement('w:pgBorders')
    for border_name in ['top', 'left', 'bottom',
                       'right']:
        border = OxmlElement(f'w:{border_name}')
        border.set(qn('w:val'), 'single')
        border.set(qn('w:sz'), '24')
        border.set(qn('w:space'), '24')
        border.set(qn('w:color'), '0000FF')
        pgBorders.append(border)
    sectPr.append(pgBorders)
```

Ici, nous créons un document Word et ajoutons une bordure bleue à la page.

Exporter les données

Ajouter l'entête, les données avec les images démonstratives, un tableau de résultat qui affiche les résultats des calculs, (Les en-têtes et les données du tableau sont extraits de TableWidget), et la valeur maximale.

```
# Ajouter l'entête
heading = doc.add_heading('Note de Calcul Système A', 0)
heading.alignment = WD_PARAGRAPH_ALIGNMENT.CENTER
run = heading.runs[0]
run.bold = True
run.font.size = Pt(24)
run.font.name = 'Lemon Milk'

# Les Données
doc.add_heading('Les Données du Pont', level=1)
data_paragraph = doc.add_paragraph()
data_paragraph.add_run(f"La largeur roulable:
{self.dataWidget.LrLineEdit.text()} m\n").font.name = 'Poppins'
ngs = 0 if self.dataWidget.radioButton0.isChecked() else 1 if
self.dataWidget.radioButton1.isChecked() else 2
data_paragraph.add_run(f"Nombre des Glissières de Sécurité:
{ngs}\n").font.name = 'Poppins'
data_paragraph.add_run(self.dataWidget.labelLc.text() +
"\n").font.name = 'Poppins'

#Image démonstrative de la largeur chargeable selon RCPR
if os.path.exists('LC.png'):
    doc.add_picture('LC.png', width=Inches(4))

data_paragraph.add_run(self.dataWidget.labelNv.text() +
"\n").font.name = 'Poppins'
data_paragraph.add_run(self.dataWidget.labelLv.text() +
"\n").font.name = 'Poppins'
data_paragraph.add_run(self.dataWidget.labelClasse.text() +
"\n").font.name = 'Poppins'

#Image démonstrative des classes des ponts selon RCPR
if os.path.exists('classe du pont.png'):
    doc.add_picture('classe du pont.png', width=Inches(4))
data_paragraph.add_run(f"le coefficient a1:
{self.dataWidget.a1}\n").font.name = 'Poppins'
data_paragraph.add_run(f"le coefficient a2:
{self.dataWidget.a2}\n").font.name = 'Poppins'

#Image démonstrative des valeurs de coefficient a1 selon RCPR
if os.path.exists('coeff a1.png'):
    doc.add_picture('coeff a1.png', width=Inches(4))
data_paragraph.add_run(
    f"Nombre de Cas de Charges:
{self.dataWidget.CasLineEdit.text()}\n").font.name = 'Poppins'

# Tableau des Résultats
doc.add_heading('Tableau des Résultats', level=1)
table = doc.add_table(rows=1,
cols=self.tableWidgetInstance.tableWidget.columnCount())
table.style = 'Table Grid'
hdr_cells = table.rows[0].cells
```

```

for i in range(self.tableWidgetInstance.tableWidget.columnCount()):
    hdr_cells[i].text =
self.tableWidgetInstance.tableWidget.horizontalHeaderItem(i).text()
    hdr_cells[i].paragraphs[0].alignment =
WD_PARAGRAPH_ALIGNMENT.CENTER
    run = hdr_cells[i].paragraphs[0].runs[0]
    run.bold = True
    run.font.color.rgb = RGBColor(255, 255, 255)
    shading_elm = OxmlElement('w:shd')
    shading_elm.set(qn('w:fill'), '00008B') # Dark blue background
    hdr_cells[i]._element.get_or_add_tcPr().append(shading_elm)

for row in range(self.tableWidgetInstance.tableWidget.rowCount()):
    row_cells = table.add_row().cells
    for col in
range(self.tableWidgetInstance.tableWidget.columnCount()):
        item = self.tableWidgetInstance.tableWidget.item(row, col)
        row_cells[col].text = item.text() if item is not None else ''
        row_cells[col].paragraphs[0].alignment =
WD_PARAGRAPH_ALIGNMENT.CENTER

```

Design du Tableau

En ajoutant les bordure et couleur en bleu pour l'entête du tableau, en a ajouté un texte qui contient la valeur maximale de A(l), donc on va le centrer en bas du tableau :

```

# Design du Tableau
for cell in table._cells:
    tcPr = cell._element.get_or_add_tcPr()
    tcBorders = OxmlElement('w:tcBorders')
    for border_attr in ['top', 'left', 'bottom', 'right']:
        border = OxmlElement(f'w:{border_attr}')
        border.set(qn('w:val'), 'single')
        border.set(qn('w:sz'), '4')
        border.set(qn('w:space'), '0')
        border.set(qn('w:color'), '00008B')
        tcBorders.append(border)
    tcPr.append(tcBorders)

max_value =
max(float(self.tableWidgetInstance.tableWidget.item(row,
3).text()) for row in

range(self.tableWidgetInstance.tableWidget.rowCount()))
max_value_paragraph = doc.add_paragraph(f"Max value in fourth
column: {max_value}")
max_value_paragraph.alignment = WD_PARAGRAPH_ALIGNMENT.CENTER
run = max_value_paragraph.runs[0]
run.font.name = 'Poppins'
run.bold = True

```

Sauvegarder et ouvrir le fichier Word :

```
doc.save('Note_de_Calcul.docx')

# Ouvrir le document
os.startfile('Note_de_Calcul.docx')
```

➤ Classe *DataWidget* :

La classe *DataWidget* gère la saisie des données et effectue des calculs de base pour classer le pont, déterminer le nombre et la largeur des voies, calculer les coefficients...etc.

Initialisation et Validation :

```
class DataWidget(QDialog, Ui_Datawidget):
    def __init__(self, table_widget_instance, parent=None):
        super(DataWidget, self).__init__(parent)
        self.setupUi(self)
        self.tableWidget = table_widget_instance
        self.setWindowIcon(QIcon("Aicon.png"))

        # Set validators
        self.LrLineEdit.setValidator(QDoubleValidator(0.0, 100.0,
2, self))
        self.CasLineEdit.setValidator(QIntValidator(1, 100, self))

        self.checkBox.clicked.connect(self.checkValues)
        self.doneButton.clicked.connect(self.doneClicked)
```

Les champs de saisie sont validés pour s'assurer que seules les valeurs numériques appropriées sont acceptées.

Calcul des Valeurs :

```

def checkValues(self):
    try:
        Lr = float(self.LrLineEdit.text())
        NGS = 0 if self.radioButton0.isChecked() else 1 if
self.radioButton1.isChecked() else 2
        Cas = int(self.CasLineEdit.text())
        self.Lc = Lr - NGS * 0.5
        Nv = round(self.Lc / 3)
        Lv = self.Lc / Nv

        if Lr > 7:
            ClassePont = 1
            v0 = 3.5
        elif Lr > 5.5:
            ClassePont = 2
            v0 = 3
        else:
            ClassePont = 3
            v0 = 2.75

        if ClassePont == 1:
            if Nv == 1:
                self.a1 = 1
            elif Nv == 2:
                self.a1 = 1
            elif Nv == 3:
                self.a1 = 0.9
            elif Nv == 4:
                self.a1 = 0.75
            elif Nv >= 5:
                self.a1 = 0.7
        elif ClassePont == 2:
            if Nv == 1:
                self.a1 = 1
            elif Nv == 2:
                self.a1 = 0.9
        elif ClassePont == 3:
            if Nv == 1:
                self.a1 = 0.9
            elif Nv == 2:
                self.a1 = 0.8

        self.a2 = v0 / Lv

        self.labelLc.setText(f"La Largeur chargeable est : {self.Lc} m")
        self.labelNv.setText(f"Nombre des Voies est {Nv} voies")
        self.labelLv.setText(f"La Largeur de Voie est {Lv} m")
        self.labelClasse.setText(f"Le Pont est de Classe: {ClassePont}")
    except ValueError:
        QMessageBox.warning(self, "Erreur d'Input", "Veuillez Entrez une
valeur numérique !")

```

La fonction *checkValues* calcule plusieurs valeurs basées sur les entrées utilisateur et met à jour les étiquettes correspondantes. Si les entrées sont invalides, une alerte est affichée.

Fonction Opérationnelle du Button Done

Si le bouton « Done » est cliqué, le code va vérifier la valeur entrée par l'utilisateur est integer en nombre des cas de charges, pour crée les lignes dans la tableau des résultats (nombre des cas), et sauvegarder les valeurs de a1, a2 et largeur chargeable, qui sont utiles dans le calcul de A(l), sinon un message d'erreur va s'afficher.

```
def doneClicked(self):
    try:
        Cas = int(self.CasLineEdit.text())
        self.tableWidget.updateTable(Cas)
        # Pass les valeurs calculées vers le TableWidget instance
        self.tableWidget.set_calculated_values(self.a1, self.a2,
        self.Lc)
        self.close() # Fermer la fenêtre DataWidget
    except ValueError:
        QMessageBox.warning(self, "Erreur d'Input", "Veuillez Entrez
        une valeur numérique !")
```

➤ Classe *TableWidget*:

La classe *TableWidget* affiche les résultats des calculs dans un tableau.

Initialisation et Mise à Jour du Tableau

```
class TableWidget(QDialog, Ui_Tablewidget):
    def __init__(self):
        super(TableWidget, self).__init__()
        self.setupUi(self)
        self.setWindowIcon(QIcon("Aicon.png"))

    self.tableWidget.cellChanged.connect(self.calculate_values)
    self.FINISHbtn.clicked.connect(self.clickedFINISH)

    # Initialisation des variables instances
    self.a1 = None
    self.a2 = None
    self.Lc = None

    def updateTable(self, Cas):
        self.tableWidget.setRowCount(Cas)
        self.tableWidget.setColumnCount(4)
        self.tableWidget.setHorizontalHeaderLabels(["L [m]",
        "A(1) [KN/m²]", "A2 (1) [KN/m²]", "A(1) [KN/ml]"])
        for i in range(Cas):
            self.tableWidget.setVerticalHeaderItem(i,
            QTableWidgetItem(f"Cas {i+1}"))
```

Le tableau est configuré avec le nombre de lignes spécifié par l'utilisateur. Les colonnes et en-têtes sont également définis.

Calcul des Valeurs du Tableau

```

def set_calculated_values(self, a1, a2, Lc):
    self.a1 = a1
    self.a2 = a2
    self.Lc = Lc

def calculate_values(self, row, column):
    # Condition: calculer seulement s'il y a un changement dans la
    # première colonne
    if column == 0:
        item1 = self.tableWidget.item(row, 0)
        if item1 is not None:
            try:
                value = float(item1.text())
                All = 2.3 + (360 / (value + 12))
                All = round(All, 3)

                if self.a1 is None or self.a2 is None or
self.Lc is None:
                    raise ValueError("Calculated values
are not set")

                A2 = All * self.a1 * self.a2
                A2 = round(A2, 3)

                A3 = A2 * self.Lc
                A3 = round(A3, 3)

                # Mettre à jour les colonnes 2 et 3 et 4.
                item1 = QTableWidgetItem(str(All))
                item1.setFlags(Qt.ItemIsEnabled)
                item2 = QTableWidgetItem(str(A2))
                item2.setFlags(Qt.ItemIsEnabled)
                item3 = QTableWidgetItem(str(A3))
                item3.setFlags(Qt.ItemIsEnabled)

                self.tableWidget.setItem(row, 1, item1)
                self.tableWidget.setItem(row, 2, item2)
                self.tableWidget.setItem(row, 3, item3)
            except ValueError as e:
                QMessageBox.warning(self, "Erreur d'Input",
f"Erreur: {e}")

```

Lorsque la valeur de la première colonne change, les valeurs des autres colonnes sont calculées et mises à jour en conséquence.

Fermeture de la Fenêtre

```
def clickedFINISH(self):  
    self.close()
```

Cette fonction ferme la fenêtre TableWidget quand le bouton est cliqué.

➤ Exécution de l'Application

```
if __name__ == '__main__':  
    app = QApplication(sys.argv)  
    window = MainWindow()  
    window.show()  
    sys.exit(app.exec_())
```

L'application est initialisée et la fenêtre principale est affichée. Le programme se termine lorsque l'utilisateur ferme la fenêtre.



ETUDE DU TABLIER

CHAPITRE V : ETUDE DU TABLIER

V.1. INTRODUCTION :

La méthode des encorbellements successifs est largement employée pour ériger des structures en porte-à-faux, notamment des ponts. Dans ce chapitre, nous détaillerons les diverses étapes de la construction de notre pont, en mettant un accent particulier sur l'analyse de la stabilité des voussoirs pendant la phase de construction. En outre, nous examinerons en détail les câbles de précontrainte des travées, incluant leur nombre, leur disposition, les pertes éventuelles, ainsi que les vérifications nécessaires.

V.2. DISPOSITION DE STABILITE DES FLEAUX :

Pendant la phase de construction, il est crucial d'assurer la stabilité des travées sur leurs piles avant leur assemblage avec les travées adjacentes ou la partie réalisée sur cintre, surtout près des culées et des travées en bordure. Le principal incident à éviter est le basculement de la travée sur l'appui de la pile. Pour évaluer ce risque, deux types de scénarios de déséquilibre doivent être pris en compte :

- Une situation temporaire de construction survient lorsque la travée est en déséquilibre sous l'effet du poids d'un voussoir construit ou posé avant son symétrique, des charges de chantier asymétriques et d'un vent ascendant agissant sur l'une des moitiés de la travée.
- Une situation accidentelle survient en cas de chute d'un équipement mobile ou d'un voussoir préfabriqué.

V.2.1. Les phases de construction d'un fléau :

La figure ci-dessous, représente les différentes phases de construction d'un fléau à partir de la pile

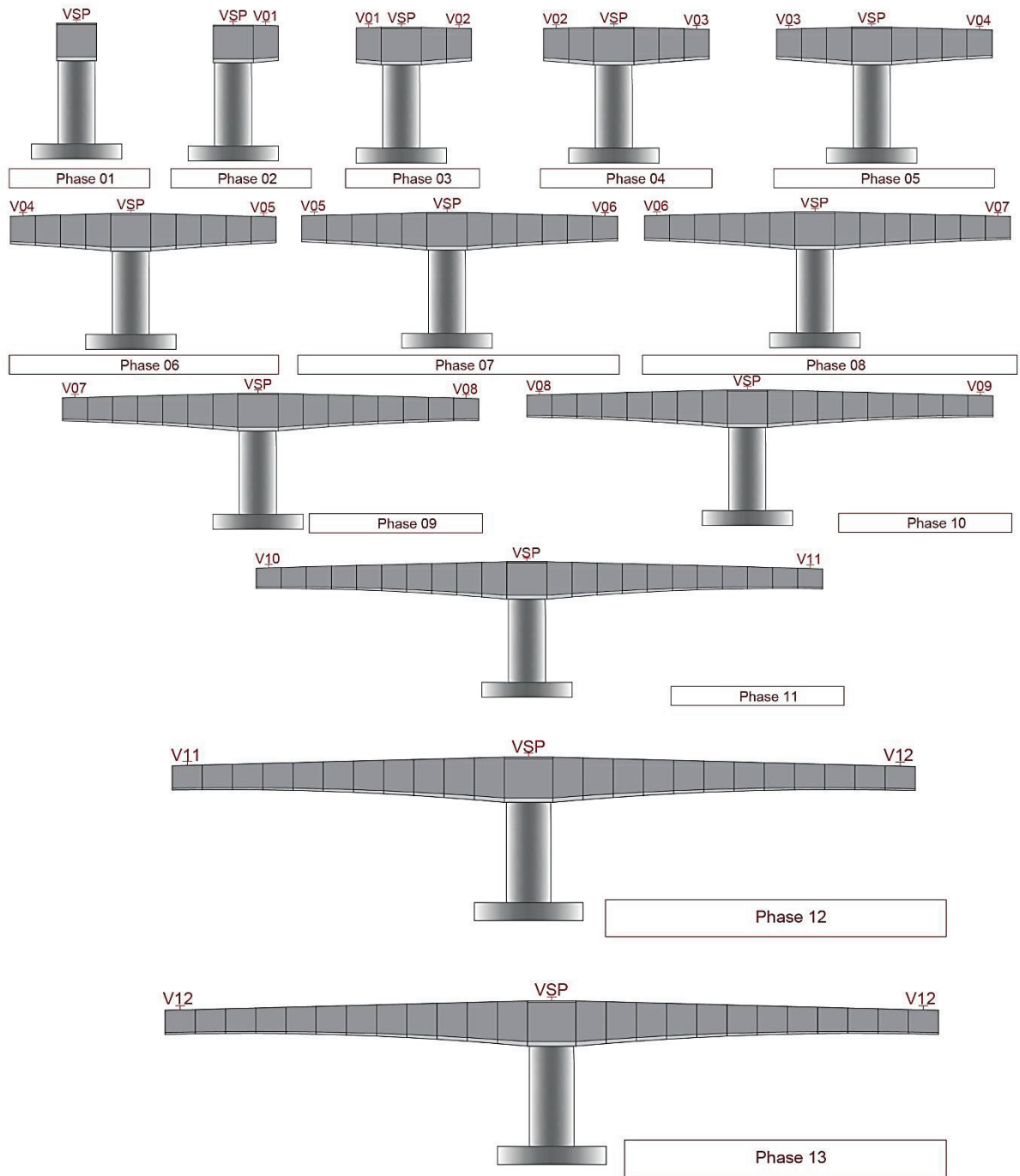


Figure V. 1: Cheminement de la réalisation d'un fléau

V.2.2. Les Charges A Prendre En Compte :

V.2.2.1. Poids propre du fléau :

Le poids des demi-fléaux situés du côté du déséquilibre sont majorés de 2 % (G max) alors que le poids de leur symétrique est minoré de 2 % (G min).

- Dans notre cas : le fléau est composé de 1 voussoirs sur pile (VSP) et 24 voussoirs courants (VST), 12 d'une part et 12 d'autre part.

$$G (\text{VSP}) = 229.2 \text{ t}$$

$$G (\text{VST}) = 2570.75 \text{ t}$$

$$G = G (\text{VSP}) + G (\text{VST})$$

$$G = 229.2 + 2570.75$$

$$\text{Le poids du demi-fléau est : } G = 2799.95 \text{ t}$$

V.2.2.2. Charges dues au vent :

Pour les ouvrages qui ont une portée plus de 120 m il convient à prendre en compte une charge complémentaire du vent.

L'effet complémentaire du vent (Q_w) est alors équivalent à une charge uniforme d'une intensité de 100 à 200 N/m².

- Dans notre cas, la portée est de 130m donc on peut prendre

$$Q_w = 100 \times 57 \text{ d'où :}$$

$$Q_w = 5.7 \text{ KN/ml}$$

V.2.2.3. Charges variables d'exécution :

Il existe deux types de charges variables :

V.2.2.3.A. Charges de chantier connues :

Les charges connues sont celles dont on peut préciser le poids et la position de chaque phase de construction ; dans les ouvrages coulés en place, il s'agit principalement de l'équipage mobile noté QPRC1, dont la valeur courante varie entre 0.30 et 0.90 MN suivant la longueur des voussoirs et la largeur du tablier. Dans les calculs, ces charges doivent être majorées de +6% du côté du demi-fléau le plus lourd ou minoré de 4% du côté opposé ($Q_{prc1 \text{ max}}$ ou $Q_{prc1 \text{ min}}$).¹

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 97– Article 5.3.2.1.

V.2.2.3.B. Charges de chantier aléatoires :

Ces charges comprennent les matériaux entreposés sur le tablier, les petits équipements de chantier (comme les compresseurs), le personnel et les effets climatiques non pris en compte par ailleurs.

Pour supporter ces charges, on utilise :

- Une charge répartie de 200N/m^2 sur un demi-fléau :

$$Q_{PRA1} = 3.20 \text{ KN/ml}$$

- Une charge concentrée de $(50+5b)$ appliqué à l'extrémité du dernier voussoir :

$$Q_{PRA2} = 130 \text{ KN}$$

b : largeur du hourdis supérieur

V.2.2.4. Actions accidentelles (FA) :

La chute de l'ensemble ou d'un voussoir préfabriqué pendant la phase de pose FA est considérée avec un coefficient de majoration dynamique de 2. Pour envisager le scénario le plus défavorable, on suppose que la chute se produit lors de la pose de la dernière paire de voussoirs.

Pour un ouvrage coulé en place, toute charge mobile pendant une ou plusieurs phases de déplacement de l'équipage est susceptible de chuter ¹.

$$FA = - Q_{PRC1 \text{ Max}} = 2429.52 \text{ KN}$$

Tableau V. 1: Les Charges Intervenant Dans La Phase Construction.

G (t)	Q _w (t/ml)	Q _{PRC1} (t)		Q _{PRA}		FA (t)
		Q _{PRC1} Max	Q _{PRC1} Min	Q _{PRA1} (t/ml)	Q _{PRA2} (t)	
2799.95	0.57	2429.52	2200.32	0.32	13	2429.52

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 99– Article 5.3.3.

V.2.3. Les combinaisons d'action en construction :

Selon le document SETRA, le tableau ci-dessous résume les différentes combinaisons d'action.

Tableau V. 2: Combinaison d'Action en Phase Construction.

Type de combinaison	G_{max}	G_{min}	Q_{PRC1} max	Q_{PRC1} min	Q_{PRA1}	Q_{PRA1}	QW	FA
Type A	A1	1.1	1.1	1.25	1.25	1.25	1.25	0
	A2	0.9	0.9	1.25	1.25	1.25	1.25	0
Type B	B1	1.1	1.1	1	1	1	1	1
	B2	0.9	0.9	1	1	1	1	1

V.2.4. Evaluation des Efforts :

Afin d'évaluer les efforts déployés, on se sert de logiciel MIDAS Civil, on considère que le tablier travaille comme une poutre bi-console :

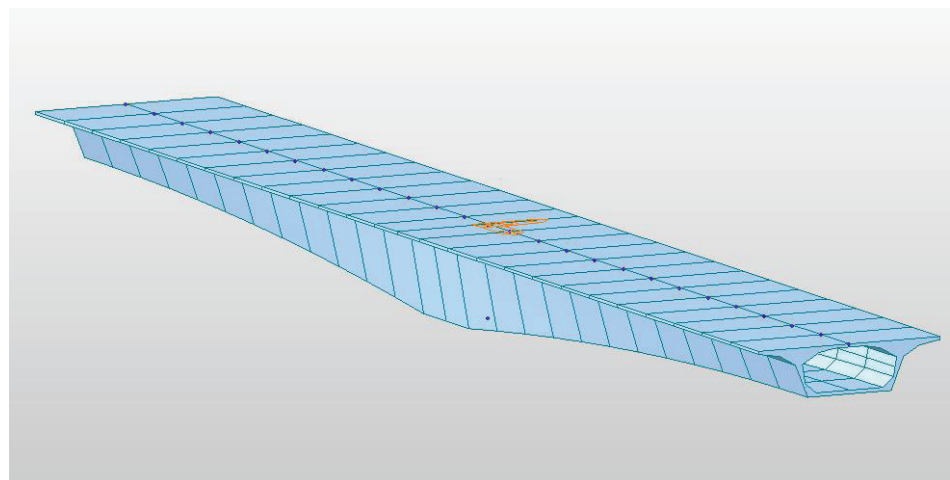


Figure V. 2: Modèle de Calcul de Fléau

⚠ **Remarque :**

Au but de comparer les résultats obtenus par le modèle précédent, on a aussi modélisé le fléau à l'aide d'un deuxième logiciel « Robot Structural Analysis » ; bien que les résultats obtenus avec les deux soient un peu loin ; C'est vrai qu'il est normal de ne pas obtenir des résultats exactement identiques lors de la modélisation et d'avoir des différences cela est dues aux spécificités des algorithmes de calcul, des méthodes de discrétisation, de la modélisation des matériaux, des conditions aux limites et des paramètres numériques propres à chaque logiciel. Mais il faut avoir une certaine limite de tolérance.

Malgré qu'il y ait des justifications que ces variations sont généralement acceptables dans la pratique de l'ingénierie structurelle, à condition qu'elles restent dans des limites raisonnables et ne compromettent pas la sécurité ou la performance de la structure – On a continué avec le model de Midas Civil.

Le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis, n'est pas orienté vers les études de ce type de ponts, cependant, Midas Civil est plus juste et exact !

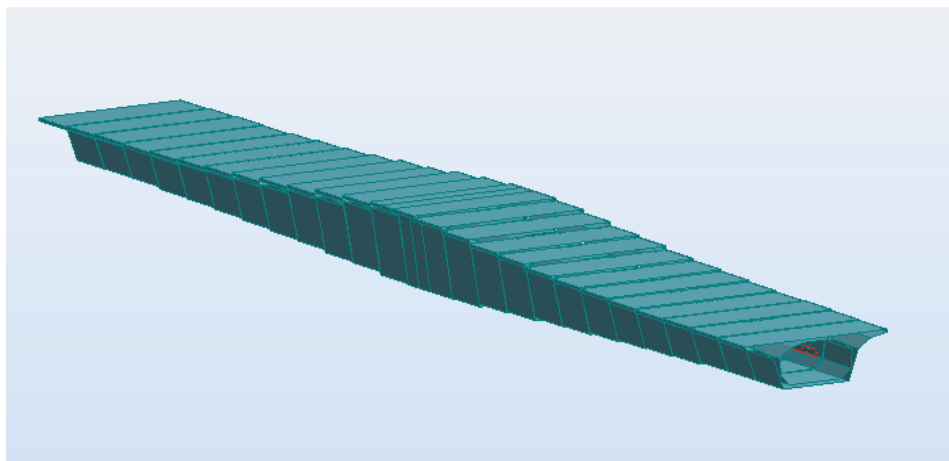


Figure V. 3: Model de Calcul de Fléau sur « Robot Structural Analysis ».

On remarque que la modélisation sur Autodesk Robot est faite avec l'importation de toutes les sections moyennes des voussoirs ! cependant : en utilisant Midas Civil on peut modéliser les variations paraboliques d'hauteur et d'épaisseur en utilisant « Tapered Section » entre la section de VSP et la section de VSC.

Ainsi que, le logiciel MIDAS Civil peut calculer la précontrainte, contrairement au Robot Structural Analysis.

On conclut que l'utilisation du logiciel Autodesk Robot est déconseillé pour ce type d'ouvrages si la maîtrise du logiciel MIDAS Civil est possible.

V.3. ETUDE DE LA PRECONTRAINTE :

V.3.1. ETUDE DE LA PRECONTRAINTE DE FLEAU :

L'application de la précontrainte aux ponts construits par encorbellements successifs se déroule principalement en deux phases :

- La première phase consiste à assembler les voussoirs par une précontrainte horizontale (câbles de fléau).
- La seconde phase consiste à relier les fléaux entre eux et aux sections de rive, construites sur des cintres, par une précontrainte dite de continuité.

V.3.1.1. DETERMINATION DU NOMBRE DE CABLE DE FLEAU :

Le dimensionnement des câbles du fléau a comme but de reprendre les moments négatifs dus au poids propre du fléau et aux surcharges en phase de construction, et de reprendre les charges permanentes et d'exploitation en phase de service.

A partir de la relation suivante, le nombre de câbles sera calculé :

$$n \geq \frac{P}{(1 - \Delta P)P_0}$$

Avec :

P : force de précontrainte.

P₀ : effort de précontrainte limite qu'un câble peut créer.

ΔP : pertes de tension estimées à 30%.

V.3.1.1.1. Evaluation de l'effort de précontrainte P₀ :

$$P_0 = \sigma_{p0} \times A_p \text{ (câbles 19T15s)}$$

La tension d'origine : $\sigma_{p0} = \min(0.8 f_{prg} ; 0.9 f_{peg})$

$f_{prg} = 1860 \text{ MPa}$ et $f_{peg} = 1674 \text{ MPa}$ (pour un câble de 1 T15s)

Ce qui résulte :

$$\sigma_{p0} = 1488 \text{ MPa}$$

et $P_0 = \sigma_{p0} \times S_{\text{câble19T15s}}$ Avec $S = 2\,850 \text{ mm}^2$

Ce qui résulte :

$$P_0 = 4.24 \text{ MN}$$

V.3.1.1.2. Evaluation de l'effort de précontrainte P :

A partir de la relation suivante, l'effort de précontraint sera calculé :

$$P = \frac{\frac{M \times v}{I}}{\frac{1}{S} + \frac{e \times v}{I}}$$

Avec :

M : moment fléchissant dû au poids propre et aux surcharges.

S : section droite du voussoir.

v : distance du CDG de section à la fibre supérieure.

e : excentricité du câble par rapport au CDG de la section : $e = v - d$.

I : le moment d'inertie de la section.

V.3.1.1.3. Application numérique :

On prend le cas où le moment est maximum c.-à-d. sur l'axe VSP :

- $M = 1\,068\,622.22 \text{ KN.m}$
- $v = 3.28 \text{ m}$
- $I = 193.2 \text{ m}^4$
- $S = 22.96 \text{ m}^2$
- $d = 15 \text{ cm}$

D'où $P = 187.63 \text{ MN}$ ce qui donne $n \geq 63.21$;

Alors :

$$N = 64 \text{ câbles de } 19\text{T}15\text{s.}$$

Dans le tableau ci-après ; les résultats des douze (12) voussoirs sont présentés :

Tableau V. 3: Estimation Du Nombre De Câbles De Fléau Pour Chaque Section.

	x (m)	M (kN.m)	H (m)	v' (m)	v (m)	I (m ⁴)	S (m ²)	e (m)	P (MN)	N câble	N retenus
Axe VSP	0	1068622.22	7.5	4.22	3.28	193.214	22.9609	3.13	187.63	63.21	64
Fin VSP	4	936556.7	7.5	4.22	3.28	193.214	22.9609	3.13	164.44	55.40	56
Fin V01	9	785907.05	6.94	4.01	2.93	154.107	21.4117	2.78	150.09	50.56	52
Fin V02	14	650544.97	6.43	3.82	2.61	122.695	20.0324	2.46	135.34	45.59	46
Fin V03	19	529633.73	5.97	3.64	2.33	98.1859	18.8684	2.18	120.00	40.42	42
Fin V04	24	422425.75	5.56	3.46	2.10	79.2903	17.903	1.95	104.07	35.06	36
Fin V05	29	328258.63	5.19	3.30	1.89	64.0718	17.0361	1.74	88.00	29.65	30
Fin V06	34	246551.1	4.88	3.16	1.72	52.9135	16.3513	1.57	71.43	24.06	26
Fin V07	39	176799.09	4.61	3.03	1.58	44.4857	15.8112	1.43	55.07	18.55	20
Fin V08	44	118571.67	4.39	2.92	1.47	38.0466	15.3457	1.32	39.44	13.29	16
Fin V09	49	71507.09	4.22	2.83	1.39	33.6443	15.02	1.24	25.08	8.45	12
Fin V10	54	35308.78	4.1	2.77	1.33	30.4683	14.7469	1.18	12.91	4.35	6
Fin V11	59	9741.35	4.02	2.73	1.29	28.6038	14.5934	1.14	3.66	1.23	2
Fin V12	64	0.00	4	2.72	1.28	28.2288	14.5728	1.13	0.00	0.00	0

- ✓ Chaque voussoir a deux (02) âmes, alors le nombre de câbles doit être entier et pair.
- ✓ Pour éviter le phénomène de torsion le nombre de câbles doit être le même dans chacun des goussets supérieurs.

V.3.1.2. VERIFICATION DES CONTRAINTES NORMALES :

La condition à vérifier est la suivante : $\sigma_{bt} \leq \sigma_y \leq \sigma_{bc}$

$$\sigma_y = \frac{P}{B} + (P \times e_0 + M) \times \frac{Y}{I}$$

Avec :

P : effort de précontrainte.

B : surface de la section considérée.

I : inertie de la section considérée.

e_0 : excentricité du câble de précontraint moyen.

M : moment extérieur.

y : les distances de son centre de gravité aux fibres extrêmes

$$\sigma_{bc} = 0.6 \times f_{c28} = 0.6 \times 40 = 24 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{bt1} = -1.5 \times f_{t28} = -1.5 \times 3 = -4.5 \text{ MPa - Hors section d'enrobage.}$$

$$\sigma_{bt2} = -0.7 \times f_{t28} = -0.7 \times 3 = -2.1 \text{ MPa - Section d'enrobage}$$

$$\sigma_{bt2} \leq \sigma_{sup} \leq \sigma_{bc} \text{ et } \sigma_{bt1} \leq \sigma_{inf} \leq \sigma_{bc}$$

Le tableau ci-après résume les résultats des contraintes :

Tableau V. 4: Contraintes Des Fibres Extrêmes Dans La Phase De Construction.

x (m)	N câbles	M (kN.m)	v' (m)	v (m)	I (m ⁴)	S (m ²)	e _{moy} (m)	P (MN)	σ _{Sup} (MPa)	σ _{Inf} (MPa)
0	64	1068622.22	4.22	3.28	193.21	22.96	2.73	199.01	-0.25	20.15
4	56	936556.70	4.22	3.28	193.21	22.96	2.81	174.13	0.00	17.35
9	52	785907.05	4.01	2.93	154.11	21.41	2.49	161.69	0.27	17.53
14	46	650544.97	3.82	2.61	122.70	20.03	2.21	143.04	0.03	17.55
19	42	529633.73	3.64	2.33	98.19	18.87	1.94	130.60	0.36	17.14
24	36	422425.75	3.46	2.10	79.29	17.90	1.73	111.94	0.21	16.23
29	30	328258.63	3.30	1.89	64.07	17.04	1.52	93.28	-0.02	15.09
34	26	246551.10	3.16	1.72	52.91	16.35	1.37	80.85	0.52	13.07
39	20	176799.09	3.03	1.58	44.49	15.81	1.22	62.19	0.33	10.82
44	16	118571.67	2.92	1.47	38.05	15.35	1.13	49.75	0.83	8.03
49	12	71507.09	2.83	1.39	33.64	15.02	1.09	37.31	1.21	5.08
54	6	35308.78	2.77	1.33	30.47	14.75	1.03	18.66	0.56	2.74
59	2	9741.35	2.73	1.29	28.60	14.59	0.99	6.22	0.26	0.77
64	0	0.00	2.72	1.28	28.23	14.57	0.98	0.00	0.00	0.00

V.3.1.3. DISPOSITION ET ENROBAGE DES CÂBLES :

Pour garantir une mise en place correcte du béton (cheminé de bétonnage) et d'éviter tout contact entre les paquets de gaines lors de la mise en tension, il est important de respecter la distance minimale entre les conduits ainsi que l'enrobage. Par conséquent, il est nécessaire de respecter les conditions suivantes :

- L'espacement horizontal entre les axes de deux câbles :

$$e_h \geq 2\Phi_g \leftrightarrow e_h \geq 20 \text{ cm.}$$

- L'espacement vertical entre les axes de deux câbles :

$$e_v \geq 2\Phi_g \leftrightarrow e_v \geq 20 \text{ cm.}$$

- L'enrobage : $C = \max (3/4 a, \Phi_g, d)$ avec $d = 5 \text{ cm}$,

$$a = \Phi_g = 10 \text{ cm} \leftrightarrow C \geq 10 \text{ cm.}$$

Avec :

a : la dimension horizontale du rectangle circonscrit au conduit ou au paquet de conduits.

Φ : diamètre de la gaine ($\Phi = 100 \text{ mm}$).

d : 5 cm.

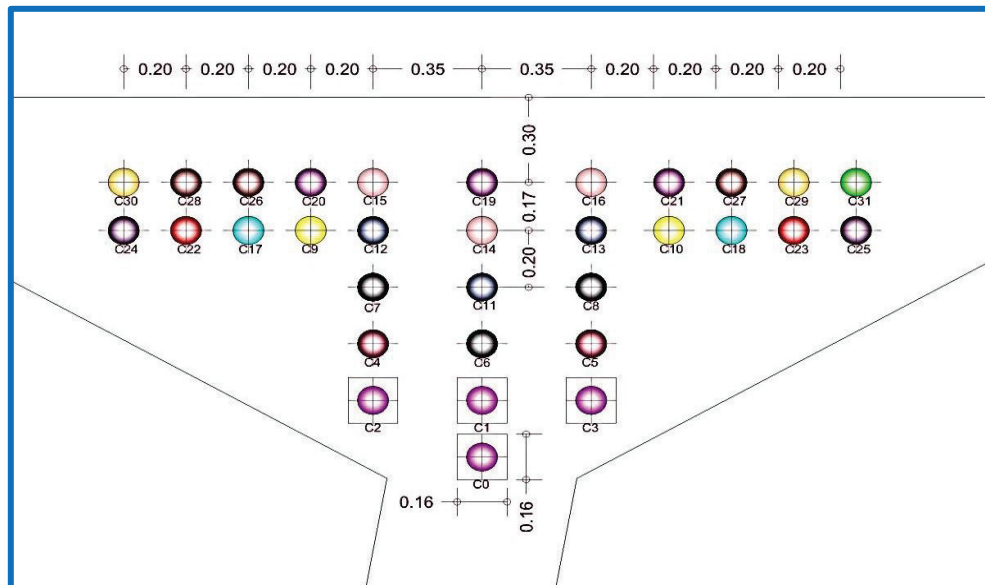


Figure V. 4: Disposition Des Câbles De Fléau Au Niveau De VSP Et Position Des Ancrages.

V.3.1.4. TRACE DES CABLES :

V.3.1.4.1. TRACE DES CABLES EN PLAN :

Le tracé des câbles devra satisfaire les conditions suivantes :

- ✓ Il est essentiel de minimiser au maximum le croisement des câbles, en particulier au niveau des âmes.
- ✓ Les câbles doivent suivre une trajectoire rectiligne jusqu'au dernier voussoir, où ils subiront alors une déviation parabolique.

Disposition en plan des câbles du fléau :

- L'équation de la parabole : $Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \left(\frac{x}{l}\right)^2$
- Les rayons de courbure : $R_i(x) = \frac{(x_i)^2}{2(Z_i - Z_{i+1})}$; $R_{i+1}(x) = \frac{(x_{i+1})^2}{2(Z_{i+1} - Z_{i+2})}$
- L'inclinaison dans la section intermédiaire : $\beta_i(x) = \text{Arctg} \frac{2(Z_i - Z_{i+1})}{x_i}$
- L'inclinaison dans la section d'ancrage : $\beta_{i+1}(x) = \text{Arctg} \frac{2(Z_{i+1})}{x_{i+1}}$

➤ Dans notre cas, les deux courbures auront la même allure mais en sens opposés :

$$x_i = x_{i+1} ; \quad \beta_i = \beta_{i+1} ; \quad R_i = R_{i+1} \quad \text{Mais} \quad Z_i = 2 \times Z_{i+1}$$

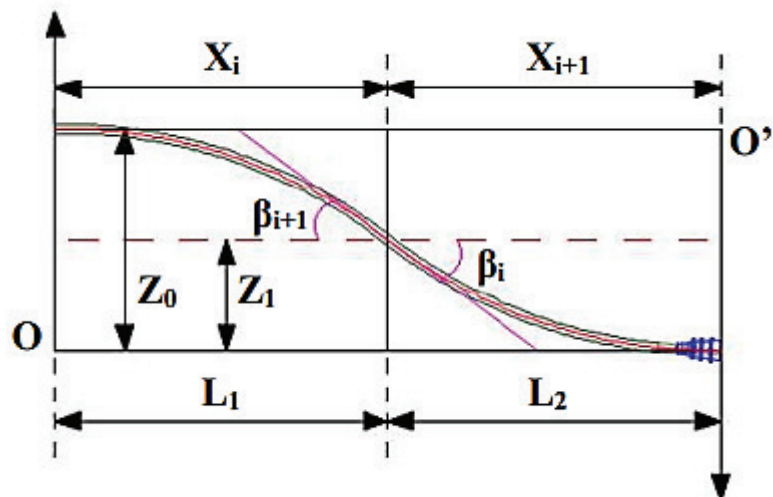


Figure V. 5 : Tracé En Plan Des Câbles De Fléau

V.3.1.4.2. TRACE DES CABLES EN ELEVATION :

Les câbles suivront une trajectoire rectiligne jusqu'au dernier voussoir, où ils dévieront paraboliquement vers le bas.

- L'équation de la parabole : $d(x) = d_0 + (d_1 - Z_0) \left(\frac{x}{l}\right)^2$

- Le rayon de courbure : $R_c(x) = \frac{x^2}{2(d_1 - d_0)} \geq R_{\min}$

- L'angle de déviation : $\alpha_n = \text{Artg} \left(2 \times (d_1 - d_0) \times \left(\frac{x}{l}\right) \right)$

Avec :

- d_1 : distance du point d'ancrage à la fibre supérieure.
- d_0 : distance du CDG du câble à la fibre supérieure.
- l : distance sur laquelle se fait la courbure (longueur d'un voussoir).
- R_{\min} : rayon minimal de câbles 19T15
($R_{\min} = 4\text{m}$ aux ancrages et $R_{\min} = 3\text{m}$ dans les déviations).

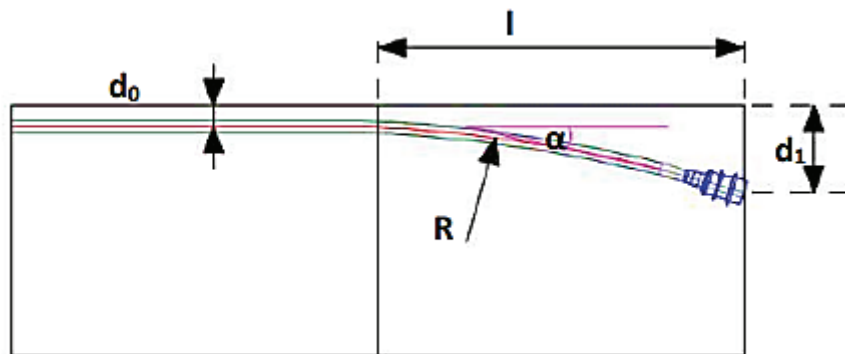


Figure V. 6: Tracé En élévation Des Câbles De Fléau

V.3.1.4.3. Application numérique sur le câble C9 :

$$L = 5 \text{ m}$$

$$x_0 = x_1 = 2.5 \text{ m}$$

$$Z_0 = 0.25 \text{ m} \quad Z_1 = Z_0/2 = 0.125 \text{ m}$$

$$d_0 = 0.47 \text{ m} \quad d_1 = 0.67 \text{ m}$$

- **En plan** : $Z(x) = 0.25 + (0.125 - 0.25) \left(\frac{x}{2.5}\right)^2$.

$$Z(x) = 0.25 - 0.02 x^2$$

$$R(x) = R_{i+1}(x) = \frac{2.5^2}{2(0.25 - 0.125)} = 25$$

$$\beta_i(x) = \beta_{i+1}(x) = \text{Arctg} \frac{2(0.25 - 0.125)}{2.5}$$

• En élévation : $Y(x) = 0.47 + (0.67 - 0.47) \times (x / 5)^2$.

$$Y(x) = 0.47 + 0.008 x^2$$

$$(x) = \frac{5^2}{2(0.67 - 0.47)} = 62.5 \text{ m.}$$

$$\alpha_n = \text{Artg} (2 \times (0.67 - 0.47) \times (\frac{5}{5^2})) = 0.08 \text{ rad}$$

Tableau V. 5: Allure Du Tracé En Plan Des Câbles De Fléau.

Câbles	Zi (m)	Zi+1 (m)	Xi ; Xi+1 (m)	Ri ; Ri+1 (m)	$\beta_i ; \beta_{i+1}$ (rad)	Z(x)
De C0 à C8 ; De C11 à C16 ; De C21 à C31.	Rectiligne					
C9 ; C10 ; C17 ; C18 ; C19 ; C20.	0.25	0.125	2.5	25	0.099	0.25-0.02 x ²

Tableau V. 6: Allure Du Tracé En Elévation Des Câbles De Fléau.

Câbles	L (m)	d0	d1	Ri (m)	α (rad)	d(x)
C0.C1.C2.C3	Rectiligne					
C4.C5.C6	5	0.87	1.07	62.5	0.0761	0.87+0.008 X ²
C7.C8.C11	5	0.67	0.87	62.5	0.08	0.67+0.008 X ²
C9.C10.C12. C13.C14.C17. C18.C22.C23. C24.C25	5	0.47	0.67	62.5	0.08	0.47+0.008 X ²
C15.C16.C19. C20.C21.C26. C27.C28.C29. C30.C31	5	0.3	0.47	73.53	0.07	0.3+0.007 X ²

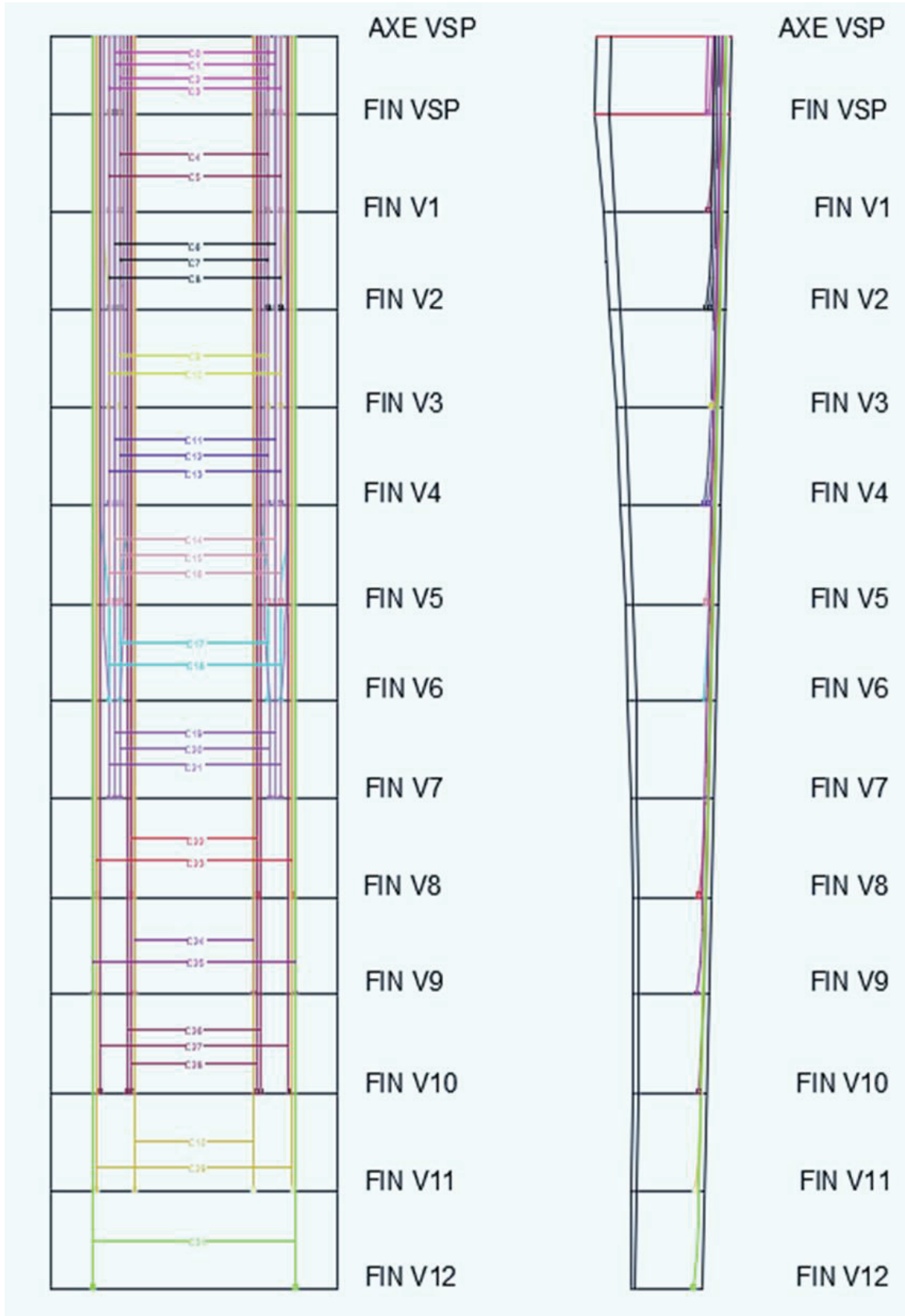


Figure V. 7: Tracé En Plan et en élévation des Câbles de Fléau

V.3.2. ETUDE DE LA PECONTRAINTE DE CONTINUITE :

Les câbles de continuité destinés à reprendre toutes les actions complémentaires appliquées à la structure après réalisation des fléaux. ¹

Ces câbles qui sont situés dans les goussets inférieurs et sont ancrés dans des bossages situés à la jonction âme-hourdis inférieur.

V.3.2.1. Détermination Du Nombre De Câbles De Continuités En Travée Principale

La précontrainte de continuité en travées intermédiaires vise à éliminer ou réduire les moments positifs aux appuis intermédiaires et à améliorer la capacité de la structure à supporter les charges d'exploitations et les forces dynamiques, pour cela on utilise des câbles nommés « câbles de continuité » et pour calculer le nombre de ces derniers on prend en considération le moment maximal en appliquant les formules suivantes :

$$P = \frac{M \times v'}{\frac{1}{S} + \frac{e \times v'}{I}}$$

Avec :

$$e = v' - d \text{ et } n \geq \frac{P}{(1 - \Delta P) \times P_0}$$

M : le moment fléchissant à mi-travée dû à la combinaison de charge la plus défavorable

✓ Application numérique :

- M = 319 225.9 KN.m (combinaison ELS A(I))
- v' = 2.72 m
- I = 28.23 m⁴
- S = 14.57 m²
- e = 1.13 m
- ΔP = 26.67 %

D'où P = 120.79 MN ; n ≥ 38.85 On prend alors : n = 40 câbles de 19T15s

¹ . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 47– Article 3.1.

Tableau V. 7: Estimation Du Nombre De Câbles De Continuité De Travée Principale

	X (m)	M (KN.m)	v' (m)	v (m)	I (m ⁴)	S (m ²)	e (m)	P (MN)	N câbles	N retenu
FIN V5	0	-28712.4	3.30	1.89	64.0718	17.0361	1.74	-9.98	-3.21	0
FIN V6	5	61029.7	3.16	1.72	52.9135	16.3513	1.57	17.68	5.68	6
FIN V7	10	136941.1	3.03	1.58	44.4857	15.8112	1.43	42.66	13.72	14
FIN V8	15	199351.6	2.92	1.47	38.0466	15.3457	1.32	66.31	21.32	22
FIN V9	20	248534.4	2.83	1.39	33.6443	15.02	1.24	87.16	28.03	30
FIN V10	25	284704.4	2.77	1.33	30.4683	14.7469	1.18	104.13	33.49	34
FIN V11	30	308017.3	2.73	1.29	28.6038	14.5934	1.14	115.81	37.24	38
FIN V12	35	318568.5	2.72	1.28	28.2288	14.5728	1.13	120.54	38.77	40
AXE VSC	37	319151.6	2.72	1.27	28.25	14.5822	1.12	120.64	38.80	40
FIN V12	35	319225.9	2.72	1.28	28.2288	14.5728	1.13	120.79	38.85	40
FIN V11	30	311961.5	2.73	1.29	28.6038	14.5934	1.14	117.29	37.72	38
FIN V10	25	291935.4	2.77	1.33	30.4683	14.7469	1.18	106.77	34.34	34
FIN V9	20	259052.3	2.83	1.39	33.6443	15.02	1.24	90.84	29.22	30
FIN V8	15	213156.4	2.92	1.47	38.0466	15.3457	1.32	70.90	22.80	22
FIN V7	10	154032.8	3.03	1.58	44.4857	15.8112	1.43	47.98	15.43	14
FIN V6	5	81408.4	3.16	1.72	52.9135	16.3513	1.57	23.59	7.59	6
FIN V5	0	-5046.9	3.30	1.89	64.0718	17.0361	1.74	-1.35	-0.44	0

⚠ **Commentaire :** Le Nombre des câbles de continuité (40 câbles) est un peu grand, en basant sur une comparaison avec d'autres projet, mais ce nombre est justifié par la portée qui est 130m, et la largeur du pont qui est de 16m, avec notre supposition des pertes qui est 30% (les recommandations des experts stipulent que les pertes sont supposées entre 20 et 30%).

➤ Tracé Des Câbles

Tableau V. 8: Allure Du Tracé En Plan Des Câbles De Continuité De Travée Principale.

Câbles	Z _i (m)	Z _{i+1} (m)	X _i ; X _{i+1} (m)	R _i ; R _{i+1} (m)	β _i ; β _{i+1} (rad)	Z(x)
De C5 à C16	Rectiligne					
C0;C1 ; C2 ; C3 ; C4 ; C17 ; C18 ;C19	0.20	0.10	2.50	31.25	0.798	0.20-0.016x ²

Tableau V. 9: Allure Du Tracé En Elévation Des Câbles De Continuité De Travée Principale.

Câbles	L (m)	d ₀	d ₁	Ri (m)	α (rad)	d(x)
C0.C4.C6.C8	5	0.15	0.95	15.63	0.20	0.15+0.03 X ²
C1.C2.C7	5	0.15	1.28	11.06	0.23	0.15+0.05X ²
C3.C5	5	0.15	1.62	8.50	0.25	0.15+0.06X ²
C10.C12.C17. C18.C19	5	0.35	0.95	20.83	0.18	0.35+0.02 X ²
C11	5	0.35	1.28	13.44	0.22	0.35+0.04 X ²
C9	5	0.35	1.62	9.84	0.24	0.35+0.05 X ²
C14.C16	5	0.55	0.95	31.25	0.13	0.55+0.02 X ²
C15	5	0.55	1.28	17.12	0.19	0.55+0.03 X ²
C13	5	0.55	1.62	11.68	0.23	0.55+0.04 X ²

➤ Disposition Des Câbles

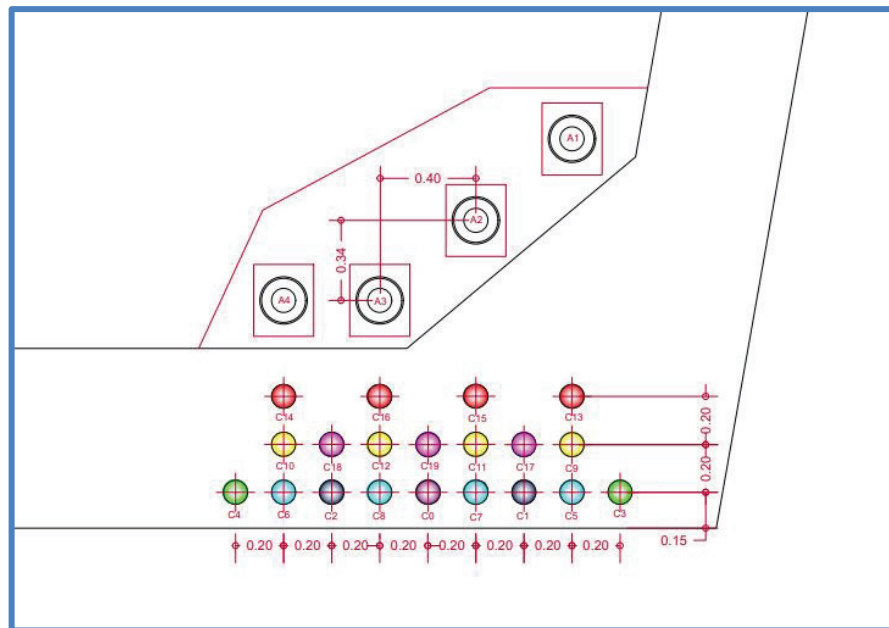


Figure V. 8: Disposition des Câbles de Continuité De Travée Principale Au Niveau de VSP.

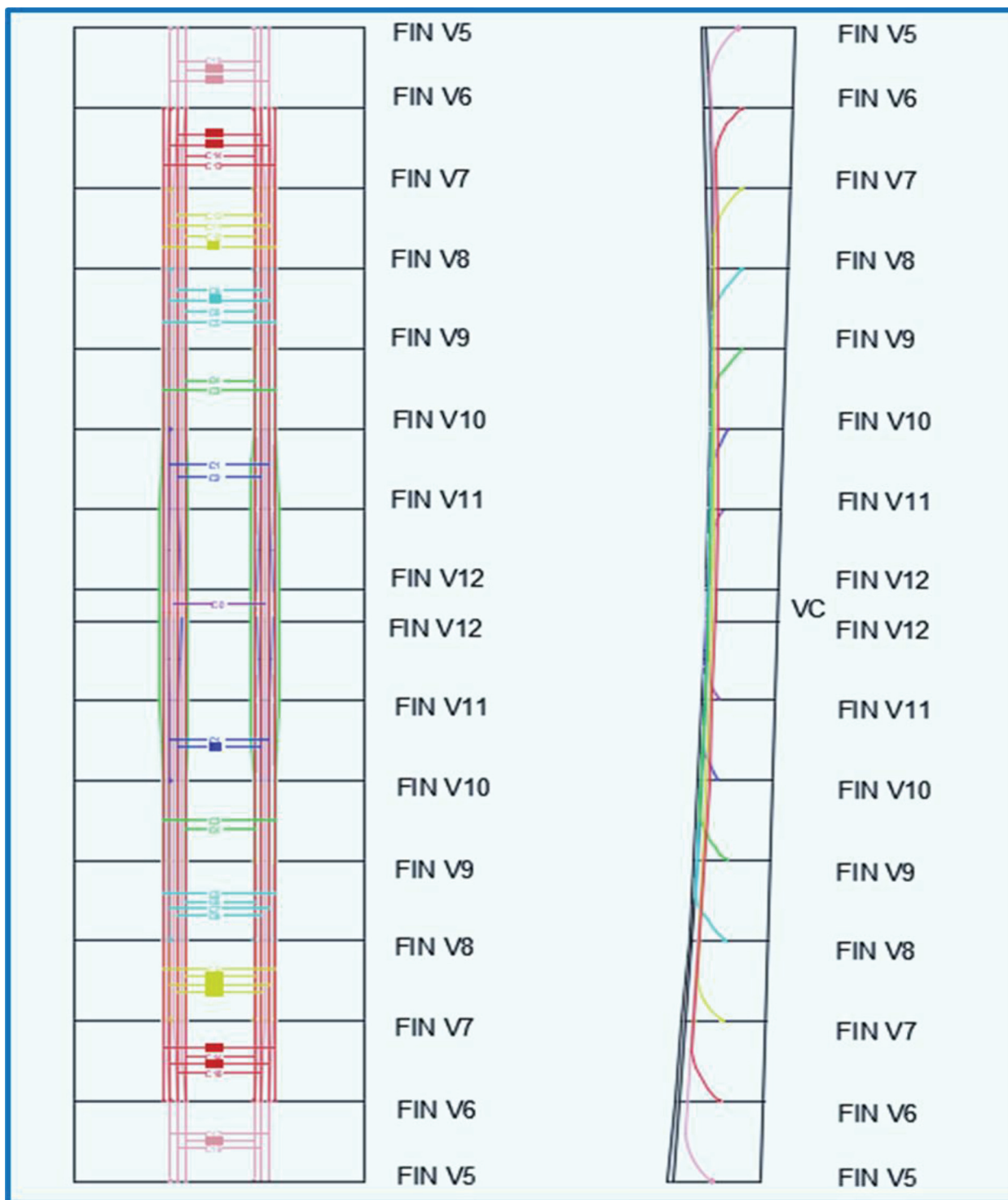


Figure V. 9: Tracé En Elévation Et En Plan Des Câbles Des Continuités Pour La Travée Principale.

V.3.2.2. Détermination Du Nombre De Câbles De Continuités En Travée de Rive :

La précontrainte de continuité en travée de rive vise à éliminer ou réduire les moments positifs aux extrémités du pont ; pour calculer le nombre de câbles nécessaires pour cet effort on s'appuie sur la même formule utilisée dans le titre précédent.

✓ Application numérique :

- $M = 110\,499.4 \text{ KN.m}$ (combinaison ELS A(1))
- $v' = 2.77 \text{ m}$
- $I = 30.47 \text{ m}^4$
- $S = 14.75 \text{ m}^2$
- $e = 1.18 \text{ m}$
- $\Delta P = 26.67 \%$

D'où $P = 58.12 \text{ MN}$; $n \geq 18.69$ On prend alors : $n = 20$ câbles de 19T15s

Tableau V. 10: Estimation du Nombre de câbles de continuité de travée de rive

	X (m)	M (KN.m)	v' (m)	v (m)	I (m ⁴)	S (m ²)	e (m)	P (MN)	N câble	N retenus
FIN VC1	0	-5.14	2.72	1.28	28.22	14.5728	1.13	-0.002791	-0.000898	0
FIN VC2	5	-5.14	2.72	1.28	28.22	14.5728	1.13	-0.002791	-0.000898	0
FIN VSC CL	10	81946.97	2.72	1.28	28.23	14.5728	1.13	44.483329	14.312056	16
FIN V12	12	91997.89	2.72	1.28	28.228	14.5728	1.13	49.830847	16.032565	18
FIN V11	17	107874.4	2.73	1.29	28.603	14.5934	1.14	58.119715	18.699424	20
FIN V10	22	110499.3	2.77	1.33	30.468	14.7469	1.18	57.531504	18.510173	20
FIN V09	27	99777.27	2.83	1.39	33.644	15.02	1.24	49.136552	15.809183	16
FIN V08	32	75552.45	2.92	1.47	38.046	15.3457	1.32	34.821276	11.203389	12
FIN V07	37	37609.92	3.03	1.58	44.485	15.8112	1.43	15.912589	5.1197127	6
FIN V06	42	-14323.36	3.16	1.72	52.913	16.3513	1.57	-5.522718	-1.776878	0
FIN V05	47	-80577.41	3.30	1.89	64.071	17.0361	1.74	-28.01147	-9.012405	0

➤ Disposition Des Câbles

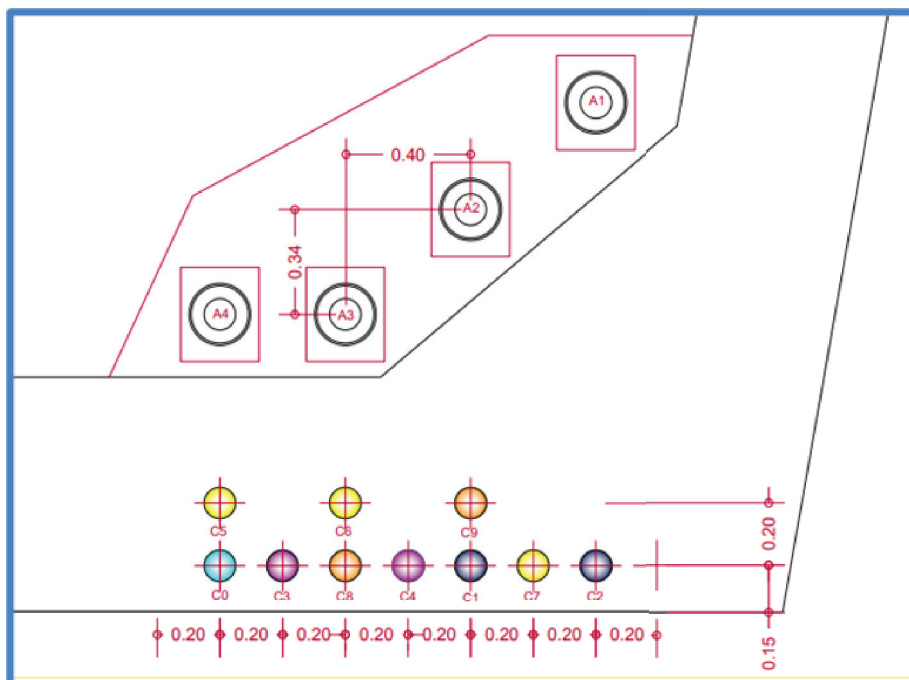


Figure V. 10: Disposition des câbles de continuité de travée principale au niveau de VSP.

➤ Tracé Des Câbles

Tableau V. 11: Allure Du Tracé En Plan Des Câbles De Continuité De Travée De Rive.

Câbles	Z _i (m)	Z _{i+1} (m)	X _i ; X _{i+1} (m)	R _i ; R _{i+1} (m)	β _i ; β _{i+1} (rad)	Z(x)
C0 ; C1 ; C2 ; C5 ; C6 ; C8 ; C9.	Rectiligne					
C3 ; C4 ; C7.	0.20	0.10	2.50	31.25	0.08	0.20-0.016 x ²

Tableau V. 12: Allure Du Tracé En élévation Des Câbles De Continuité De Travée De Rive.

Câbles	Voussoirs	L(m)	d0	d1	Ri(m)	(rad)	d(x)
C0	V10	5	0.15	0.95	15.63	0.20	$0.15 + 0.03 x^2$
	V11	5	0.15	0.95	15.63	0.20	
C1	V09	5	0.15	1.28	11.06	0.23	$0.15 + 0.05 x^2$
	V12	5	0.15	1.28	11.06	0.23	
C2	V09	5	0.15	1.62	8.50	0.25	$0.15 + 0.06 x^2$
	V12	5	0.15	1.62	8.50	0.25	
C3	V08	5	0.15	0.95	15.63	0.20	$0.15 + 0.03 x^2$
	VCL	5	0.15	0.95	15.63	0.20	
C4	V08	5	0.15	0.95	15.63	0.20	$0.15 + 0.03 x^2$
	CVL	5	0.15	0.95	15.63	0.20	
C5	V07	5	0.35	0.95	20.83	0.18	$0.35 + 0.02 x^2$
	5m VCL	5	0.35	0.95	20.83	0.18	
C6	V07	5	0.35	0.95	20.83	0.18	$0.35 + 0.02 x^2$
	5m VCL	5	0.35	0.95	20.83	0.18	
C7	V07-	5	0.15	1.28	11.06	0.23	$0.15 + 0.05 x^2$
	5m VCL	5	0.15	1.28	11.06	0.23	
C8	V07	5	0.15	0.95	15.63	0.20	$0.15 + 0.03 x^2$
	10m VCL	5	0.15	0.95	15.63	0.20	
C9	V07	5	0.35	1.28	13.44	0.22	$0.35 + 0.04 x^2$
	10m VCL	5	0.35	1.28	13.44	0.22	

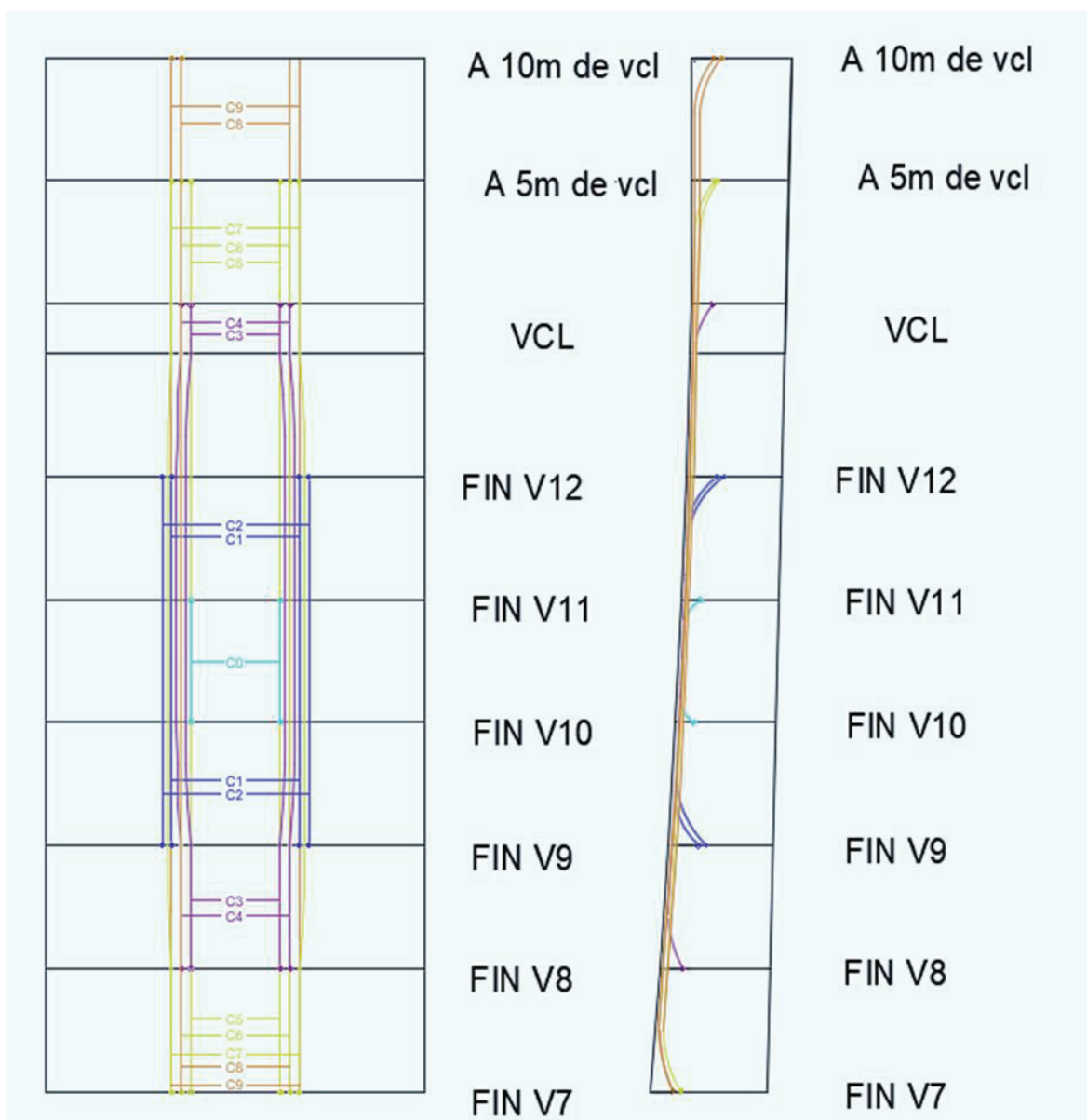


Figure V. 11: Tracé En Elévation Et En Plan Des Câbles Des Continuités Pour La Travée de Rive.

V.3.3. EVALUATION DES PERTES DE LA PRECONTRAINTE :

La "perte de précontrainte" désigne généralement toutes les différences entre la force appliquée par le vérin lors de la mise en tension et la force présente en un point spécifique de l'armature à un instant bien défini.

Dans le cas du béton précontraint, ces pertes sont importantes et peuvent atteindre de 20 à 30% de la précontrainte initiale.

Il existe deux catégories de perte de tension : instantanées et différées.

V.3.3.1. PERTE INSTANTANÉES :

Au moment de la mise en tension de la précontrainte, et dans un temps relativement court, il se produit trois types de pertes instantanées :

- Les pertes de tension par frottement ;
- Les pertes de tension par déformations instantanées du béton ;
- Les pertes de tension par recul d'ancrage ;

V.3.3.1.1. Perte de tension par frottement :

Ce type de perte se manifeste lors de la mise en tension des câbles par suite de leurs frottements avec la gaine ; le déplacement des câbles à l'intérieur de cette dernière est gêné par sa courbure en plan et en élévation.

Cela peut être calculé par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_{\varphi}(x) = \sigma_{p0} \times (1 - e^{-(f \times \theta + \phi \times x)})$$

Avec :

- σ_{p0} : La tension à l'origine ;
- e : la base des logarithmes népériens ;
- f : coefficient de frottement en courbe (rd-1) ;
- ϕ : coefficient de frottement en ligne (m-1) ;
- x : la distance de la section considérée (m) ;
- θ : somme des déviations angulaires arithmétiques du câble sur la distance x (rd) ;

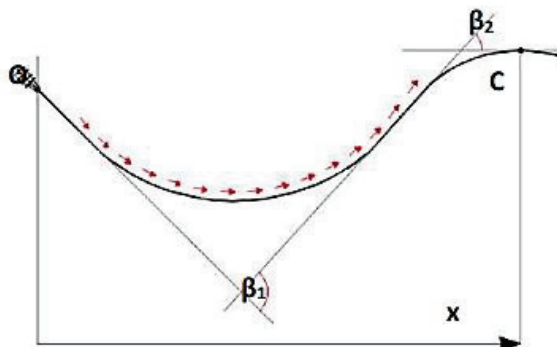


Figure V. 12: Frottement Le Long Du Câble Lors De La Mise En Tension.

- Si les déviations α en élévation et β en plan se succèdent, la déviation totale à considérer est la somme : $\theta = \alpha + \beta$ (dans notre cas $\beta=0$ pour certains câbles car ils suivent une trajectoire rectiligne en plan cependant d'autres câbles ont une déviation β en plan).
- Si les déviations α en élévation et β en plan ont lieu simultanément, on aura la formule approchée : $\text{tg } \theta = \sqrt{\text{tg}^2 \beta + \text{tg}^2 \alpha}$

➤ Dans notre cas :

Les valeurs de φ et f sont les suivantes :

$$f=0.2 \text{ et } \Phi = 0.003$$

V.3.3.1.2. Perte De Tension Par Recul D'ancrage :

Un glissement des câbles peut être causé par le tassement ou la déformation de l'ancrage cela provoque le glissement de l'armature par rapport à son ancrage ce qui donne naissance à des pertes de tension par recul d'ancrage, son influence diminue à partir de l'ancrage jusqu'à s'annuler à une distance « d ».

Cela est défini par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_g(x) = 2 \cdot \sigma_{p0} \times k(d - x)$$

Avec :

- $k = \alpha \frac{f}{L} + \varphi$ et $d = \sqrt{\frac{E_p \cdot g}{k \cdot \sigma_0}}$
- σ_{p0} : Contrainte initiale.
- k : fonction croissante.
- α : somme des déviations angulaires arithmétiques du câble.
- f : coefficient de frottement en courbe (rd^{-1}).
- L : longueur du câble.
- φ : coefficient de frottement en ligne (m^{-1}). $\varphi=0.003$.
- d : longueur dans laquelle s'effectue le recul d'ancrage.
- g : l'intensité du recul d'ancrage. $g=0.006$ (m).
- E_p : module d'élasticité des aciers. $E_p=190\ 000$ (MPa).
- x : la distance depuis l'ancrage (m).

V.3.3.1.3. Perte De Tension Due Au Non-Simultanéité de La Mise En Tension :

Lorsque plusieurs câbles sont présents dans une poutre lors de la mise en tension, ceux-ci sont tendus successivement. À chaque mise en tension d'un câble, le béton subit un raccourcissement, ce qui entraîne une diminution de la tension dans les câbles déjà tendus.

Cela est défini par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_{\text{rac}}(\mathbf{x}) = \frac{N-1}{2n} \times \frac{E_p}{E_{bi}} \sigma_b(\mathbf{x})$$

Avec :

n : nombre de câble

σ_b : Contrainte finale (après pertes instantanées : $\Delta P = 30\%$) du béton au niveau des câbles dans l'ouvrage soumis à ses seules charges permanentes.

E_p : module de Young des armatures de précontrainte

E_{bi} : module instantané du béton au jour j

➤ Le **BPEL** donne la perte moyenne par câble par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_{\text{rac}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \times \frac{E_p}{E_{bi}} \sigma_b(\mathbf{x})$$

$$\frac{E_p}{E_{bi}} = 5.28 \text{ D'où } \Delta\sigma_{\text{rac}}(\mathbf{x}) = 2.64 \times \sigma_b(\mathbf{x})$$

$$\text{Avec : } \sigma_{bi} = \frac{p}{B} + \frac{p \cdot e^2}{I} - \frac{M_g \cdot e}{I}$$

Avec :

P : effort de précontrainte, $P = P_0 (1 - \Delta P)$

M_g : Moment dû au poids propre.

e : Excentricité du câble moyen.

V.3.3.1.4. Pertes Instantanées Totales :

Pour la même abscisse x , la valeur de pertes instantanées est calculée à l'aide de la formule suivante : $\Delta\sigma_i = \Delta\sigma\phi + \Delta\sigma g + \Delta\sigma$

V.3.3.2. PERTES DE TENSION DIFFEREEES :

Avec le temps, la tension dans les câbles se réduit progressivement au cours du temps par les effets du retrait et du fluage du béton, ainsi que la relaxation des aciers jusqu'à une valeur finale à prendre en compte dans le calcul de l'ouvrage.

V.3.3.2.1. Perte Par Retrait :

Le béton subit une diminution de volume au cours de son durcissement qui dû à l'évaporation de l'eau en excès. On peut considérer par simplification que le retrait final ξ_r ne dépend que des conditions climatiques.

Soit t_0 l'âge du béton au moment de la mise en tension d'un câble, la partie non encore effectuée du retrait vaut : $\xi_r [1 - r(t_0)]$

La perte finale de tension par retrait est donc : $\Delta\sigma_r = E_p \times \xi_r [1 - r(t_0)]$.

Souvent, on peut négliger $r(t_0)$ devant 1, ce qui donne naissance à la formule simplifiée suivante :

$$\Delta\sigma_r = E_p \times \xi_r$$

ξ_r : retrait final, estimé suivant BPEL par 2×10^{-4} pour région tempérée.

$r(t)$: loi d'évolution du retrait en fonction du temps.

V.3.3.2.2. Perte par fluage :

Sous l'effet d'une contrainte constante, il se produit un phénomène nommé « fluage » qui est une déformation du béton dans le temps. En revanche, lorsqu'il s'agit de retrait, le fluage commence dès le chargement et évolue dans le temps.

La perte due au fluage est définie par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_{fl} = \frac{E_p}{E_{bi}} \times (\sigma_b + \sigma_M)$$

σ_b : Contrainte de compression du béton au niveau des câbles en phase finale.

σ_M : Contrainte maximale au niveau du centre de gravité des armatures de précontrainte, dans la section considérée ; d'après le BPEL la contrainte σ_M vaut:

$$\sigma_M = 1.5 \times \sigma_b$$

$$\text{D'où : } \Delta\sigma_{fl} = 2.5 \times \frac{E_p}{E_{bi}} \times \sigma_b(x)$$

V.3.3.2.3. Perte Par Relaxation :

La relaxation des aciers peut être définie par la diminution de la tension dans ces armatures ;

La perte finale de la tension résultante de ce phénomène est estimée par la formule suivante :

$$\Delta\sigma_p = 0.06 \times \sigma_{pi}(x) \cdot \rho_{1000}(\mu - \mu_0), \quad \text{tel que : } \mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}}$$

Avec :

- σ_{pi} : La contrainte après les pertes instantanées dans l'abscisse x
- μ_0 : Coefficient qui tient compte du taux en delà duquel il n'y a pas de relaxation, il est égal à 0.43 pour les aciers de très bonne relaxation.
- ρ_{1000} (%): Valeur garantie de la relaxation à 1000 h. $\rho_{1000} = 2.5 \%$.
- f_{prg} : Contrainte limite conventionnelle d'élasticité. $f_{prg} = 1860$ MPa.

V.3.3.2.4. Pertes Différées Totales :

Pour tenir compte de l'interaction du retrait et du fluage ainsi que la relaxation minorée de $\frac{5}{6}$ des armatures, les pertes différées totales sont évaluées par la formule ci-après :

$$\Delta\sigma_d = \Delta\sigma_r + \Delta\sigma_{fl} + \frac{5}{6} \Delta\sigma_p$$

V.3.3.3. LES PERTES TOTALES :

La perte totale représente la somme des pertes instantanées et différées d'où :

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma_i + \Delta\sigma_d$$

V.3.3.4. APPLICATION NUMERIQUE POUR LE PREMIER CABLE C0:

V.3.3.4.1. Pertes Instantanées :

- ✓ Perte de tension par frottement :

$$\Delta\sigma_{\varphi}(4) = 1488 \times (1 - e^{-(0.2 \times 0 + 0.003 \times 4)})$$

$$\Delta\sigma_{\varphi}(4) = 17.75 \text{ MPa}$$

- ✓ Perte de tension par recul d'ancrage :

$$k = 0 \times \frac{0.2}{4} + 0.003 \text{ D'ou } k = 0.003 \text{ Et } d = \sqrt{\frac{190000 \times 0.006}{0.003 \times 1488}} = 15.98 \text{ m}$$

L'ancrage est situé en fin de VSP dont $x=0$, d'où :

$$\Delta\sigma_g(0) = 2.1488 \times 0.003(15.98 - 0)$$

$$\Delta\sigma_g(0) = 142.67 \text{ MPa}$$

En $x=4$ m (Axe VSP) : $\Delta\sigma_g(4) = 2.1488 \times 0.003(15.98 - 4)$

$$\Delta\sigma_g(4) = 106.96 \text{ MPa}$$

- ✓ Perte de tension due au non simultanété de la mise en tension :

$$\sigma_{bi} = \frac{3.76}{22.96} + \frac{3.76 \times 2.73^2}{193.21} - \frac{1068.62 \times 2.73}{193.21} \text{ D'où } \sigma_{bi} = 4.66 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{rac}(4) = 2.64 \times 4.66$$

$$\Delta\sigma_{rac}(4) = 12.29 \text{ MPa}$$

Les résultats des autres voussoirs sont présentés dans les ANNEXES B.

V.3.3.4.2. Pertes Différées :

- ✓ Perte par retrait : $\Delta\sigma_r = 190000 \times 2 \times 10^{-4}$

$$\Delta\sigma_r = 38 \text{ MPa donc } \Delta\sigma_r = 2.55 \%$$

- ✓ Perte par fluage : $\Delta\sigma_{fl} = 2.5 \times \frac{190000}{35981.73} \times 4.47$

$$\Delta\sigma_{fl} = 59.03 \text{ MPa donc } \Delta\sigma_{fl} = 3.97 \%$$

- ✓ Perte par relaxation : $\mu = \frac{1306.5}{1860} \text{ Donc } \mu = 0.702$

- ✓ $\Delta\sigma_p = 0.06 \times 1306.5 \times 2.5 \times (0.702 - 0.43)$

$$\Delta\sigma_p = 53.39 \text{ MPa donc } \Delta\sigma_p = 3.59 \%$$

- ✓ Pertes différées totales :

$$\Delta\sigma_d = 2.55 + 3.97 + \frac{5}{6} \times 3.59$$

$$\Delta\sigma_d = 9.51 \%$$

Le tableau ci-après résume les résultats des pertes instantanées et différées des douze (12) voussoirs ; le calcul est plus détaillé dans l'ANNEXE B.

Tableau V. 13: Pourcentages (%) des pertes de tension moyennes des câbles de fléau.

Section	$\Delta\sigma_o$ (%)	$\Delta\sigma_g$ (%)	$\Delta\sigma_{rac}$ (%)	$\Delta\sigma_i$ (%)	$\Delta\sigma_r$ (%)	$\Delta\sigma_n$ (%)	$\Delta\sigma_p$ (%)	$\Delta\sigma_d$ (%)	$\Delta\sigma_{tot}$ (%)
Axe VSP	10.30	1.07	0.83	12.20	2.55	3.97	3.59	9.51	21.71
FIN VSP	9.31	1.81	0.74	11.87	2.55	3.59	3.64	9.18	21.05
FIN V1	9.08	9.98	0.50	19.56	2.55	2.42	2.58	7.12	26.68
FIN V2	8.24	7.49	0.54	16.27	2.55	2.61	3.01	7.67	23.94
FIN V3	7.58	8.19	0.57	16.35	2.55	2.79	3.00	7.85	24.19
FIN V4	6.70	10.57	0.46	17.73	2.55	2.25	2.82	7.15	24.88
FIN V5	6.19	9.38	0.42	16.00	2.55	2.08	3.05	7.17	23.17
FIN V6	5.48	8.96	0.48	14.92	2.55	2.38	3.20	7.60	22.52
FIN V7	4.17	9.81	0.39	14.37	2.55	1.93	3.28	7.21	21.58
FIN V8	3.70	6.86	0.44	10.99	2.55	2.16	3.77	7.86	18.85
FIN V9	2.80	7.64	0.41	10.85	2.55	2.05	3.79	7.75	18.61
FIN V10	1.63	9.38	0.20	11.21	2.55	1.00	3.73	6.66	17.87
FIN V11	0.92	11.25	0.08	12.25	2.55	0.38	3.58	5.92	18.17
FIN V12	0.00	13.13	0.00	13.13	2.55	0.00	3.45	5.43	18.56

V.4. ETUDE TRANSVERSALE

La conception transversale adaptée à notre pont (encorbellement successif) est une section tubulaire dite (caisson) comme on a vu dans le chapitre III. cette section fermée présente une grande résistance à la torsion, et assure la transmission des charges verticales aux appuis (pile ou culée).

La résistance à la flexion (longitudinale) -est aussi- doit être assurée par ses deux hourdis (inférieur et supérieur). Donc, l'étude transversale dans ce chapitre est faite pour le but de déterminer les armatures passives (transversales) pour les sections de l'âme, et les deux hourdis.

Pour effectuer cette analyse transversale, on doit étudier les sections dangereuses qui sont la section sur pile (VSP) et la section à la clé (VSC) ou les moments de flexions sont maximaux, négatifs au niveau de pile, et positifs à la clé.

V.4.1. ÉVALUATION DES EFFORTS TRANSVERSAUX

V.4.1.1. LES SECTIONS EQUIVALENTES

Avant de Modéliser les sections à étudier (VSP et VSC), on a choisi de passer par une simplification, et d'analyser l'influence des sollicitations transversalement en utilisant model des sections équivalentes, les figures suivantes présentent les sections équivalentes des VSP et VSC :

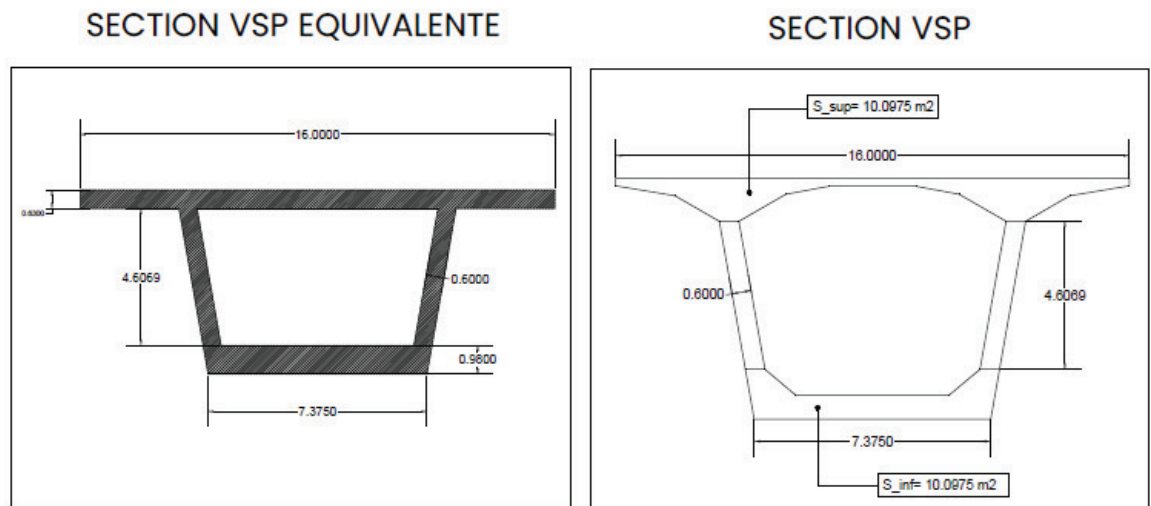


Figure V. 13: La Section de VSP et La Section Equivalente

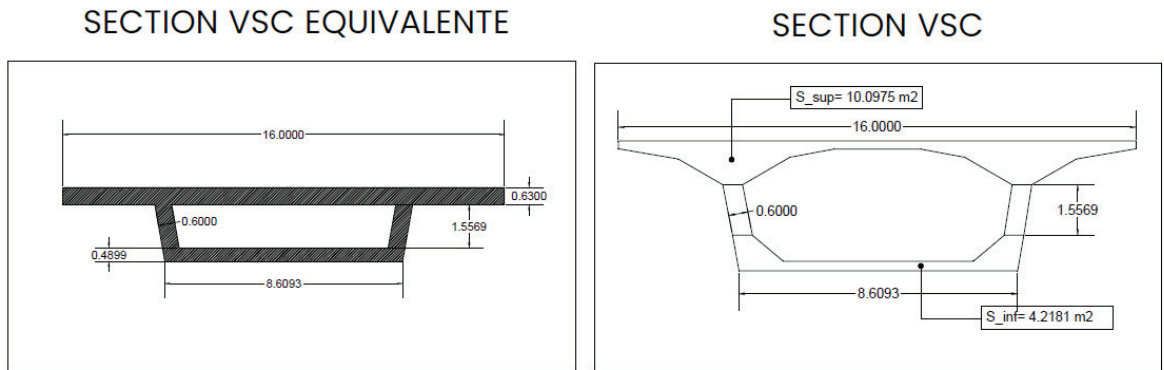


Figure V. 14: La Section de VSC et La Section Equivalente

V.4.1.2. MODELISATION ET COMBINAISON

La modélisation est effectuée par MIDAS Civil. Les deux sections de caisson VSP et VSC sont modélisées par un portique fermé (cadre) appuyé au niveau de la partie inférieure des âmes par deux appuis (un appui double et un autre simple) à l'extrémité de chaque âme sous l'hourdis inférieur. On a choisi de modéliser par « center-center » et pour chaque voussoir on prendra une longueur unitaire égale à 1m, les dimensions des sections des différents éléments de caissons sont déjà présentées dans les figures précédentes.

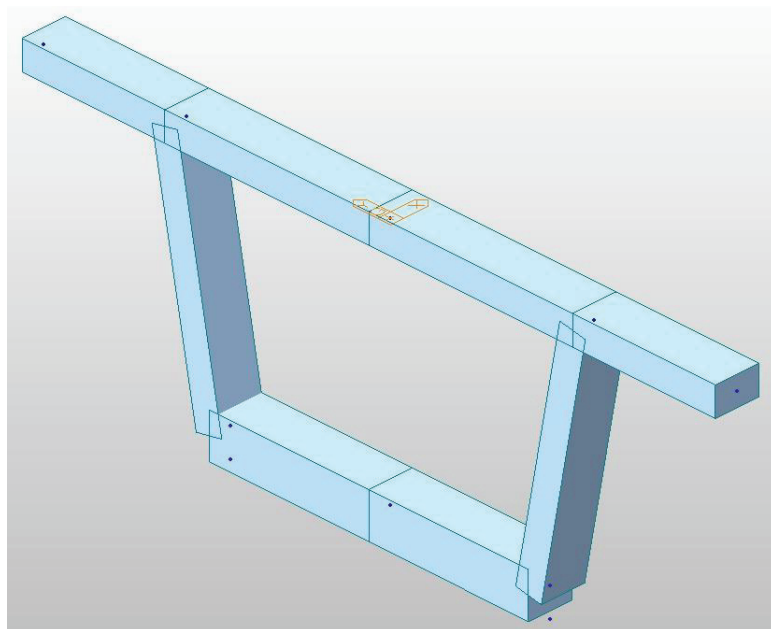


Figure V. 15: Le Model de la section VSP équivalente

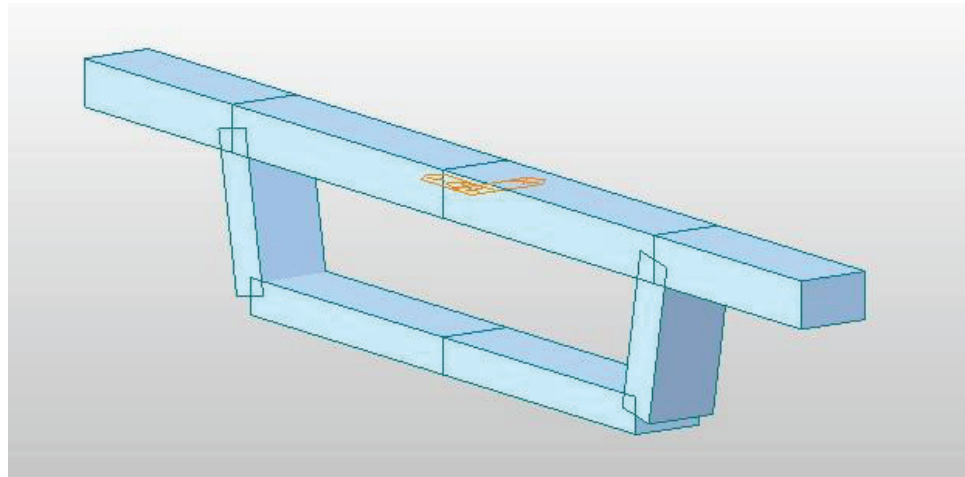


Figure V. 16: Le Model De La Section VSC Equivalente.

V.4.1.3. DETERMINATION DES SOLLICITATIONS

Les charges et surcharges à considérer sont déjà présentées dans le chapitre précédent, le RCPR présente aussi les cas de charges transversalement pour chaque système.

Les sections des voussoirs étudiés doivent être ferrillées sous un moment propre à la combinaison la plus défavorable, donnée par RCPR.

Tableau V. 14: Combinaisons des Charges Appliquées.

Cas	Combinaisons
ELS	$G + 1.2 A(l) + ST$
	$G + D_{240}$
	$G + M_{C120}$
	$G + 1.2 B_c + ST$
	$G + 1.2 B_t + ST$
ELU	$1.35 G + 1.6 A(l) + 1.6 ST$
	$1.35 G + 1.35 D_{240}$
	$1.35 G + 1.35 M_{C120}$
	$1.35 G + 1.6 B_c + 1.6 ST$
	$1.35 G + 1.6 B_t + 1.6 ST$

- ⚠ **Commentaire :** Après l'analyse, le cas le plus défavorable transversalement est obtenue par la combinaison du système B_t.

V.4.1.4. SECTIONS A JUSTIFIER

Le Guide SETRA recommande que : « dans une section du tablier, les principales sections à justifier sont en général les suivantes :

- hourdis supérieur : à la racine de l'encorbellement, au droit du gousset côté intérieur, et au centre de la dalle
- dans les âmes : au niveau du centre de gravité et aux extrémités supérieure et inférieure
- hourdis inférieur : à la racine du gousset principalement. » ¹

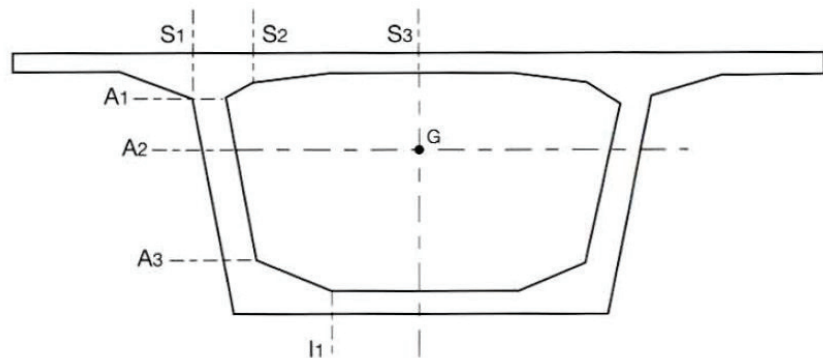


Figure V. 17: Sections à Justifier selon le Guide SETRA 2003.

Par esprit d'Ingénieur, selon les diagrammes des moments, on a choisi d'adapter les sections recommandées par le guide SETRA selon la nature de notre projet, donc on a décidé de prendre les sections S2 et S3, A1 et A3, et I1 dans le cas de VSP, on a éliminé les section S1 et A3 car elles ne sont pas utiles selon les diagrammes des moments obtenus.

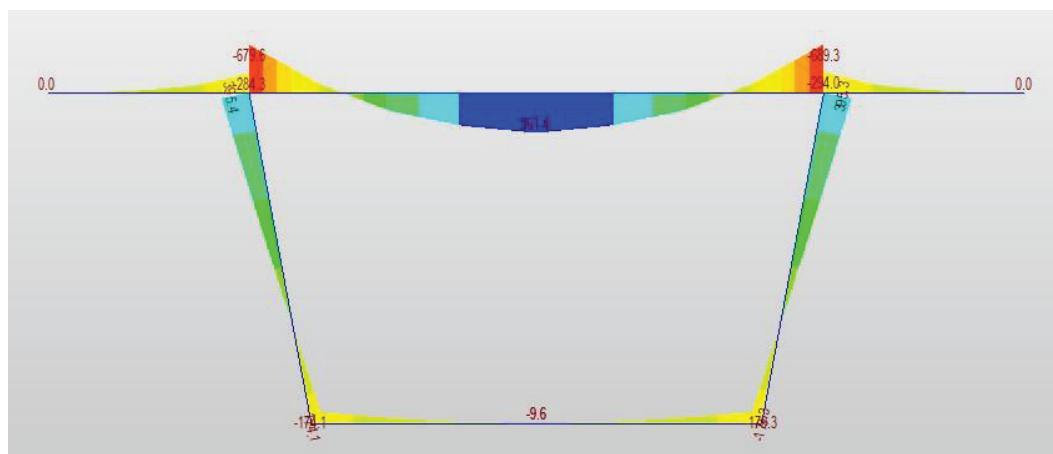


Figure V. 18: Diagramme des Moments dans VSP - Combinaison Bt à ELS.

1 . Service d'Etude Technique Des Routes Et Autoroutes (SETRA) – Guide de Conception _Pont en béton Précontraint Construit Par Encorbellement successifs– Année 2003 – Page 62– Article 4.1.

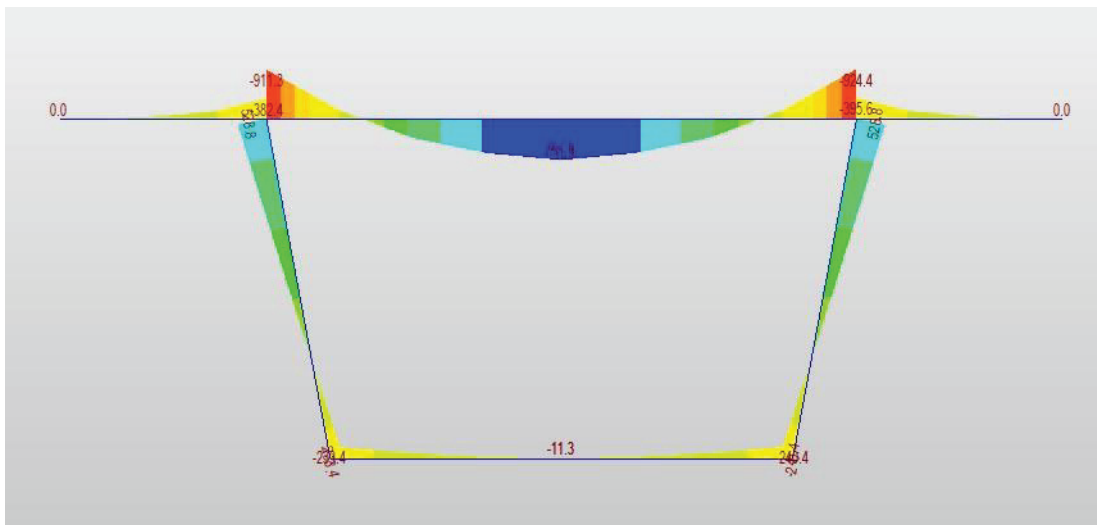


Figure V. 19: Diagramme des Moments dans VSP - Combinaison Bt à ELU.

Pour la section VSC : on a décidé de prendre les sections S2 et S3, A1 et A3, I1 et d'ajouter une vérification dans I2 (le centre de l'hourdis inférieur) car on a un moment positif ! au contraire du moment en I1 qui est négatif.

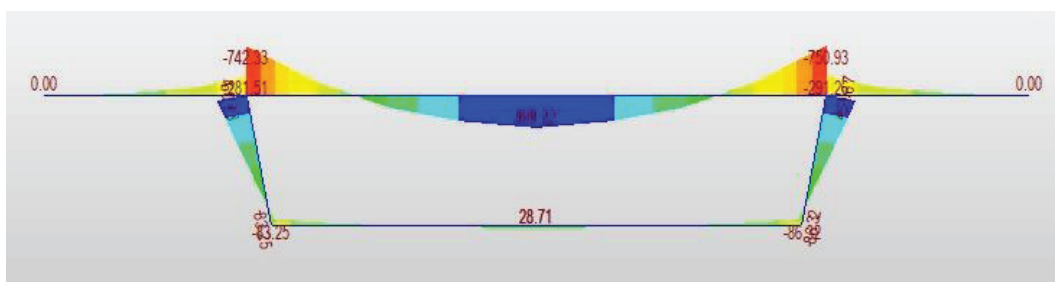


Figure V. 20: Diagramme des Moments dans VSC - Combinaison Bt à ELS.

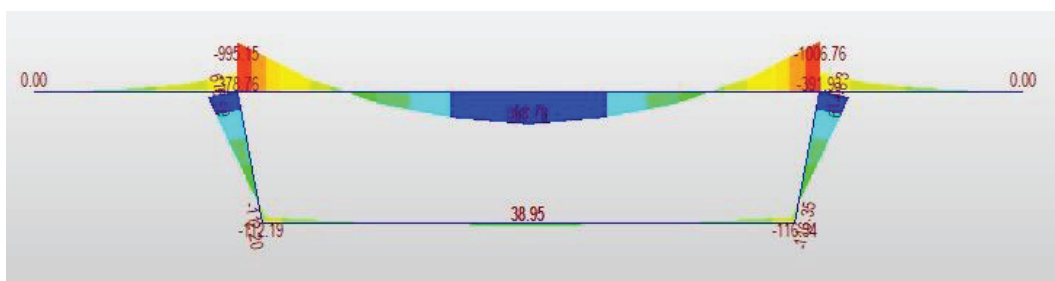


Figure V. 21: Diagramme des Moments dans VSC - Combinaison Bt à ELU.

V.4.1.5. RESULTATS D'ANALYSE TRANSVERSALE

Les résultats sont résumés dans les deux tableaux suivants :

Les Efforts dans le Voussoir sur Pile

Tableau V. 15: Les Efforts Dans Les Sections de VSP.

Elément	Section	M _{ult} [KN.m]	M _{ser} [KN.m]	N _{ult} [KN]	N _{ser} [KN]
Hourdis Supérieur	S2	-924.38	-689.34		
	S3	751.89	561.36		
Âmes	A1	528.84	395.38	991.17	738.86
	A3	-240.38	-179.29	1100.81	820.07
Hourdis Inférieur	I1	-240.38	-179.29		

Les Efforts dans le Voussoir à la clef

Tableau V. 16: Les Efforts Dans Les Sections de VSC.

Elément	Section	M _{ult} [KN.m]	M _{ser} [KN.m]	N _{ult} [KN]	N _{ser} [KN]
Hourdis Supérieur	S2	-1006.76	-750.93		
	S3	668.76	499.22		
Âmes	A1	616.39	460.83	951.94	709.58
	A3	-116.35	-86.32	994.81	741.34
Hourdis Inférieur	I1	-116.35	-86.32		
	I2	38.95	28.71		

- ⚠ **Commentaire :** On Remarque que les moments sont assez grands, et ça à cause de la largeur de 16 mètres et 4 voies chargées, c'est-à-dire 4 Camions de B_c.

V.4.2.FERRAILLAGE

Pour le ferrailage, on subdivise le voussoir en plusieurs éléments, on a :

- Hourdis Supérieur : qui travaille en flexion simple.
- Hourdis Inférieur : qui travaille en flexion simple.
- Les Âmes : qui travaillent en flexion composée.

V.4.2.1. Exemple de ferrailage de l'hourdis supérieur de VSP

Les fissurations sont jugées préjudiciables (nuisible).

Donc : le dimensionnement de la section rectangulaire de 1m de largeur et de hauteur (dépend de type d'élément) sera à l'ELS.

❖ Application Numérique :

✓ Nappe Supérieure :

$$M_{ser} = 689.34 \text{ KN.m} ; \bar{\sigma}_{bc} = 24 \text{ MPa} ; \bar{\sigma}_{st} = 250 \text{ MPa}$$

$$b = 1 \text{ m} ; h = 0.50 \text{ m} ; d = 0.45 \text{ m}$$

$$y_1 = \bar{\alpha} \times d = \frac{15 \times \bar{\sigma}_{bc}}{15 \times \bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} \times d = 26.56 \text{ cm} ; z = d - \frac{\bar{\alpha}}{3} = 36.15 \text{ cm}$$

$$M_1 = \frac{1}{2} b \cdot y_1 \cdot z \cdot \bar{\sigma}_{bc} = 1152.18 \text{ KN.m}$$

$$M_{ser} \leq M_1 \rightarrow \text{Section sans Armatures Comprimées (S.S.A.C)}$$

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{z \times \bar{\sigma}_{st}} = 76.28 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$A_{(C.N.F)} = 0.23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} \times b \times d = 6.21 \text{ cm}^2 \leq A_{ser} \rightarrow \text{CNF Vérifiée}$$

✓ Nappe Inférieure :

$$h = 0.30 \text{ m} ; y_1 = 15.93 \text{ cm} ; d = 0.27 \text{ m} ;$$

$$d' = 0.11d = 0.0297 ; z = 0.2169 \text{ m}$$

$$M_{ser} = 561.36 \text{ KN.m} \geq M_1 = 414.53 \text{ KN.m}$$

$$M_{ser} \geq M_1 \rightarrow \text{Section Avec Armatures Comprimées (S.A.A.C)}$$

$$\bar{\sigma}_{sc} = \frac{15 \bar{\sigma}_{bc} (y_1 - d)}{y_1} = 250.17 \text{ MPa}$$

$$A_{sc} = \frac{M_{ser} - M_1}{(d - d') \bar{\sigma}_{sc}} = 24.425 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$A_{ser} = \left(\frac{M_1}{z} + \frac{M_{ser} - M_1}{d - d'} \right) \times \frac{1}{\bar{\sigma}_{st}} = 100.89 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

✓ Ferrailage Longitudinal :

$$A_{sl} = \frac{A_{st}}{3} = 33.63 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$A_{(C.N.F)} = 0.23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} \times b \times d = 3.726 \text{ cm}^2 \leq A_{sl} \rightarrow \text{CNF Vérifiée}$$

V.4.2.2. Ferrailage passif des voussoirs

A l'aide d'un logiciel de calcul de ferrailage (Robot Expert 2010), On trouve les résultats donnés dans les **tableaux V.17 et V.18**

Tableau V. 17: Ferrailage passif du VSP.

Elément	Nappe	H [cm]	Transversale			Longitudinale		
			As [cm ²]	Φ [mm]	e [cm]	As [cm ²]	Φ [mm]	e [cm]
Hourdis Supérieur	Supérieur	50	70.40	HA32	12	25.47	HA25	12.5
	Inférieur	30	116.50	9HA32 9HA25	12	38.87	HA25	12.5
Âmes	Interne	60	19.00	HA20	12	8.28	HA12	12.5
	Externe	60	19.00	HA20	12	8.28	HA12	12.5
Hourdis Inférieur	Supérieur	75	11.40	HA14	12	10.35	HA14	12.5
	Inférieur	75	11.40	HA14	12	10.35	HA14	12.5

Tableau V. 18: Ferrailage passif du VSC.

Elément	Nappe	H [cm]	Transversale			Longitudinale		
			As [cm ²]	Φ [mm]	e [cm]	As [cm ²]	Φ [mm]	e [cm]
Hourdis Supérieur	Supérieur	50	83.8	HA32 HA25	12	27.93	HA20	12
	Inférieur	30	103.7	HA32 HA25	12	34.57	HA25	12
Âmes	Interne	60	25.2	HA20	12	8.40	HA14	12
	Externe	60	25.2	HA20	12	8.40	HA14	12
Hourdis Inférieur	Supérieur	30	16.2	HA16	12	4.14	HA12	12
	Inférieur	30	16.2	HA16	12	4.14	HA12	12

⚠ NB : On vérifie toujours la section minimale pour quelques voussoirs en utilisant la formule suivante :

$$A_{smin} = 0.23 \times \frac{f_{tj}}{f_e} \times b \times d$$

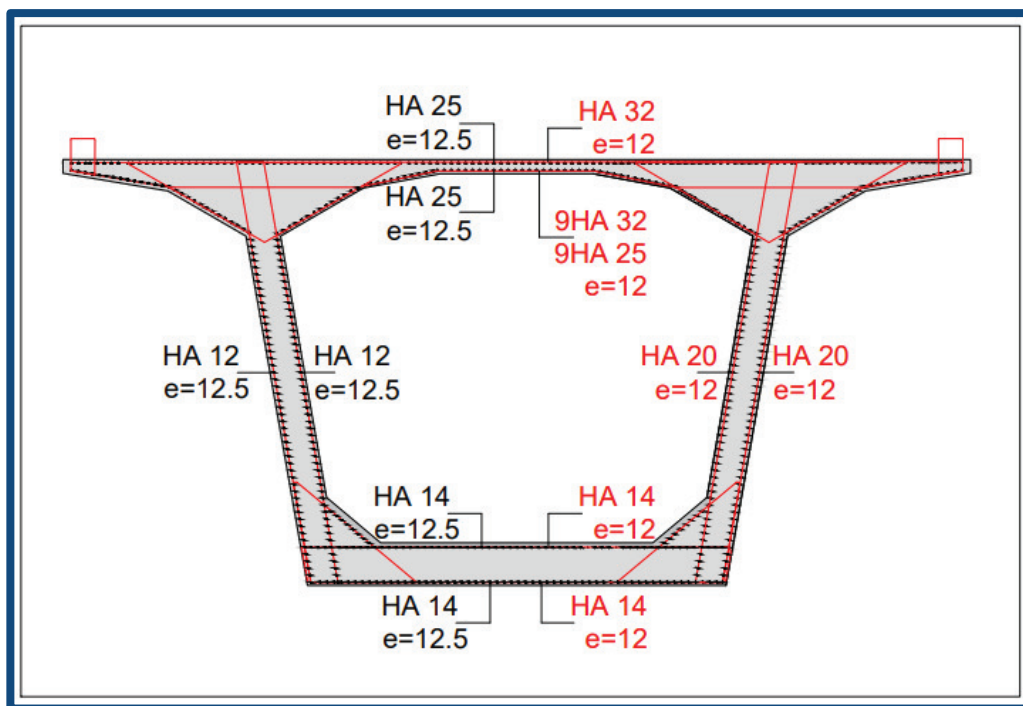


Figure V. 22: Ferrailage de Voussoir sur Pile.

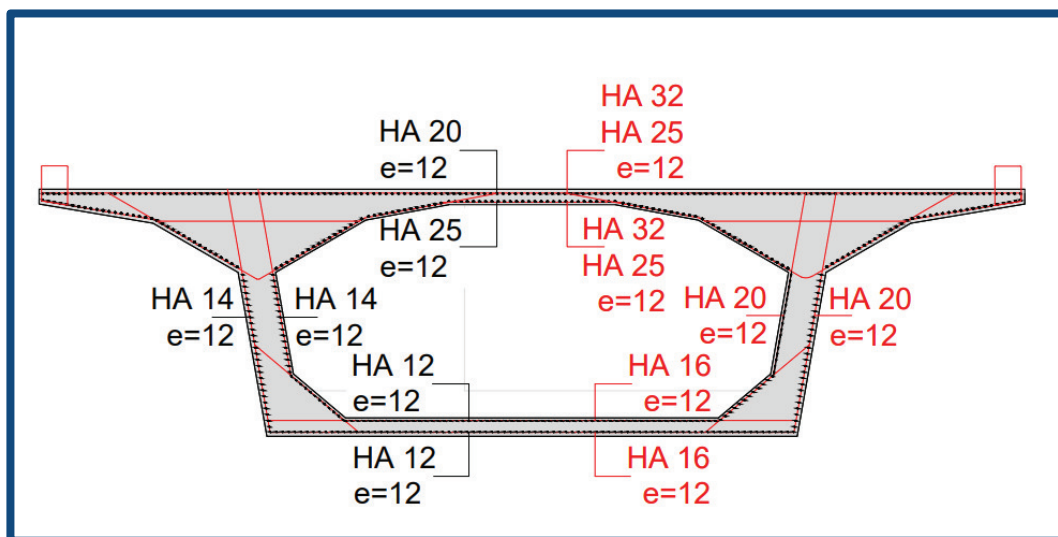


Figure V. 23: Ferrailage de Voussoir à la Clef.



ETUDE SISMIQUE

CHAPITRE VI : ETUDE SISMIQUE

VI.1. INTRODUCTION

Pour évaluer l'effort sismique dans l'ouvrage, il est essentiel de prendre en compte l'action sismique résultant d'une translation d'ensemble. Cela signifie que tous les points du sol se déplacent de manière synchronisée dans chacune des trois directions : horizontale nord-sud, horizontale est-ouest et verticale. Cette approche permet de modéliser de manière réaliste les effets du séisme sur la structure.

L'action sismique considérée dépend de l'accélération spécifique de la zone où se situe l'ouvrage. En d'autres termes, les caractéristiques sismiques locales, telles que la magnitude et la fréquence des tremblements de terre, influencent directement les forces exercées sur la structure. Pour représenter cette action, on utilise des spectres de réponse, qui sont des courbes montrant la réponse maximale de la structure en fonction de différentes fréquences de mouvement.

Un spectre de réponse horizontal est utilisé pour chacune des deux composantes horizontales de mouvement (nord-sud et est-ouest). Ces spectres permettent d'évaluer comment l'ouvrage réagit aux mouvements sismiques dans ces directions. De même, un spectre de réponse vertical est appliqué pour la composante verticale du mouvement sismique. Ces spectres de réponse fournissent une estimation de la réponse maximale de l'ouvrage, en tenant compte des différentes directions et des fréquences associées aux mouvements sismiques.

En combinant ces données, il est possible de prévoir avec précision les efforts sismiques que devra supporter la structure, assurant ainsi une conception plus sûre et plus résiliente face aux événements sismiques potentiels. L'utilisation des spectres de réponse permet non seulement de déterminer les forces maximales auxquelles la structure sera soumise, mais aussi de comprendre comment ces forces varient en fonction des caractéristiques spécifiques du site. Cette compréhension détaillée des réponses dynamiques est cruciale pour le dimensionnement des éléments structuraux et pour la mise en place de dispositifs de protection sismique, tels que les amortisseurs et les isolateurs sismiques.

Les réglementations sismiques et les codes de construction sont cruciaux pour définir les actions sismiques à considérer, basés sur des études et des observations passées. En respectant ces normes, les ingénieurs peuvent concevoir des structures résistantes aux séismes, minimisant les dommages et assurant la sécurité des occupants. De plus, la modélisation numérique et les simulations sismiques permettent d'évaluer les effets des séismes, d'identifier les points faibles et d'optimiser la conception des ouvrages. Ces outils avancés aident à anticiper et gérer les risques sismiques, contribuant ainsi à des environnements plus sûrs et durables.

VI.2. Méthodes Utilisées Pour L'estimation De la Force Sismique :

VI.2.1. Méthode Monomodale

VI.2.1.1. Principe : ¹

Pour les ponts réguliers, les effets du mouvement d'ensemble sont déterminés par un calcul spectral monomodale. Les déplacements différentiels sont pris en compte de façon statique. Les caractéristiques du mode fondamental dans chaque direction sont déterminées soit à l'aide d'une analyse modale dans la direction considérée à condition de remplacer, pour le calcul des efforts, la masse du mode fondamental par la masse totale du modèle.

VI.2.1.2. Domaine et Conditions d'Application : ²

Cette méthode ne s'applique pas aux ponts spéciaux : arcs, ponts à béquilles, ponts à câbles (de suspension ou d'haubanage), ponts cantilevers. Elle s'applique aux ponts remplissant les critères suivants simultanément :

- La masse modale (Masse totale mise en mouvement par le mode fondamental) doit être supérieure à 70% de la masse totale de la structure, y compris la masse des appuis en élévation (fut et chevêtre).
- Le biais (Angle de l'axe du tablier avec l'axe de ses appuis) est supérieur à 70 grades et les raideurs longitudinale et transversale totales des appuis) ne variant pas de plus de 10% par rapport aux valeurs calculées sans biais.
- La courbure (Angle balayé en plan par la tangente a l'axe) est inférieure a 30 grades et les raideurs longitudinale et transversale totales des appuis ne variant pas de plus de 10% par rapport aux valeurs calculées sans courbure.
- La symétrie transversale c'est à dire la distance entre le centre de masse du tablier et le centre élastique des appuis (excentricité théorique e_0) n'excède pas 5% de la distance entre appuis extrêmes pour l'étude du séisme transversal.

1 . Ministère Des Travaux Publics - Règles Parasismiques Applicables Au Domaine Des Ouvrages D'art (RPOA 2008) – Page 26– Article 4.3.1.1.

2 . Même Référence – Page 26– Article 4.3.1.2.

VI.2.1.3. Vérification des Conditions :

➤ La Première Condition : la masse modale (la masse mise en mouvement) doit être supérieur à 70% de la masse totale :

$$M_P \leq \frac{1 - 0,7}{0,7} M_T$$

Avec :

M_P : la masse de l'ensemble des piles hors fondations.

M_T : la masse totale du tablier

- **Poids du Tablier : 444 560.35 KN**
- **Evaluation Poids des Piles :**

Tableau VI. 1: La Masse des Piles Hors Fondations.

Surface Evidée	28.1948 m ²		Surface Pleine	58.96 m ²
Pile	Hauteur Vide [m]	Hauteur Pleine [m]	Volume [m ³]	Masse [KN]
P01	0	9.5	560.12	14003
P02	18.2	9.8	1090.953	27273.834
P03	23.4	12.6	1402.654	35066.358
P04	22.75	12.25	1363.692	34092.293
P05	22.1	11.9	1324.729	33118.227
P06	18.85	10.15	1129.916	28247.9
P07	14.3	7.7	857.1776	21429.441
			Somme	193231.052 KN

$$193231,052 \text{ kN} > 190525,86 \text{ kN}$$

Condition NON Vérifiée !

VI.2.2. Méthode Spectrale Multimodale

VI.2.2.1. Définition et Domaine d'Application

L'analyse par le spectre de réponse est une analyse élastique des réponses dynamiques maximales de tous les modes significatifs de la structure. La méthode se base sur un calcul dynamique multimodale spectrale et tient compte de façon statique des déplacements différentiels. ¹

La réponse globale est obtenue par des combinaisons statistiques des contributions modales maximales. Les effets de l'action sismique doivent être déterminés à partir d'un modèle linéaire dynamique complet, en accord avec les lois de la mécanique et avec les principes de l'analyse structurale. ²

Pour déterminer les effets de l'action sismique, il est nécessaire de se baser sur un modèle linéaire dynamique complet, conformément aux lois de la mécanique et aux principes de l'analyse structurale. Ce modèle permet de représenter avec précision les comportements dynamiques de la structure sous l'influence des forces sismiques. ³

Pour réaliser notre calcul multimodal, nous avons besoin d'un logiciel de calcul spécialisé. Dans ce cadre, nous réutiliserons le modèle longitudinal, en y incluant la modélisation des piles et des appareils d'appui. Nous appliquerons ensuite une analyse modale spectrale pour obtenir une estimation précise des réponses sismiques maximales de la structure.

VI.2.2.2. Les Spectres de Réponse

Nous utiliserons un modèle en 3D avec le logiciel MIDAS CIVIL 2022 pour évaluer les efforts sismiques dans les trois directions ainsi que pour déterminer les périodes propres de la structure. Dans le calcul des modes propres, nous prendrons en compte la masse du tablier, des piles, ainsi que la masse des équipements.

Les spectres de réponse utilisés pour ce calcul sont les suivants :

- ❖ Pour les deux directions longitudinale et transversale, on utilise le spectre montré ci-dessous :

1 . Ministère Des Travaux Publics - Règles Parasismiques Applicables Au Domaine Des Ouvrages D'art (RPOA 2008) – Page 31– Article 4.3.2.1.

2 . Même Référence.

3 . Même Référence.

$$Sae(T, \xi) = \begin{cases} A g S (1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta A g S & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta A g S (\frac{T_2}{T}) & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta A g S (\frac{3T_2}{T^2}) & T \geq 3.0s \end{cases}$$

- **Sae (T, ξ)** : accélération spectrale du spectre de calcul correspondant à l'amortissement ξ et à la période **T** du mode propre considéré dans la direction considérée.
- **A** : coefficient d'accélération de zone. **A = 0.25**
- **g** : accélération de la pesanteur **g = 9.81 m/s²**
- **S** : coefficient du site **S = f(S3) = 1.2** (voir RPOA tableau 3.3)
- **T** : période du mode propre considéré dans la direction considérée.
- **T₁, T₂** : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site (voir RPOA, tableau 3.3) : **(T₁, T₂) = f(S3) = (0.20 ; 0.50)**
- **η** : facteur de correction de l'amortissement : $\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} = 1$

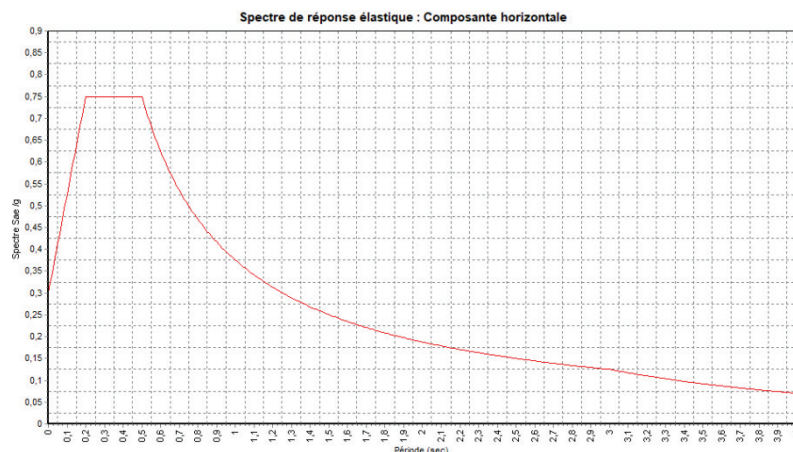


Figure VI. 1: Spectre de réponse élastique Sae/g (T) - composante horizontale.

- ❖ Pour la composante verticale du séisme, on utilise le spectre montré ci-dessous :

$$Sae(T, \xi) = \begin{cases} \alpha A g \left(1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta - 1)\right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \alpha A g \eta & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \alpha A g \eta \left(\frac{T_2}{T}\right) & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5 \alpha A g \eta \left(\frac{3T_2}{T^2}\right) & T \geq 3.0s \end{cases}$$

- α : coefficient qui tient en compte l'importance de la composante verticale en zone de forte sismicité α (zone IIa) = 0.7
- S : le coefficient de site, dans le cas de la composante verticale, est pris égal à 1.

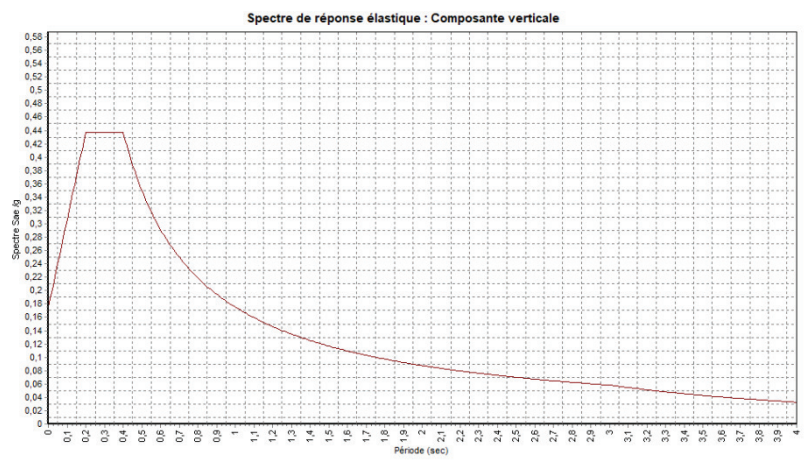


Figure VI. 2: Spectre de réponse élastique $Sae/g(T)$ - composante verticale.

VI.2.2.3. Les Modes Significatifs

Tous les modes ayant une contribution significative à la réponse structurale totale doivent être pris en compte. En d'autres termes, nous considérons les modes pour lesquels la somme des masses modales effectives, $\Sigma(M_i)$, atteint au moins 90 % de la masse totale du pont M_T . (VOIR ANNEXES-C)

VI.2.2.4. Combinaison Des Composantes De L'action Sismiques : ¹

La combinaison des forces sismiques orthogonales est employée pour tenir compte de l'incertitude directionnelle du séisme. L'effet probable de l'action maximale E, dû à l'apparition simultanée des actions sismiques le long des axes horizontaux X et Y et de l'axe vertical Z, peut être estimé, à partir des effets d'actions maximales E_x , E_y et E_z dus à l'action sismique indépendante le long de chaque axe. Les effets des différentes composantes du mouvement d'ensemble sont combinés de la manière suivante :

$$E_1 = \pm E_x \pm 0.3 E_y \pm 0.3 E_z$$

$$E_2 = \pm E_y \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_z$$

$$E_3 = \pm E_z \pm 0.3 E_x \pm 0.3 E_y$$

E_x , E_y et E_z sont les effets des actions sismiques dans chacune des directions respectives X, Y et Z.

1 . Ministère Des Travaux Publics - Règles Parasismiques Applicables Au Domaine Des Ouvrages D'art (RPOA 2008) – Page 32– Article 4.3.2.5.

VI.3. LES EQUIPEMENTS

VI.3.1. Les Appareils d'Appuis

Les appareils d'appui en élastomère fretté (AAEF) et les appareils d'appui à pot (AAP) représentent plus de 90 % des appareils d'appui utilisés sur les ponts.

Les appareils d'appui en élastomère fretté conviennent aux charges d'appui jusqu'à 12 MN. Cependant, pour des réactions d'appui supérieures, il est préférable d'utiliser des appareils d'appui à pot. Ces derniers offrent l'avantage de limiter l'encombrement du dispositif, ce qui les rend plus appropriés dans ces situations.

La figure suivante présente le domaine d'utilisation des différents appareils d'appuis selon l'effort vertical et la rotation acceptable : ¹

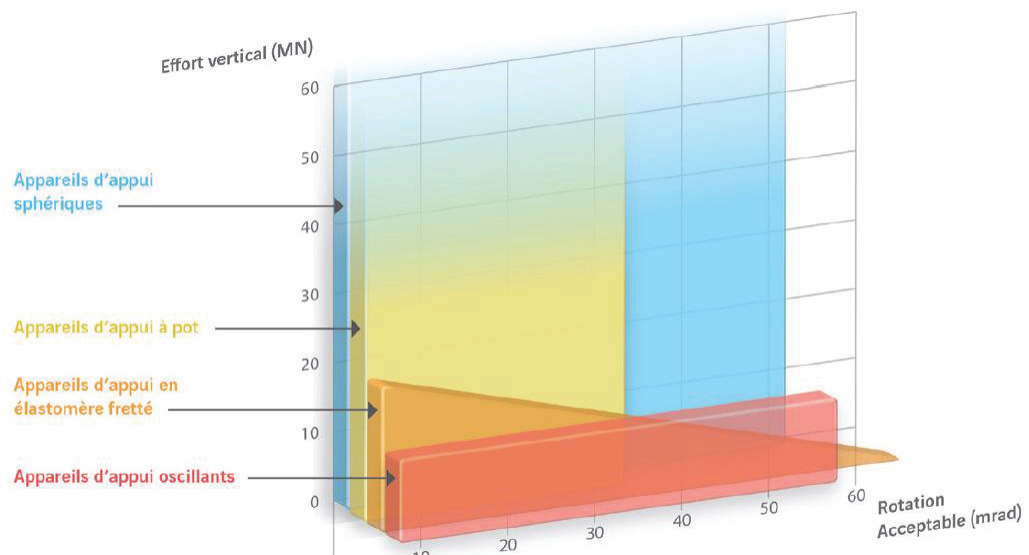


Figure VI. 3 : Le Domaine d'utilisation des différents appareils d'appuis

1 . Les appareils d'appui mécaniques – Freyssinet – page 04.

VI.3.1.1. Les Appareils d'Appuis à Pot

Les appareils d'appuis à pot constitués d'une embase métallique en forme de pot cylindrique dans laquelle est enserré un coussin en caoutchouc apparaissent au début des années 1960. Une plaque de glissement, généralement en PTFE (polytétrafluoroéthylène), peut être insérée dans la partie supérieure pour permettre les glissements.

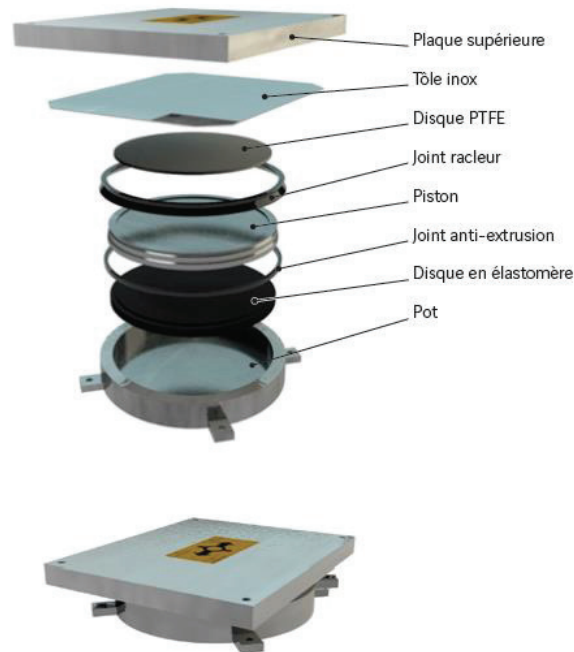


Figure VI. 4: Composition d'un Appareil d'Appuis à Pot

Classement sur le critère de fonctionnement :

- **Fixes** : Ils permettent les rotations sur appui mais ne permettent pas les déplacements.
- **Mobiles unidirectionnels** : Ils permettent les rotations sur appui ainsi que les déplacements dans une seule direction.
- **Mobiles multidirectionnels** : Ils permettent les rotations sur appui ainsi que les déplacements dans toutes les directions.

VI.3.1.2. Dimensionnement des Appareils d'Appuis

Les appareils d'appui à pot de caoutchouc sous pression ou métalliques sont le plus souvent des produits fournis sur catalogue par les fabricants, en fonction des efforts verticaux et horizontaux à transmettre.

Le dimensionnement est fait sur la base de la norme NF EN 1337, et le choix des appareils est fait à l'aide de catalogue « Les appareils d'appui mécaniques Freyssinet ». Les charges à prendre en compte sont celles définies au chapitre IV.

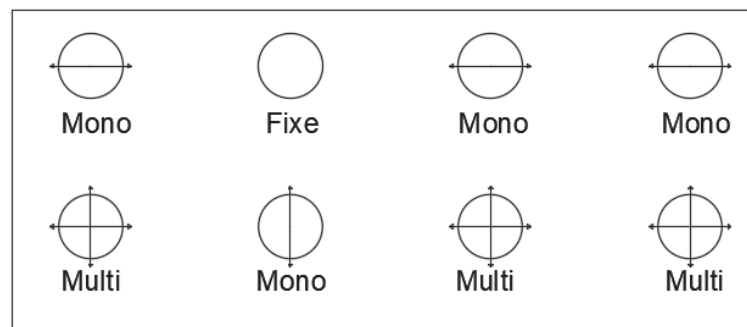


Figure VI. 5: Les Conditions d'Appuis Probables.

⚠ **Note :** Tous les piles sont encastées sauf la pile 01.

Les Tableaux Suivants présentent les résultats des efforts.

Tableau VI. 2: Les Réactions Pour Une Paire D'appareils D'appui A Pot.

Appuis	Effort Vertical (KN)	Effort Horizontal (KN)
C1	28 610.82	24 417.96
P1	89 295.42	26 455.57
C2	23 362.94	20 369.29

Tableau VI. 3: Les Réactions Par Chaque Appareil d'Appui

Appuis	Effort Vertical (KN)	Effort Horizontal (KN)
C1	14 305.41	12 208.98
P1	44 647.71	13 227.80
C2	11 681.47	10 184.65

➤ Choix Du Modèle :

Tableau VI. 4: Choix des appareils d'appuis commerciaux

Appuis	Appareil d'appui1	Appareil d'appui2	TYPE D'APPUI 1	TYPE D'APPUI 2
C1/C2	MONO	MULTI	GG 16 000 - 4800. 400	GL 16 000. 100. 40
P1	MONO	MULTI	GG 45 000 - 13500. 400	GL 45 000. 100. 40

VI.3.2. Joints de Chaussée

Les tabliers de ponts subissent des variations dimensionnelles longitudinales causées par les variations de température, le retrait, le fluage et les déformations d'exploitation. Il est donc nécessaire de permettre au tablier de se dilater librement en prévoyant un espace de jeu à l'une de ses extrémités ou aux deux.

VI.3.2.1. Dimensionnement

le dimensionnement est fait selon la combinaison proposée par le RPOA 2008.

$$W = W_D + 0.4 W_T + \frac{W_S}{3}$$

- **W** : souffle total du joint.
- **W_D** : souffle des déformations différées (retrait + fluage).
- **W_T** : souffle thermique.
- **W_S** : souffle sismique.

➤ Souffle Thermique :

$$W_T = L \times \lambda \times \Delta T = 46600 \times 10^{-5} \times 7 = 3.26 \text{ cm}$$

L : la moitié de la longueur du pont (on a deux joints).

ΔT : le gradient thermique à Bejaïa.

λ : Coefficient de dilatation.

➤ Déplacement Dû Au Retrait Et Fluage :

$$W_D = L \times (\varepsilon_r + \varepsilon_f) = 466 \times (2 \times 10^{-4} + 3 \times 10^{-4})$$

$$W_D = 23.3 \text{ cm}$$

$\varepsilon_r = (2 \times 10^{-4})$: Coefficient de retrait.

$\varepsilon_f = (3 \times 10^{-4})$: Coefficient de fluage.

➤ Souffle Sismique :

Le souffle sismique a été calculé lors du calcul des efforts séismiques (**W_S = 4.95 cm**).

✓ SOUFFLE TOTAL DU JOINT :

$$W = W_D + 0.4 W_T + \frac{W_S}{3} = 26.25 \text{ cm}$$

VI.3.2.2. Choix de Joint

Le choix du type de joint de chaussée est déterminé en fonction du souffle calculé. En consultant le catalogue des joints de chaussée CIPEC, il apparaît que pour un souffle de 26.25 cm, la famille de joints appropriée est la famille CIPEC Wd & Wd+ joints. Ces joints, appartenant à la catégorie des joints à dents en console, sont spécifiquement conçus pour supporter une circulation lourde et intense, offrant ainsi une robustesse exceptionnelle.

Tableau VI. 5: Souffles des Joints W_d en Fonction du Biais de L'Ouvrage

Type	Straight (100 gr)	80 gr	60 gr	40 gr	30 gr
Wd/Wd+ 60	60	61	71	66	67
Wd/Wd+ 80	80	84	92	85	86
Wd/Wd+ 110	110	116	104	92	90
Wd/Wd+ 160	160	169	158	141	139
Wd/Wd+ 230	230	185	127	102	97
Wd/Wd+ 320	320	231	150	120	112

- ⚠ Commentaire : Le modèle pris en fonction du souffle et du biais de l'ouvrage (Négligeable), on a choisi le joint W_d/W_{d+320} .

VI.3.3. L'Étanchéité

L'étanchéité des tabliers vise à accroître la durabilité de l'hourdis en prévenant la corrosion des armatures et la détérioration du béton. Différentes techniques peuvent être utilisées pour assurer l'étanchéité des tabliers, telles que l'étanchéité à base d'asphalte coulé et l'étanchéité par film mince adhérent. Pour le présent projet, l'étanchéité par film mince a été retenue, car elle est plus efficace et économique pour un pont à poutres-caisson en béton précontraint.



**CONCLUSION
GENERALE**



CONCLUSION GENERALE

Après avoir finalisé notre travail qui est « Conception Et Etude D'un Viaduc Du PK46+489.700 Au PK47+440.300 Sur La Liaison Autoroutière Reliant Le Port De Bejaia A L'autoroute Est-Ouest Au Niveau d'AHNIF Avec La Programmation De La Superstructure », on a pu atteindre nos acquis qui ont été souligné au début ; on a pu appliquer concrètement les notions fondamentales de conception et de dimensionnement d'une structure spécifique.

La gigantesque de l'ouvrage qu'on a choisi est l'une des causes qui nous a pousser d'intégrer la programmation avec PYTHON dans les différents niveaux qui ont été cités le long de ce mémoire ainsi que la complexité géométrique et mécanique de cette structure.

L'utilisation des logiciels de modélisation en trois démentions « Midas Civil & Robot Structural Analysis » a aussi comme but de simplifier la conception et le dimensionnement de l'ouvrage.

Cette tranche de travail nous a fait apprise de nouvelles notions sur la conception des ponts, surtout sur les ponts vousoirs construit par encorbellement successifs ; cette conception est particulièrement exigeante pour l'ingénieur car il doit vérifier le comportement de la structure à plusieurs sections et pour toutes les charges possibles susceptibles de survenir tant pendant la construction que durant la vie de l'ouvrage.

Enfin, nous espérons sincèrement que ce modeste travail sera à la hauteur des attentes de tous ceux qui nous ont accordé leur confiance. Nous souhaitons que ce mémoire puisse devenir une référence crédible pour les promos qui nous suivent ; pour cela tout au long de la rédaction, nous avons veillé à présenter un contenu bien structuré avec un raisonnement clair et accessible pour tout étudiant ou curieux désirant approfondir ses connaissances en indiquant à chaque fois les références qu'on a utilisées. Nous espérons également qu'il servira de point de départ pour de futures études dans la vie professionnelle.


A decorative border with ornate floral and scrollwork patterns in the corners and along the sides of the page.
A horizontal decorative flourish with symmetrical floral and scrollwork patterns.

BIBLIOGRAPHIE

A horizontal decorative flourish with symmetrical floral and scrollwork patterns, identical to the one above.

BIBLIOGRAPHIE



- [1] BAEL, *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites*, BAEL 91 révisé 99, 1999.
- [2] BPEL, *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états limites*, BPEL 91 révisé 99, 1999.
- [3] CALGARO, J.A & BERNARD-GELY.A. *Conception des ponts*. Ecole nationale des ponts et chaussées de Paris (France), 1994.
- [4] Document SETRA, *Barrières de sécurité pour la retenue des poids lourds, Barrières de niveau H2, H3*, SETRA, 1999.
- [5] Document SETRA, *Eurocodes 3 et 4, Application aux ponts-routes mixtes acier-béton*, Guide méthodologique, ministère de l'Équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer (France), 2007.
- [6] Document SETRA, *Pont à Poutres préfabriqués précontrainte par poste tension VIPP*, France, SETRA, 1996.
- [7] Document SETRA, *Ponts courants en zone sismique*, ministère de l'Équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer (France), janvier 2000.
- [8] Document SETRA, *Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs*. Ministère de l'équipement, des transports, du logement, du tourisme et de la mer (France), juin 2003.
- [9] Document SETRA, *Ponts mixtes acier-béton bipoutres*, Guide de conception, SETRA, France, 1990.
- [10] RCPR, *Règles Définissant Les Charges A Appliquer Pour Le Calcul Et Les Epreuves Des Ponts Routes*, Algérie, 2009.
- [11] RPOA, *Règles Parasismiques Applicables au domaine des Ouvrages d'Art*, Algérie, 2008.
- [12] Catalogue : Les appareils d'appui mécaniques – Freyssinet.



ANNEXES A

RESULTATS DES ESSAIS

GÉOTECHNIQUES

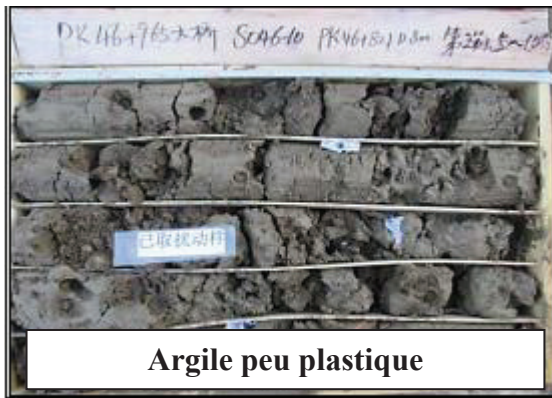


➤ La géomorphologie :



Géomorphologie de plaine alluviale

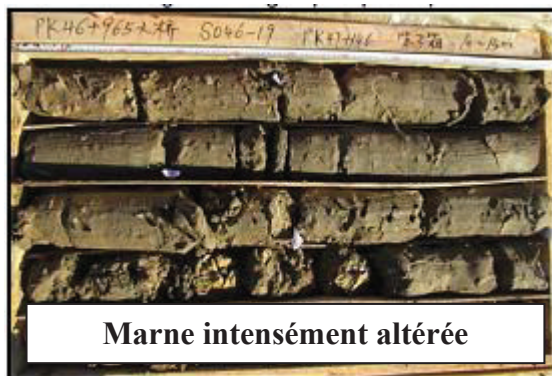
➤ La Lithologie :



Argile peu plastique



Grave



Marne intensément altérée



Marne faiblement altérée



Grés intensément altérée



Marne faiblement altérée

Tableau de lithologie des formations principales

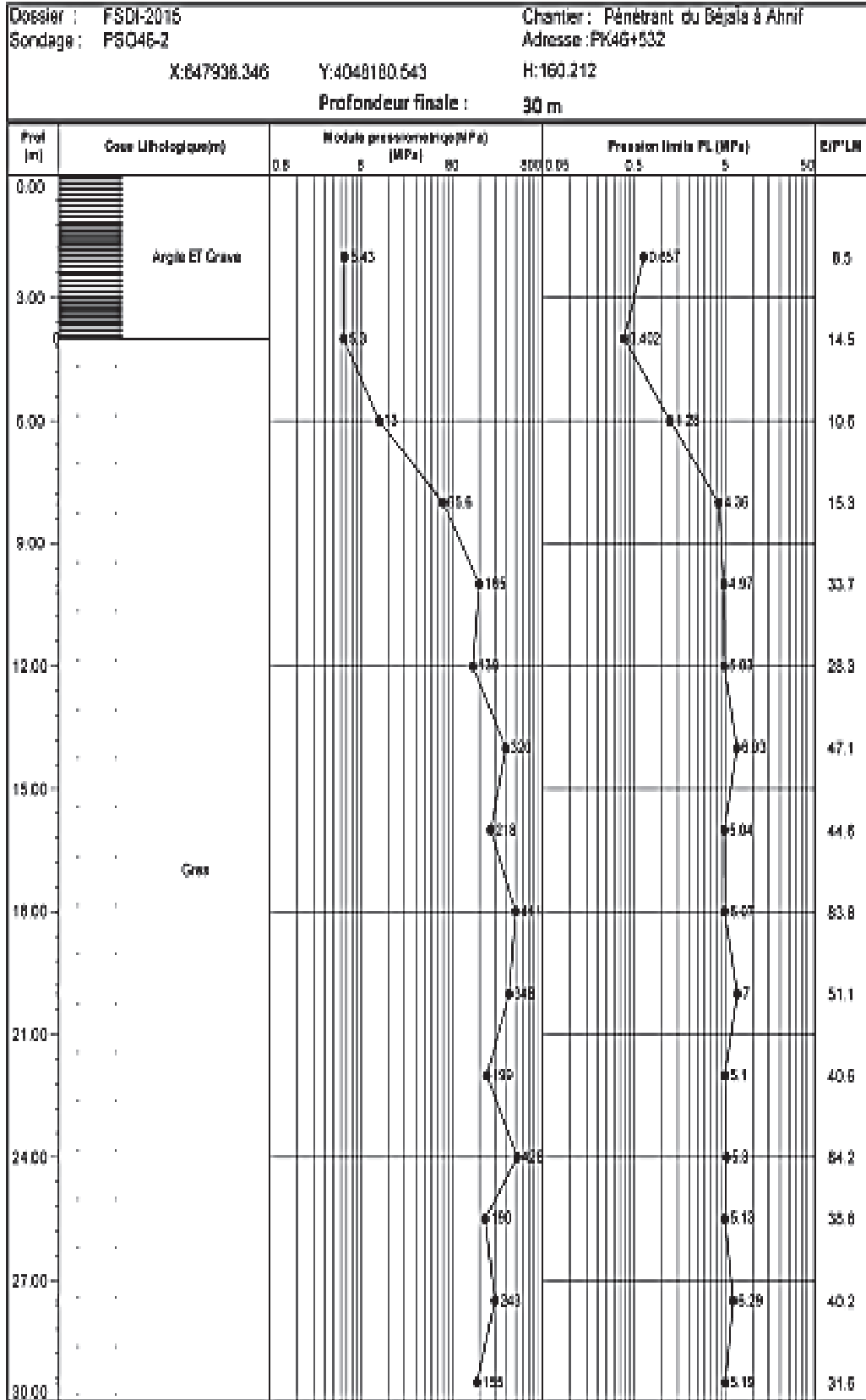
N° couche	Type du sol	Code	Epaisseur (m)	Couleur	Statut	Description
①	Argile peu plastique	AP	0.60-16.70	Brun	Plasticité molle	Sol homogène, humide-saturé, plasticité molle.
②	Sable	S	0.0-1.6m	Brunatre	Molle	Sable fin ,argileux ,brunâtre ,molle.
③	Grave	G	3.90-17.80	Bigarré	Densité moyenne	En forme arrondie, rempli par des sables moyennement gros et de sol argileux, bloc erratique occasionnel, humide-saturé, densité moyenne.
④	Marne intensement altérée	Ma	5.00-24.00	Gris	Molle	La plupart des carottes est sous forme cylindrique, bien fragile à frappe de marteau, la roche est molle, la teneur en argile est élevée.
⑤	Marne faiblement altérée	Ma	Non exposé	Gris-foncé	Roche dure	Se composant principalement de minéraux argileux et de calcite, cimentation argilacée et formation feuilletée, la carotte en forme de colonne courte, roche dure.
⑥	Grès	Gr	3.30-6.00	Gris	Molle	La composition principale est en quartz et

N° couche	Type du sol	Code	Epaisseur (m)	Couleur	Statut	Description
	intensement altérée					feldspath, structure à granule gros et moyen, formation stratifiée, avec des strates localement intercalaires et faibles.
⑦	Grès faiblement altérée	Gr	Non exposé	Gris-foncé	Roche dure	La composition principale est en quartz et feldspath, structure à granule gros et moyen, formation stratifiée.

➤ EXEMPLE D'UN ESSAI PRESSIOMETRIQUE

Sondage PSO46-2:

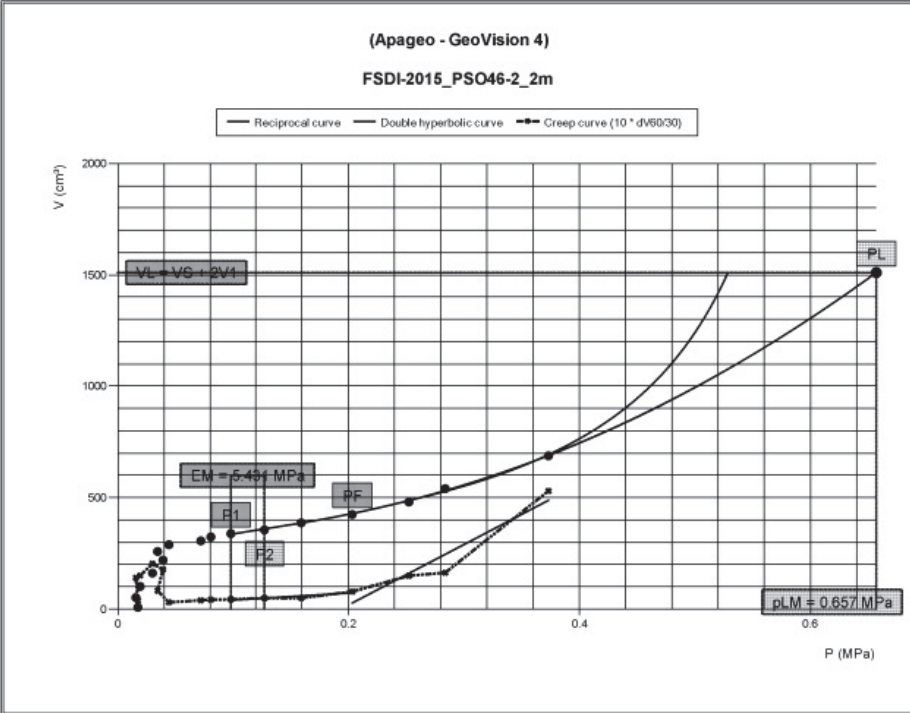
N° sondage	N°	Profondeur (m)	Symbole Lithologique	Donnée essais			
				PI(MPa)	Em(MPa)	s _{hs} (MPa)	P* _l (MPa)
PSO46-2	1	2.00	①	0.66	5.4	0.019	0.64
	2	4.00	①	0.40	5.3	0.038	0.36
	3	6.00	⑥	1.28	13.0	0.069	1.21
	4	8.00	⑥	4.36	65.6	0.092	4.27
	5	10.00	⑥	4.97	164.7	0.115	4.86
	6	12.00	⑦	5.03	139.5	0.150	4.88
	7	14.00	⑦	6.93	320.1	0.175	6.75
	8	16.00	⑦	5.04	218.4	0.200	4.84
	9	18.00	⑦	5.07	411.1	0.225	4.84
	10	20.00	⑦	7.00	348.4	0.250	6.75
	11	22.00	⑦	5.10	198.9	0.275	4.83
	12	24.00	⑦	5.30	427.7	0.300	5.00
	13	25.50	⑦	5.13	190.2	0.319	4.81





MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012913
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	2.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS	
σ_{10} (MPa)	0.018
p_1 (MPa)	0.10
p_2 (MPa)	0.13
p_r (MPa)	0.20
p_{rn} (MPa)	0.66
p_{rn} (MPa)	0.64
E_M (MPa)	5.4
E_M / p_{rn}	8.3
E_M / p_{rn}	8.5

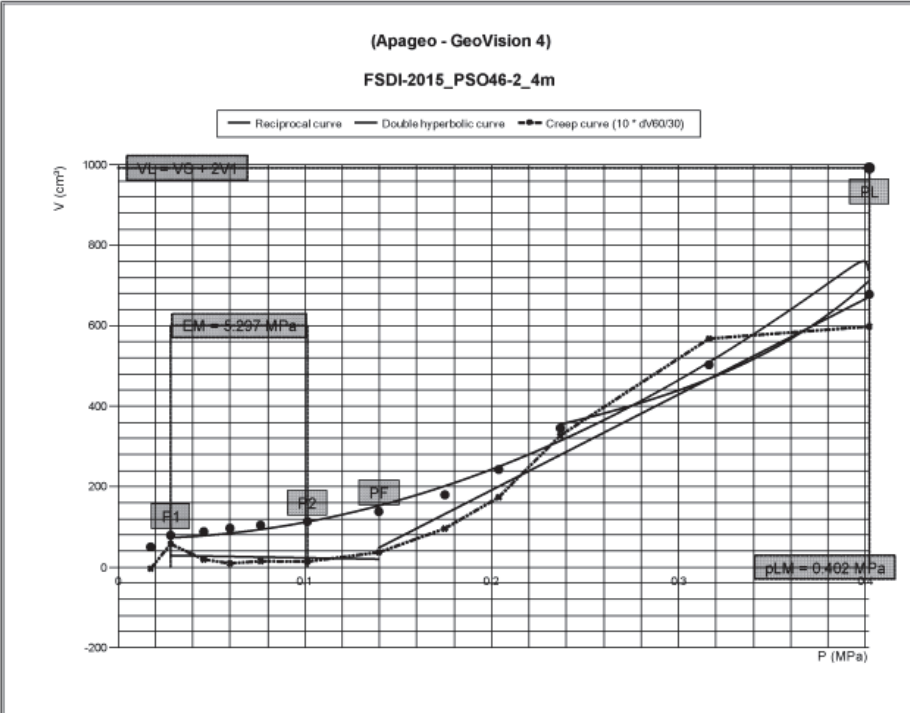
EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-5.03E-03
	B	3.32E-03
double hyperbolic	A1	-2.64E+07
	A2	-2.85E+05
	A3	5.37E+00
	A4	2.46E+09
	A5	1.43E-03
	A6	9.29E+01
A6	1.61E+01	

COMMENTS	
PLMR = 0.529 MPa	
PLMDH = 0.657 MPa	



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012002
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	4.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS	
σ_{10} (MPa)	0.036
p_1 (MPa)	0.03
p_2 (MPa)	0.10
p_r (MPa)	0.14
p_{rn} (MPa)	0.40
p_{rn} (MPa)	0.37
E_M (MPa)	5.3
E_M / p_{rn}	13.2
E_M / p_{rn}	14.5

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-8.54E-03
	B	4.84E-03
double hyperbolic	A1	-1.86E+06
	A2	9.29E+04
	A3	-3.72E+07
	A4	-4.25E-02
	A5	-2.00E+01
	A6	4.02E-01
A6	1.19E+01	

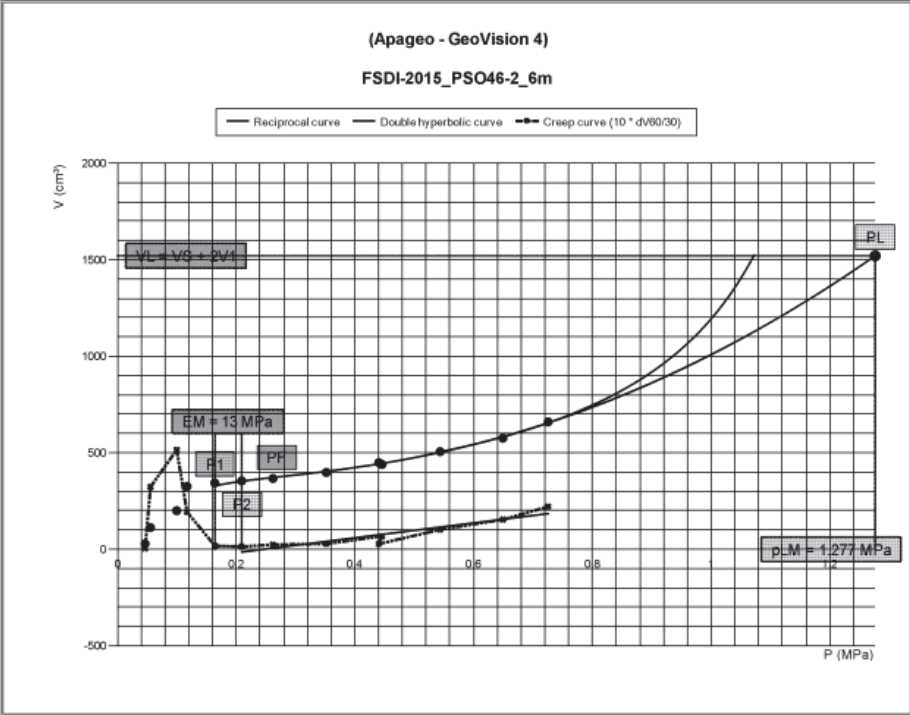
COMMENTS	
PLMR = 0.448 MPa	
PLMDH = -0.434 MPa	





MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012101
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	6.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS	
σ_{13} (MPa)	0.054
p_1 (MPa)	0.16
p_2 (MPa)	0.21
p_l (MPa)	0.21
p_m (MPa)	1.28
p_{1m} (MPa)	1.22
E_M (MPa)	13.0
E_M / p_m	10.2
E_M / p_{1m}	10.6

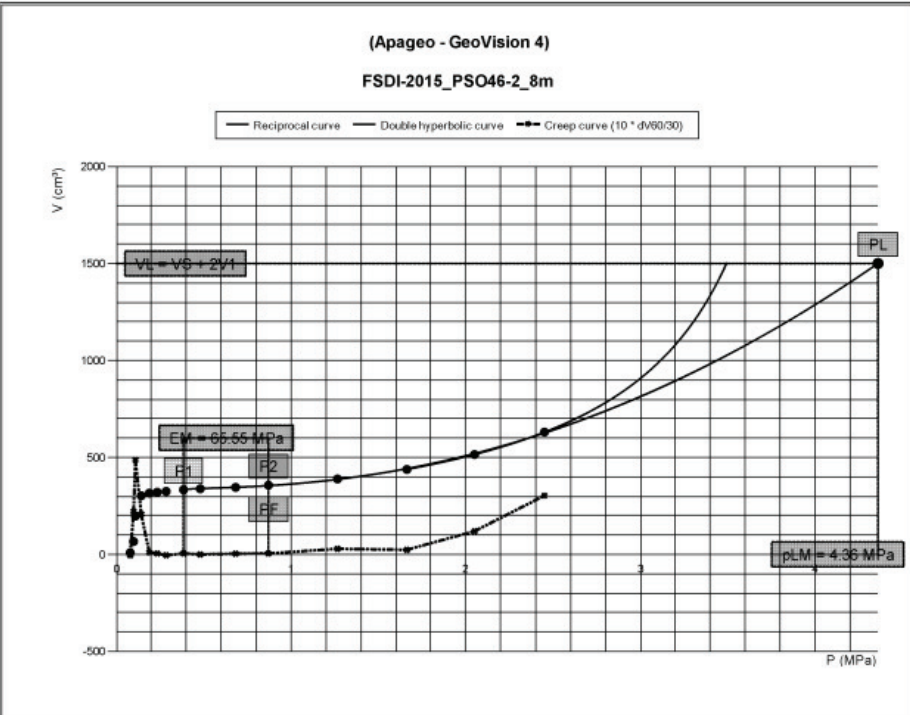
EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-2.51E-03
	B	3.35E-03
double hyperbolic	A1	-8.65E+06
	A2	-9.41E+04
	A3	2.29E+01
	A4	7.99E+08
	A5	-1.77E-03
	A6	9.24E+01

COMMENTS	
PLMR	= 1.072 MPa
PLMDH	= 1.277 MPa



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012102
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	8.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS	
σ_{13} (MPa)	0.072
p_1 (MPa)	0.38
p_2 (MPa)	0.87
p_l (MPa)	0.87
p_m (MPa)	4.36
p_{1m} (MPa)	4.29
E_M (MPa)	65.6
E_M / p_m	15.0
E_M / p_{1m}	15.3

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-8.83E-04
	B	3.75E-03
double hyperbolic	A1	-5.56E+05
	A2	-6.56E+03
	A3	9.93E+00
	A4	4.76E+07
	A5	5.43E-02
	A6	8.56E+01

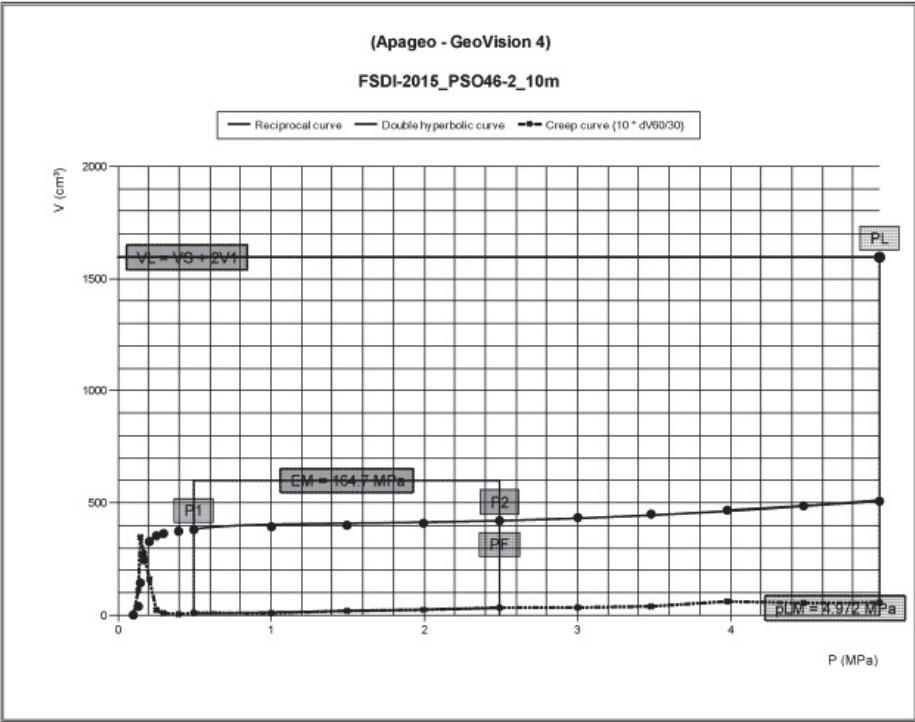
COMMENTS	
PLMR	= 3.493 MPa
PLMDH	= 4.36 MPa





MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012201
Job site identification	Pénétrant du Bé
Borehole	PSO46-2
Test depth	10.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS

σ_{1s} (MPa)	0.090
p_1 (MPa)	0.50
p_2 (MPa)	2.49
p_t (MPa)	2.49
p_{tm} (MPa)	4.97
p_{tn} (MPa)	4.88
E_M (MPa)	164.7
E_M / p_{tm}	33.1
E_M / p_{tn}	33.7

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS

inverse volumes	A	-1.71E-04
	B	2.82E-03
double hyperbolic	A1	-7.83E+04
	A2	-8.15E+02
	A3	2.44E+01
	A4	7.87E+06
	A5	5.14E-02
	A6	1.00E+02
		2.01E+01

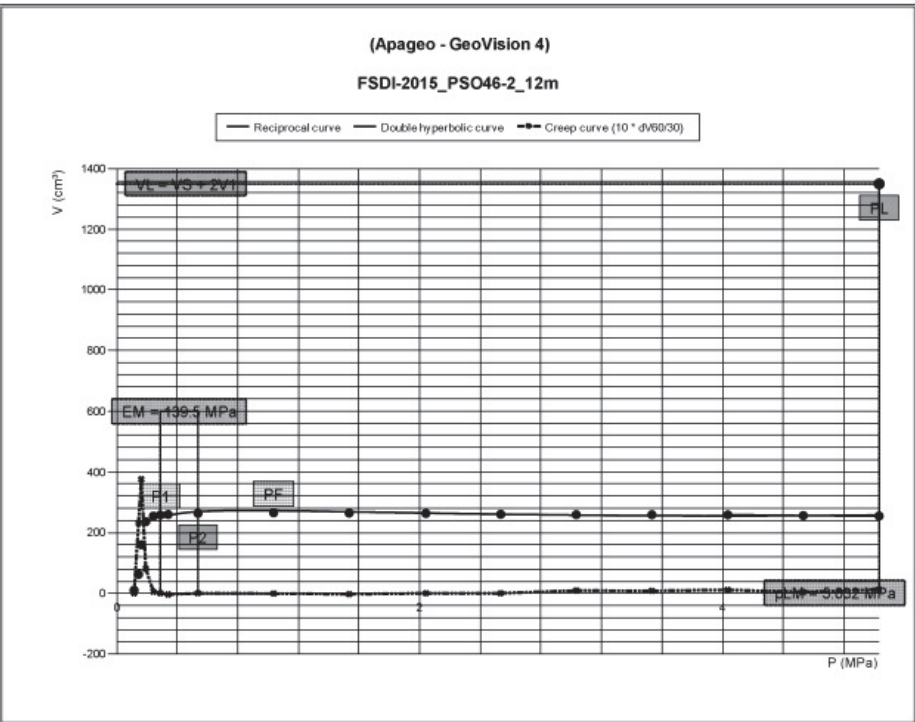
COMMENTS

PLMR = 12.83 MPa
PLMDH = 12.89 MPa



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012202
Job site identification	Pénétrant du Bé
Borehole	PSO46-2
Test depth	12.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS

σ_{1s} (MPa)	0.108
p_1 (MPa)	0.29
p_2 (MPa)	0.54
p_t (MPa)	1.04
p_{tm} (MPa)	5.03
p_{tn} (MPa)	4.92
E_M (MPa)	139.5
E_M / p_{tm}	27.7
E_M / p_{tn}	28.3

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS

inverse volumes	A	5.86E-05
	B	3.63E-03
double hyperbolic	A1	-2.34E+04
	A2	-2.58E+02
	A3	1.02E+01
	A4	2.37E+06
	A5	8.28E-02
	A6	1.00E+02
		1.21E+01

COMMENTS

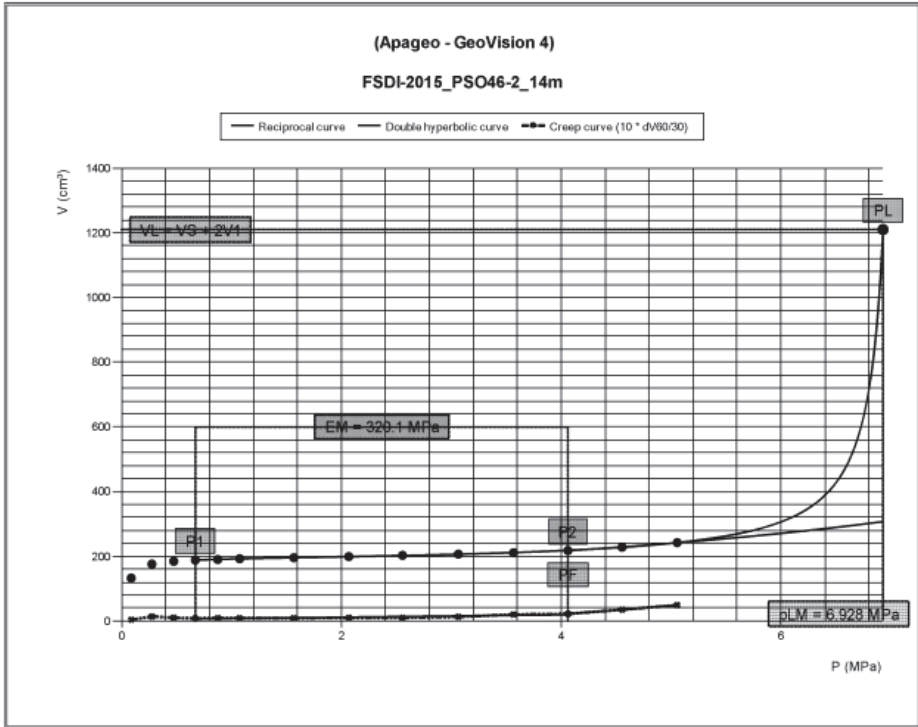
PLMR = 49.37 MPa
PLMDH = 22.29 MPa





MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012203
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	14.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS

σ_{vs} (MPa)	0.126
P1 (MPa)	0.67
P2 (MPa)	4.06
Pf (MPa)	4.06
Pm (MPa)	6.93
P _{1m} (MPa)	6.80
E _u (MPa)	320.1
E _u / P _m	46.2
E _u / P _{1m}	47.1

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS

inverse volumes	A	-4.70E-04
	B	6.51E-03
double hyperbolic	A1	1.73E+02
	A2	-6.49E-01
	A3	4.96E+00
	A4	1.48E+02
	A5	7.72E-03
	A6	7.07E+00
		3.08E-01

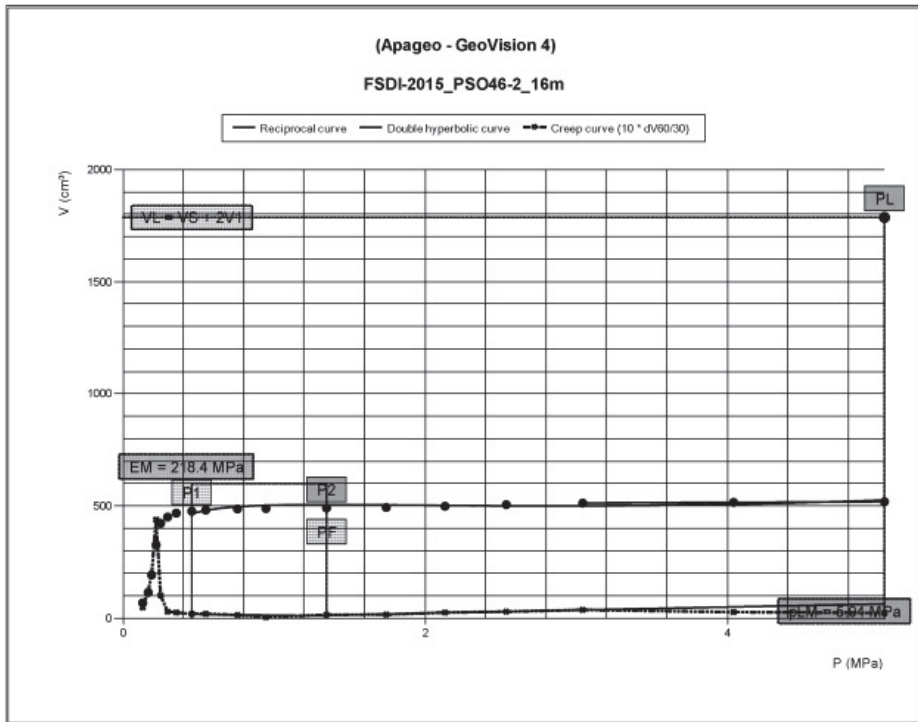
COMMENTS

PLMR = 12.09 MPa
PLMDH = 6.928 MPa



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012401
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	16.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS

σ_{vs} (MPa)	0.144
P1 (MPa)	0.46
P2 (MPa)	1.35
Pf (MPa)	1.35
Pm (MPa)	5.04
P _{1m} (MPa)	4.90
E _u (MPa)	218.4
E _u / P _m	43.3
E _u / P _{1m}	44.6

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS

inverse volumes	A	-1.09E-05
	B	1.96E-03
double hyperbolic	A1	-5.57E+04
	A2	-6.01E+02
	A3	3.66E+01
	A4	5.63E+06
	A5	6.57E-02
	A6	1.00E+02
		2.63E+01

COMMENTS

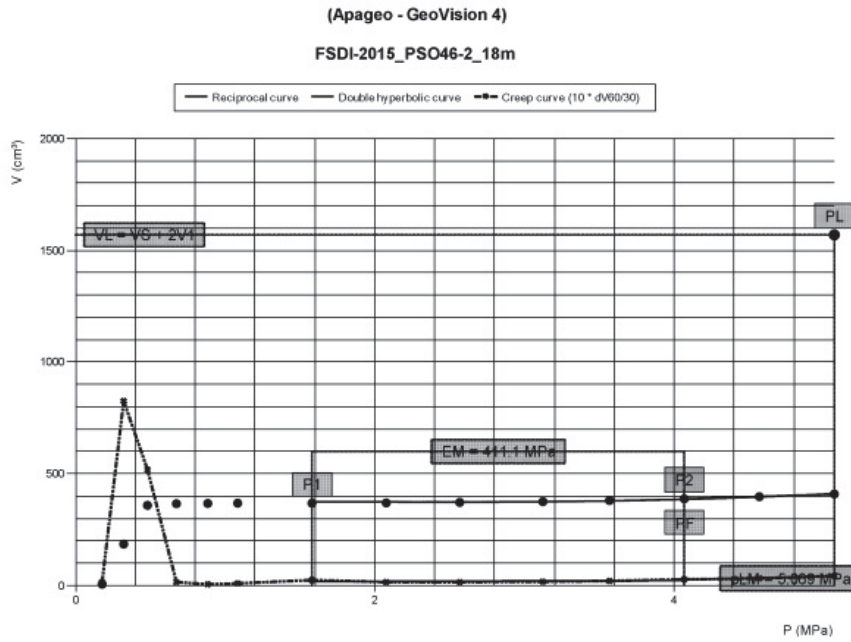
PLMR = 130.8 MPa
PLMDH = 16.53 MPa





MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012402
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	18.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS	
σ_{1s} (MPa)	0.162
p_1 (MPa)	1.58
p_2 (MPa)	4.07
p_t (MPa)	4.07
p_m (MPa)	5.07
p_{tm} (MPa)	4.91
E_M (MPa)	411.1
E_M / p_m	81.1
E_M / p_{tm}	83.8

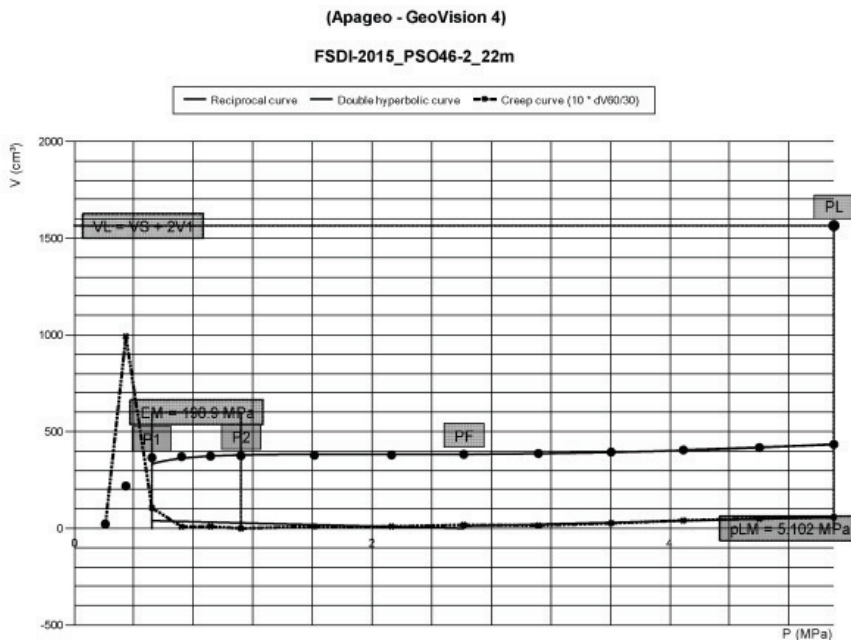
EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-1.36E-04
	B	3.14E-03
double hyperbolic	A1	-6.65E+04
	A2	-7.13E+02
	A3	5.12E+01
	A4	6.70E+06
	A5	6.62E-02
	A6	1.00E+02
		1.11E+01

COMMENTS	
PLMR = 18.33 MPa PLMDH = 14.97 MPa	



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012802
Job site identification	Pénétrant du B6
Borehole	PSO46-2
Test depth	22.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS	
σ_{1s} (MPa)	0.198
p_1 (MPa)	0.62
p_2 (MPa)	1.12
p_t (MPa)	2.62
p_m (MPa)	5.10
p_{tm} (MPa)	4.90
E_M (MPa)	198.9
E_M / p_m	39.0
E_M / p_{tm}	40.6

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-1.63E-04
	B	3.14E-03
double hyperbolic	A1	-7.53E+04
	A2	-8.03E+02
	A3	4.66E+01
	A4	7.58E+06
	A5	1.04E-01
	A6	1.00E+02
		7.80E+00

COMMENTS	
PLMR = 15.32 MPa PLMDH = 14.01 MPa	

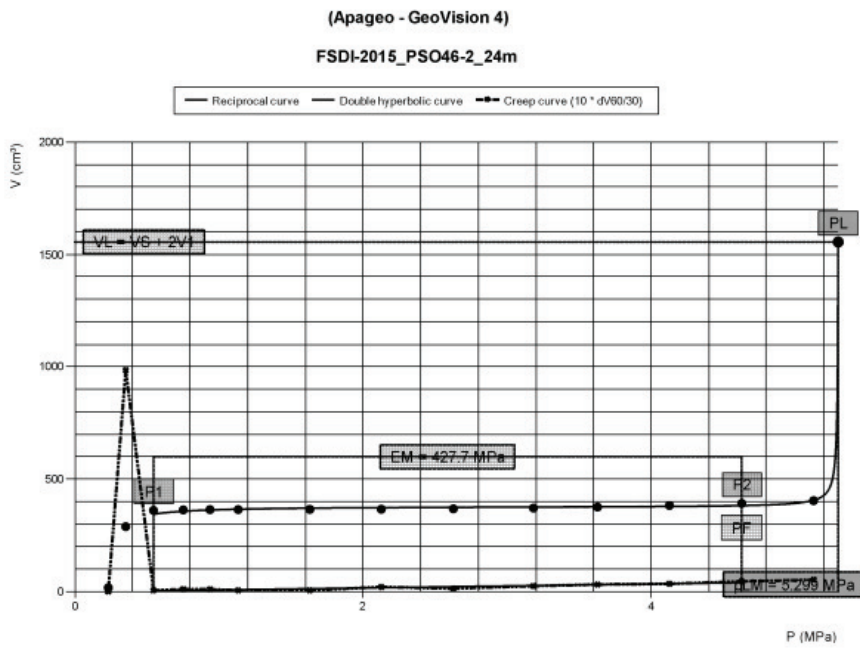


Apageo - GeoVision® 4.0.3.1



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15012803
Job site identification	Pénétrant du B
Borehole	PSO46-2
Test depth	24.00



CALCULATED NORMATIVE RESULTS		
σ_{1s} (MPa)		0.216
p_1 (MPa)		0.55
p_2 (MPa)		4.63
p_t (MPa)		4.63
p_m (MPa)		5.30
p_{3m} (MPa)		5.08
E_M (MPa)		427.7
E_M / p_m		80.7
E_M / p_{3m}		84.2

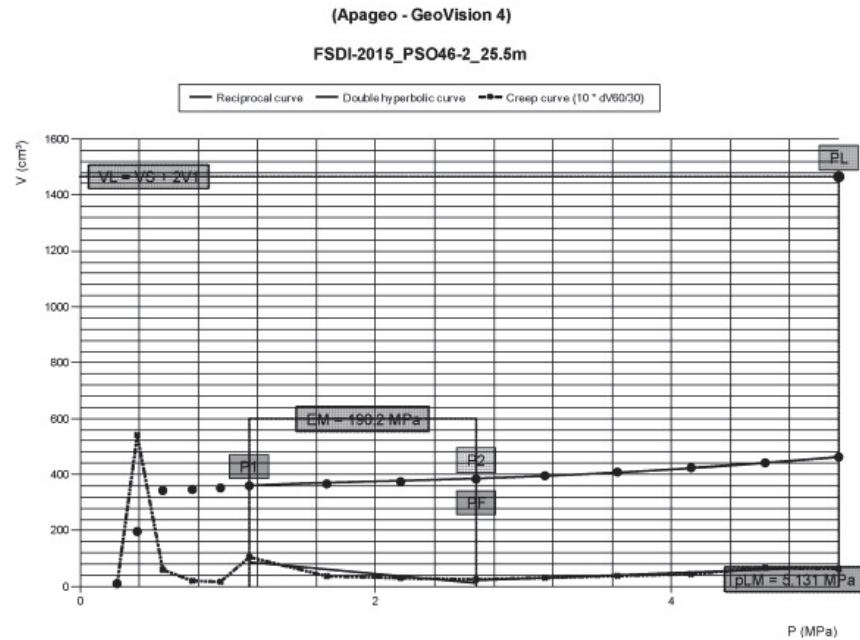
EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-1.39E-04
	B	3.19E-03
double hyperbolic	A1	3.79E+02
	A2	-4.53E-01
	A3	1.26E+01
	A4	5.63E+00
	A5	1.97E-01
	A6	5.30E+00

COMMENTS	
PLMR = 18.33 MPa	
PLMDH = 5.299 MPa	



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15013001
Job site identification	Pénétrant du B
Borehole	PSO46-2
Test depth	25.50



CALCULATED NORMATIVE RESULTS		
σ_{1s} (MPa)		0.229
p_1 (MPa)		1.14
p_2 (MPa)		2.68
p_t (MPa)		2.68
p_m (MPa)		5.13
p_{3m} (MPa)		4.90
E_M (MPa)		190.2
E_M / p_m		37.1
E_M / p_{3m}		38.8

EXTRAPOLATION METHODS PARAMETERS		
inverse volumes	A	-1.96E-04
	B	3.17E-03
double hyperbolic	A1	-6.29E+04
	A2	-6.57E+02
	A3	4.02E+01
	A4	6.33E+06
	A5	1.53E-01
	A6	1.00E+02

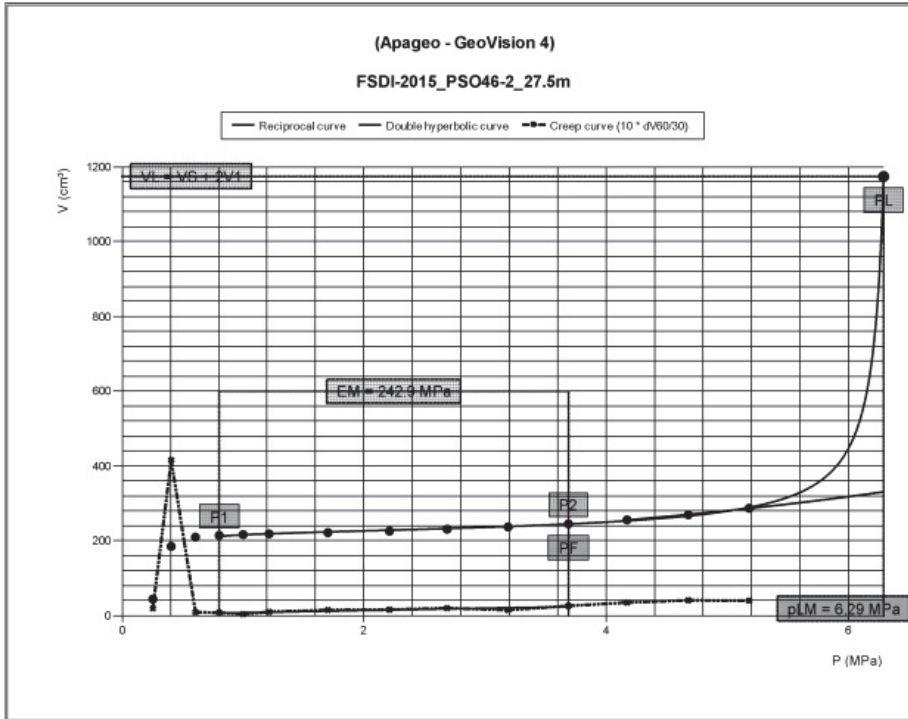
COMMENTS	
PLMR = 12.69 MPa	
PLMDH = 13.71 MPa	





MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15013002
Job site identification	Pénétrant du B
Borehole	PSO46-2
Test depth	27.50



α_{13} (MPa)	0.247
p_1 (MPa)	0.80
p_2 (MPa)	3.69
p_l (MPa)	3.69
p_m (MPa)	6.29
p_{3m} (MPa)	6.04
E_M (MPa)	242.9
E_M / p_m	38.6
E_M / p_{3m}	40.2

inverse volumes	A	-4.20E-04
	B	5.66E-03
double hyperbolic	A1	2.05E+02
	A2	2.55E+00
	A3	6.11E+00
	A4	8.67E+01
	A5	2.20E-01
	A6	6.38E+00
		1.85E+00

PLMR = 11.45 MPa
PLMDH = 6.29 MPa

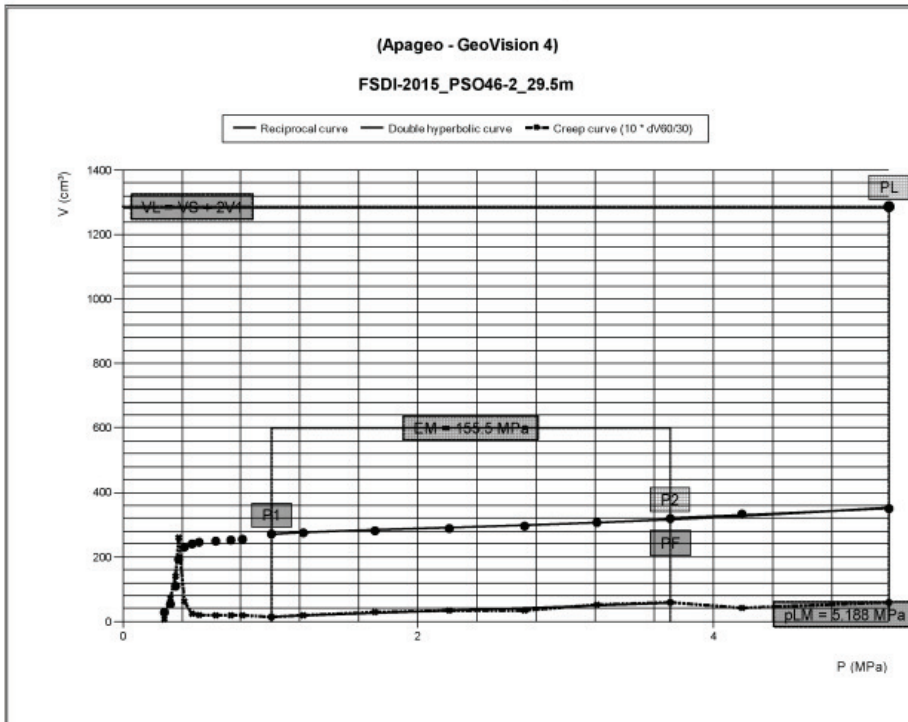


Apageo - GeoVision® 4.0.3.1



MENARD PRESSUREMETER
REPORT AND INTERPRETATION

File	FSDI-2015
Test reference	ES15013003
Job site identification	Pénétrant du B
Borehole	PSO46-2
Test depth	29.50



α_{13} (MPa)	0.265
p_1 (MPa)	1.01
p_2 (MPa)	3.71
p_l (MPa)	3.71
p_m (MPa)	5.19
p_{3m} (MPa)	4.92
E_M (MPa)	155.5
E_M / p_m	30.0
E_M / p_{3m}	31.6

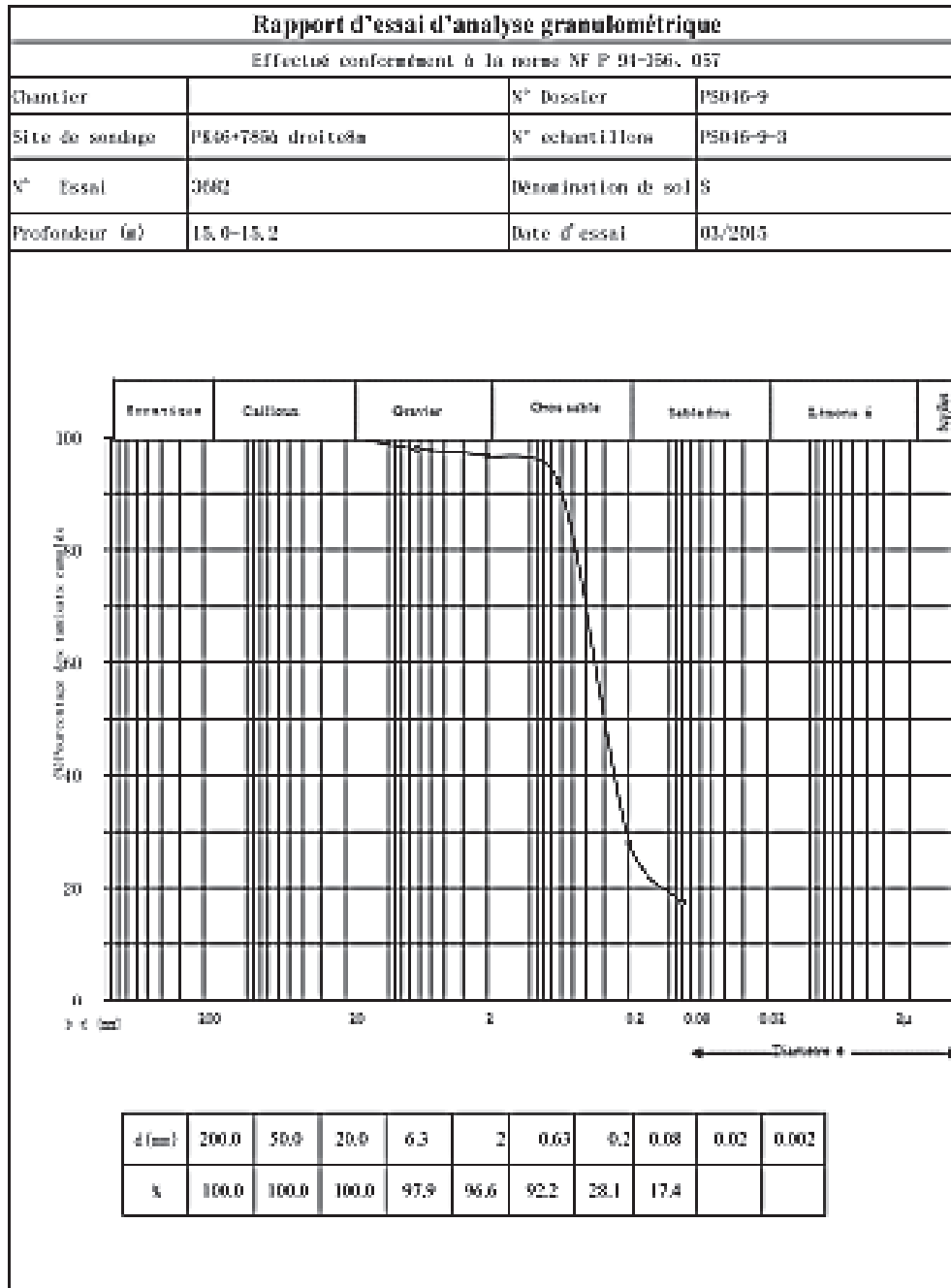
inverse volumes	A	-1.81E-04
	B	3.79E-03
double hyperbolic	A1	-3.05E+04
	A2	-3.13E+02
	A3	1.95E+01
	A4	3.08E+06
	A5	2.17E-01
	A6	1.00E+02
		1.38E+01

PLMR = 16.6 MPa
PLMDH = 17.06 MPa



Apageo - GeoVision® 4.0.3.1

EXEMPLE DU RAPPORT D'ESSAI GRANULOMETRIQUE :







ANNEXES B

DIAGRAMMES DES EFFORTS INTERNES



Diagramme des Moments A(l) ELS :

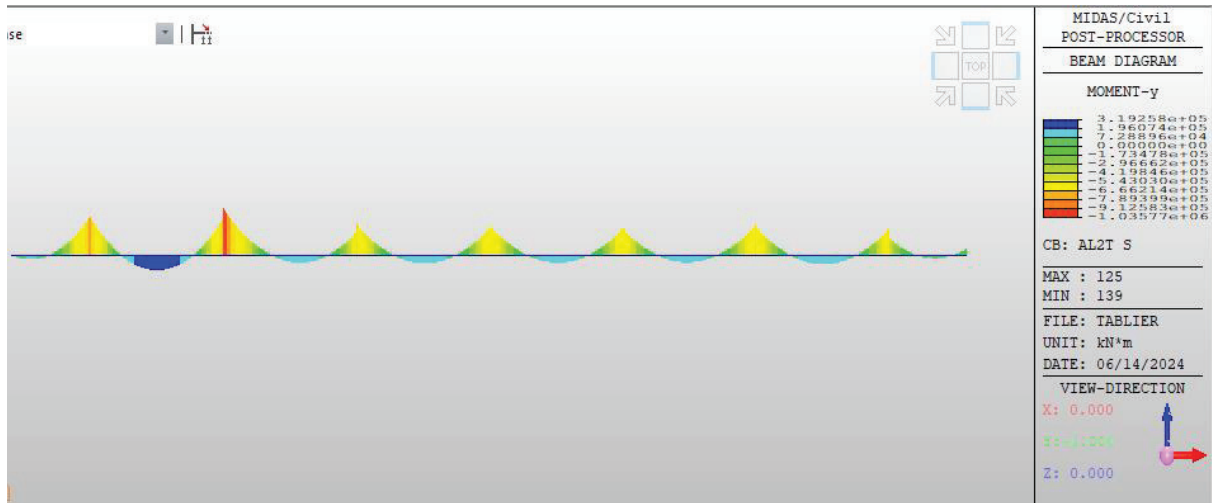


Diagramme des Moments Bc ELS:

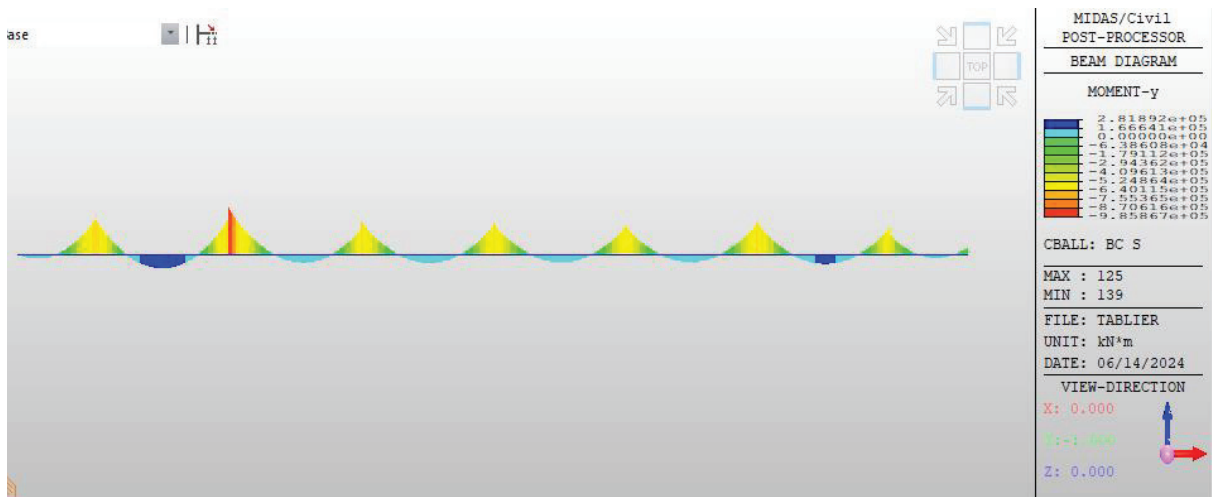


Diagramme des Moments Bc ELS:

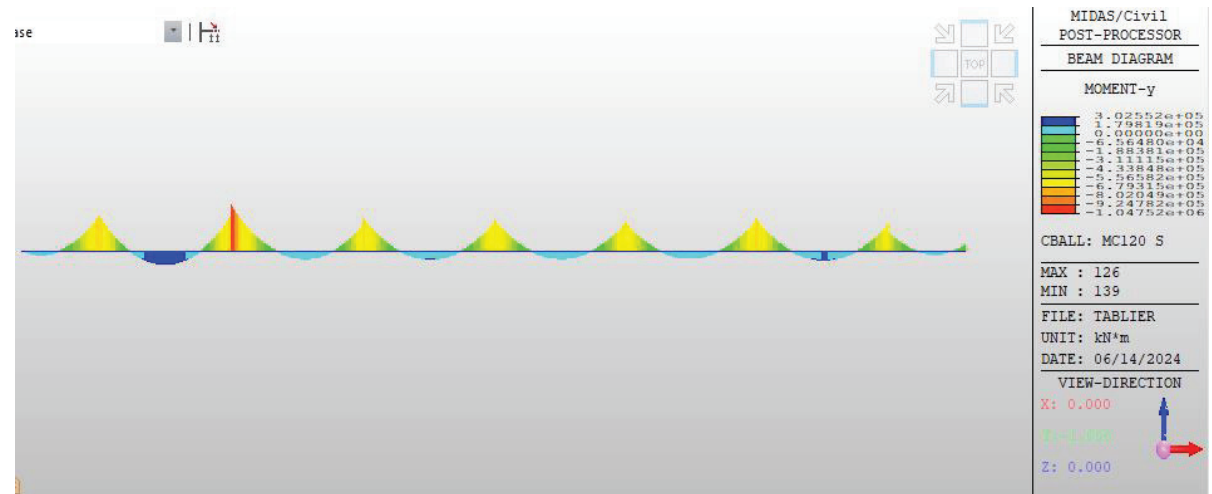


Diagramme des Moments D240 ELS :

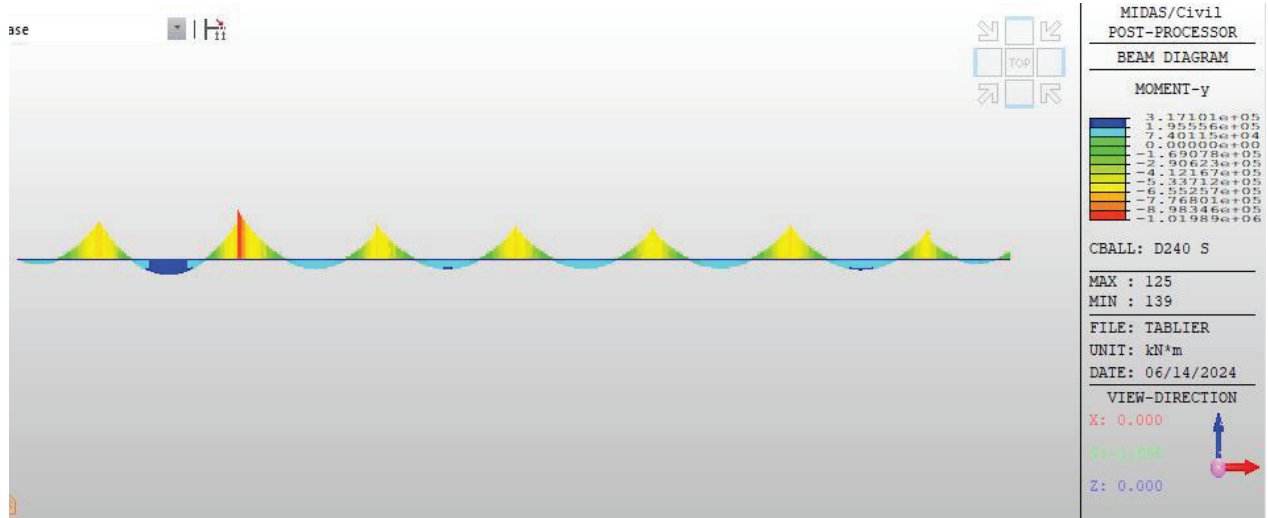


Diagramme des Moments de Fléau A1

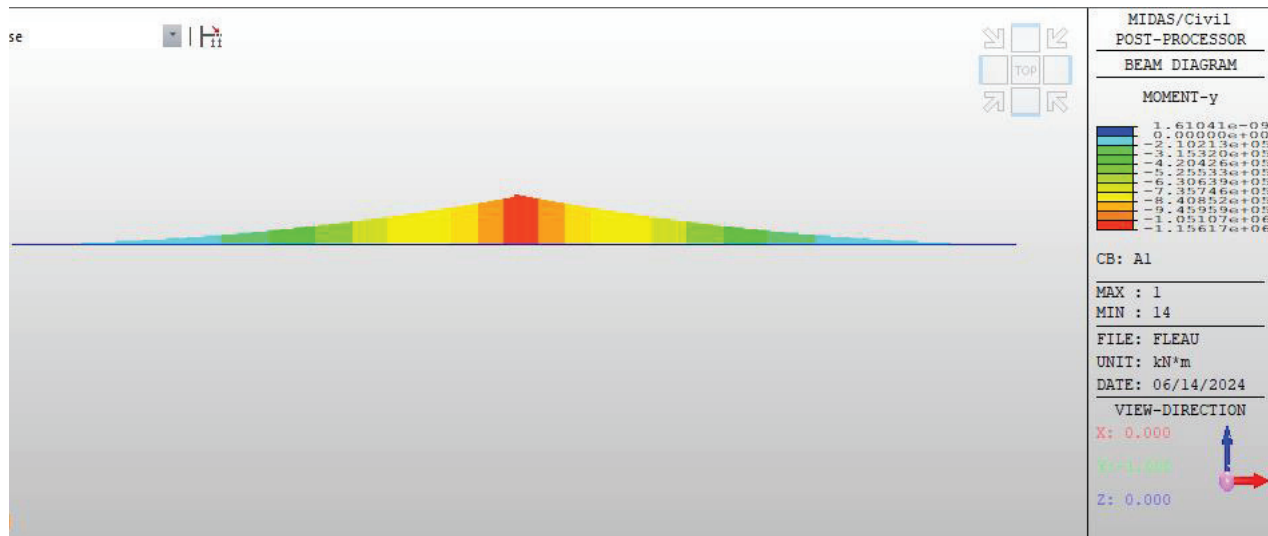


Diagramme des Moments de Fléau A2

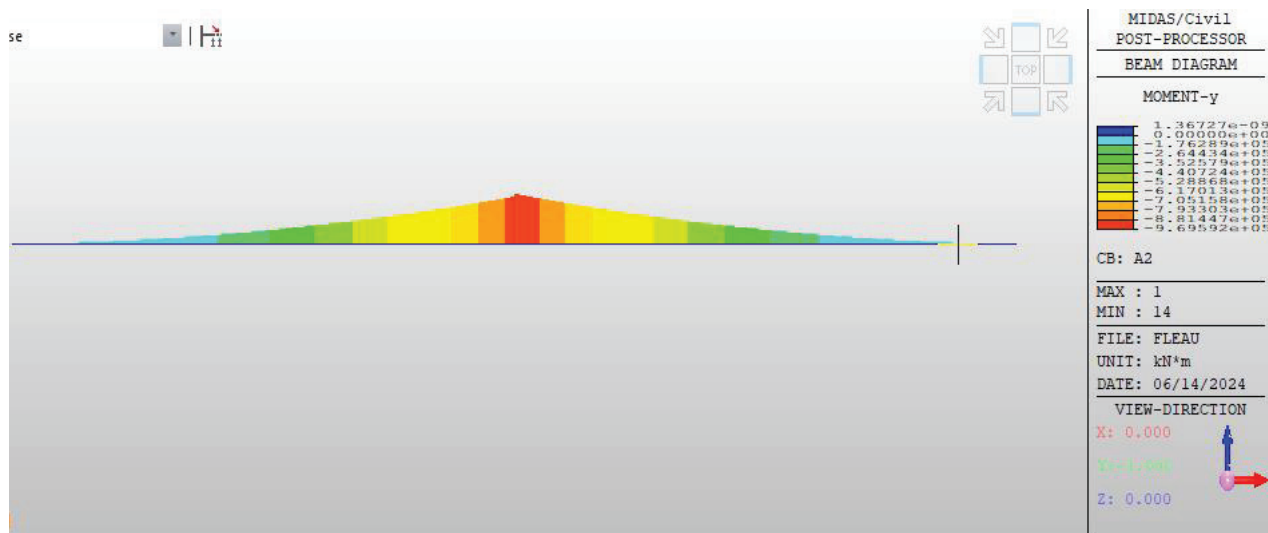


Diagramme des Moments de Fléau B1

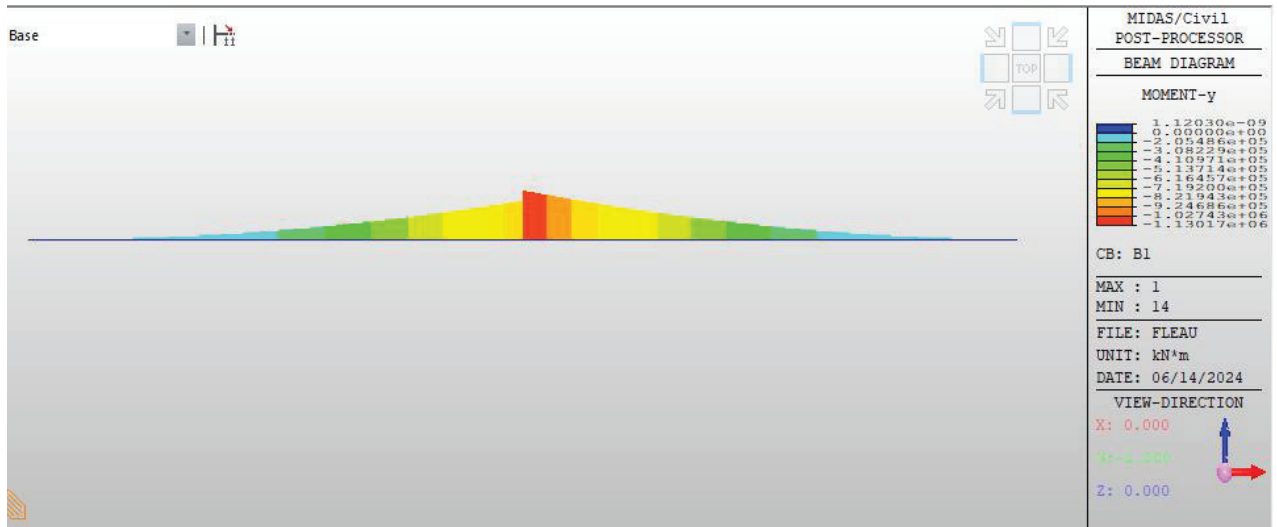
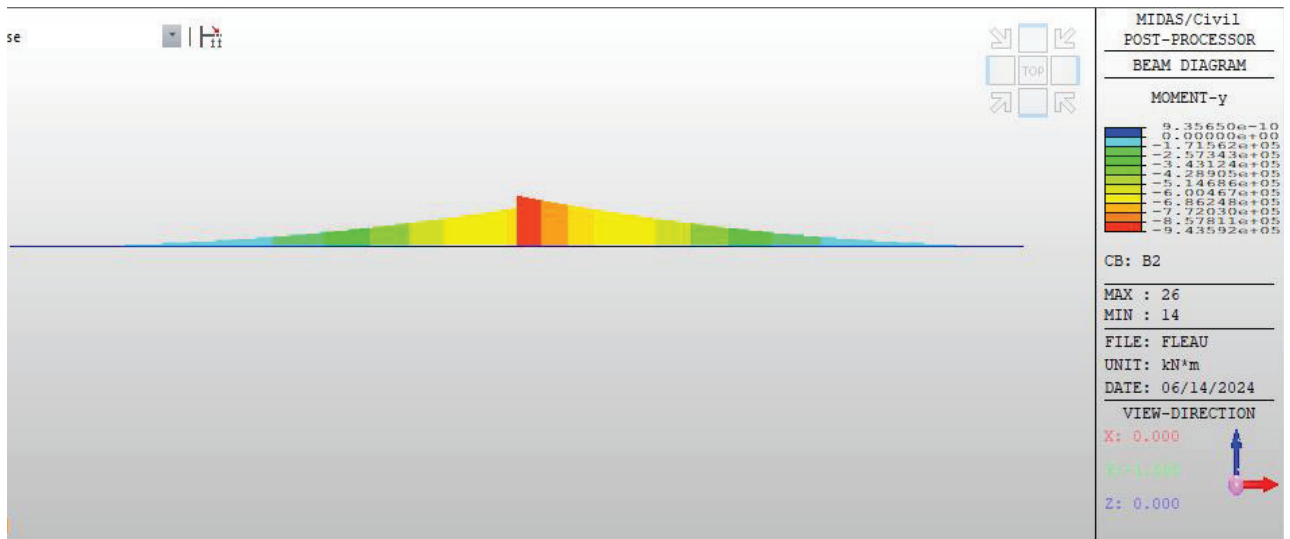


Diagramme des Moments de Fléau B2





ANNEXES C
TABLEAUX DE CALCUL



Tableau C. 1: Moments de Fléau sous combinaison A1

Elem	Load	Part	Axial (kN)	Shear-y (kN)	Shear-z (kN)	Torsion (kN*m)	Moment-y (kN*m)	Moment-z (kN*m)
14	A1	I[14]	0	0	-34316.08	0	-1068622.22	0
13	A1	I[14]	0	0	-32760.68	0	-1013254.95	0
15	A1	I[15]	-2117.13	0	-31648.35	0	-936556.7	0
12	A1	I[13]	-2020.81	0	-30208.4	0	-887181.76	0
16	A1	I[16]	-1710.99	0	-28520.48	0	-785907.05	0
11	A1	I[12]	-1631.67	0	-27198.33	0	-743448.31	0
17	A1	I[17]	-1360.82	0	-25564.76	0	-650544.97	0
10	A1	I[11]	-1296.35	0	-24353.66	0	-614426.84	0
18	A1	I[18]	-1062.25	0	-22763.67	0	-529633.73	0
9	A1	I[10]	-1010.64	0	-21657.58	0	-499313.43	0
19	A1	I[19]	-810.95	0	-20100.45	0	-422425.75	0
8	A1	I[9]	-770.34	0	-19093.96	0	-397389.82	0
20	A1	I[20]	-602.57	0	-17559.06	0	-328258.63	0
7	A1	I[8]	-571.29	0	-16647.4	0	-308019.59	0
21	A1	I[21]	-432.79	0	-15124.2	0	-246551.1	0
6	A1	I[7]	-409.3	0	-14303.2	0	-230644.26	0
22	A1	I[22]	-297.31	0	-12781.3	0	-176799.09	0
5	A1	I[6]	-280.24	0	-12047.36	0	-164779.52	0
23	A1	I[23]	-191.98	0	-10516.5	0	-118571.67	0
4	A1	I[5]	-180.12	0	-9866.57	0	-110011.34	0
24	A1	I[24]	-112.93	0	-8316.68	0	-71507.09	0
3	A1	I[4]	-105.21	0	-7748.22	0	-65992.18	0
25	A1	I[25]	-56.73	0	-6169.44	0	-35308.78	0
2	A1	I[3]	-52.23	0	-5680.39	0	-32437.08	0
26	A1	I[26]	-19.68	0	-3900.64	0	-9741.35	0
1	A1	I[2]	-18.43	0	-3651.89	0	-9119.88	0

Tableau C. 2: Moments de Fléau sous combinaison A2

Elem	Load	Part	Axial (kN)	Shear-y (kN)	Shear-z (kN)	Torsion (kN*m)	Moment-y (kN*m)	Moment-z (kN*m)
14	A2	I[14]	0	0	-28485.46	0	-897960.44	0
13	A2	I[14]	0	0	-27158.71	0	-849285.79	0
15	A2	I[15]	-1759.22	0	-26298.08	0	-788280.61	0
12	A2	I[13]	-1676.93	0	-25067.95	0	-744720.41	0
16	A2	I[16]	-1423.93	0	-23735.46	0	-663006.48	0
11	A2	I[12]	-1355.86	0	-22600.96	0	-625367.37	0
17	A2	I[17]	-1134.53	0	-21313.67	0	-550258.54	0
10	A2	I[11]	-1078.94	0	-20269.28	0	-518073.21	0
18	A2	I[18]	-887.48	0	-19018.37	0	-449352.2	0
9	A2	I[10]	-842.72	0	-18059.15	0	-422180.19	0
19	A2	I[19]	-679.24	0	-16835.85	0	-359675.8	0
8	A2	I[9]	-643.8	0	-15957.37	0	-337100.65	0
20	A2	I[20]	-506.28	0	-14752.98	0	-280687.37	0
7	A2	I[8]	-478.77	0	-13951.36	0	-262313.87	0
21	A2	I[21]	-365.06	0	-12757.26	0	-211911.34	0
6	A2	I[7]	-344.22	0	-12029.08	0	-197362.91	0
22	A2	I[22]	-252.08	0	-10836.75	0	-152935.27	0
5	A2	I[6]	-236.78	0	-10179.07	0	-141851.54	0
23	A2	I[23]	-163.93	0	-8980.14	0	-103406.6	0
4	A2	I[5]	-153.17	0	-8390.46	0	-95440.99	0
24	A2	I[24]	-97.45	0	-7176.68	0	-63029.34	0
3	A2	I[4]	-90.34	0	-6652.92	0	-57846.9	0
25	A2	I[25]	-49.8	0	-5416.23	0	-31560.86	0
2	A2	I[3]	-45.57	0	-4956.71	0	-28836.13	0
26	A2	I[26]	-17.8	0	-3526.76	0	-8808.54	0
1	A2	I[2]	-16.62	0	-3292.68	0	-8223.65	0

Tableau C. 3: Moments de Fléau sous combinaison B1

Elem	Load	Part	Axial (kN)	Shear-y (kN)	Shear-z (kN)	Torsion (kN*m)	Moment-y (kN*m)	Moment-z (kN*m)
14	B1	I[14]	0	0	-33862.71	0	-1042621.89	0
15	B1	I[15]	-2087.41	0	-31203.97	0	-912349.06	0
13	B1	I[14]	0	0	-29351.35	0	-812071.89	0
16	B1	I[16]	-1684.55	0	-28079.9	0	-763916.27	0
12	B1	I[13]	-1793.89	0	-26816.24	0	-699616.85	0
17	B1	I[17]	-1337.57	0	-25128	0	-630751.05	0
11	B1	I[12]	-1429.52	0	-23828.65	0	-572822.09	0
18	B1	I[18]	-1042.05	0	-22330.77	0	-512016.67	0
10	B1	I[11]	-1118.19	0	-21006.66	0	-460619.31	0
19	B1	I[19]	-793.64	0	-19671.43	0	-406965.55	0
9	B1	I[10]	-855.52	0	-18333.46	0	-362204.59	0
20	B1	I[20]	-587.98	0	-17133.94	0	-314935.29	0
8	B1	I[9]	-637.16	0	-15792.91	0	-276859.67	0
21	B1	I[21]	-420.74	0	-14703	0	-235344.62	0
7	B1	I[8]	-458.8	0	-13369.59	0	-203948.12	0
22	B1	I[22]	-287.6	0	-12364.04	0	-167689.47	0
6	B1	I[7]	-316.17	0	-11048.8	0	-142911.48	0
23	B1	I[23]	-184.44	0	-10103.2	0	-111538.91	0
5	B1	I[6]	-205.08	0	-8816.5	0	-93265.42	0
24	B1	I[24]	-107.37	0	-7907.34	0	-66531.19	0
4	B1	I[5]	-121.57	0	-6659.37	0	-54595.94	0
25	B1	I[25]	-53	0	-5764.09	0	-32369.74	0
3	B1	I[4]	-61.99	0	-4564.77	0	-26555.46	0
2	B1	I[3]	-23.18	0	-2520.78	0	-8859.05	0
26	B1	I[26]	-17.82	0	-3531.77	0	-8819.17	0
1	B1	I[2]	-2.6	0	-516.19	0	-1280.54	0

Tableau C. 4: Moments de Fléau sous combinaison B2

Elem	Load	Part	Axial (kN)	Shear-y (kN)	Shear-z (kN)	Torsion (kN*m)	Moment-y (kN*m)	Moment-z (kN*m)
14	B2	I[14]	0	0	-28032.09	0	-871960.11	0
15	B2	I[15]	-1729.5	0	-25853.7	0	-764072.97	0
13	B2	I[14]	0	0	-23749.38	0	-648102.73	0
16	B2	I[16]	-1397.49	0	-23294.88	0	-641015.7	0
12	B2	I[13]	-1450.01	0	-21675.79	0	-557155.51	0
17	B2	I[17]	-1111.29	0	-20876.91	0	-530464.62	0
11	B2	I[12]	-1153.71	0	-19231.28	0	-454741.15	0
18	B2	I[18]	-867.28	0	-18585.47	0	-431735.14	0
10	B2	I[11]	-900.78	0	-16922.28	0	-364265.68	0
19	B2	I[19]	-661.93	0	-16406.82	0	-344215.6	0
9	B2	I[10]	-687.6	0	-14735.03	0	-285071.35	0
20	B2	I[20]	-491.69	0	-14327.86	0	-267364.03	0
8	B2	I[9]	-510.62	0	-12656.32	0	-216570.49	0
21	B2	I[21]	-353	0	-12336.06	0	-200704.86	0
7	B2	I[8]	-366.28	0	-10673.55	0	-158242.4	0
22	B2	I[22]	-242.37	0	-10419.49	0	-143825.65	0
6	B2	I[7]	-251.09	0	-8774.67	0	-109630.13	0
23	B2	I[23]	-156.39	0	-8566.83	0	-96373.84	0
5	B2	I[6]	-161.62	0	-6948.21	0	-70337.44	0
24	B2	I[24]	-91.89	0	-6767.34	0	-58053.44	0
4	B2	I[5]	-94.62	0	-5183.26	0	-40025.58	0
25	B2	I[25]	-46.07	0	-5010.87	0	-28621.82	0
3	B2	I[4]	-47.11	0	-3469.48	0	-18410.18	0
26	B2	I[26]	-15.94	0	-3157.9	0	-7886.36	0
2	B2	I[3]	-16.52	0	-1797.11	0	-5258.1	0
1	B2	I[2]	-0.79	0	-156.98	0	-384.31	0

Tableau C. 5: Les Pertes par Frottement

X	Cable	L	$\alpha 1$	$\alpha 2$	Axe VSP	FIN VSP	FIN V1	FIN V2	FIN V3	FIN V4	FIN V5	FIN V6	FIN V7	FIN V8	FIN V9	FIN V10	FIN V11	FIN V12
4	C0	4.00	0.000	0.000	17.75	0.00												
4	C1	4.00	0.000	0.000	17.75	0.00												
4	C2	4.00	0.000	0.000	17.75	0.00												
4.00	C3	4.00	0.000	0.000	17.75	0.00												
9.00	C4	5.00	0.000	0.076	61.52	65.79	0.00											
9.00	C5	5.00	0.000	0.076	61.52	65.79	0.00											
14.00	C6	5.00	0.000	0.076	82.75	65.79	44.30	0.00										
14.00	C7	5.00	0.000	0.076	82.75	65.79	44.30	0.00										
14.00	C8	5.00	0.000	0.076	82.75	65.79	44.30	0.00										
19.00	C9	5.00	0.160	0.076	131.15	114.77	94.01	72.94	0.00									
19.00	C10	5.00	0.160	0.076	131.15	114.77	94.01	72.94	0.00									
24.00	C11	5.00	0.000	0.076	124.28	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00								
24.00	C12	5.00	0.000	0.076	124.28	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00								
24.00	C13	5.00	0.000	0.076	124.28	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00								
29.00	C14	5.00	0.000	0.076	144.59	128.37	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00							
29.00	C15	5.00	0.000	0.066	141.75	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00							
29.00	C16	5.00	0.000	0.066	141.75	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00							
34.00	C17	5.00	0.317	0.076	228.90	213.70	194.44	174.89	155.05	134.90	114.45	0.00						
34.00	C18	5.00	0.317	0.076	228.90	213.70	194.44	174.89	155.05	134.90	114.45	0.00						
39.00	C19	5.00	0.000	0.066	181.54	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00					
39.00	C20	5.00	0.160	0.066	209.10	193.66	174.10	154.25	134.09	113.63	92.86	71.77	0.00					

39.00	C21	5.00	0.160	0.066	209.10	193.66	174.10	154.25	134.09	113.63	92.86	71.77	0.00					
44.00	C22	5.00	0.000	0.076	203.70	188.20	168.55	148.61	128.37	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00				
44.00	C23	5.00	0.000	0.076	203.70	188.20	168.55	148.61	128.37	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00				
49.00	C24	5.00	0.000	0.076	222.82	207.55	188.20	168.55	148.61	128.37	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00			
49.00	C25	5.00	0.000	0.076	222.82	207.55	188.20	168.55	148.61	128.37	107.82	86.96	65.79	44.30	0.00			
54.00	C26	5.00	0.000	0.066	239.02	223.95	204.84	185.45	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00		
54.00	C27	5.00	0.000	0.066	239.02	223.95	204.84	185.45	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00		
54.00	C28	5.00	0.000	0.066	239.02	223.95	204.84	185.45	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00		
59.00	C29	5.00	0.000	0.066	257.62	242.77	223.95	204.84	185.45	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00	
59.00	C30	5.00	0.000	0.066	257.62	242.77	223.95	204.84	185.45	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00	
64.00	C31	5.00	0.000	0.066	275.94	261.31	242.77	223.95	204.84	185.45	165.77	145.78	125.50	104.91	84.00	62.78	41.24	0.00
Pertes par frottement Moyennes					153.886	139.12	135.75	123.32	114.54	101.65	94.49	80.12	62.11	54.99	41.66	24.21	13.75	0.00
en pourcentage (%)					10.34	9.35	9.12	8.29	7.70	6.83	6.35	5.38	4.17	3.70	2.80	1.63	0.92	0.00

Tableau C. 6: Pertes par Recul d'Ancrage

X	Cable	L	θ	k	d	Axe VSP	FIN VSP	FIN V1	FIN V2	FIN V3	FIN V4	FIN V5	FIN V6	FIN V7	FIN V8	FIN V9	FIN V10	FIN V11	FIN V12
4.00	C0	4.00	0.000	0.003	15.98	106.96	142.67												
4.00	C1	4.00	0.000	0.003	15.98	106.96	142.67												
4.00	C2	4.00	0.000	0.003	15.98	106.96	142.67												
4.00	C3	4.00	0.000	0.003	15.98	106.96	142.67												
9.00	C4	5.00	0.076	0.006	11.26	40.63	112.58	202.51											
9.00	C5	5.00	0.076	0.006	11.26	40.63	112.58	202.51											
14.00	C6	5.00	0.076	0.006	11.26	-	22.64	112.58	202.51										
14.00	C7	5.00	0.076	0.006	11.26	-	22.64	112.58	202.51										
14.00	C8	5.00	0.076	0.006	11.26	-	22.64	112.58	202.51										
19.00	C9	5.00	0.176	0.010	8.73	-	-	-	111.59	261.17									
19.00	C10	5.00	0.176	0.010	8.73	-	-	-	111.59	261.17									
24.00	C11	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	22.64	112.58	202.51								
24.00	C12	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	22.64	112.58	202.51								
24.00	C13	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	22.64	112.58	202.51								
29.00	C14	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	-	22.64	112.58	202.51							
29.00	C15	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31							
29.00	C16	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31							
34.00	C17	5.00	0.325	0.016	6.92	-	-	-	-	-	91.38	329.56							
34.00	C18	5.00	0.325	0.016	6.92	-	-	-	-	-	91.38	329.56							
39.00	C19	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31						

39.00	C20	5.00	0.172	0.010	8.80	-	-	-	-	-	-	-	111.89	259.01					
39.00	C21	5.00	0.172	0.010	8.80	-	-	-	-	-	-	-	111.89	259.01					
44.00	C22	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	-	-	-	-	22.64	112.58	202.51				
44.00	C23	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	-	-	-	-	22.64	112.58	202.51				
49.00	C24	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	-	-	-	-	-	22.64	112.58	202.51			
49.00	C25	5.00	0.076	0.006	11.26	-	-	-	-	-	-	-	-	22.64	112.58	202.51			
54.00	C26	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31		
54.00	C27	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31		
54.00	C28	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31		
59.00	C29	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31	
59.00	C30	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31	
64.00	C31	5.00	0.066	0.006	11.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	28.00	111.66	195.31

Tableau C. 7: Pertes de tension dues aux non-simultanéités de la mise en tension

Abcs	N° cables	v (m)	dmoy (m)	e moy (m)	I (m4)	S (m2)	Mg (MN.m)	P (MPa)	$\Delta\sigma_e$ (MPa)	$\Delta\sigma_e$ (%)	σ_{bi} (Mpa)	$\Delta\sigma_f + \Delta\sigma_g$ (MPa)
Axe VSP	64	3.28	0.549	2.73	193.21	22.96	1068.62	3.76	12.27	0.82	4.65	11.41
FIN VSP	56	3.28	0.468	2.81	193.21	22.96	936.56	3.77	11.06	0.74	4.19	11.16
FIN V1	52	2.93	0.437	2.49	154.11	21.41	785.91	3.43	7.42	0.50	2.81	19.11
FIN V2	46	2.61	0.397	2.21	122.70	20.03	650.54	3.57	7.96	0.53	3.02	15.84
FIN V3	42	2.33	0.390	1.94	98.19	18.87	529.63	3.58	8.63	0.58	3.27	15.58
FIN V4	36	2.10	0.366	1.73	79.29	17.90	422.43	3.50	6.83	0.46	2.59	17.40
FIN V5	30	1.89	0.368	1.52	64.07	17.04	328.26	3.59	6.38	0.43	2.42	15.35
FIN V6	26	1.72	0.352	1.37	52.91	16.35	246.55	3.59	6.95	0.47	2.63	15.37
FIN V7	20	1.58	0.368	1.22	44.49	15.81	176.80	3.66	5.90	0.40	2.24	13.62
FIN V8	16	1.47	0.343	1.13	38.05	15.35	118.57	3.79	6.52	0.44	2.47	10.55
FIN V9	12	1.39	0.300	1.09	33.64	15.02	71.51	3.80	6.14	0.41	2.33	10.44
FIN V10	6	1.33	0.300	1.03	30.47	14.75	35.31	3.77	2.98	0.20	1.13	11.00
FIN V11	2	1.29	0.300	0.99	28.60	14.59	9.74	3.72	1.13	0.08	0.43	12.18
FIN V12	0	1.28	0.300	0.98	28.23	14.57	0.00	3.68	0.00	0.00	0.00	13.13

Tableau C. 8: Pertes par retrait

Pertes dues au retrait			
Zone climatique	Ep (MPa)	ϵ_r	Pertes
A	190 000	0.0002	38
			en (%)
			2.55

Tableau C. 9: Pertes par fluage

Abcs	N° cables	v (m)	d (m)	e moy (m)	I (m4)	S (m2)	Mg (MN.m)	P (MPa)	$\Delta\sigma_{fl}$ (MPa)	$\Delta\sigma_e$ (%)
Axe VSP	64	3.28	0.55	2.73	193.21	22.96	1068.62	3.72	58.92	3.96
FIN VSP	56	3.28	0.47	2.81	193.21	22.96	936.56	3.74	53.36	3.59
FIN V1	52	2.93	0.44	2.49	154.11	21.41	785.91	3.41	35.84	2.41
FIN V2	46	2.61	0.40	2.21	122.70	20.03	650.54	3.55	38.57	2.59
FIN V3	42	2.33	0.39	1.94	98.19	18.87	529.63	3.56	41.91	2.82
FIN V4	36	2.10	0.37	1.73	79.29	17.90	422.43	3.48	33.29	2.24
FIN V5	30	1.89	0.37	1.52	64.07	17.04	328.26	3.57	31.23	2.10
FIN V6	26	1.72	0.35	1.37	52.91	16.35	246.55	3.57	34.10	2.29
FIN V7	20	1.58	0.37	1.22	44.49	15.81	176.80	3.65	29.09	1.96
FIN V8	16	1.47	0.34	1.13	38.05	15.35	118.57	3.77	32.21	2.16
FIN V9	12	1.39	0.30	1.09	33.64	15.02	71.51	3.78	30.43	2.05
FIN V10	6	1.33	0.30	1.03	30.47	14.75	35.31	3.77	14.83	1.00
FIN V11	2	1.29	0.30	0.99	28.60	14.59	9.74	3.72	5.64	0.38
FIN V12	0	1.28	0.30	0.98	28.23	14.57	0.00	3.68	0.00	0.00

Tableau C. 10: Pertes par Relaxation

Abcs	N° cables	Seg pi	μ	μ_0	$\Delta\sigma_{rel}$ (MPa)	en (%)
Axe VSP	64	1305.94	0.702	0.43	53.30	3.58
FIN VSP	56	1310.82	0.705	0.43	54.02	3.63
FIN V1	52	1196.28	0.643	0.43	38.25	2.57
FIN V2	46	1244.39	0.669	0.43	44.62	3.00
FIN V3	42	1247.49	0.671	0.43	45.04	3.03
FIN V4	36	1222.29	0.657	0.43	41.65	2.80
FIN V5	30	1253.15	0.674	0.43	45.82	3.08
FIN V6	26	1252.38	0.673	0.43	45.71	3.07
FIN V7	20	1279.45	0.688	0.43	49.49	3.33
FIN V8	16	1324.47	0.712	0.43	56.04	3.77
FIN V9	12	1326.48	0.713	0.43	56.34	3.79
FIN V10	6	1321.27	0.710	0.43	55.56	3.73
FIN V11	2	1305.70	0.702	0.43	53.27	3.58
FIN V12	0	1292.69	0.695	0.43	51.38	3.45

Tableau C. 11: Participation de Masse Modale

Mode No	TRAN-X	Column1	TRAN-Y	Column2	TRAN-Z	Column3	ROTN-X	Column4	ROTN-Y	Column5	ROTN-Z	Column6
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	0	0	43.92	43.92	0	0	4.88	4.88	0	0	0.35	0.35
2	0	0	0.93	44.85	0	0	0.11	4.99	0	0	15.86	16.22
3	6.15	6.15	0	44.85	2.17	2.17	0	4.99	2.45	2.45	0	16.22
4	0	6.15	15.05	59.9	0	2.17	1.95	6.94	0	2.45	0.27	16.49
5	0	6.15	0.06	59.96	0	2.17	0.01	6.95	0	2.45	29.02	45.51
6	0.15	6.3	0	59.96	0.06	2.23	0	6.95	0.04	2.49	0	45.51
7	0	6.3	15	74.96	0	2.23	2.26	9.21	0	2.49	0.05	45.56
8	0.38	6.68	0	74.96	0.01	2.24	0	9.21	0.84	3.34	0	45.56
9	0	6.68	0.05	75	0	2.24	0	9.21	0	3.34	9.35	54.91
10	5.72	12.4	0	75	0.43	2.66	0	9.21	0.03	3.37	0	54.91
11	42.63	55.02	0	75	2.14	4.81	0	9.21	1.33	4.7	0	54.91
12	5.54	60.56	0	75	1.76	6.57	0	9.21	11.82	16.52	0	54.91
13	3.6	64.16	0	75	27.67	34.24	0	9.21	3.65	20.17	0	54.91
14	0	64.16	1.2	76.2	0	34.24	0.18	9.39	0	20.17	0.73	55.65
15	6.28	70.44	0	76.2	8.95	43.19	0	9.39	13.67	33.84	0	55.65
16	0	70.44	0.46	76.67	0	43.19	0.05	9.44	0	33.84	24	79.65
17	0	70.44	9.89	86.56	0	43.19	1.71	11.15	0	33.84	4.01	83.66
18	1.04	71.49	0	86.56	0	43.19	0	11.15	11.46	45.3	0	83.66
19	0	71.49	0.16	86.72	0	43.19	0.02	11.17	0	45.3	4.91	88.57
20	0.95	72.43	0	86.72	5.65	48.85	0	11.17	5.79	51.09	0	88.57
21	0	72.43	0.45	87.17	0	48.85	0.05	11.22	0	51.09	0.15	88.72
22	2.05	74.49	0	87.17	0	48.85	0	11.22	0.68	51.77	0	88.72
23	2.7	77.19	0	87.17	0.06	48.91	0	11.22	1.88	53.66	0	88.72
24	0	77.19	0.02	87.19	0	48.91	0.01	11.23	0	53.66	0.5	89.22
25	0.13	77.32	0	87.19	0.23	49.14	0	11.23	0.04	53.7	0	89.22
26	2.67	79.99	0	87.19	0	49.14	0	11.23	0.01	53.71	0	89.22
27	5.55	85.53	0	87.19	0.02	49.16	0	11.23	0.68	54.39	0	89.22

28	0.96	86.49	0	87.19	0.02	49.18	0	11.23	0.09	54.48	0	89.22
29	0	86.49	0.17	87.36	0	49.18	0.09	11.32	0	54.48	0.02	89.24
30	1.09	87.58	0	87.36	0.01	49.18	0	11.32	0.23	54.72	0	89.24
31	0	87.58	0.01	87.36	0	49.18	0.04	11.36	0	54.72	0.07	89.31
32	0	87.58	0.5	87.86	0	49.18	0.18	11.54	0	54.72	0.03	89.34
33	0	87.58	0.02	87.88	0	49.18	0	11.54	0	54.72	0.03	89.36
34	0.15	87.74	0	87.88	0.44	49.62	0	11.54	0.06	54.78	0	89.36
35	0.21	87.95	0	87.88	0.26	49.88	0	11.54	1.49	56.27	0	89.36
36	0	87.95	0.04	87.92	0	49.88	0.02	11.55	0	56.27	0.01	89.37
37	0.01	87.96	0	87.92	0.03	49.9	0	11.55	0.03	56.31	0	89.37
38	0.02	87.98	0	87.92	0	49.91	0	11.55	0.33	56.64	0	89.37
39	0.03	88	0	87.92	0.36	50.27	0	11.55	0.29	56.93	0	89.37
40	0	88	0	87.92	0	50.27	0	11.56	0	56.93	0.29	89.66
41	0.05	88.05	0	87.92	2.72	52.99	0	11.56	1.03	57.96	0	89.66
42	0.08	88.13	0	87.92	5.81	58.8	0	11.56	4.63	62.59	0	89.66
43	0.04	88.17	0	87.92	5.28	64.08	0	11.56	2.8	65.39	0	89.66
44	0.38	88.55	0	87.92	0.64	64.72	0	11.56	0.82	66.21	0	89.66
45	0	88.55	0.11	88.03	0	64.72	0	11.56	0	66.21	0	89.66
46	0	88.55	0	88.03	0	64.72	0	11.56	0	66.21	0.25	89.91
47	0.08	88.63	0	88.03	0	64.73	0	11.56	0	66.21	0	89.91
48	0	88.63	0.05	88.08	0	64.73	0.02	11.58	0	66.21	0	89.92
49	0.04	88.68	0	88.08	0	64.73	0	11.58	0	66.21	0	89.92
50	0	88.68	0	88.08	0	64.73	0	11.58	0	66.21	0.19	90.11
51	0	88.68	0.05	88.13	0	64.73	0	11.58	0	66.21	0	90.11
52	0.26	88.93	0	88.13	0.01	64.74	0	11.58	0.26	66.48	0	90.11
53	0.18	89.11	0	88.13	0.01	64.75	0	11.58	0.29	66.76	0	90.11
54	0.02	89.14	0	88.13	0	64.75	0	11.58	0.01	66.77	0	90.11
55	0.08	89.22	0	88.13	0	64.75	0	11.58	0.02	66.79	0	90.11
56	0	89.22	0	88.13	0.01	64.76	0	11.58	0	66.79	0	90.11
57	0.06	89.28	0	88.13	0	64.77	0	11.58	0	66.8	0	90.11

58	0	89.28	0	88.13	0	64.77	0	11.58	0	66.8	0.06	90.17
59	0	89.28	0	88.13	0	64.77	0	11.58	0	66.8	0	90.17
60	0	89.28	0.02	88.15	0	64.77	0.01	11.59	0	66.8	0	90.18
61	0	89.28	0	88.15	1.31	66.08	0	11.59	3.52	70.32	0	90.18
62	0	89.28	0	88.15	0	66.08	0.01	11.61	0	70.32	0.03	90.21
63	0.05	89.33	0	88.15	1.2	67.28	0	11.61	3.18	73.5	0	90.21
64	0	89.33	0.01	88.16	0	67.28	0.37	11.98	0	73.5	0.01	90.21
65	0	89.33	0	88.16	0	67.28	0.01	12	0	73.5	0.29	90.5
66	0	89.33	0	88.16	7.43	74.71	0	12	0.07	73.57	0	90.5
67	0	89.34	0	88.16	0.01	74.73	0	12	3.1	76.67	0	90.5
68	0	89.34	0.56	88.72	0	74.73	1.93	13.93	0	76.67	0	90.5
69	0.01	89.35	0	88.72	1.7	76.43	0	13.93	1.18	77.85	0	90.5
70	0	89.35	0	88.72	1.34	77.77	0	13.93	0.23	78.08	0	90.5
71	0	89.35	0	88.72	0.01	77.78	0	13.93	0.75	78.83	0	90.5
72	0	89.35	0	88.72	1.11	78.89	0	13.93	1.78	80.61	0	90.5
73	0	89.35	0	88.72	0	78.9	0	13.93	0.06	80.67	0	90.5
74	0	89.36	0	88.72	0.03	78.93	0	13.93	0.05	80.72	0	90.5
75	0	89.36	0.06	88.78	0	78.93	0.47	14.4	0	80.72	0	90.51
76	0	89.36	0.03	88.81	0	78.93	0.28	14.67	0	80.72	0.02	90.53
77	0	89.36	0.02	88.83	0	78.93	0.15	14.82	0	80.72	0.04	90.58
78	0	89.36	0	88.84	0	78.93	0.01	14.83	0	80.72	0.01	90.59
79	0	89.36	0	88.84	0.01	78.94	0	14.83	0.01	80.73	0	90.59
80	0	89.36	0	88.84	0	78.94	0	14.83	0	80.73	0	90.59
81	0	89.36	0.03	88.87	0	78.94	0.37	15.2	0	80.73	0	90.59
82	0	89.36	0	88.87	0	78.94	0.04	15.25	0	80.73	0.02	90.6
83	0	89.36	0	88.87	0.01	78.96	0	15.25	0.01	80.74	0	90.6
84	0	89.36	0	88.87	0.01	78.97	0	15.25	0.03	80.77	0	90.6
85	0	89.36	0	88.87	0	78.97	0	15.25	0	80.77	0	90.6
86	0	89.36	0	88.87	0	78.97	0	15.25	0.17	80.94	0	90.6
87	0	89.36	0	88.87	0.13	79.09	0	15.25	0	80.94	0	90.6

88	0.02	89.37	0	88.87	0.11	79.21	0	15.25	0.1	81.05	0	90.6
89	0	89.37	0.41	89.28	0	79.21	2.32	17.57	0	81.05	0	90.6
90	0.1	89.47	0	89.28	0.04	79.25	0	17.57	0.29	81.34	0	90.6
91	0	89.47	0	89.28	0	79.25	0.01	17.59	0	81.34	0.03	90.63
92	0	89.48	0	89.28	0.01	79.26	0	17.59	0.01	81.34	0	90.63
93	0	89.48	0.03	89.31	0	79.26	0.2	17.78	0	81.34	0.07	90.7
94	0	89.48	0	89.32	0	79.26	0.01	17.79	0	81.34	0.07	90.78
95	0	89.48	0	89.32	4.06	83.32	0	17.79	0	81.35	0	90.78
96	0	89.48	0.16	89.47	0	83.32	0.72	18.51	0	81.35	0	90.78
97	0	89.48	0	89.47	1.31	84.63	0	18.51	0.11	81.46	0	90.78
98	0	89.48	0	89.47	0.03	84.66	0	18.51	2.86	84.32	0	90.78
99	0	89.48	0.01	89.48	0	84.66	0.03	18.54	0	84.32	0.18	90.96
100	0	89.48	0	89.48	0.98	85.64	0	18.54	0.42	84.74	0	90.96
101	0	89.48	0	89.48	0.5	86.14	0	18.54	1.47	86.21	0	90.96
102	0	89.48	0.14	89.62	0	86.14	0.52	19.06	0	86.21	0.04	91
103	0.01	89.49	0	89.62	0.01	86.15	0	19.06	0	86.22	0	91
104	0	89.49	0	89.62	0.27	86.42	0	19.06	0.94	87.15	0	91
105	0	89.49	0.08	89.7	0	86.42	0.26	19.32	0	87.15	0.14	91.14
106	0	89.5	0	89.7	0.18	86.6	0	19.32	0.18	87.33	0	91.14
107	0	89.5	0.01	89.71	0	86.6	0.01	19.33	0	87.33	0	91.14
108	0.01	89.5	0	89.71	0.02	86.62	0	19.33	0.07	87.4	0	91.14
109	0.02	89.52	0	89.71	0.02	86.64	0	19.33	0.09	87.48	0	91.14
110	0	89.52	0	89.71	0	86.64	0.01	19.34	0	87.48	0.01	91.15
111	0.01	89.53	0	89.71	0	86.64	0	19.34	0.05	87.54	0	91.15
112	0	89.53	0	89.71	0.01	86.65	0	19.34	0	87.54	0	91.15
113	0.06	89.59	0	89.71	0	86.65	0	19.34	0.05	87.59	0	91.15
114	0	89.59	0.03	89.73	0	86.65	0.08	19.41	0	87.59	0	91.15
115	0	89.59	0	89.73	0.01	86.66	0	19.41	0	87.59	0	91.15
116	0	89.59	0	89.73	0	86.66	0	19.41	0	87.59	0.08	91.24
117	0	89.59	0	89.73	0	86.66	0	19.41	0.02	87.61	0	91.24

118	0	89.59	0.07	89.8	0	86.66	0.28	19.69	0	87.61	0	91.24
119	0	89.59	0	89.8	0.02	86.68	0	19.69	0.07	87.67	0	91.24
120	0	89.59	0.01	89.81	0	86.68	0	19.69	0	87.67	0.05	91.29
121	0	89.59	0	89.81	0.24	86.92	0	19.69	0.01	87.68	0	91.29
122	0	89.59	0	89.81	0	86.92	0.05	19.75	0	87.68	0.02	91.32
123	0.06	89.65	0	89.81	0.01	86.93	0	19.75	0.2	87.88	0	91.32
124	0	89.65	0.06	89.86	0	86.93	0.24	19.99	0	87.88	0.06	91.37
125	0	89.65	0	89.86	1.18	88.11	0	19.99	0.01	87.89	0	91.37
126	0	89.65	0	89.86	0.04	88.16	0	19.99	0.01	87.9	0	91.37
127	0	89.65	0	89.86	0.03	88.19	0	19.99	0.88	88.79	0	91.37
128	0	89.65	0.04	89.91	0	88.19	0.07	20.06	0	88.79	0.05	91.42
129	0	89.65	0	89.91	0.05	88.24	0	20.06	0.55	89.34	0	91.42
130	0	89.65	0	89.91	0.7	88.94	0	20.06	0.25	89.58	0	91.42
131	0	89.65	0.01	89.91	0	88.94	0.07	20.12	0	89.58	0.12	91.54
132	0	89.65	0	89.91	0.01	88.95	0	20.12	0	89.59	0	91.54
133	0	89.65	0	89.91	0.02	88.96	0	20.12	0.03	89.61	0	91.54
134	0	89.66	0	89.91	0.06	89.02	0	20.12	0.19	89.8	0	91.54
135	0	89.66	0.08	89.99	0	89.02	0.13	20.25	0	89.8	0.01	91.55
136	0	89.66	0	89.99	0.01	89.03	0	20.25	0.02	89.82	0	91.55
137	0	89.66	0	89.99	0	89.03	0.03	20.29	0	89.82	0.22	91.77
138	0	89.66	0	89.99	0	89.03	0	20.29	0.13	89.95	0	91.77
139	0	89.66	0	89.99	0.08	89.11	0	20.29	0	89.95	0	91.77
140	1.14	90.81	0	89.99	0	89.11	0	20.29	0	89.95	0	91.77
141	0	90.81	0.15	90.14	0	89.11	0.13	20.42	0	89.95	0.03	91.8
142	0	90.81	0	90.14	0	89.11	0	20.42	0.07	90.02	0	91.8
143	0	90.81	0	90.14	0	89.11	0.06	20.47	0	90.02	0.35	92.15
144	0	90.82	0	90.14	0.02	89.13	0	20.47	0.01	90.03	0	92.15
145	0	90.82	0.87	91.01	0	89.13	0.13	20.61	0	90.03	1.85	94
146	0.06	90.88	0	91.01	0	89.13	0	20.61	0	90.03	0	94
147	0	90.88	0	91.01	0	89.13	0	20.61	0.01	90.04	0	94

148	0	90.88	0	91.01	0	89.13	0	20.61	0	90.04	0.01	94
149	0.01	90.89	0	91.01	0.01	89.14	0	20.61	0.03	90.07	0	94
150	0	90.89	0	91.01	0	89.14	0	20.61	0	90.07	0	94
151	0.01	90.9	0	91.01	0	89.14	0	20.61	0	90.07	0	94
152	0	90.9	0	91.01	0	89.14	0	20.61	0	90.07	0	94.01
153	0	90.9	0	91.01	0	89.14	0	20.61	0	90.07	0	94.01
154	0.01	90.9	0	91.01	0.01	89.15	0	20.61	0.05	90.12	0	94.01
155	0	90.9	0	91.01	0	89.15	0	20.61	0	90.12	0	94.01
156	0.01	90.92	0	91.01	0.02	89.16	0	20.61	0	90.13	0	94.01
157	0	90.92	0	91.01	0	89.16	0	20.62	0	90.13	0	94.01
158	0	90.92	0	91.01	0.13	89.29	0	20.62	0.01	90.13	0	94.01
159	0.01	90.93	0	91.01	0.01	89.3	0	20.62	0.1	90.23	0	94.01
160	0	90.93	0	91.01	0	89.3	0.02	20.63	0	90.23	0	94.01
161	0	90.94	0	91.01	0.26	89.56	0	20.63	0.56	90.79	0	94.01
162	0	90.94	0	91.01	0.31	89.87	0	20.63	0	90.79	0	94.01
163	0.01	90.95	0	91.01	0.04	89.91	0	20.63	0.19	90.98	0	94.01
164	0	90.95	0	91.01	0	89.91	0.03	20.66	0	90.98	0.05	94.06
165	0	90.95	0	91.01	0	89.91	0	20.66	0.06	91.03	0	94.06
166	0	90.95	0.03	91.05	0	89.91	0.11	20.77	0	91.03	0	94.06
167	0	90.95	0	91.05	0	89.91	0	20.77	0	91.03	0.01	94.08
168	0	90.95	0	91.05	0.01	89.91	0	20.77	0.04	91.07	0	94.08
169	0.01	90.96	0	91.05	0	89.92	0	20.77	0	91.08	0	94.08
170	0	90.96	0	91.05	0	89.92	0	20.77	0	91.08	0	94.08
171	0	90.96	0	91.05	0	89.92	0	20.77	0	91.08	0	94.08
172	0	90.96	0	91.05	0	89.92	0	20.77	0	91.08	0	94.08
173	0	90.97	0	91.05	0.01	89.93	0	20.77	0	91.09	0	94.08
174	0	90.97	0	91.05	0.01	89.94	0	20.77	0.01	91.1	0	94.08
175	0	90.97	0	91.05	0	89.94	0	20.77	0	91.1	0	94.08
176	0	90.97	0	91.05	0	89.94	0	20.77	0.04	91.14	0	94.08
177	0	90.97	0	91.05	0.02	89.95	0	20.77	0	91.14	0	94.08

178	0	90.97	0	91.05	0	89.95	0	20.77	0	91.14	0	94.08
179	0	90.97	0	91.05	0	89.95	0	20.77	0	91.14	0	94.08
180	0	90.98	0	91.05	0	89.95	0	20.77	0	91.14	0	94.08
181	0	90.98	0	91.05	0	89.95	0	20.77	0	91.14	0	94.08
182	0.01	90.98	0	91.05	0.02	89.98	0	20.77	0.06	91.2	0	94.08
183	0	90.98	0	91.05	0	89.98	0	20.77	0	91.21	0	94.08
184	0.01	90.99	0	91.05	0	89.98	0	20.77	0.01	91.22	0	94.08
185	0	90.99	0	91.05	0	89.98	0	20.77	0	91.22	0	94.08
186	0	90.99	0	91.05	0	89.98	0	20.77	0	91.22	0	94.08
187	0	90.99	0	91.05	0	89.98	0	20.77	0	91.22	0	94.08
188	0	90.99	0	91.05	0	89.98	0	20.77	0.01	91.23	0	94.08
189	0	90.99	0	91.05	0.01	89.99	0	20.77	0.01	91.24	0	94.08
190	0	90.99	0	91.05	0	89.99	0	20.77	0	91.24	0	94.08
191	0	91	0	91.05	0	89.99	0	20.77	0.03	91.27	0	94.08
192	0	91	0	91.05	0.05	90.04	0	20.77	0	91.27	0	94.08



ANNEXES D

NOTE DE CALCUL

FERRAILLAGE



Calcul de Section en Flexion Composée

SECTION AME A1

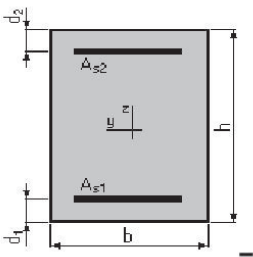
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poteau
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 60.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N°	Type	N (kN)	M (kN*m)
1.	ELU	991.17	528.84
2.	ELS	738.86	395.38

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique $A_{s1} = 19.0$ (cm²)

Section minimum $A_{s\ min} = 12.8$ (cm²)

théorique $\rho = 0.63$ (%)

minimum $\rho_{\min} = 0.21$ (%)

Section théorique $A_{s2} = 19.0$ (cm²)

Section maximum $A_{s\ max} = 300.0$ (cm²)

maximum $\rho_{\max} = 5.00$ (%)

Analyse par Cas:

Cas N° 1: Type ELU **N = 991.17 (kN)** **M = 528.84 (kN*m)**

Coefficient de sécurité: 1.53 Pivot: A

Position de l'axe neutre: $y = 10.4$ (cm)

Bras de levier: $Z = 50.8$ (cm)

Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 10.00$ (‰)

Déformation du béton: $\epsilon_b = 2.33$ (‰)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa) comprimée: $\sigma_s' = 241.3$ (MPa)

Cas N° 2: Type ELS N = 738.86 (kN) M = 395.38 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00
Position de l'axe neutre: $y = 20.6$ (cm)
Bras de levier: $Z = 48.1$ (cm)
Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 9.6$ (MPa)
Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:
 tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)
 comprimée: $\sigma_s' = 109.1$ (MPa)
Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Composée VSP SECTION A3

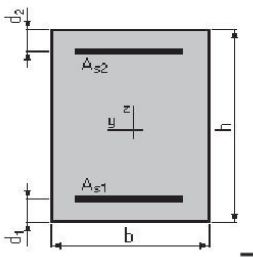
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poteau
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 60.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N°	Type	N (kN)	M (kN*m)
1.	ELU	1100.81	-240.38
2.	ELS	820.07	-179.29

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique $A_{s1} = 6.4$ (cm²)

Section minimum $A_{s\ min} = 12.8$ (cm²)

théorique $\rho = 0.21$ (%)

minimum $\rho_{min} = 0.21$ (%)

Section théorique $A_{s2} = 6.4$ (cm²)

Section maximum $A_{s\ max} = 300.0$ (cm²)

maximum $\rho_{max} = 5.00$ (%)

Analyse par Cas:

Cas N° 1: Type ELU N = 1100.81 (kN) M = -240.38 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 4.51 Pivot: B

Position de l'axe neutre: $y = 27.4$ (cm)

Bras de levier: $Z = 44.0$ (cm)

Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 3.52$ (‰)

Déformation du béton: $\epsilon_b = 3.50$ (‰)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa) comprimée: $\sigma_s' = 434.8$ (MPa)

Cas N° 2: Type ELS N = 820.07 (kN) M = -179.29 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 4.10
Position de l'axe neutre: $y = 31.4$ (cm)
Bras de levier: $Z = 44.5$ (cm)
Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 4.1$ (MPa)
Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:
 tendue: $\sigma_s = 15.2$ (MPa)
 comprimée: $\sigma_s' = 54.9$ (MPa)
Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple

VSP SECTION I1

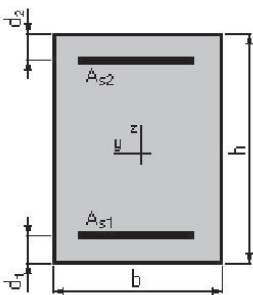
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 75.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	-240.38	0.00
Etat Limite de Service	-179.29	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 0.0$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 11.4$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 0.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 0.16$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.13$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = -240.38$ (kN*m)	$M_{min} = 0.00$ (kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.42	Pivot: A
Position de l'axe neutre:	$y = 2.7$ (cm)	
Bras de levier:	$Z = 68.9$ (cm)	
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 0.41$ (‰)	
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 10.00$ (‰)	

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = -179.29$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 13.8$ (cm)

Bras de levier: $Z = 65.4$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 1.8$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

comprimée: $\sigma_s' = 23.1$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple

SECTION VSP S2

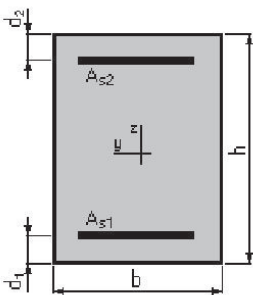
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 50.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	-924.38	0.00
Etat Limite de Service	-689.34	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 0.0$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 70.4$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 0.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 1.70$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.14$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = -924.38$ (kN*m)	$M_{min} = 0.00$ (kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.35	Pivot: B
Position de l'axe neutre:	$y = 18.3$ (cm)	
Bras de levier:	$Z = 37.7$ (cm)	
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 3.50$ (‰)	
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 5.09$ (‰)	

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = -689.34$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 22.6$ (cm)

Bras de levier: $Z = 37.5$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 16.3$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple

VSP SECTION S3

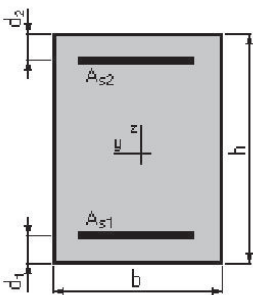
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 30.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	751.89	0.00
Etat Limite de Service	561.36	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 116.5$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 42.1$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 4.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 6.35$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.16$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = 751.89$	(kN*m)	$M_{min} = 0.00$	(kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.20		Pivot: B	
Position de l'axe neutre:	$y = 15.9$	(cm)		
Bras de levier:	$Z = 18.7$	(cm)		
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 3.50$	(‰)		
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 2.02$	(‰)		

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 403.7$ (MPa)

comprimée: $\sigma_s' = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = 561.36$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 15.0$ (cm)

Bras de levier: $Z = 20.0$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 24.0$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)

comprimée: $\sigma_s' = 239.7$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple VSC HOURDIS SUPERIEURS S2

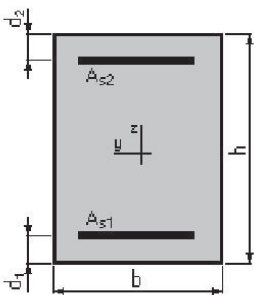
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 50.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	-1006.00	0.00
Etat Limite de Service	-750.93	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 0.0$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 83.8$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 0.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 1.86$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.14$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = -1006.00$ (kN*m)	$M_{min} = 0.00$ (kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.34	Pivot: B
Position de l'axe neutre:	$y = 20.1$ (cm)	
Bras de levier:	$Z = 37.0$ (cm)	
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 3.50$ (‰)	
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 4.34$ (‰)	

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = -750.93$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 23.3$ (cm)

Bras de levier: $Z = 37.2$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 17.3$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple

VSC SECTION S3

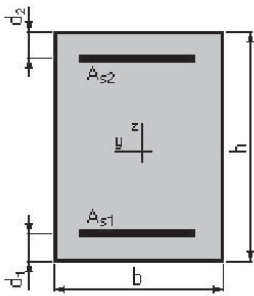
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 30.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	668.76	0.00
Etat Limite de Service	499.22	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 103.7$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 29.2$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 4.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 5.31$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.16$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = 668.76$	(kN*m)	$M_{min} = 0.00$	(kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.18		Pivot: B	
Position de l'axe neutre:	$y = 15.9$	(cm)		
Bras de levier:	$Z = 18.6$	(cm)		
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 3.50$	(‰)		
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 2.00$	(‰)		

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 400.4$ (MPa)

comprimée: $\sigma_s' = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = 499.22$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 15.0$ (cm)

Bras de levier: $Z = 20.0$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 24.0$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)

comprimée: $\sigma_s' = 239.7$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple INF I1

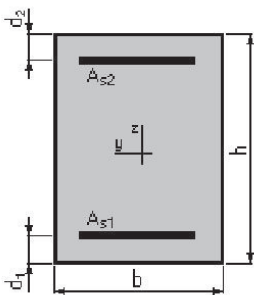
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 30.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	-116.34	0.00
Etat Limite de Service	-86.32	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 0.0$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 16.2$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 0.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 0.65$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.16$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = -116.34$ (kN*m)	$M_{min} = 0.00$ (kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.42	Pivot: A
Position de l'axe neutre:	$y = 3.9$ (cm)	
Bras de levier:	$Z = 23.4$ (cm)	
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 1.85$ (‰)	
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 10.00$ (‰)	

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = -86.32$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 8.9$ (cm)

Bras de levier: $Z = 22.0$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 8.8$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Simple AME I2 MEDIANE

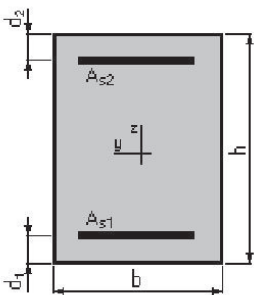
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Prise en compte des armatures comprimées
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 30.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Moments appliqués:

	M_{max} (kN*m)	M_{min} (kN*m)
Etat Limite Ultime (fondamental)	38.95	0.00
Etat Limite de Service	28.71	0.00
Etat Limite Ultime (Accidentel)	0.00	0.00

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique	$A_{s1} = 5.1$ (cm ²)	Section théorique	$A_{s2} = 0.0$ (cm ²)
Section minimum	$A_{s\ min} = 4.0$ (cm ²)		
théorique	$\rho = 0.21$ (%)		
minimum	$\rho_{min} = 0.16$ (%)		

Analyse par Cas:

Cas ELU	$M_{max} = 38.95$	(kN*m)	$M_{min} = 0.00$	(kN*m)
Coefficient de sécurité:	1.41		Pivot: A	
Position de l'axe neutre:	$y = 1.2$	(cm)		
Bras de levier:	$Z = 24.5$	(cm)		
Déformation du béton:	$\epsilon_b = 0.52$	(‰)		
Déformation de l'acier:	$\epsilon_s = 10.00$	(‰)		

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa)

Cas ELS $M_{\max} = 28.71$ (kN*m) $M_{\min} = 0.00$ (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00

Position de l'axe neutre: $y = 5.5$ (cm)

Bras de levier: $Z = 23.2$ (cm)

Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 1.9$ (MPa)

Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 18.0$ (MPa)

Contrainte limite de l'acier:

$\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Composée AME A1

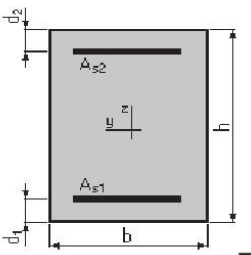
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poteau
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 60.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N°	Type	N (kN)	M (kN*m)
1.	ELU	951.94	616.39
2.	ELS	709.58	460.83

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique $A_{s1} = 25.2$ (cm²)

Section minimum $A_{s\ min} = 12.8$ (cm²)

théorique $\rho = 0.84$ (%)

minimum $\rho_{\min} = 0.21$ (%)

Section théorique $A_{s2} = 25.2$ (cm²)

Section maximum $A_{s\ max} = 300.0$ (cm²)

maximum $\rho_{\max} = 5.00$ (%)

Analyse par Cas:

Cas N° 1: Type ELU N = 951.94 (kN) M = 616.39 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.49 Pivot: A

Position de l'axe neutre: $y = 10.5$ (cm)

Bras de levier: $Z = 50.8$ (cm)

Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 10.00$ (‰)

Déformation du béton: $\epsilon_b = 2.35$ (‰)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 434.8$ (MPa) comprimée: $\sigma_s' = 245.1$ (MPa)

Cas N° 2: Type ELS N = 709.58 (kN) M = 460.83 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 1.00
Position de l'axe neutre: $y = 20.9$ (cm)
Bras de levier: $Z = 48.0$ (cm)
Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 9.9$ (MPa)
Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:
 tendue: $\sigma_s = 241.0$ (MPa)
 comprimée: $\sigma_s' = 112.7$ (MPa)
Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

Calcul de Section en Flexion Composée AME A2

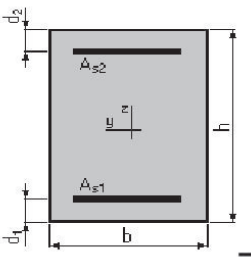
1. Hypothèses:

Béton: $f_{c28} = 40.0$ (MPa)

Acier: $f_e = 500.0$ (MPa)

- Fissuration préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul en poteau
- Calcul suivant BAEL 91

2. Section:



$b = 100.0$ (cm)

$h = 60.0$ (cm)

$d_1 = 5.0$ (cm)

$d_2 = 5.0$ (cm)

3. Efforts appliqués:

Cas N°	Type	N (kN)	M (kN*m)
1.	ELU	994.81	-116.35
2.	ELS	741.34	-86.32

4. Résultats:

Sections d'Acier:

Section théorique $A_{s1} = 6.4$ (cm²)

Section minimum $A_{s\ min} = 12.8$ (cm²)

théorique $\rho = 0.21$ (%)

minimum $\rho_{min} = 0.21$ (%)

Section théorique $A_{s2} = 6.4$ (cm²)

Section maximum $A_{s\ max} = 300.0$ (cm²)

maximum $\rho_{max} = 5.00$ (%)

Analyse par Cas:

Cas N° 1: Type ELU **N = 994.81 (kN)** **M = -116.35 (kN*m)**

Coefficient de sécurité: 8.88 Pivot: B

Position de l'axe neutre: $y = 47.6$ (cm)

Bras de levier: $Z = 36.0$ (cm)

Déformation de l'acier: $\epsilon_s = 0.55$ (‰)

Déformation du béton: $\epsilon_b = 3.50$ (‰)

Contrainte de l'acier:

tendue: $\sigma_s = 109.2$ (MPa) comprimée: $\sigma_s' = 434.8$ (MPa)

Cas N° 2: Type ELS N = 741.34 (kN) M = -86.32 (kN*m)

Coefficient de sécurité: 9.39
Position de l'axe neutre: $y = 56.2$ (cm)
Bras de levier: $Z = 36.3$ (cm)
Contrainte maxi du béton: $\sigma_b = 2.5$ (MPa)
Contrainte limite: $0,6 f_{cj} = 24.0$ (MPa)

Contrainte de l'acier:
 comprimée: $\sigma_s' = 34.8$ (MPa)
Contrainte limite de l'acier: $\sigma_{s \text{ lim}} = 241.0$ (MPa)

