

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID-TLEMCCEN

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master

Spécialité : **Travaux Publics**

Option : **Voies et Ouvrages d'Art**



Thème

EPREUVES DE CHARGEMENT DES OUVRAGES D'ART

CAS : VIADUCS DE L'AUTOROUTE EST-OUEST

Présenté en juillet 2021 par :

M^{lle} Chiali Wafaa Manel

M^{lle} Senhadji Imane

Devant le jury composé de :

M^r. HAMZAOUIF.

Président

Université de Tlemcen

M^r. TALEB O.

Examineur

Université de Tlemcen

M^r. CHEKROUN LOKMANE EL-HAKIM.

Encadreur

Université de Tlemcen

M^r. BOUMECHRA NADIR

Co-Encadreur

Université de Tlemcen

Année universitaire : 2020/2021



بِسْمِ اللَّهِ
الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Nous voulons remercier en premier lieu Dieu qui nous a donné la puissance pour achever ce modeste travail.

*Un grand remerciement à nos encadreur, **Mr CHEKROUN LOKMANE EL-HAKIM et Mr BOUMECHRA NADIR** Pour leur soutien, leur aide, leur disponibilité, leur grand intérêt qu'ils nous ont toujours manifesté, durant notre formation et la préparation de ce mémoire.*

Nous avons bénéficié, grâce à eux, deux enseignants vrais, non seulement sur le plan scientifique, mais aussi sur le plan humain.

Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans eux, qui ont toujours su nous consacrer un peu de leur temps à nos calculs. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

*Nos plus vifs remerciements s'adressent à Monsieur **HAMZAOUI. F** de nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury.*

*Que Monsieur **TALEB. O**, reçoive l'expression de notre profonde reconnaissance d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.*

*Nous remercions également Monsieur **OUJDI. F** qui nous a aidés dans notre travail.*

*Nous adressons également notre profonde gratitude à tous les professeurs de l'université Abou Bakr Belkaid en particulier ceux du département de **GENIE CIVIL**.*

Nos remerciements s'attarderont aussi à nos amis de plus longue date. A la promotion 2020-2021, les nommer serait inutile, ils se reconnaîtront. Qu'ils sachent que leur amitié nous est précieuse

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

- A Mes Très Chers Parents, Ma sœur et Mes frères ainsi que Mes Grands Parents qui m'ont soutenu et encouragé durant tout le long de ce chemin je vous aime tellement ...

- Celle qui a partagé ce travail avec moi dans les bons et mauvais moments mon binôme
CHIALI WAFAA MANEL.

- Tous mes camarades et mes chers amis de ma promotion du L1 jusqu'au M2 (2016-2021).

- Tous mes amis et mes cousins spécialement :
MOHAMMED –BOUMEDIANE–AMINA–IKRAM-

KHADIDJA-DOUNIA-SALIMA-BAYA-MERIAM-NADJIA-IKRAM-HANANE-AHLEM

SENHADJI IMANE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

- A Mes Très Chers Parents et Mes frères ainsi que Mes Grands Parents qui m'ont soutenu et encouragé durant tout le long de ce chemin je vous aime tellement ...

- Celle qui a partagé ce travail avec moi dans les bons et mauvais moments mon binôme

SENHADJI IMANE.

- Tous mes camarades et mes chers amis de ma promotion du L1 jusqu'au M2 (2016-2021).

- Tous mes amis et mes cousins spécialement :
**MOHAMMED –BOUMEDIANE–AMINA-
IKRAM**

CHIALI WAFAA MANEL

RESUME

Grâce aux grands projets exécutés et les autres en cours d'exécution au domaine de travaux publics. Le nombre des ponts a été augmenté d'une façon énorme. Chose qui nous a encouragés a proposé l'étude des épreuves des chargements des ouvrages d'art comme thème de notre projet de fin d'étude.

Généralement le problème qui se pose le plus dans la conception c'est les choix à prendre qui doit conduire à un résultat satisfaisant que ce soit sur le plan de qualité ou bien le cout de l'ouvrage et tout ça dans un temps bien défini.

Ce mémoire propose une étude d'un ouvrage d'art à l'autoroute Est-Ouest d'Algérie au point kilométrique 93,296 traversant Oued MRIHIM.

Notre travail se traduit par la recherche du comportement des ponts et la modélisation utilisant le code de calcul SAP2000.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux, figures et des graphiques représentant les écarts trouvés entre la flèche issue de modélisation et celle des épreuves de chargement.

Mots Clés : Pont, Déflexion, Epreuves de chargement, Structure, Modélisation, flèche.

ABSTRACT

Thanks to the major projects executed and the others in progress in the areas of public works. The number of bridge has been increased enormously. Something that encouraged us proposed the study of the load tests of structures as the theme of our end of study project.

Usually the problem that arises the most in the design is the choices to be made which must lead to a satisfactory result whether its in terms of quality and the cost and all in a well defined time.

This thesis proposes a study of a work of art on the east-west motorway of algeria at kilometer point 93.296 crossing valley mrihim.

Our work is reflected in the search for the deviation of the bridge, a modeling using SAP2000.

The results obtained are presented in the form of tables and figures and graphs which represent the reinforcement as well as the results of the managerial study.

Keywords : Bridge, Deflexion, loads, structure, Modeling.

ملخص

بفضل إنجاز مشاريع وأخرى في طور الإنجاز في قطاع الأشغال العمومية، ارتفع عدد الجسور في الجزائر بشكل مذهل الأمر الذي شجعنا على دراسة جسر وعوارض الانحراف في منكرة تخرجنا.

المشكلة الأكثر ظهورا في التصميم هي الخيارات التي يجب القيام بها والتي يجب أن تؤدي إلى نتيجة مرضية سواء من حيث الجودة أو تكلفة العمل وكل ذلك في وقت محدد

هذه المنكرة تقترح دراسة عن جسر الذي تم اختياره عبارة عن جسر طريق سريع يقع في أ 8 بين النقطة الكيلومترية 93,296 المخطط لعبور واد مريهيم.

ينعكس عملنا في إيجاد الانحراف للجسرين، والنمجة باستخدام برنامج

SAP2000

يتم عرض النتائج التي تم الحصول عليها في شكل جداول وأشكال ورسوم بيانية التي تمثل التعزيز وكذلك نتائج الدراسة الإدارية.

الكلمات المفتاحية: الجسر، الانحراف، الأحمال، الهياكل، النمجة

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
Dédicace	II
Dédicace	III
RESUME	IV
ABSTRACT	V
ملخص.....	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
Listes des notations :.....	XIV
Listes des abréviations :.....	XV
INTRODUCTION GENERALE	1
1 Introduction générale :	2
Chapitre 1.....	3
Généralités.....	3
1 INTRODUCTION :.....	4
1.1 Les grandeurs mesurées :.....	4
1.2 Les appareils pour les mesures de déplacement :.....	4
1.3 Les appareils pour les mesures de déformation :.....	4
2 Généralités :.....	5
3 Consistance des épreuves :.....	6
4 Programme des épreuves :.....	6
5 Objectifs des épreuves :.....	7
6 Organisation des épreuves par le maître d'œuvre :.....	8
6.1 La place des épreuves dans la construction des ouvrages :.....	8
6.2 Les épreuves, éléments de contrôle :.....	9
6.3 Déroulement des épreuves :.....	10
6.3.1 La note de calculs :.....	10
6.3.2 Le programme des épreuves et l'organisation des chargements :.....	10
6.3.3 Les moyens mis en œuvre pour effectuer les mesures :.....	11
6.3.4 Examen préalable de la structure :	11
6.3.5 La vérification des charges appliquées :.....	12
6.3.6 Le chargement de l'ouvrage et les mesures :.....	13
6.3.7 Examen après les épreuves :.....	14
6.3.8 Analyse des résultats et validation après les épreuves :.....	14

6.3.9 Cas de certains ouvrages :	15
Chapitre 2	16
Définition des différents cas de chargement des ouvrages d'art	16
1 INTRODUCTION :	17
2 Système de charges A :	17
3 Système de charges B :	19
3.1 Système de charges BC :	19
3.2 Système de charges Br :	21
4 Système Mc :	23
4.1 Convoi Mc 80 :	23
4.2 Convoi Mc 120 :	23
5 Convoi type D280 :	24
6 Convoi type D240 :	24
7 Convoi type E400 :	25
8 Convoi type E360 :	25
Chapitre 3	26
La description des épreuves du viaduc PK 93	26
1 Date de l'épreuve :	27
2 Description de l'ouvrage :	27
3 Localisation de l'ouvrage :	27
4 Condition de franchissement :	28
5 Le Tracé en plan de l'ouvrage :	28
6 Coupe longitudinale de nombre de travées :	29
7 Vue en élévation :	29
8 Matériel utilisé :	30
8.1 Matériel de chargement :	30
8.2 Matériel de mesure des déplacements :	30
8.3 Fleximètres-Centrale d'acquisition pour la mesure des déplacements des appuis :	31
8.4 Niveau et mire pour la mesure du déplacement à mi travée :	31
9 Opérations préalables à l'épreuve :	32
9.1 Inspection préalable de l'ouvrage :	32
9.2 Pesage des camions de chargement :	33
9.3 Installation des échafaudages :	33
9.3.1 Déroulement des épreuves :	34
Chapitre 4	36
La modélisation numérique du viaducs Pk 93 et leur Calculs	36

Modélisation :	37
1 C'est quoi la modélisation ?	37
2 Code de calcul SAP2000 :	37
3 Les Etapes à suivre pour la modélisation de notre structure :	37
3.1 Modélisation de la poutre :	39
3.2 Modélisation du tablier :	40
3.3 Détermination des Charges et leurs combinaisons :	41
3.4 Déplacement en travée :	44
3.4.1 Déplacement en travée dans les poutres :	44
Calcul :	45
1 Plans du pont :	45
2 Principaux matériaux utilisés :	45
2.1 Béton :	45
2.2 Acier (TITRE D'INFORMATION) :	45
2.3 Système de précontrainte :	45
3 Position transversale des points de mesure sur le pont :	46
4 Charge du véhicule d'essai :	47
4.1 Plan du véhicule :	47
4.2 Dimensions du véhicule :	48
4.3 Charge à l'essieu du poids-lourd de trois essieux :	48
5 Données des essais pour chaque cas :	48
5.1 Cas N°1-1 : chargement sur la poutre L1 (poutre de rive) de la travée SPAN1, valable pour toutes les travées de rive.	49
5.1.1 Plan d'implantation de la charge d'essai « excentrée »	49
5.1.2 Valeur de la charge d'essai :	50
5.1.3 Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (voir annexe) :	50
5.1.4 Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :	51
5.1.5 Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :	51
5.2 Cas N°1-2 : chargement sur la poutre L4(poutre centrale) de la travée SPAN1, valable pour toutes les travées de rive.	55
5.2.1 Plan d'implantation de la charge d'essai :	55
5.2.2 Valeur de la charge d'essai :	55
5.2.3 Déformation des points de mesure sous la charge d'essai :	55
5.2.4 Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :	57
5.2.5 Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :	57

5.3	Cas N°2-1 : chargement sur la poutre L1 (poutre de rive) de la travée SPAN2, valable pour toutes les travées centrales.	58
5.3.1	Plan d'implantation de la charge d'essai :.....	58
5.3.2	Valeur de la charge d'essai :.....	58
5.3.3	Déformation des points de mesure sous la charge d'essai :.....	59
5.3.4	Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :.....	60
Tableau 4- 17-Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai.....		60
5.3.5	Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :.....	60
5.4	Cas N°2-2 : chargement sur la poutre L4 (poutre centrale) de la travée SPAN2, valable pour toutes les travées centrales.	62
5.4.1	Plan d'implantation de la charge d'essai :.....	63
5.4.2	Valeur de la charge d'essai :.....	63
5.4.3	Déformation des points de mesure sous la charge d'essai :.....	63
5.4.1	Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :.....	64
5.4.2	Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :.....	64
5.5	Autres cas :.....	65
6	Méthode de calcul de la déformation verticale des appuis sous la charge d'essai :.....	65
CHAPITRE 5.....		67
SYNTHESE ET ANALYSE COMPARATIVE		67
1	Discussion et analyse Comparative des résultats :.....	68
2	La présentation graphique des flèches :.....	70
CONCLUSION GENERALE		76
REFERENCES BIBLIOGRAPHIE.....		78
ANNEXES		79

LISTE DES FIGURES

Figure1- 1-Epreuve de chargement des ouvrages d'art.....	4
Figure1- 2-Différents appareils utilisée pour les mesures de déformation	5
Figure1- 3-Chargement d'appui d'un dalle.....	7
Figure1- 4-Pesée d'un camion sur une bascule.....	13
Figure1- 5-Chargement d'un appui.....	14
Figure1- 6-Essai de chargement d'un ouvrage de faible portée	15
Figure2- 1-Définition de la disposition des camions selon le système BC	20
Figure2- 2-Définition du système Br.....	21
Figure2- 3-Définition du système Bt.....	22
Figure2- 4-Illustration du convoi Mc80.....	23
Figure2- 5-Représentation du convoi Mc120	23
Figure2- 6-Représentation du convoi D280.....	24
Figure2- 7-Représentation du convoi type D240.....	24
Figure2- 8-Représentation du convoi type E400.....	25
Figure2- 9-Représentation du convoi E360.....	25
Figure3- 1-Travée de la partie droite-.....	27
Figure3- 2-Viaduc PK 93+296.....	28
Figure3- 4-La vue en plan	29
Figure3- 5-Coupe longitudinale (la partie à gauche).....	29
Figure3- 6--Coupe transversale droite en travée (1/2).....	30
Figure3- 7-Plan de ferrailage des butées sismiques de la pile.....	30
Figure3- 8-Le système d'acquisition avec les Fleximètres	31
Figure3- 9-Les Fleximètres installés au droit des appareils	31
Figure3- 10-levé topographique par le niveau	32
Figure3- 11-les camions à benne	33
Figure3- 12-Installation des échafaudages	33
Figure3- 13-la positionnement des camions au niveau des appuis	34
Figure3- 14-1er cad de chargement(rive).....	34
Figure4- 1-Choix d'unité et du Modèle	37
Figure4- 2-Représentation de le fenêtre (Bridge Wizard)	38
Figure4- 3-Tableau du matériau.....	38
Figure4- 4-Tableau des sections des poutres (Médiane & intermédiaire	39
Figure4- 5-Modélisation du tablier	40
Figure4- 6-Représentation du la longueur du tablier.....	40
Figure4- 7-Représentation des charges	41
Figure4- 8-Affectation des valeurs des surcharges.....	42
Figure4- 9-Modèle du tablier à une seule travée.....	42
Figure4- 10-Le modèle du pont (SAP2000).....	43
Figure4- 11-Déplacement du poutre centrale L4.....	44

Figure4- 12-Principe de numérotation des points de mesure.....	46
Figure4- 13-Schéma de numérotation des travées (SPAN1,SPAN2)	46
Figure4- 14-Schéma de numérotation des poutres	47
Figure4- 15-Plan d'implantation des points de mesure d'une seule poutre	47
Figure5- 1- Travée de rive Cas de chargement N°1 (4camion).....	70
Figure5- 2-Travée intermédiaire Cas de chargement N°1 (4camion)	70
Figure5- 3-Travée de rive Cas de chargement N°2 (4camion)	71
Figure5- 4-Travée intermédiaires de chargement N°2 (4camion)	71
Figure5- 5-Travée de rive Cas de chargement N°1 (4camion)	72
Figure5- 6-Travée intermédiaire Cas de chargement N°1 (4camion)	72
Figure5- 7-Travée de rive Cas de chargement N°2 (4camion)	73
Figure5- 8-Travée intermédiaire Cas de chargement N°2 (4camion)	73
Figure5- 9-Travée de rive Cas de chargement N°1 (4camion)	74
Figure5- 10-Travée intermédiaire Cas de chargement N°1 (4camion).....	74
Figure5- 11-Travée de rive Cas de chargement N°2 (4camion).....	75
Figure5- 12-Travée intermédiaire Cas de chargement N°2 (4camion).....	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1- 1-Les différentes phases de réalisation des épreuves et les tâches des différents intervenants.....	9
Tableau2- 1-Définition coefficients α_1	18
Tableau2- 2-Définition des valeurs de V_0	18
Tableau2- 3- Valeur de B_c	21
Tableau2- 4- Valeur de B_t	22
Tableau3- 1-Les poids par camion	33
Tableau 4- 1-Charge à l'essieu du poids-lourds de trois essieux.....	48
Tableau 4- 2-Déformation au milieu de travée.....	50
Tableau 4- 3-déformation au milieu de travée.....	50
Tableau 4- 4-Déformation au milieu de travée.....	50
Tableau 4- 5-Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai.....	51
Tableau 4- 6-Paramètre des appareils d'appuis sur le point de mesure T1	54
Tableau 4- 7-Paramètre des appuis sur le point de mesure T3.....	54
Tableau 4- 8-L'affaissement des points de mesure.....	55
Tableau 4- 9-Déformation au milieu de travée.....	56
Tableau 4- 10-Déformation au milieu de travée.....	56
Tableau 4- 11-Déformation au milieu de travée.....	56
Tableau 4- 12-Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai.....	57
Tableau 4- 13-L'affaissement des points de mesure.....	58
Tableau 4- 14-Déformation au milieu de travée.....	59
Tableau 4- 15-Déformation au milieu de travée.....	59
Tableau 4- 16-Déformation au milieu de travée.....	59
Tableau 4- 17-Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai.....	60
Tableau 4- 18-Paramètre des appuis sur les points de mesure T1 et T3	62
Tableau 4- 19-L'affaissement des points de mesure.....	62
Tableau 4- 20-Déformation au milieu de travée.....	63
Tableau 4- 21-Déformation au milieu de travée.....	63
Tableau 4- 22-L'affaissement sous la charge d'essai	64
Tableau 4- 23-L'affaissement des points de mesure.....	65
Tableau5- 1-Confrontation des résultats de flèches utilisant un module de déformation de $E=36\ 620\ MP$	68
Tableau5- 2- Confrontation des résultats de flèches un module de déformation de $E=37000MPA$	68
Tableau5- 3-Confrontation des résultats de flèches un module de déformation de $E=37\ 620\ MPA$	68

Listes des notations :

γ : la masse volumique du béton armé

f_{c28} : Résistance à la compression

ν : coefficient de poisson

E : Module de déformation longitudinale du béton

b : Épaisseur, facteur de contrôle de la surface de charge

L : largeur de tablier

N : Nombre des poutres

L : longueur de la poutre

$L1$: poutre de rive

$L4$: poutre centrale

$T1, T3$: les points de mesure des déformations des appuis

V : largeur d'une voie

I_p : périmètre non portant de l'appui

H_t : Hauteur de la poutre

B : la largeur de la section

G : la charge permanente totale

T_i : épaisseur de caoutchouc

$S1$: coefficient de forme

G : module de cisaillement

T_e : épaisseur valable du corps élastique

$A(L)$: surcharge uniformément répartie sur la largeur roulable, définie comme charge statique

B_c : surcharge des camions types, définie comme une charge mobile

B_r : surcharge d'une roue isolée, définie comme une charge mobile

B_t : surcharge de groupes de deux essieux (tendem), définie comme une charge mobile

$Mc80, Mc 120$: surcharge militaire, définie comme une charge mobile

$D280, D240, E400, E360$: surcharge exceptionnelle (convoi), définie comme charge mobile

ρ_{1000} : coefficient de relaxation à 1000 h

I : module d'inertie de l'appui

Listes des abréviations :

CCTP : Cahier des clauses techniques particulières.

CCAG : Cahier des clauses administratives générales.

SETRA : Services d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements.

CCAP : Cahier des clauses administratives particulières.

MEO : Maitre d'œuvre.

MOA : Maitre d'ouvrage.

BE : Bureau d'étude.

IDI : Inspection détaillée initial.

DTR : Document technique réglementaire.

INTRODUCTION GENERALE

1 Introduction générale :

L'automobile s'est rapidement imposé comme le principal moyen de déplacement à travers le monde, l'Algérie en particulier a connu une augmentation incroyable de véhicules (près de 200000 voitures par ans) donc l'état s'est répondu présent en confiant la mission au département des travaux publics de régénérer et élargir le réseau routier en construction tous type d'ouvrage qui peut satisfaire la circulation automobile comme les trémies, les tunnels, et les ponts.

Un pont est une construction qui permet de franchir un obstacle naturel ou artificiel (cours d'eau, voie de communication, ravin) en passant par-dessus.

Le franchissement supporte le passage d'humains et de véhicules dans le cas d'un pont routier, ou d'eau dans le cas d'un aqueduc.

Chaque type de pont est adapté à une plage de portée, pour les petits ponts hydrostatiques on parle de ponceau ou de dalot contrairement aux grandes portées ou' on emploie le terme de viaduc qui contient plusieurs travées généralement en fonction de la longueur du pont.

L'objectif de ce travail est de vérifier que le fonctionnement mécanique des ouvrages sous chargement est conforme à leur modélisation de calcul, On vérifie également que les grandeurs mesurées restent dans une plage acceptable compte tenu des incertitudes provenant de mesures (10% selon recommandations du SETRA).

Le premier chapitre portera sur des généralités des épreuves de chargement d'ouvrages d'art en termes de consistance, programme et objectifs recherchés.

Quant au second chapitre, il sera dédié à la définition des différents de cas de chargement des ouvrages d'art, description de l'épreuve ainsi que les moyens et les équipements utilisés. On met l'accent essentiellement sur le cas de chargement Bc, objet de notre travail.

Le troisième chapitre c'est la description des épreuves du viaduc PK 93.

Le quatrième chapitre sera consacré à la modélisation numérique du viaduc de l'autoroute Est ouest d'Algérie au niveau de la Wilaya de Tlemcen, sous le code de calcul SAP 2000. Il s'agit du viaduc du point kilométrique PK 93.296. Ainsi ont traité la vérification de conformité de la flèche par rapport à celle issue des calculs donnés par le Bureau d'Etudes de l'entreprise réalisatrice. Une étude paramétrique a été faite en vue de cibler les paramètres mécaniques pouvant influencer le comportement des ouvrages d'art.

En ce qui concerne le cinquième chapitre, il sera dédié à la synthèse et l'analyse des résultats trouvés.

A la fin de ce travail, on présente les principales conclusions tirées ainsi que les perspectives envisagées pour les futurs travaux.

Chapitre 1

Généralités

1 INTRODUCTION :

L'épreuve d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage est un essai de comportement statique ou dynamique en vraie grandeur réalisé :

- Avant sa mise en service (contrôle d'exécution, validité des hypothèses de calculs).
- A la suite d'un évènement naturel ou d'un incident.
- Dans le cas d'un doute sur son fonctionnement.
- Dans le cadre d'une surveillance périodique.
- Dans le cadre d'une validation de comportement et de capacité portante.



Figure1- 1-Epreuve de chargement des ouvrages d'art

1.1 Les grandeurs mesurées :

Les mesures peuvent porter sur les flèches, les tassements des appuis et appareils d'appui, les déplacements horizontaux des appuis, en tête de béquille ou en tête de pylône, les rotations de flexion en pied ou tête de béquille, les déformations extenso métrique sur des poutres métalliques, non ouverture de joints secs, les courbatures, et les tensions.

1.2 Les appareils pour les mesures de déplacement :

- Flexi graphes mécanique.
- Capteurs de déplacements.
- Flexi graphes laser.
- Matériels de nivellement théodolites motorisés.
- Interféromètres radar terrestres.

1.3 Les appareils pour les mesures de déformation :

- Jauges électriques.
- Cordes vibrantes.

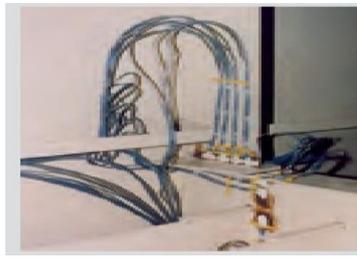
- Extensomètres base longue.
- Fibres optiques.
- Courbure mètres.



Fibre optique



Extensomètre



Jauge électrique



Capteur de déplacement



Flexigraphe LASER



Clinomètre

Figure1- 2-Différents appareils utilisée pour les mesures de déformation

2 Généralités :

Tout pont doit être soumis à des épreuves de fiabilités.

Les épreuves n'ont pas pour but de mesurer le coefficient de sécurité réel offert par le pont.

L'objectif des épreuves est le contrôle de la bonne conception et de la bonne exécution des ponts par l'examen de leur comportement sous des charges normales. Dans certains cas particuliers, la réalisation des épreuves peut être l'occasion de fournir un moyen d'investigation technique pour le perfectionnement de l'art de l'ingénieur.

La date des épreuves est fixée par le maitre d'ouvrages et celles-ci ne sont exécutées que sur ordre de service et en sa présence du maitre d'œuvre.

Au préalable le maitre d'œuvre devra :

- Etablir le programme des épreuves.
- Designer un ingénieur responsable qui assistera aux épreuves.
- S'assurer de la disponibilité du personnel et des moyens matériels nécessaires.

Pour procéder aux épreuves, l'âge minimal requis pour les bétons de la structure porteuse de l'ouvrage est de **90** jours.

Les épreuves doivent normalement être réalisées avant la mise en service de l'ouvrage. Si les exigences de l'exploitation rendent nécessaire la mise en service avant qu'il ait été procédé aux épreuves :

- Il appartient au maître d'ouvrage d'apprécier, en fonction de la qualité de la réalisation (essai de contrôle du béton notamment) et de l'importance des circulations prévisibles, les mesures à prendre à titre provisoire jusqu'au moment des épreuves devront avoir lieu dans les délais les plus brefs compatibles avec l'âge minimal du béton précisé ci avant.
- Une visite contradictoire détaillée de l'ouvrage doit être réalisée juste avant la mise en service ou, si cela n'est pas possible, juste après.

Dans les cas où les résultats issus des épreuves imposées laissent planer un doute sur l'aptitude de l'ouvrage à remplir son rôle, des épreuves complémentaires plus poussées doivent être exécutées.

3 Consistance des épreuves :

- Visite détaillée de toutes les parties de l'ouvrage avant mise en charge.
- Levé des repères de nivellement.
- Mises en charge statique de l'ouvrage ou de certaines parties.
- Nivellement des appuis et mesures des flèches.
- Relaxation de l'ouvrage.
- Mise en charge dynamique avec mesures des flèches et des tassements d'appuis.
- Nivellement à vide.

4 Programme des épreuves :

Il est à noter que la notification de ce programme est faite à l'entrepreneur par le maître d'ouvrage. Ces épreuves comportent normalement ce qui suit :

- L'application des charges définies sur l'ouvrage (viaduc).
- La position et la durée de chaque chargement statique.
- Des visites détaillées de l'ouvrage avant, pendant et après l'application des charges.
- La durée des relaxations entre les chargements.
- La ou les vitesses de circulation des convois.
- La mesure des flèches et le nivellement des appuis.
- Les flèches calculées.



Figure1- 3-Chargement d'appui d'une dalle

En outre, le maître d'ouvrage se réserve le droit de procéder à toutes autres mesures utiles qui sont alors à sa charge.

Dans le cas où un même marché comporte l'exécution de plusieurs ouvrages de même type, le maître d'ouvrage fixe le programme des épreuves dans les conditions suivantes :

Un ouvrage au moins doit faire l'objet de l'ensemble des épreuves énumérées à l'alinéa précédent et détaillées.

Les autres ouvrages peuvent ne faire l'objet que d'épreuves par poids mort sur chaussée, dans ce dernier cas, il est loisible de simplifier le processus des épreuves tel qu'il est prévu.

Il appartient au maître d'ouvrage d'apprécier dans quelle mesure les visites prévues, peuvent être simplifiées, d'autre part, il est recommandé de procéder à au moins une mesure de flèche par travée, le but étant alors d'obtenir un ordre de grandeur de cette flèche sans chercher forcément une très grande précision.

Les ponts présentant un caractère particulier du fait de leur conception, de leurs dimensions ou de leur nombre, doivent faire l'objet d'un programme spécial d'épreuves que le **CCTP** doit préciser.

5 Objectifs des épreuves :

Les épreuves poursuivent les objectifs suivants :

- Assurer au maître d'ouvrage que l'ouvrage livré est apte à bien supporter les charges d'épreuves, et, par extrapolation, à assurer sa destination finale en termes de portance. A cette fin, on exige notamment le passage de poids lourds simulant les charges d'essai définies au chapitre 2, en s'assurant qu'aucune dégradation de la structure n'est observable. Les épreuves peuvent concerner également les trottoirs et les remblais adjacents qui font l'objet de chargement adéquats. L'aptitude au service d'ouvrage sensibles aux effets dynamiques tels que les ponts de grande portée (>200 m), les ponts à câble, les passerelles piétonnes, demande un contrôle de leur comportement dynamique.

- Vérifier que le fonctionnement mécanique de l'ouvrage sous charge est conforme à sa modélisation de calculs. On procède dans ce but à la mesure de quelques grandeurs représentatives du fonctionnement de l'ouvrage. On contrôle simplement que les grandeurs mesurées restent dans une plage acceptable compte tenu des incertitudes provenant des mesures, de la modélisation, et de matériaux. Pour certains ouvrages courants, les épreuves de chargement peuvent être simplifiées (les ouvrages courants : les ponts cadres et portiques/les ponts dalles ou ponts à nervures larges coulés en place/les ponts à poutres).
- Constituer un des éléments de l'état de référence de l'ouvrage qui peut s'avérer indispensable à l'établissement du diagnostic, en cas de problèmes ultérieurs. Le futur gestionnaire de l'ouvrage doit être associé dans la mesure du possible aux opérations préalables à la réception. Les épreuves doivent être reproductibles et les résultats obtenus sont consignés dans le dossier de l'ouvrage. Le contenu des épreuves d'ouvrages d'art comprend en particulier, une inspection avant et après chargement et, d'une façon générale, la mesure de grandeurs physiques significatives reflétant le comportement de l'ouvrage dans son ensemble ainsi que le travail des matériaux sous charges d'épreuve. Les constantes avant, pendant, et après les épreuves, permettent l'identification des éventuels défauts apparents.

6 Organisation des épreuves par le maître d'œuvre :

6.1 La place des épreuves dans la construction des ouvrages :

Les épreuves des ouvrages d'art constituent, dans la plupart des cas, le dernier acte du contrôle extérieur lors de la construction d'un ouvrage neuf.

Ces épreuves ne peuvent se dérouler qu'après la réalisation d'une couche de roulement protégeant le tablier et son étanchéité, la vérification de la capacité des matériaux constitutifs à subir les charges d'épreuves, et le calage définitif des appareils d'appui.

Pour les structures ou parties de structures réalisées en béton, le béton doit avoir atteint un âge suffisant à la date des épreuves. Les épreuves ne peuvent commencer avant un délai minimal de 28 jours après le dernier bétonnage et sous réserve de l'obtention des valeurs de résistance de béton prévues dans les notes de calculs.

Le marché peut prescrire à l'entrepreneur de mettre à disposition pendant une certaine période un ouvrage non encore achevé pour permettre l'exécution d'autres travaux (par exemple des travaux de terrassement). Il convient dans ce cas de se reporter à l'article 43 du CCAG.

Avant et après la mise à disposition de ces ouvrages, il convient de dresser un état des lieux contradictoirement entre le maître d'œuvre et l'entrepreneur. Bien entendu, l'ouvrage doit avoir été conçu et exécuté pour pouvoir supporter les effets des charges prévues.

Si le marché prévoit que les épreuves sont réalisées longtemps après l'achèvement des travaux, la réception de l'ouvrage doit être assortie d'une réserve liée à l'exécution ultérieure des épreuves à prévoir dans le CCAP.

L'entrepreneur doit établir la note d'hypothèses, la note de calculs, et le programme des épreuves. Les autres opérations, comme la reconnaissance des ouvrages exécutés, la constatation éventuelle de l'inexécution des prestations prévues au marché, doivent bien sûr être maintenues. Dans ce cas, l'exécution des épreuves et leur interprétation sont à la charge du maître d'œuvre, en présence d'un représentant de l'entrepreneur. Sauf s'il y a urgence, toute prise de possession des ouvrages par le maître d'ouvrage doit être précédée de leur réception.

Le tableau ci-après récapitule les différentes phases de réalisation des épreuves ainsi que les tâches des différents intervenants :

Tableau1- 1-Les différentes phases de réalisation des épreuves et les tâches des différents intervenants

	Entreprise		Maitrise	D'Œuvre	
	BE⁽¹⁾	Entreprise	Mesure	BE⁽²⁾	MOE
Examen préalable de l'ouvrage		X		X	V
Note d'hypothèses	X			PV	V
Note de calculs	X			PV	V
Programme des épreuves		X			V
Charge d'épreuve		X			V
Mesures			X		
Analyse des résultats	X		X	PV	V
Détermination de l'acceptabilité				X	V

Légende :

X : Réalisation ; **V** : Validation par visa ; **PV** : proposition de validation

BE : Bureau d'études ; **MOE** : maître d'œuvre

(1) Bureau d'Etudes de l'entrepreneur.

(2) Bureau d'Etudes maîtrise d'œuvre.

6.2 Les épreuves, éléments de contrôle :

Les épreuves contribuent à fournir des éléments d'appréciation permettant au maître d'œuvre de proposer ou non au maître d'ouvrage la réception de l'ouvrage.

Les épreuves constituent une mesure globale d'un ou de plusieurs comportements de l'ouvrage sous une sollicitation extérieure, permettant de juger de l'acceptabilité de l'ouvrage au regard de sa destination, supporter un trafic routier. Cette mesure est

d'interprétation délicate et les conditions de sa réalisation doivent donc être particulièrement soignées.

Les épreuves doivent se dérouler en présence du maître d'œuvre (ou d'un représentant qualifié du maître d'œuvre) et d'un représentant qualifié de réel le bon déroulement des épreuves et les arrêter en cas d'anomalie.

L'analyse des résultats des épreuves dressées par l'entrepreneur doit être validée formellement par le maître d'œuvre, c'est-à-dire visée avec ou sans réserve.

Le maître d'ouvrage peut également faire à l'occasion de cette opération préalable à la réception, l'état de référence de l'ouvrage. On rappelle que les vices et l'objet de réserves lors de la réception sont réputés acceptés par le maître d'ouvrages.

6.3 Déroulement des épreuves :

6.3.1 La note de calculs :

6.3.1.1 La note d'hypothèses :

L'entrepreneur fournit au maître d'œuvre la note d'hypothèses conforme aux exigences décrites. Le maître d'œuvre doit retourner cette note d'hypothèses visée avec ses observations éventuelles.

6.3.1.2 La note de calculs :

Le maître d'œuvre doit viser la note de calculs, ce qui constitue une condition au lever du point d'arrêt préalable à la réalisation des chargements. La consistance d'une telle note est développée.

6.3.2 Le programme des épreuves et l'organisation des chargements :

L'entrepreneur propose un programme de chargement destiné à décrire tous les éléments nécessaires aux épreuves de l'ouvrage.

Ce document précise en particulier :

- L'organisation générale des épreuves, avec la désignation explicite des responsabilités,
- L'ordre des chargements des différentes parties d'ouvrage,
- La nature des moyens à utiliser, tant en termes de véhicules que de dispositifs de mesure et de communication,
- Le plan de rotation des véhicules, conforme à la note de calculs, visant à optimiser les déplacements et les mises en position des matériels de mesure,
- L'adéquation géométrique entre les moyens de mesures optiques et les chargements qui peuvent former un obstacle à certaines visées,
- Le mode de repérage de la position des chargements,
- Si nécessaire, les moyens à mettre en œuvre pour stabiliser les effets thermiques.

Remarque :

– Préalablement au chargement de l'ouvrage, l'entrepreneur marque, par exemple à la peinture, la position des véhicules, pour les différents cas de charges à réaliser. Il peut être établi une codification des cas de charges par le nombre de traits, et des types de véhicules par

la couleur, en précisant la partie du camion repérée (dernier essieu arrière). Comme il est très fréquent que les véhicules utilisés soient légèrement différents des véhicules définis dans la note de calculs, il est préférable que le repérage s'effectue sur l'essieu le plus chargé pour se rapprocher des hypothèses de calcul.

6.3.3 Les moyens mis en œuvre pour effectuer les mesures :

Le maître d'œuvre doit s'assurer que les moyens prévus par l'organisme d'essais de génie civil pour réaliser les mesures sont bien adaptés à la nature des problèmes posés et permettent de satisfaire aux exigences de qualité. Il vérifie en particulier :

- Le domaine d'emploi du matériel, les caractéristiques métrologiques des appareils,
- Leur étalonnage,
- La qualification du personnel ayant à mettre en œuvre le matériel de mesures,
- La cohérence entre l'organisation du chantier de mesure et les chargements : faisabilité des mesures, délai entre chaque mesure,
- L'accès rapide aux valeurs permettant de contrôler en temps réel le bon fonctionnement de l'ouvrage.

On vérifie également que l'organisme d'essai de génie civil dispose bien des moyens d'enregistrement des grandeurs physiques mesurées sur l'ouvrage et des paramètres susceptibles d'influencer la mesure : température de l'air et de la structure, gradient thermique, niveau de l'eau, hygrométrie...

L'enregistrement de ces paramètres est très important, car il permet de procéder à des mesures tout au long de la vie de l'ouvrage, de comparer deux états, et d'apprécier l'évolution de son comportement dans le temps.

Il faut noter que si une relative constance de ces paramètres ne peut être mise en évidence durant les épreuves, il est préférable de réaliser ces épreuves à des moments ou dans des conditions où les variations sont minimales, par exemple tôt le matin, par temps nuageux, par marée de morte-eau, en l'absence de vent fort, etc.

6.3.4 Examen préalable de la structure :

Préalablement à toute action de chargement, une visite détaillée contradictoire de la structure doit être menée afin de relever les éventuels désordres ou défauts, de les mesurer et les quantifier. Ceci permet de vérifier leur éventuelle évolution pendant ou après les épreuves de chargement.

Les résultats de l'examen préalable sont notifiés au titulaire du marché de travaux, pour que ce dernier puisse mener une contre-visite, et proposer, si nécessaire, d'éventuelles mesures confortatives.

Le niveau de détail de cette action de surveillance est celui d'une inspection détaillée d'ouvrage d'art, menée selon les principes du fascicule 02 de l'Instruction Technique pour la surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'art, relatifs aux conditions d'exercice de la surveillance.

Elle doit être confiée à un organisme ou laboratoire spécialisé disposant d'un personnel formé et qualifié en inspection d'ouvrage d'art. En général, c'est l'organisme chargé du contrôle extérieur des travaux du fait de sa connaissance du chantier qui est retenu. Les laboratoires de l'équipement assurent traditionnellement cette fonction avec leur savoir-faire et peuvent donc constituer une ressource précieuse.

Le résultat de cette inspection doit permettre d'apprécier l'aptitude de l'ouvrage à supporter les épreuves. En effet, si les désordres constatés sont révélateurs d'un risque pour l'ouvrage, il faut arrêter la procédure de réception et demander à l'entrepreneur d'analyser les désordres et proposer si nécessaire les réparations. En cas d'exécution d'une réparation, il convient de rester son efficacité préalablement au déroulement des chargements d'épreuves.

Enfin, sur des désordres ne mettant pas en cause la stabilité et la résistance de la structure, le maître d'œuvre, peut accepter que les désordres ne soient pas réparés avant les épreuves. Le maître d'œuvre peut alors décider d'une instrumentation particulière, destinée à contrôler l'évolution (supposée réversible) du désordre sous l'effet du chargement d'épreuves. Dans ce cas, il est opportun de procéder à un chargement par paliers.

Remarque :

– On peut citer comme exemple de désordres susceptibles d'être instrumentés : une fissuration de quelques dixièmes de millimètres sur des structures en béton armé, une déplantation excessive de l'âme d'une poutre métallique, un défaut de réalisation engendrant des poussées au vide...

6.3.5 La vérification des charges appliquées :

Il est exigé pour chaque camion un bon de pesée (poids total et poids des essieux), établi le jour même de chaque phase d'épreuves sur une installation de pesage statique récemment étalonnée ou vérifiée. La tolérance admise sur la masse totale de chaque camion est généralement prise égale à 3%.

Lors d'épreuves réalisées sous très forte pluie, la variation de la masse doit être contrôlée du fait de la variation de la teneur en eau des chargements.

Il est rappelé la nécessité d'un strict respect des règles du code de la route, notamment en matière de charge totale autorisée.

L'entrepreneur contrôle que la position réelle des essieux est proche de la position théorique tant dans le sens longitudinal que transversal avec un écart inférieur à 10 cm.

L'attention est attirée sur le fait que certains chargements ne sont pas toujours bien connus en gabarit. Certaines charges peuvent déborder de l'arrière des véhicules et empêcher le respect des dispositions prévues. Il y a lieu dans ce cas d'apporter les ajustements nécessaires dans la note de calculs.



Figure1- 4-Pesée d'un camion sur une bascule

6.3.6 Le chargement de l'ouvrage et les mesures :

En premier lieu, l'organisme d'essais en génie civil propose un programme de mesures conforme aux exigences.

Il est utile de demander à cet organisme de s'informer des conditions climatiques prévisibles pendant son intervention, particulièrement en termes de neige, de vent, de température, de brouillard... Ainsi, une vérification des prévisions météorologiques la veille du jour retenu pour le déroulement des épreuves, peut éviter un déploiement inutile.

Préalablement aux épreuves, le maître d'œuvre vérifie que toutes les autorisations administratives (exploitation de la route, accès aux terrains riverains pour faire des mesures...) sont bien obtenues, et que les moyens de communications (radio, par exemple) nécessaires entre les divers intervenants (entreprise générale, mesureurs et géomètres, coordonnateur des camions, maître d'œuvre) sont bien mis à disposition et qu'ils fonctionnent.

Le chargement des appuis permet de provoquer le tassement immédiat des appuis. Ces tassements sont généralement très faibles (de l'ordre de quelques dixièmes de mm). Il convient simplement de suivre les tassements et d'établir le nivellement du tablier à vide après l'enlèvement des chargements. Si les tassements ne sont a priori pas négligeables, c'est-à-dire supérieurs à 0,5 cm (cette valeur dépend des types de structures), ils devront avoir été évalués dans la note de calculs de l'ouvrage. Les différentes mesures topométriques après déchargement de la structure (retour à vide) peuvent, dans la mesure où elles sont réalisées selon les conditions spécifiées dans le fascicule 04 de l'Instruction Technique, constituer l'Etat Initial de Référence Topométrique.

Les travées sont chargées dans l'ordre précisé par le programme de chargement. Les consignes de sécurité n'autorisent pas le déplacement simultané de plusieurs camions sur l'ouvrage. Ce point doit être vérifié également à la fin des épreuves lorsque les camions quittent l'ouvrage.

L'organisme d'essais en génie civil vérifie à tout moment que la valeur physique significative mesurée sous le cas de charge étudié ne dépasse pas 1,5 fois la valeur prévue, de manière à ne

pas mettre l'ouvrage en péril. Le dépassement de ce seuil commande l'arrêt des épreuves. La mesure des tassements d'appui sous les différents cas de charge permet de recalibrer les mesures faites sur les autres parties du tablier. Quand l'ouvrage est instrumenté pour permettre l'évaluation d'un désordre particulier ou d'un comportement spécifique, ces instrumentations complémentaires doivent être assorties de seuils d'alerte.



Figure1- 5-Chargement d'un appui

6.3.7 Examen après les épreuves :

Cet examen a pour but de constater l'état de l'ouvrage après les épreuves et de le comparer à l'état initial déjà enregistré avant les épreuves. Ces constats sont reportés sur le document ayant servi à l'examen préalable, en les différenciant des constats initiaux.

Cette inspection peut avantageusement être conduite au sens de l'Instruction Technique, afin de constituer alors l'Inspection Détaillée Initiale (IDI). Dans ce cas, bien évidemment, cette inspection doit être menée de manière contradictoire avec l'entrepreneur.

Il est rappelé que les délais liés à l'acte de réception et visés par l'article 41 du CCAG ne permettent pas toujours d'effectuer toutes les opérations préalables à la réception notamment si l'on inclut l'IDI. C'est souvent le cas pour les ouvrages d'art non courants. Deux solutions peuvent être envisagées dans le CCAP :

- Prévoir un délai contractuel plus important dans le marché,
- Assortir la réception d'une réserve relative aux résultats de l'IDI.

6.3.8 Analyse des résultats et validation après les épreuves :

L'organisme d'essais en génie civil fait au maître d'œuvre un rapport sur les mesures réalisées lors des épreuves comprenant :

- Le rappel des charges réellement mises en œuvre et de leurs positions,
- Le rappel et l'analyse des conditions de mesures,
- Le rappel des valeurs attendues et des variations admissibles de ces valeurs au regard des incertitudes concernant les modèles et les valeurs,
- Le rappel des incertitudes affectant les mesures,
- La comparaison entre résultats mesurés et traités, et valeurs calculées.

À partir de ce rapport, le bureau d'études de l'entrepreneur établit une note d'analyse des résultats qui comprend au moins les parties suivantes :

- Le rappel des hypothèses,
- La reprise éventuelle des calculs,
- L'interprétation des différences, le cas échéant,
- Les conclusions sur la capacité de l'ouvrage à assurer ses fonctions et sa pérennité,
- Les indications sur le régime de surveillance approprié à l'ouvrage, sur d'éventuelles instrumentations complémentaires permanentes ou temporaires.
- Le maître d'œuvre analyse le rapport de l'entrepreneur avec l'aide de son bureau d'études et conclut sur la suite à donner à l'opération de réception de l'ouvrage.

6.3.9 Cas de certains ouvrages :

Les principes décrits ci-dessus concernent la majorité des ouvrages, y compris les ouvrages exceptionnels. Les épreuves réalisées après réparations ou renforcements d'ouvrages anciens doivent être adaptées au cas par cas.

Toutefois, certains ouvrages particulièrement simples et robustes, réalisés conformément aux dossiers types du Sétra, tels que les PIPO de dimensions modestes (d'une portée inférieure à 10 m), peuvent faire l'objet de dispositions allégées.



Figure1- 6-Essai de chargement d'un ouvrage de faible portée

Chapitre 2

Définition des différents cas de chargement des ouvrages d'art

1 INTRODUCTION :

Les charges définies suivant les systèmes **A**, **B**, **Mc** sont valables pour les ponts-routes supportant une ou plusieurs chaussées. Elles ne s'appliquent pas telles quelles aux ouvrages de géométrie complexe, tels que pont en croix par exemple.

Deux systèmes de charges civiles **A** et **B** peuvent être disposés sur les chaussées des ponts. Ces systèmes sont distincts et indépendants, en ce sens que pour le calcul d'un effet donné les deux systèmes ne peuvent être appliqués simultanément.

Les deux systèmes **A** et **B** sont à envisager successivement pour toutes les justifications des éléments du tablier et du pont.

En outre, les itinéraires faisant l'objet d'un classement doivent permettre la circulation de matériels militaires lourd **Mc 80** et **Mc 120** ou de convois exceptionnels **D280**, **D240**, **E400**, **E360**.

Dans certains cas, d'autres types de charges peuvent être pris en compte, notamment pour les ponts ayant à supporter la circulation d'engins de chantier lors de la construction d'une section de route ou autoroute, le **CCTP** fixe alors les caractéristiques des véhicules à prendre en compte, ainsi que les modalités du calcul.

2 Système de charges 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 1.1.

La charge $A(l)$, exprimée en kilonewton par mètre carré (KN/m²) est donnée en fonction de la longueur chargée, l , exprimée en mètres par la formule :

$$A(l) = 2,30 + \frac{360}{l+12} \quad (1.1)$$

La largeur et les longueurs des zones chargées sont choisies d'après les règles qui sont formulées ci-après, de manière à produire les effets maximaux dans l'éléments d'ouvrage dont on a en vue la justification.

Pour les ponts comportant une ou plusieurs travées dépassant 200 m, le CCTP fixe l'intensité des charges à prendre en compte.

Dans le sens transversal, la largeur de la zone chargée comprend un nombre entier de voies de circulation.

Lorsque la largeur chargeable varie de façon importante sur la longueur du pont (élargissement au voisinage d'un about par exemple), il est loisible de disposer sur les surlargeurs correspondantes (triangles curvilignes) la même intensité de charge que sur les voies courantes.

En fonction de la classe du pont et de nombre de voies chargées, la valeur de A(l) est multipliée par les coefficients α_1 du tableau 1.1.

Tableau2- 1-Définition coefficients α_1

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 $(4 - 0.002/l)$ KN/m², expression dans laquelle la longueur chargée / est exprimée en mètres, c'est cette dernière valeur qui doit être prise en compte.

La charge A1 est obtenue par :

$$A1 = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 A(l) \\ 4 - 0.002l \end{array} \right. \quad (1.2)$$

La charge A1 obtenue est multipliée par un coefficient $\alpha_2=V_0/V$,

V étant la largeur d'une voie et,

V₀ ayant les valeurs données par le tableau 1.2 :

Tableau2- 2-Définition des valeurs de V₀

Classe de pont	V₀
Première classe	3,5m
Deuxième classe	3,0m
Troisième classe	2,75m

La charge A₂= α_2 A₁ ainsi obtenue est appliquée uniformément sur toute la largeur de chacune des voies considérées.

Dans le sens longitudinal, les zones chargées sont déterminées par la considération de la ligne d'influence de l'effet envisagé.

En règle générale, notamment pour les ponts dont les lignes d'appui font avec l'axe longitudinal de la chaussée un angle de valeur non nulle (ponts droits ou biais), les limites des zones chargées doivent coïncider avec les zéros de la ligne d'influence. Si l'on ne charge qu'une zone, la longueur chargée, l, est la différence des abscisses de ces zéros, si l'on charge plusieurs zones, contiguës ou non, la longueur chargée, l, est prise égale à la somme des longueurs de ces zones chargées.

Pour les ponts courbes ou présentant un biais variable suivant les appuis on peut adopter pour les longueurs des valeurs moyennes pour chaque voie (longueur mesurée suivant l'axe de la voie).

Dans le cas des ponts dont les lignes d'appui sont parallèles à l'axe longitudinal de la chaussée, il y a lieu cependant de disposer la charge A en vue de rechercher le maximum de l'effet envisagé.

Lorsque les effets sont calculés par d'autres méthodes que celles qui ont recours à leurs lignes d'influence, ou lorsque ces effets ne comportent pas de ligne d'influence, le CCTP précise les valeurs de l à prendre en compte.

Les valeurs données dans les articles ci-dessus pour les charges du système A tiennent compte des majorations pour effets dynamiques.

3 Système de charges 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 BC se compose de camion types,
- Le système Br se compose d'une roue isolée,
- Le système BT se compose de groupe de deux essieux dénommés essieux tandems.

Les deux premiers systèmes BC et Br, s'appliquent à tous les ponts quelles que soit leur classe, le système Bt ne s'applique qu'aux ponts de première ou de deuxième classe.

3.1 Système de charges BC :

Un camion type du système Bc, comporte trois essieux, tous à roues simple munies de pneumatiques et qui répond aux caractéristiques suivantes :

Charge totale.....	300 KN
Charge portée par chacun des essieux arrière.....	120 KN
Charge portée par l'essieu avant.....	60 KN
Longueur d'encombrement.....	10,50 m
Largeur d'encombrement.....	2,50 m
Distance des essieux arrière.....	1,50 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 : carré de 0,25m de côté.

Surface d'impact d'une roue avant : carré de 0,20m de côté.

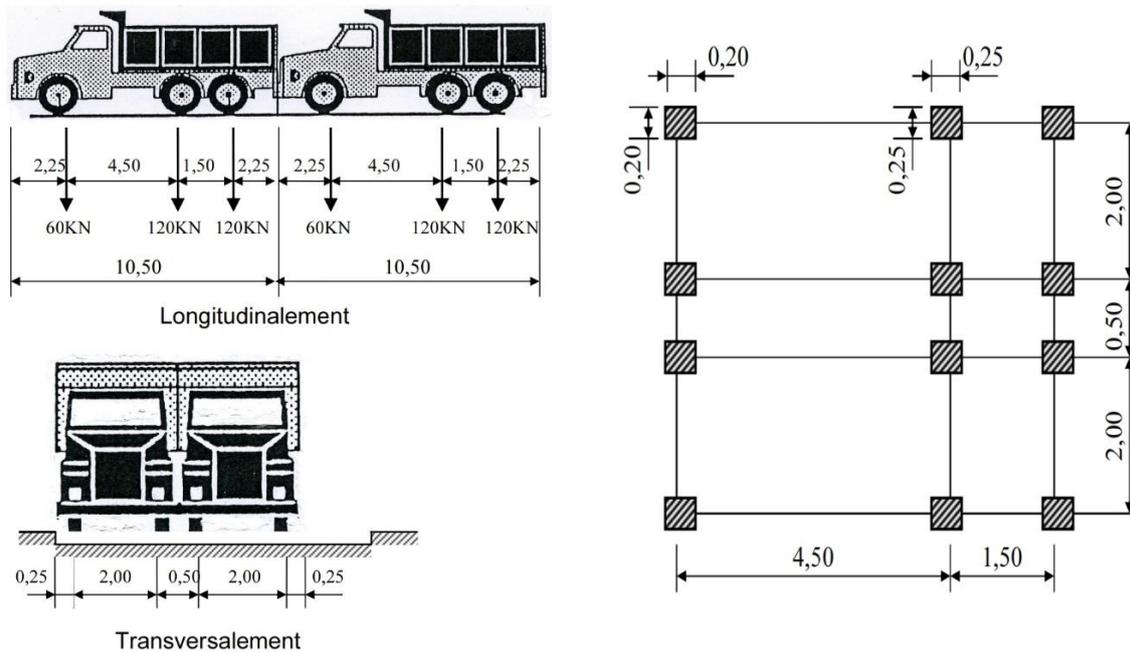


Figure2- 1-Définition de la disposition des camions selon le système BC

On dispose sur la chaussée au plus autant de files ou convois de camions que la chaussée comporte de voies de circulation et on place toujours ces files dans la situation la plus défavorable pour l'élément considéré.

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 (chaussées de 7.50 et 10.50m par exemple).

Dans le sens transversal, chaque file est supposée circulant dans l'axe d'une bande longitudinale de 2.50m de largeur. Les diverses bandes peuvent être contiguës ou séparées.

Pour le calcul des poutres maîtresses les bandes latérales peuvent toucher les bords de la largeur chargeable mais non empiéter sur eux.

Pour le calcul des éléments du tablier (dalles sous chaussée, longerons, pièces de pont, entretoises) ; ces mêmes bandes peuvent toucher les bords de la largeur roulable, mais non empiéter sur eux.

Dans le sens longitudinal le nombre de camions par file est limité à deux. La distance des deux camions d'une même file est déterminée pour produire l'effet le plus défavorable. Les camions homologues des diverses files sont disposés de front. Tous les camions étant orientés dans le même sens.

Dans les ponts biais, il est loisible, pour faciliter le calcul, de décaler suivant le biais les camions homologues des diverses files, ainsi que les roues homologues de chacun des essieux.

En fonction de la classe du pont et de nombre de files considérées, les valeurs des charges du système Bc prises en compte sont multipliées par les coefficients bc du tableau 2.3 ci-après :

Tableau2- 3- Valeur de Bc

Classe du pont	Nombre de voies chargées				
	1	2	3	4	>5
Première	1,20	1,10	0,95	0,80	0,70
Deuxième	1,00	1,00	-	-	-
Troisième	1,00	0,80	-	-	-

3.2 Système de charges Br :

La roue isolée, qui constitue le système Br, porte une charge de 100 kN. Sa surface d'impact sur la chaussée est un rectangle uniformément chargé dont le côté transversal mesure 0,60m et le côté longitudinal 0,30 m, figure 2.2.

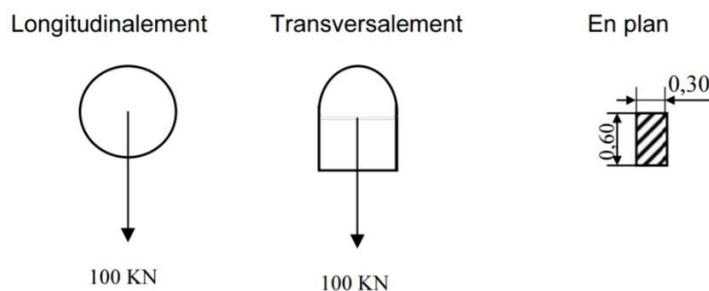


Figure2- 2-Définition du système Br

Le rectangle d'impact de la roue Br, disposé normalement à l'axe longitudinal de la chaussée, peut être placé n'importe où sur la largeur roulable.

Dans les ponts biais il est loisible de diriger suivant le biais le rectangle d'impact.

2.3) Système de charges Bt :

Un tandem du système Bt comporte deux essieux tous deux à roues simple munies de pneumatiques et répondant aux caractéristiques suivantes :

Charge portée par chaque essieu.....160 KN

Distance des deux essieux..... 1,35 m

Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu..... 2m

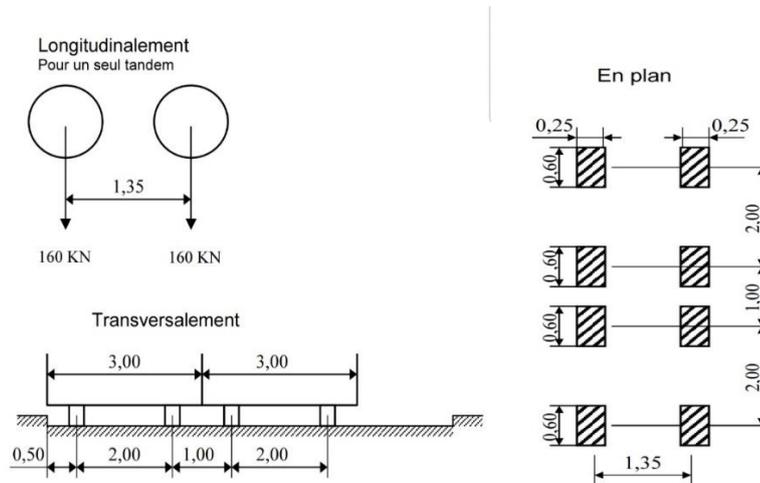


Figure2- 3-Définition du système Bt

La surface d'impact de chaque roue (portant 80 kN) sur la chaussée est un rectangle uniformément chargé dont le côté transversal mesure 0,60 m et le côté longitudinal 0,25 m.

Chaque tandem est supposé circuler dans l'axe d'une bande longitudinale de 3 m de large.

Pour les ponts à une voie un seul tandem est disposé sur la chaussée, pour les ponts supportant au moins deux voies, deux tandems au plus sont disposés de front sur la chaussée, les deux bandes longitudinales qu'ils occupent pouvant être contiguës ou séparées de façon à obtenir la situation la plus défavorable pour l'élément considéré.

Dans les ponts biais, il est loisible, pour faciliter les calculs, de décaler suivant le biais les 2 tandems, ainsi que les roues homologues de chacun des essieux.

La disposition de ces bandes longitudinales par rapport aux bords de la largeur chargeable ou de la largeur roulable, est soumise aux mêmes règles que les bandes considérées en 2.1 pour les camions Bc.

En fonction de la classe du pont, les valeurs des charges du système Bt prises en compte sont multipliées par les coefficients bt suivants :

Tableau2- 4- Valeur de Bt

Classe de pont	Bt
Première classe	1,2
Deuxième classe	1

4 Système Mc :

4.1 Convoi Mc 80 :

Un véhicule type du système Mc 80 comporte deux chenilles et répond aux caractéristiques suivantes :

Charge totale..... 720 KN

Longueur d'une chenille..... 4,90 m

Largeur d'une chenille..... 0,85 m

Distance d'axe en axe des deux chenilles..... 2,80 m.

Le rectangle d'impact de chaque chenille est supposé uniformément chargé.

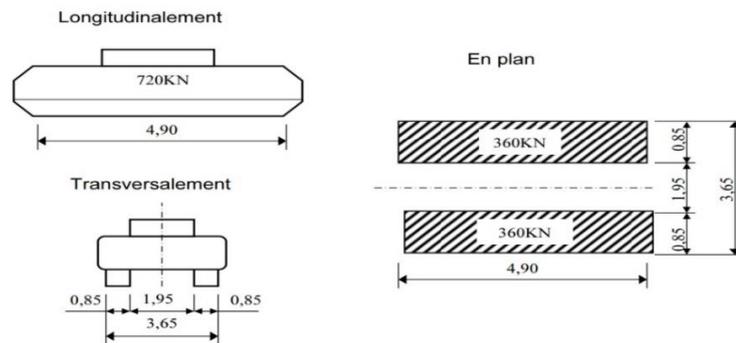


Figure2- 4-Illustration du convoi Mc80

4.2 Convoi Mc 120 :

Un véhicule type du système Mc 120 comporte deux chenilles et répond aux caractéristiques suivantes :

Charge totale..... 1100 KN

Longueur d'une chenille..... 6,10 m

Largeur d'une chenille..... 1,0 m

Distance d'axe en axe des deux chenilles3,30 m.

Le rectangle d'impact de chaque chenille est supposé uniformément chargé.

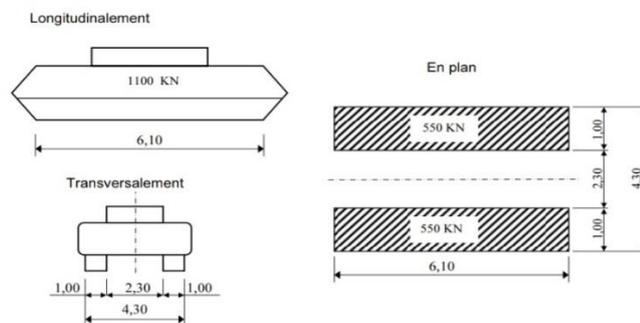


Figure2- 5-Représentation du convoi Mc120

Les véhicules des systèmes Mc peuvent circuler en convoi ; dans le sens transversal, un seul convoi est supposé circuler quelle que soit la largeur de la chaussée ; dans le sens longitudinal, le nombre des véhicules du convoi n'est pas limité et la distance de deux véhicules successifs est déterminée pour produire l'effet le plus défavorable, la distance libre entre leurs points de contact avec la chaussée devant être au moins égale à 30,50 m.

5 Convoi type D280 :

Le convoi type D280 comporte deux remorques supportant chacune 1400 kN, dont le poids est supposé réparti au niveau de la chaussée sur un rectangle uniformément chargé de 3,30 m de large et 11 mètres de long, la distance entre axes des deux rectangles est de 19 mètres.

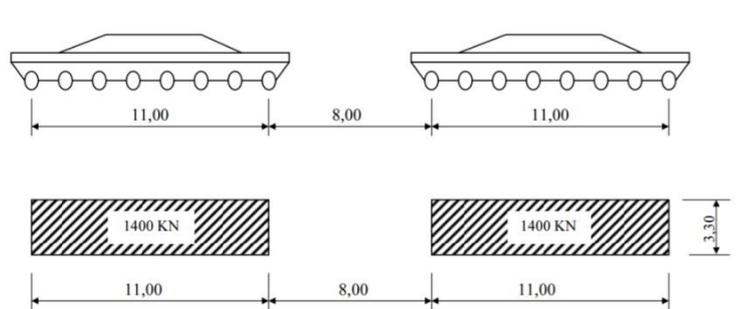


Figure2- 6- Représentation du convoi D280

6 Convoi type D240 :

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 3,20 m de large et de 8,60 m de long.

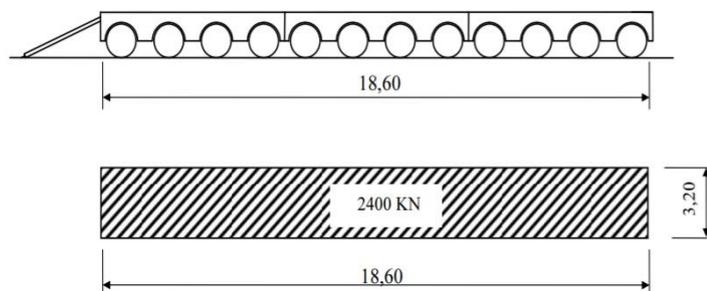


Figure2- 7- Représentation du convoi type D240

7 Convoi type E400 :

Le convoi-type E400 comporte deux remorques supportant chacune 2000 kN, dont le poids est supposé réparti au niveau de la chaussée sur un rectangle uniformément chargé de 3,30 m de large et 5 mètres de long : la distance entre axes des deux rectangles est de 33 mètres.

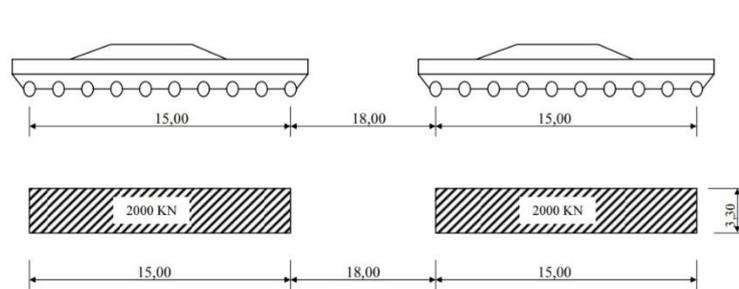


Figure2- 8- Représentation du convoi type E400

8 Convoi type E360 :

Le convoi type E360 comporte une remorque de trois éléments de quatre lignes à trois essieux de 3600 kN de poids total.

Ce poids est supposé réparti au niveau de la chaussée sur un rectangle uniformément chargé de 5,10 m de large et de 18,60 m de long.

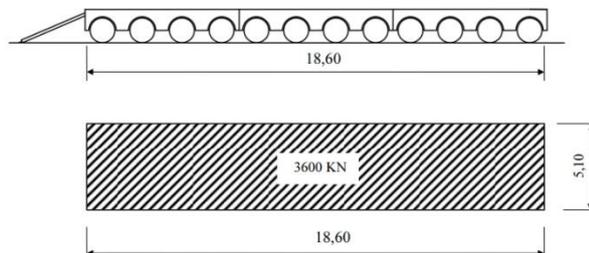


Figure2- 9- Représentation du convoi E360

Chapitre 3

La description des épreuves du viaduc PK 93

1 Date de l'épreuve :

L'épreuve de chargement s'est déroulée en 02 jours : le 21 & le 22/05/2014, les résultats issus du 1^{er} jour n'ont pas été concluants vu les conditions climatiques défavorables qu'a connu la région (vent assez marqué).

Le deuxième jour, soit le 22/05/2014, l'épreuve de chargement statique a été reprise avec des conditions climatiques beaucoup plus favorables.

Nous rappelons que l'ouvrage en question situé au PK 93,296 se trouve à la section W8 qui a été ouverte à la circulation depuis le mois d'Octobre 2010.

2 Description de l'ouvrage :

- L'ouvrage testé est un viaduc autoroutier composé de deux tabliers à poutres précontraintes et à travées indépendantes.
- Chaque tablier comporte 11 travées de 36.1m.
- Travée comprend 07 poutres précontraintes.
- L'ouvrage a un linéaire de 396 mètres.

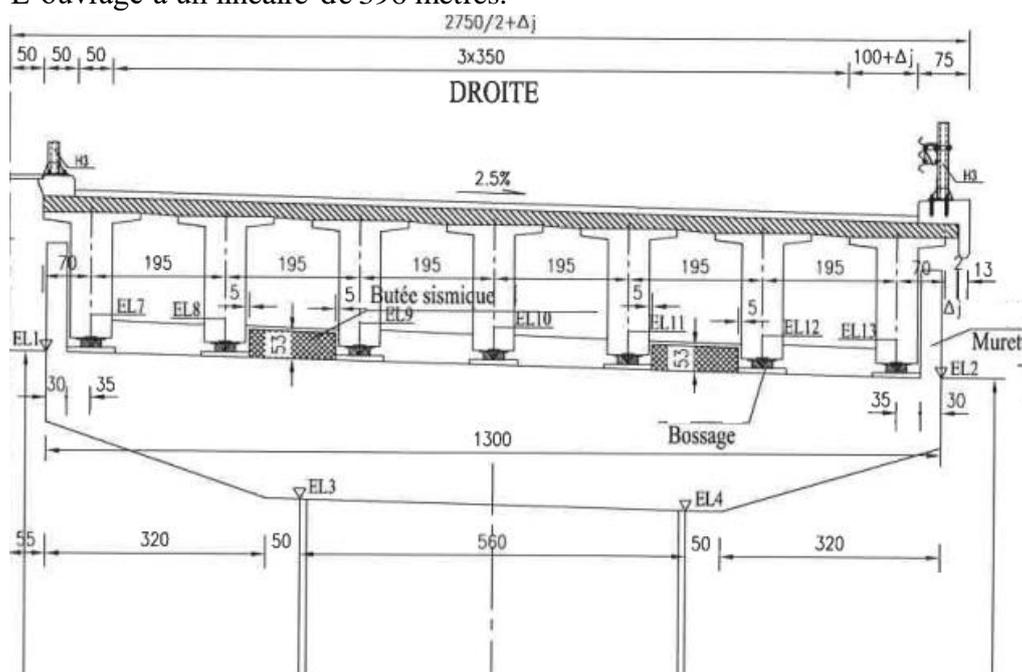


Figure3- 1-Travée de la partie droite-

3 Localisation de l'ouvrage :

Le pont au PK93+296 est prévu pour le franchissement de l'Oued Mrihim. C'est un oued saisonnier alimenté par les eaux météoriques, donc l'écoulement de cet oued est fortement influencé par les saisons, souvent sec en saison sèche. Pendant notre investigation sur site, il n'y avait pas d'eau dans l'oued. Le profil du lit de l'oued est d'une largeur de 26m au sommet, d'une largeur de 4m au fond et d'une profondeur de 5m. Le lit de cet oued est assez large et régulier, le profil du lit est bien marqué.

Il n'y a pas de signes d'érosion visibles. Sur les virages de l'oued sont de vastes terrains incultes en sol argileux meuble, peu de caillou. L'eau coule du côté gauche au côté droit du tracé.



Figure3- 2-Viaduc PK 93+296

4 Condition de franchissement :

L'oued Mrihim à franchir à un bassin versant d'environ 29km². Le débit attendu est de 136m³/s avec une vitesse d'écoulement de 2,38m/s. Le niveau de crue attendu est de 343,727m.

5 Le Tracé en plan de l'ouvrage :

Le tracé en plan est la ligne définissant la géométrie de l'axe de la voie portée, dessinée sur un plan de situation et repérée par les coordonnées de ces points caractéristiques.

Dans notre cas la longueur totale du pont est de 405.50m.

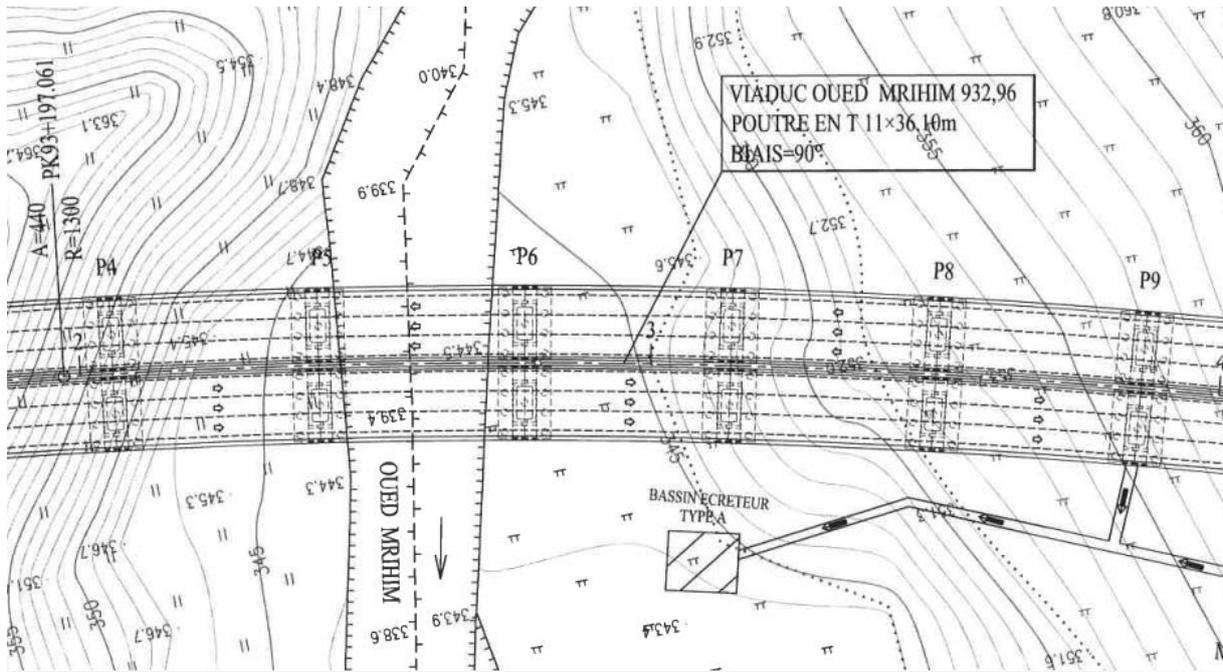


Figure3- 3-La vue en plan

6 Coupe longitudinale de nombre de travées :

C'est la ligne située à l'extrades de l'ouvrage définissant, en élévation le tracé en plan. Il est défini en tenant compte de nombreux paramètres liés aux contraintes fonctionnelles de l'obstacle franchi ou aux contraintes naturelles, et en fonction du type prévisible de l'ouvrage de franchissement. Le viaduc étudié présente 11 travées de 36,10m.

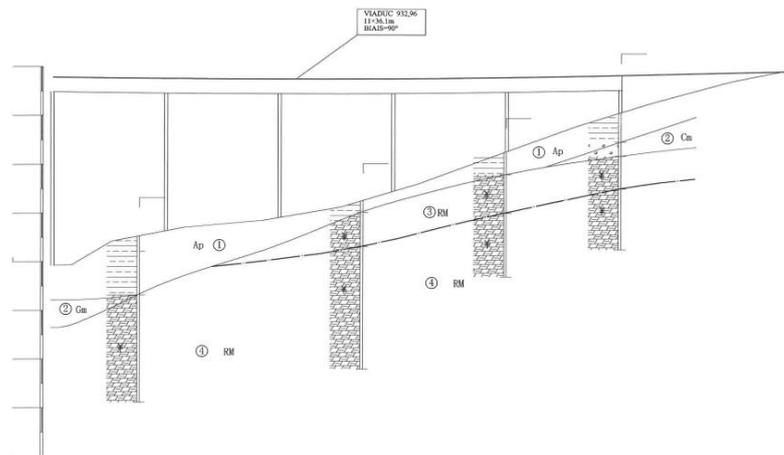


Figure3- 4-Coupe longitudinale (la partie à gauche)

7 Vue en élévation :

La vue en élévation est montrée le nombre des poutres et l'inter distance entre elles.

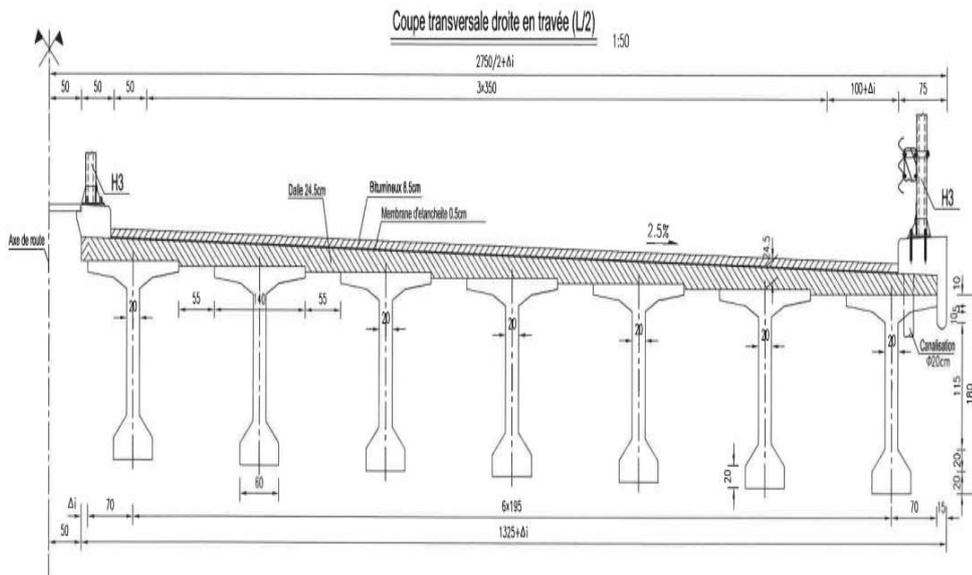


Figure3- 5--Coupe transversale droite en travée (1/2)

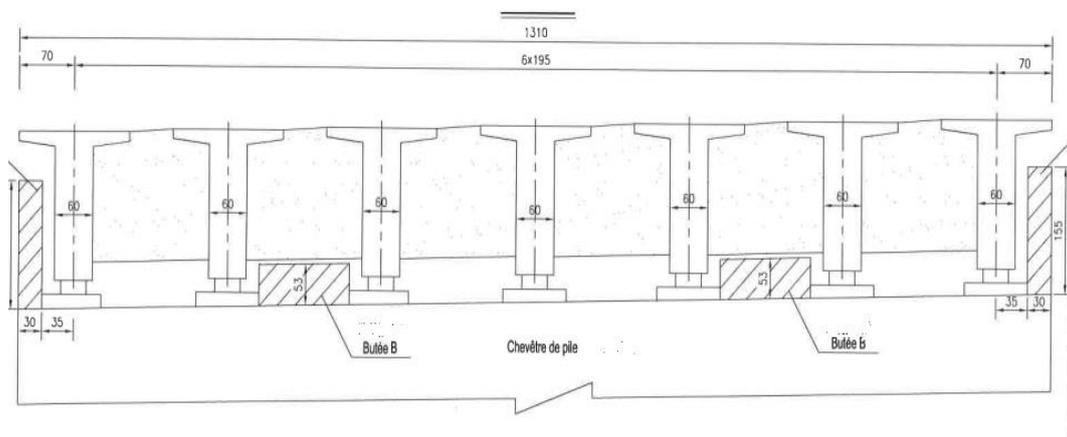


Figure3- 6-Plan de ferrailage des butées sismiques de la pile

8 Matériel utilisé :

8.1 Matériel de chargement :

Quatre (04) camions, remplis de sable, d'un poids total de 126 T ont été utilisés dans les différents cas de chargement de l'ouvrage. Chaque camion comporte trois essieux dont les deux essieux arrière ont une charge d'environ 25 T. les camions et les essieux ont été pesés conformément à la procédure.

8.2 Matériel de mesure des déplacements :

Les déplacements du tablier ont été mesurés sur la poutre de rive (L1) et sur la poutre centrale (L4) relatives aux deux premières travées du côté gauche de l'ouvrage uniquement.

A ce sujet, le maître de l'œuvre a rappelé dans sa note d'observation les spécifications du guide du SETRA (Mars 2004) indiquant que toutes les travées et tous les appuis de l'ouvrage devaient être testés.

8.3 Fleximètres-Centrale d'acquisition pour la mesure des déplacements des appuis :

La mesure des déplacements d'appuis a été faite avec des Fleximètres de la société KYOWA permettant une précision de 1/100ème de millimètre. Les Fleximètres sont reliés à une centrale d'acquisition avec lecture digitale des valeurs.



Figure3- 7-Le système d'acquisition avec les Fleximètres



Figure3- 8-Les Fleximètres installés au droit des appareils

8.4 Niveau et mire pour la mesure du déplacement à mi travée :

Le groupement a utilisé, pour la détermination des déplacements à mi travée, un niveau de type NA02 portant le numéro de série 5580850 du fabricant LEICA et une mire de deux (02) mètres de hauteur.



Figure3- 9-levé topographique par le niveau

A ce sujet, on rappelle que le Groupement a initialement prévu dans sa procédure l'utilisation de deux niveaux de haute précision avec micromètre optique et deux mires invar. Le BCS quant à lui, a mis l'accent sur la nécessité d'utiliser deux niveaux et deux mires pour éviter les erreurs liées à leurs déplacements respectifs.

On note qu'en raison de la pente du tablier, la hauteur de la mire (02 mètres) est insuffisante pour permettre la lecture à hauteur d'homme depuis le niveau. Cette insuffisance a obligé l'opérateur à effectuer des lectures sur le niveau en étant en position complètement penchée.

9 Opérations préalables à l'épreuve :

9.1 Inspection préalable de l'ouvrage :

Cette épreuve de chargement est la première réalisée au niveau de la section W8. Le BCS a fait une visite d'inspection de l'ouvrage en date du 20/05/2014 c'est-à-dire une journée avant la date prévue de l'essai, conformément aux spécifications du marché. Aucune remarque particulière en ce qui concerne l'aspect extérieur des poutres ou la déformation des appareils d'appui lors de cette inspection.

9.2 Pesage des camions de chargement :

Quatre camions à benne de types ShanQi remplis de sable ont été utilisés pour les épreuves.



Figure3- 10-les camions à benne

Les camions ont été pesés sur un pont bascule avant le début du chargement, les poids par camion sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau3- 1-Les poids par camion

N° camion	Poids Total (T)	Charges des deux essieux arrière (T)	Charge de l'essieu avant (T)
1	32,08	25,82	6,26
2	32,99	26,32	6,67
3	30,44	24,22	6,22
4	31,16	24,92	6,24

9.3 Installation des échafaudages :

Pour cet essai, les échafaudages ont été prévus uniquement au droit des piles N°1 et N°2 pour permettre l'installation des capteurs des déplacements au niveau des appuis.



Figure3- 11-Installation des échafaudages

9.3.1 Déroulement des épreuves :

9.3.1.1 Préchargement :

Dans cette phase, le Groupement a procédé à la mise en place des quatre camions pendant dix minutes au droit des appuis de la culée N°1 et pile N°2. Cette phase permet l'élimination des déformations résiduelles au niveau des appuis. A noter que les camions ont été placés de telle sorte que les essieux arrière soient positionnés au niveau des appuis comme illustrées sur la photo ci-après.



Figure3- 12-la positionnement des camions au niveau des appuis

9.3.1.2 Chargement :

Deux cas de chargement sont appliqués :

- Le premier cas de chargement consiste à mettre en place les camions en rive du tablier au milieu de la poutre L1, suivant la procédure et la note de calcul du groupement. On rappelle que cette étape a pour durer 10 minutes.



Figure3- 13-1er cad de chargement(rive)

- Le deuxième cas de chargement consiste à mettre en place les camions au-dessus de la poutre centrale (L4) et ce suivant la procédure et la note de calcul du groupement.



Pour chaque cas de chargement, des mesures de déplacement ont été relevées sur chaque point de mesure (à mi travée des poutres L1 et L4 et au droit des appareils d'appui de ces poutres). Ces mesures ont été prises dix minutes après l'installation du chargement et dix minutes après le déchargement.

On rappelle que ces deux cas de chargement ont été effectués uniquement pour les deux premières travées du tablier gauche du Viaduc PK93,296.

9.3.1.3 Déchargement :

Comme indiqué ci-dessus, dix minutes après déchargement des deux cas de chargement, les mesures des déplacements ont été faites au droit des points de mesure.

Chapitre 4

La modélisation numérique du viaducs Pk 93 et leur Calculs

Modélisation :

1 C'est quoi la modélisation ?

La modélisation d'une structure c'est la conception d'un modèle dans un logiciel de calcul de structure comme SAP2000 ou Autodesk Robot qui utilise de moyen mathématique, géométrique, 3D, éléments finis ... pour simuler le comportement de la structure aux charges en fonction des matériaux de sa construction et de ces dimensions avant même qu'elle soit construite.

2 Code de calcul SAP2000 :

SAP2000 (Structural Analysis Program) est un logiciel développé par Computers and Structures, Inc. (CSI) depuis 1975 pour Windows.

Ce logiciel permet le calcul des structures d'ingénieur que sa soit dans le domaine du bâtiment

ou des travaux publique (Pont, Barrage, Château d'eau ...).

En utilisant le principe des éléments finis ce logiciel peut calculer les effort interne d'une structure que sa soit pour les effort statique ou dynamique et quelle que soit le matériau utilisé pour sa construction (Béton Armé, Charpente métallique...).

3 Les Etapes à suivre pour la modélisation de notre structure :

L'ouvrage a été réalisé en choisissant le modèle « Blank », les étapes suivies pour la Modélisation sont indiquées comme suit (figure 4.1) : Avant de choisir notre modèle avec lequel nous analysons la travée, on doit d'abord changer l'unité au « KN, m, C » et ensuite le choix du modèle « Blank » et sélectionner, soit immédiatement par la barre des tâches ou en cliquant sur « File » « New Model ».

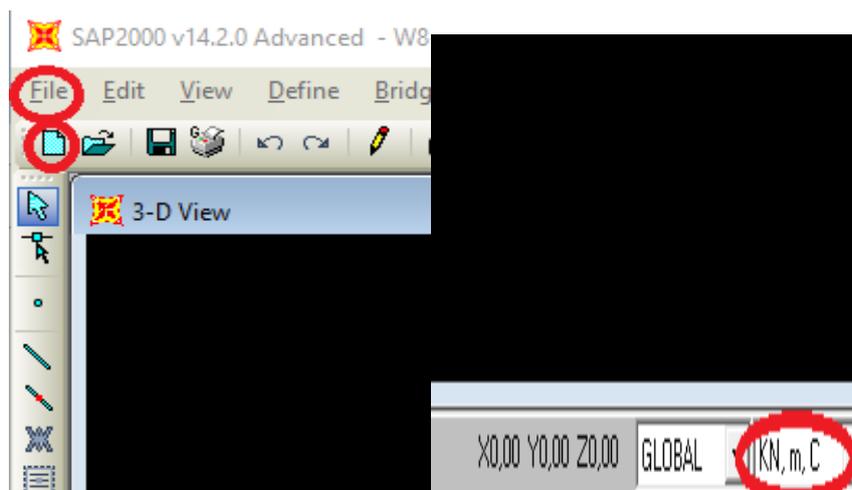


Figure4- 1-Choix d'unités et du Modèle

Dans ce cas, le modèle « **Blank** » est pris comme choix. On passe ensuite par la description « **Bridge** » pour le choix de la sous-tâche « **Bridge Wizard** », dans laquelle on trouve toutes les étapes nécessaires pour la modélisation du pont.

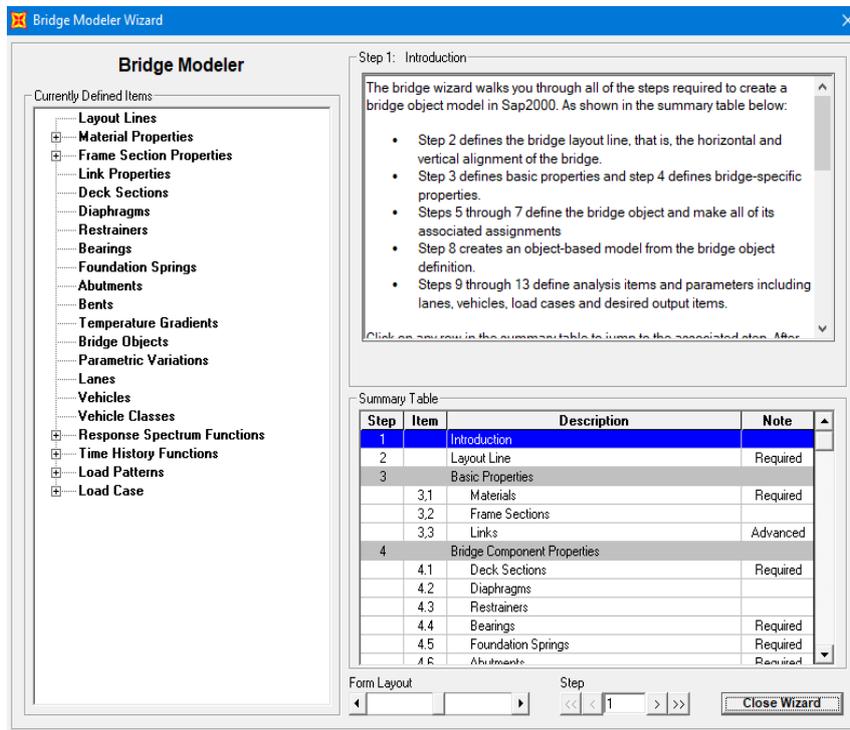


Figure4- 2- Représentation de la fenêtre (Bridge Wizard)

Après avoir cliqué sur OK on va sur : Bridge Wizard /Materials Proprietes <Modifie/Show Material...

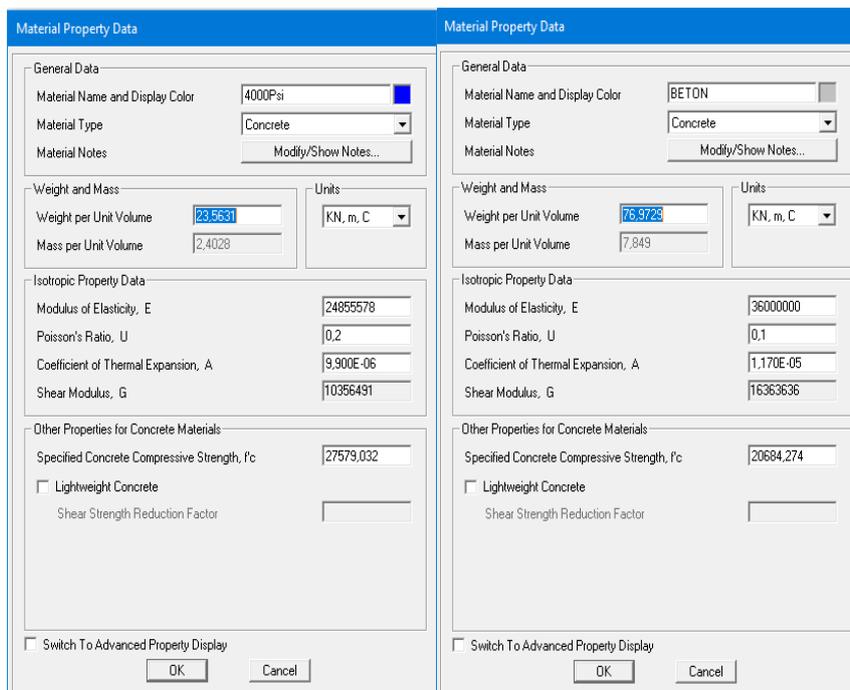


Figure4- 3- Tableau du matériau

3.1 Modélisation de la poutre :

Les poutres constituant le tablier sont modélisées de la manière suivante.

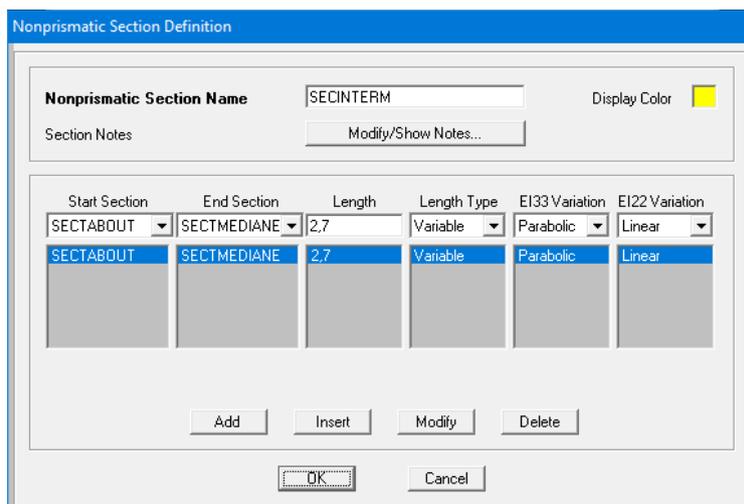
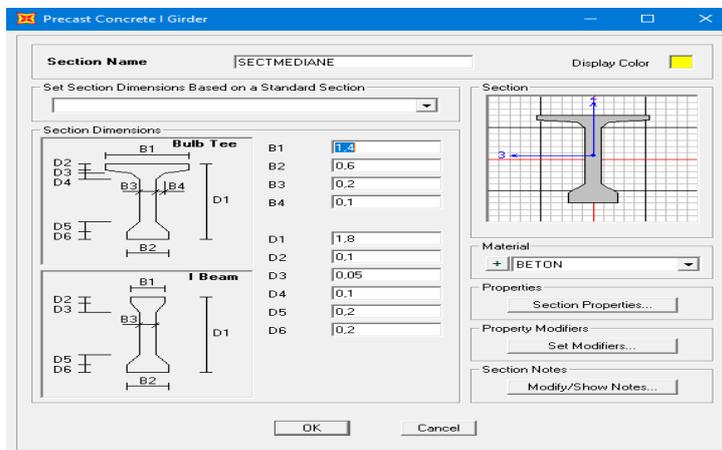
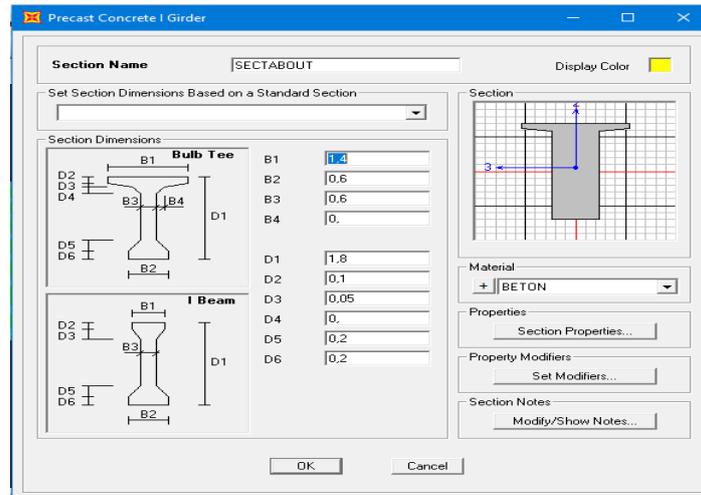


Figure4- 4-Tableau des sections des poutres (Médiane & intermédiaire)

3.2 Modélisation du tablier :

Le tablier est défini par la description « **Layout Line** » représenté dans le tableau de la fenêtre précédente, et dans laquelle on fait entrer la valeur initiale et finale de toute la longueur du tablier, comme indiqué dans la figure suivante :

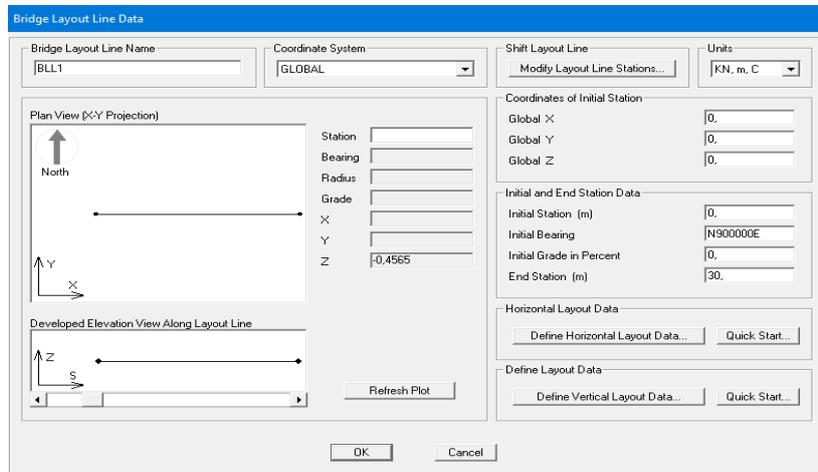


Figure4- 5-Modélisation du tablier

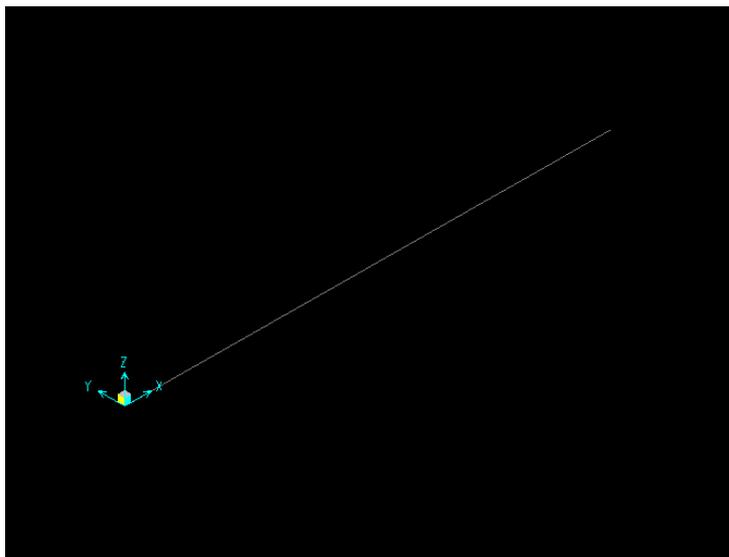


Figure4- 6-Représentation du la longueur du tablier

Pour analyser correctement le tablier, l'utilisateur devra utiliser des combinaisons dans l'état limite ultime (ELU) et dans l'état limite de service (ELS), et pour les définir on doit passer d'abord par la description du chargement nécessaire dans l'étude, calculé dans le Chapitre précédent (II).

C'est la raison pour laquelle, on choisit la description « **Load Pattern Définitions** » du tableau indiqué dans la figure (3.3) et ajouter à chaque fois la charge et son type en cliquant sur « **Add New Load Pattern** », représenté comme suit :

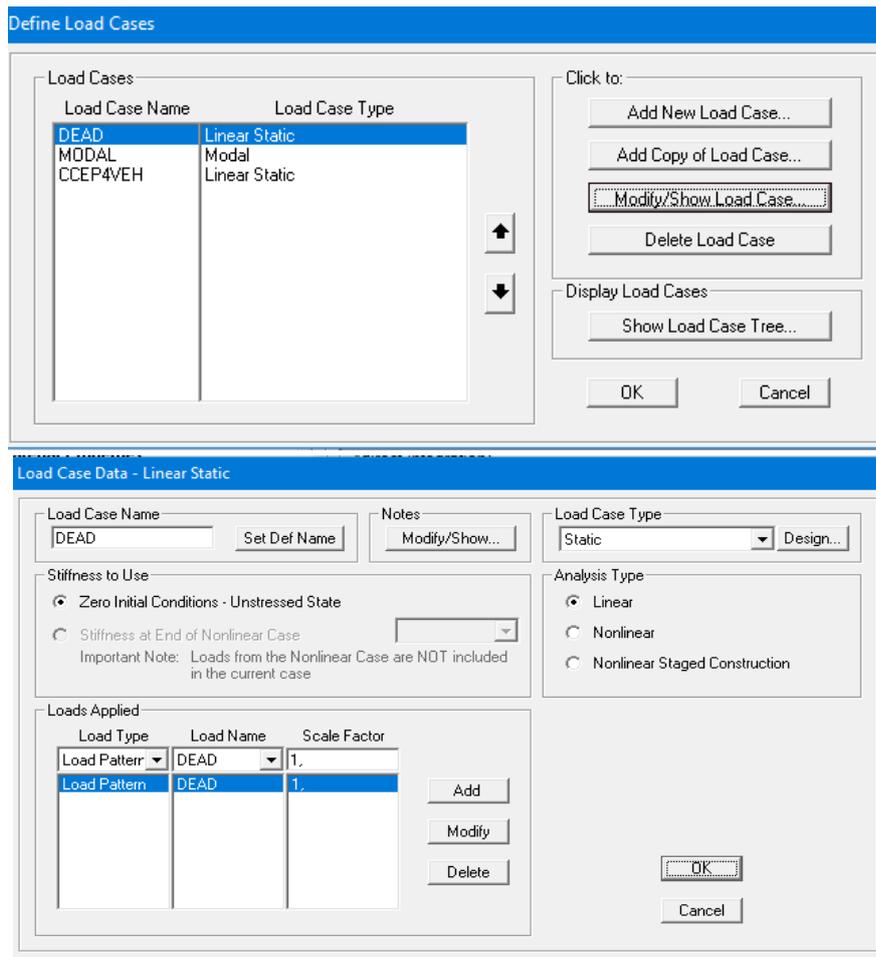


Figure4- 8-Affectation des valeurs des surcharges

La figure ci-dessous représente la configuration finale du tablier constitué de 07 poutres :

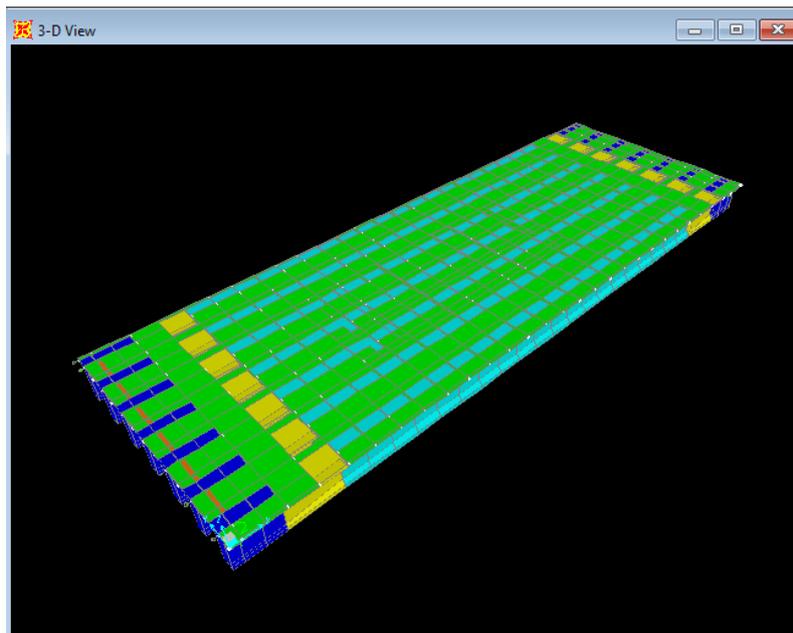


Figure4- 9-Représentation du modèle du tablier à une seule travée

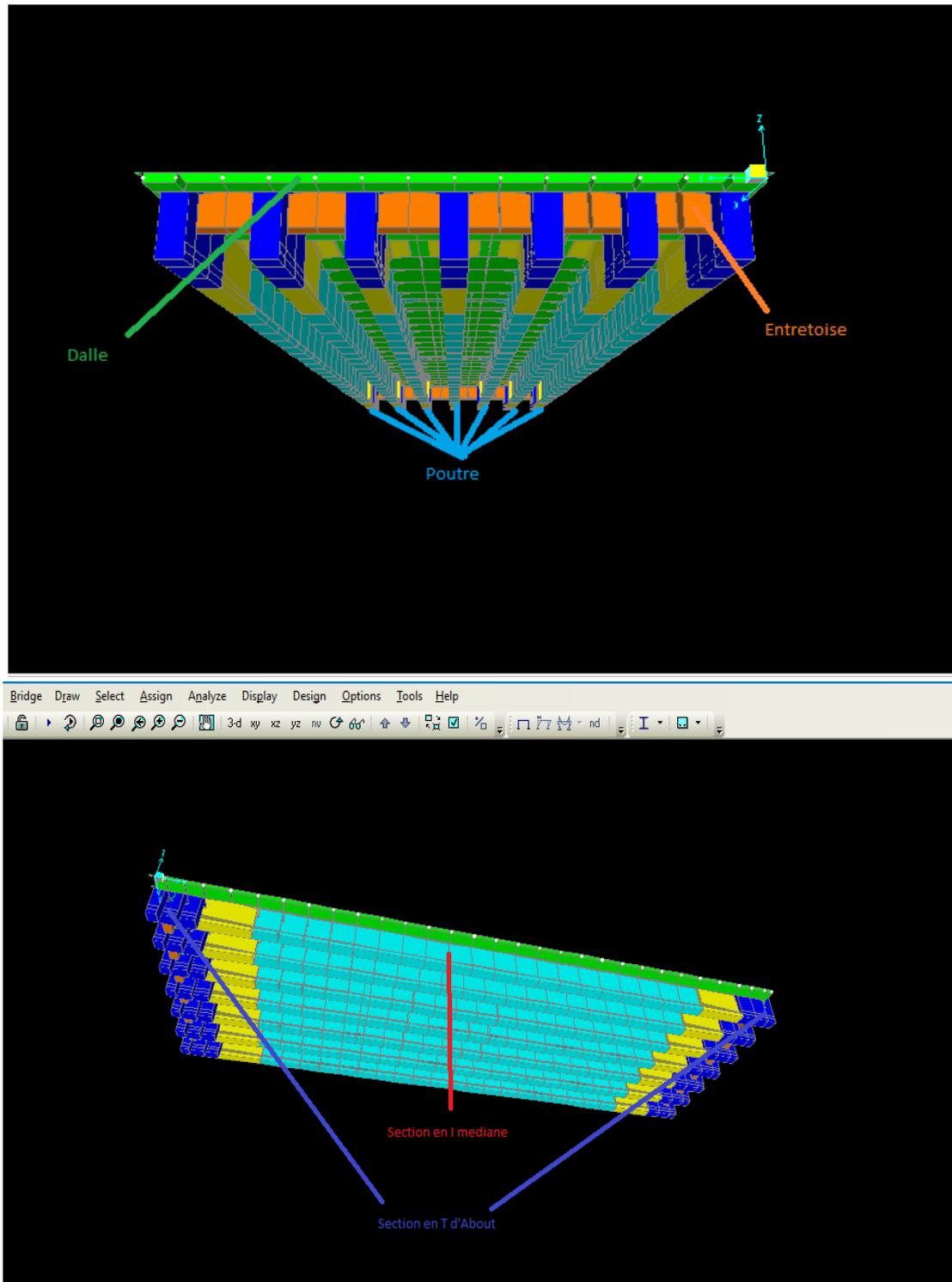


Figure4- 10-Description des différents éléments constituant l'ouvrage sous SAP2000

3.4 Déplacement en travée :

3.4.1 Déplacement en travée dans les poutres :

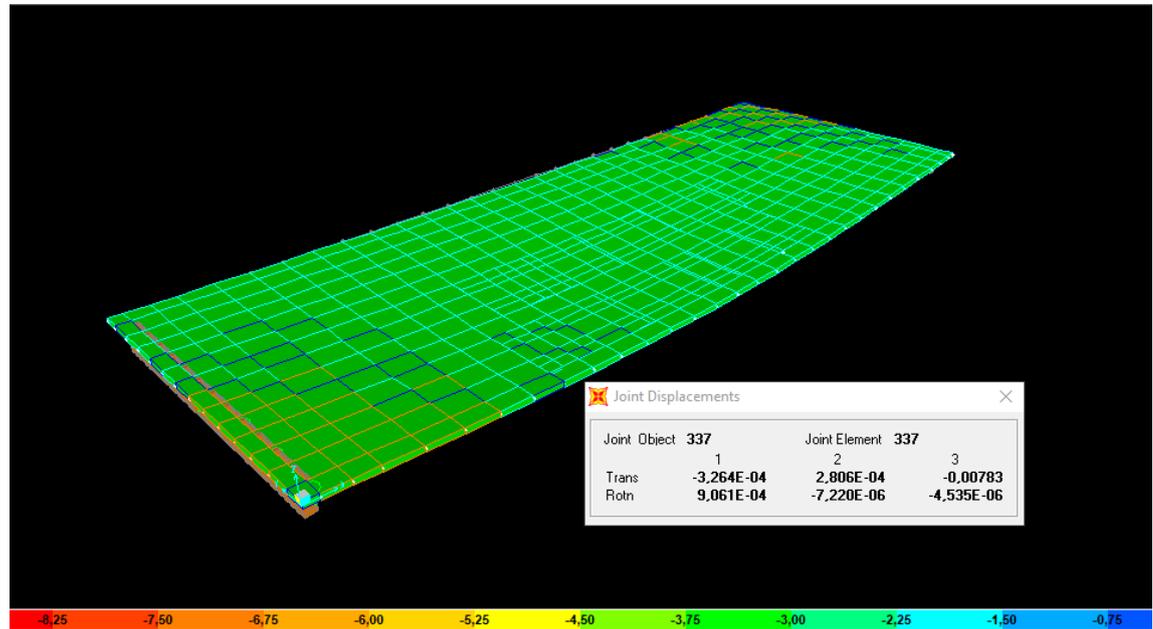


Figure4- 11-Déplacement de la poutre centrale L4

Conclusion :

La modélisation du viaduc objet de notre étude est une étape cruciale dans l'étude du comportement de l'ouvrage sous chargement statique.

Cette partie doit être minutieusement contrôlée afin d'éviter toute incohérence avec les résultats issus des épreuves de chargement.

Le modèle 3D en éléments finis doit se rapprocher le plus possible avec le comportement réel du viaduc.

Calcul :

Épreuves par poids mort sur ouvrage d'art

W8VIADUCPK93+296

1 Plans du pont :

Voir Annexe

2 Principaux matériaux utilisés :

2.1 Béton :

Les caractéristiques du béton utilisé sont :

Poutres précontraintes préfabriquées en T, et dalle en BA. RN35

Le module de déformation élastique instantané utilisé est comme :

$E_b = 3.6 \times 10^5$ MPa pour $f_{c28} = 35$ MPa (modèle 1)

$E_b = 3.7 \times 10^5$ MPa pour $f_{c28} = 38$ MPa (modèle 2)

$E_b = 3.76 \times 10^5$ MPa pour $f_{c28} = 40$ MPa (modèle 3)

Poids volumique $\gamma_b = 25$ KN/M³.

2.2 Acier (TITRE D'INFORMATION) :

Module de déformation élastique $E_s = 2.0 \times 10^5$ MPa, Poids volumique $\gamma = 7850$ kg/m³.

Barre lisse : aciers de nuance FeE235, correspondant à NF A35-015, limite élastique $f_e = 235$ MPa.

Acier tors : aciers de nuance FeE 500-3, correspondant à NF A35-016, limite élastique $f_e = 500$ MPa.

Treillis soudé : acier de nuance FeE 500-2 correspondant à NF 35-016 et à NF 35-019, limite élastique $f_e = 500$ MPa.

Tôle et profilé d'acier : correspondants aux normes et réglementations en vigueur.

2.3 Système de précontrainte :

Câble de précontrainte : câble à très basse relaxation TBR conforme à NF XP A 35-045, résistance normale $f_{prg} = 1860$ MPa, diamètre nominal d'un toron $\phi = 15.2$ mm, surface nominale d'un toron $A_p = 140$ mm², module de déformation élastique $E_p = 1.95 \times 10^5$ MPa, coefficient de relaxation $p_{1000} \leq 2.5\%$.

Ancrage de précontraint : ancrage type OVM et équipements de précontrainte par post tension.

3 Position transversale des points de mesure sur le pont :

Au niveau de chaque travée, on choisit une poutre de rive et une poutre centrale pour réaliser l'essai de chargement. Afin de faciliter la distinction, on fait une numérotation sur les travées, les poutres et les points de mesure. On voit le schéma de principe de numérotation dans la figure1 :

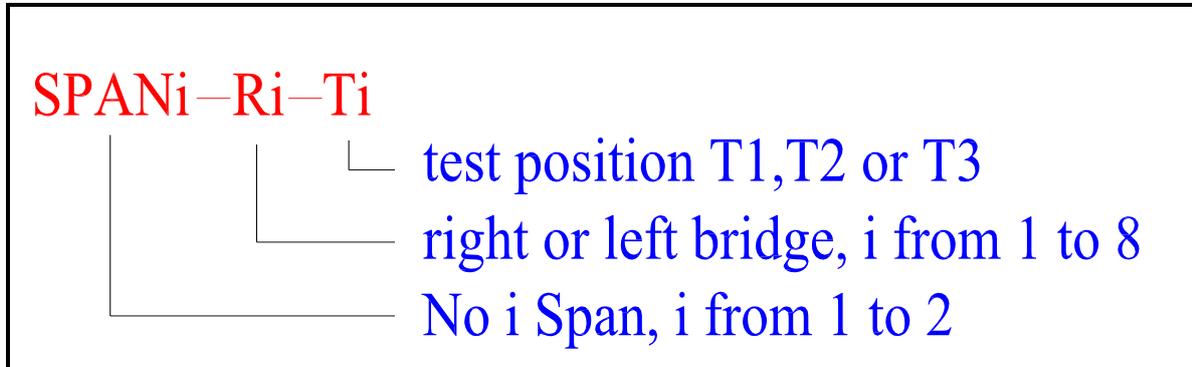


Figure4- 12-Principe de numérotation des points de mesure

On voit le schéma de numérotation sur les travées dans la figure 2 (la présente figure est un schéma qui permet le repérage des différents appuis d'un pont typique.

Le sens de la numérotation des travées (SPANi) est fonction de l'ordre croissant des PK, n est le nombre des travées.

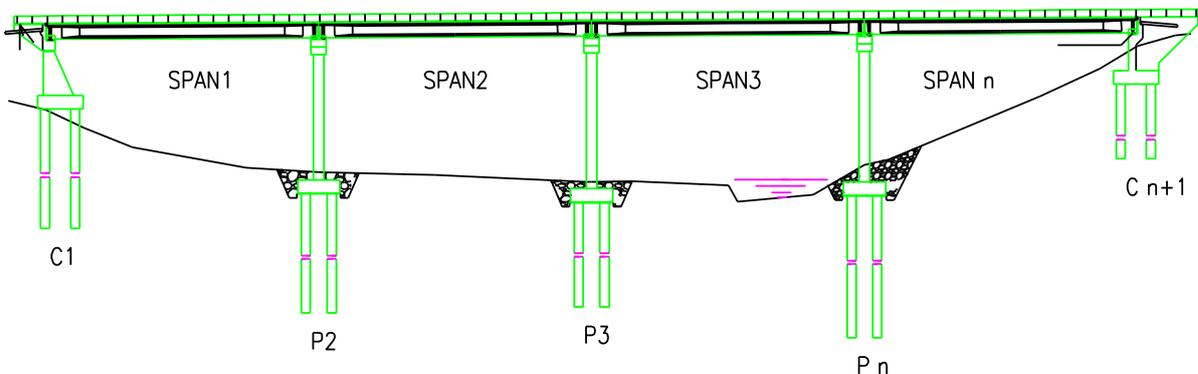


Figure4- 13-Schéma de numérotation des travées (SPAN1, SPAN2)

Les poutres sont numérotées de l'intérieur vers l'extérieur comme présenté dans la figure 3 (la présente figure est un schéma d'un pont typique

. L pour la gauche, R pour la droite.

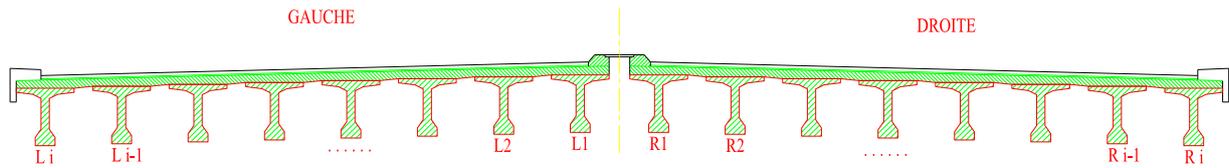


Figure4- 14-Schéma de numérotation des poutres

La position des points de mesure d'une poutre en est présentée dans la figure 4, où T1 et T3 sont les points de mesure des déformations des appuis, T2 est le point de mesure des déformations au milieu de travée.

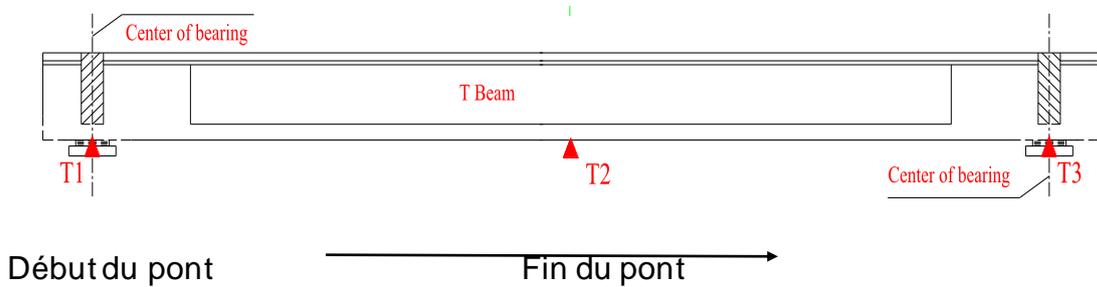
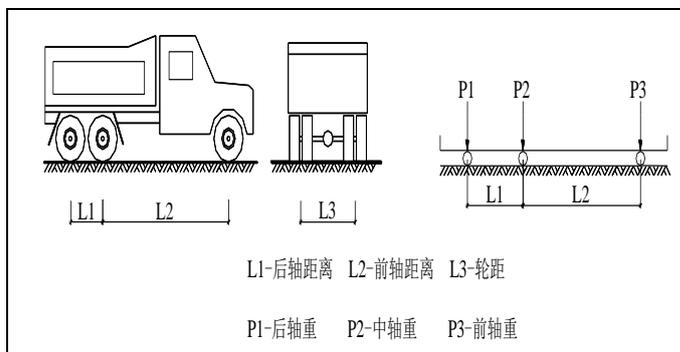


Figure4- 15-Plan d'implantation des points de mesure d'une seule poutre

4 Charge du véhicule d'essai :

4.1 Plan du véhicule :



L2 est l'empattement avant,

L3 est la voie,

P1 est la charge à l'essieu arrière,

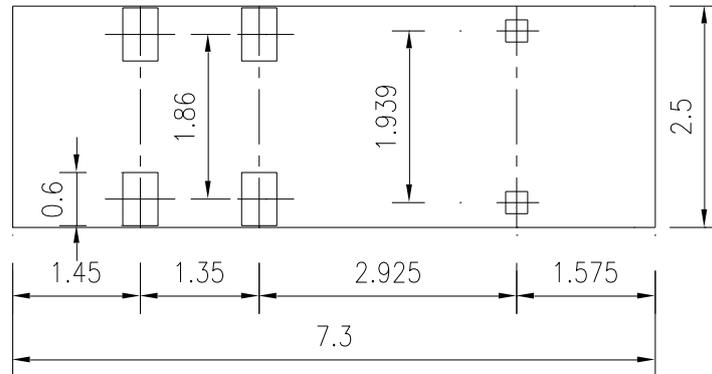
P2 est la charge à l'essieu milieu,

P3 est la charge à l'essieu avant.

L1 est l'empattement arrière,

4.2 Dimensions du véhicule :

Dans le plan ci-dessous, l'unité de la dimension est exprimée en mètre.



4.3 Charge à l'essieu du poids-lourd de trois essieux :

Le tableau ci-après montre la répartition des charges de camions par essieux ainsi que la charge totale de ces camions. Elles sont comme suit :

Tableau 4- 1-Charge à l'essieu du poids-lourds de trois essieux

État de charge	Poids total	Charge à l'essieu avant	Charge des deux essieux arrières P1
	T	T	T
Sans charge	12.45	5.1	7.4
Avec charge	30.5	7.4	23.1

5 Données des essais pour chaque cas :

N.B. : deux cas de chargement ont été adoptés : un premier chargement excentré relatif à la poutre de rive et un deuxième chargement centré sur la poutre centrale.

NOTA :

Cependant afin de pouvoir établir une étude comparative entre les résultats de notre étude (PFE) et les résultats des mesures (essai de charge), nous avons conservé les mêmes dispositions des camions pour les 2 types de chargement à savoir :

Cas de charge N° 1 : chargement excentré dû à 4 camions utilisés lors de l'essai

Cas de charge N° 2 : chargement centré dû à 4 camions utilisés lors de l'essai.

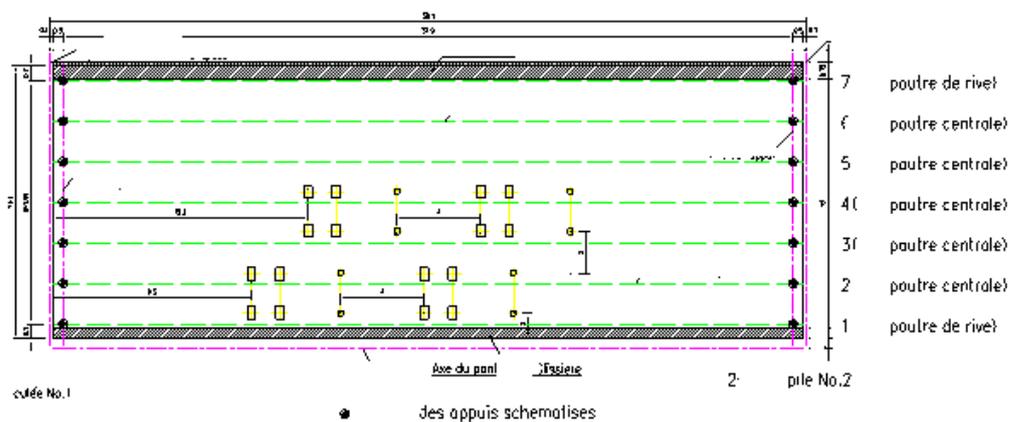
Ces dispositions ayant été utilisées lors de l'épreuve de charge.

Aussi afin de valider notre modèle de calcul, un paramétrage adéquat portant sur la variation du module d'élasticité instantanée du béton E_b a été adopté et cela en tenant compte des différentes valeurs des résistances du béton dont : $F_{c28} = 35, 38$ et 40 MPa qui sont liées par la relation.

$$11000^3 \nu - f_{c28}$$

5.1 Cas N°1-1 : chargement sur la poutre L1 (poutre de rive) de la travée SPAN1, valable pour toutes les travées de rive.

5.1.1 Plan d'implantation de la charge d'essai « excentrée »



5.1.2 Valeur de la charge d'essai :

Les valeurs de la charge d'essai considérée étant celles relatives aux poids des camions définis ci haut.

5.1.3 Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (voir annexe) :

Cas N°1-1a Tableau des déformations au milieu de travée « ES = 36620 MPa »

Tableau 4- 2-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN1-L1-T2	SPAN1-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	10.77	8.24

Cas N°1-1b Tableau des déformations au milieu de travée « ES = 37000 MPa »

Tableau 4- 3-déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN1-L1-T2	SPAN1-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	10.23	7.83

Cas N°1-1c Tableau des déformations au milieu de travée « ES = 37620 MPa »

Tableau 4- 4-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN1-L1-T2	SPAN1-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	9.70	7.43

5.1.4 Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :

Tableau 4- 5-Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai

	Appui de la culée N°1	Appui de la pile N°2
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L1 (kN)	161.858	121.503
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L2 (kN)	157.725	118.610
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L3 (kN)	144.679	123.845
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L4 (kN)	107.005	105.221
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L5 (kN)	72.744	74.437
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L6 (kN)	52.686	53.158
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L7 (kN)	-37.266	-36.205

5.1.5 Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :

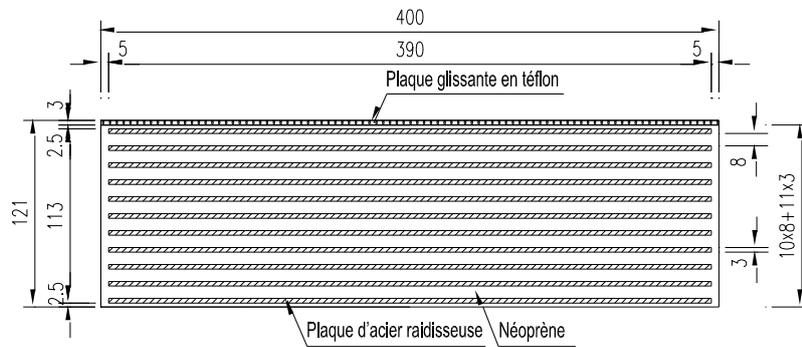
5.1.5.1 Type des appuis :

5.1.5.2 A : Appuis de la culée

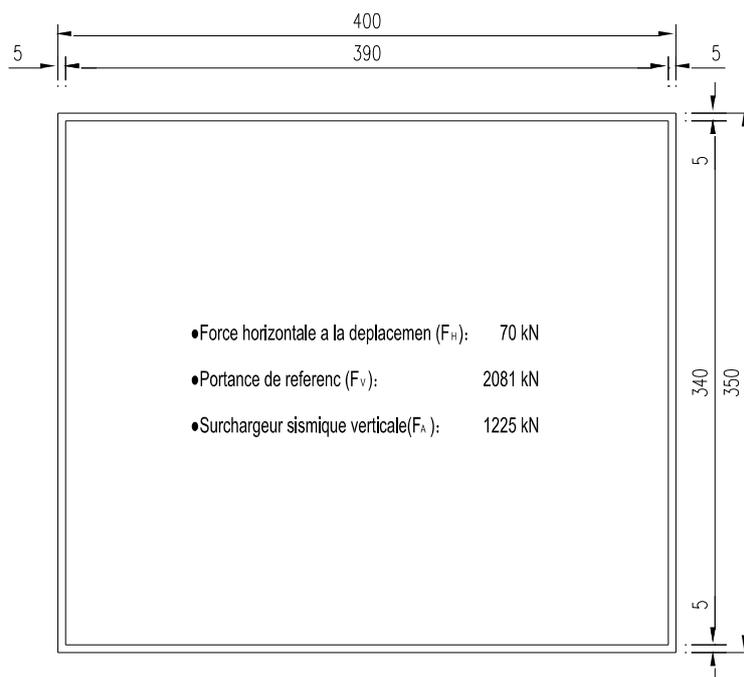
A. Appuis de la culée C1, JBZD350×400×80

Schéma d'aménagement des plaques d'appui rectangulaires en néoprène JBZD350x400x80

Elévation
1:50



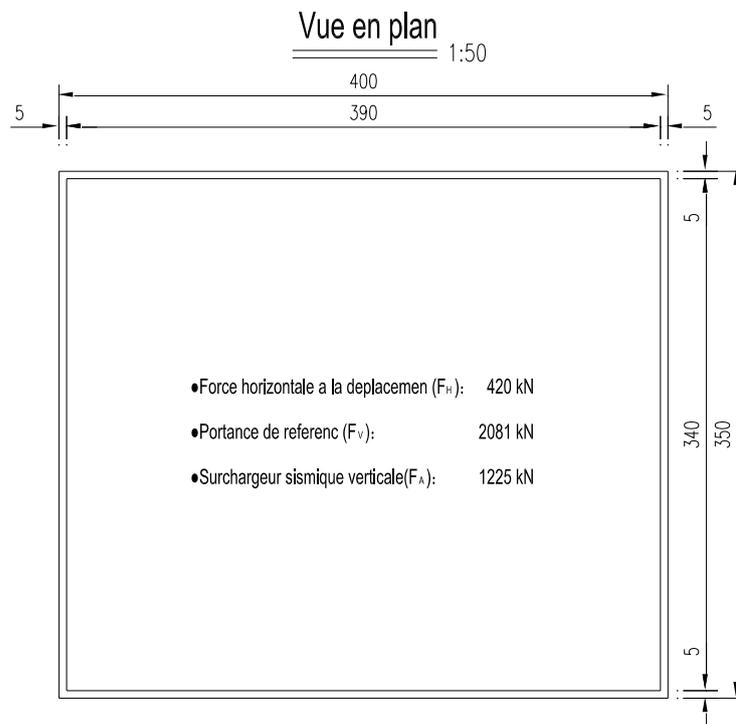
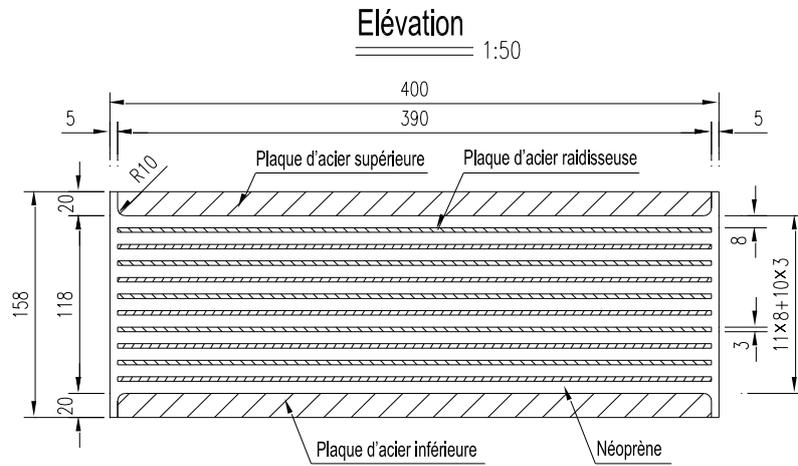
Vue en plan
1:50



5.1.5.3 B : Appui de la pile :

B. Appui de la pile P2, JBZC350×400×88

Schéma d'aménagement des plaques d'appui rectangulaires en néoprène JBZC350x400x88



5.1.5.4 Calcul de valeurs des paramètres :

Les valeurs des paramètres de la déformation verticale des appuis de l'essai :

Tableau 4- 6-Paramètre des appareils d'appuis sur le point de mesure T1

Paramètre	Valeur	Unité
G_{ELU}	0.9	Mpa
E_b	2000	Mpa
t_i	8	Mm
a'	340	Mm
b'	390	Mm
t_e	8	Mm

Tableau 4- 7-Paramètre des appuis sur le point de mesure T3

Paramètre	Valeur	Unité
G_{ELU}	0.9	Mpa
E_b	2000	Mpa
t_i	8	Mm
a'	340	Mm
b'	390	Mm
t_e	11.2	Mm

5.1.5.5 Valeur théorique du calcul :

Cas N°1-1 Tableau de l'affaissement des points de mesure

Tableau 4- 9-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN1-L1-T2	SPAN1-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	5.06	8.95

Cas N°1-2 b Tableau des déformations au milieu de travée pour ES=37000 MPa

Tableau 4- 10-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN1-L1-T2	SPAN1-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	4.19	7.42

Cas N°1-2 c Tableau des déformations au milieu de travée pour ES=37620MPa

Tableau 4- 11-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN1-L1-T2	SPAN1-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	4.13	7.30

5.2.4 Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :

	Appui de la culée N°1	Appui de la pile N°2
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L1 (kN)	10.215	3.062
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L2 (kN)	111.107	93.379
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L3 (kN)	145.408	105.869
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L4 (kN)	166.173	115.747
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L5(kN)	145.408	105.869
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L6(kN)	111.107	93.379
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L7(kN)	10.215	3.062

5.2.5 Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :

5.2.5.1 Type des appuis :

Comme Cas N°1-1.

5.2.5.2 Calcul de valeurs des paramètres :

Comme Cas N°1-1.

5.2.5.3 Valeur théorique du calcul :

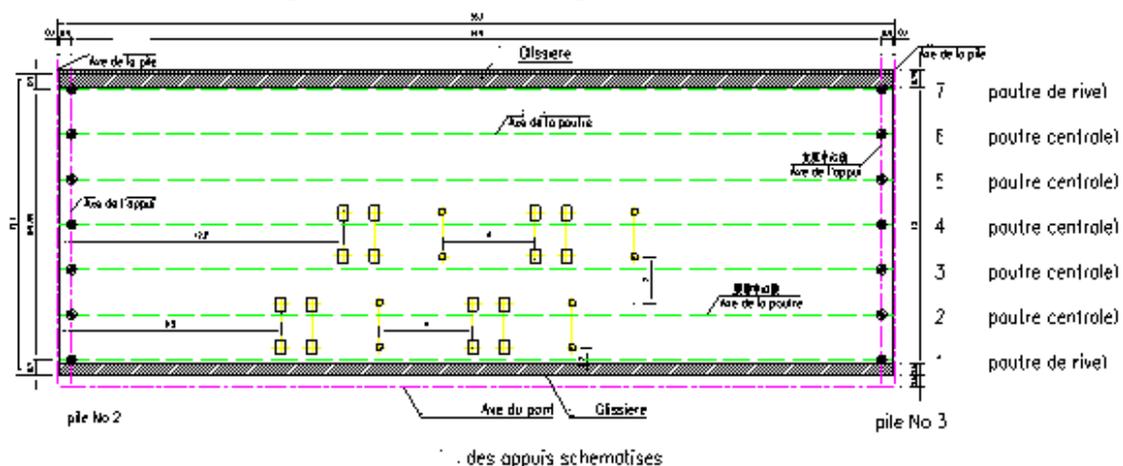
Cas N°1-2 Tableau de l'affaissement des points de mesure

Tableau 4- 12-L'affaissement des points de mesure

Point de mesure	Réaction des appuis (kN)	Déformation sur les points de mesure sous la charge d'essai (mm)
SPAN1-L1-T1	10.215	0.0150
SPAN1-L1-T3	3.062	0.0049
SPAN1-L4-T1	166.173	0.244
SPAN1-L4-T3	115.747	0.187

5.3 Cas N°2-1 : chargement sur la poutre L1 (poutre de rive) de la travée SPAN2, valable pour toutes les travées centrales.

5.3.1 Plan d'implantation de la charge d'essai :



5.3.2 Valeur de la charge d'essai :

Les valeurs de la charge d'essai considérée étant celles relatives aux poids des camions définis ci haut

5.3.3 Déformation des points de mesure sous la charge d'essai :

Cas N°2-1a Tableau des déformations au milieu de travée pour ES= 36620 MPa

Tableau 4- 13-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN2-L1-T2	SPAN2-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	10.77	8.24

Cas N°2-1b Tableau des déformations au milieu de travée pour ES = 37000 MPa

Tableau 4- 14-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN2-L1-T2	SPAN2-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	10.23	7.83

Cas N°2-1c Tableau des déformations au milieu de travée pour ES= 37620 MPa

Tableau 4- 15-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN2-L1-T2	SPAN2-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	9.70	7.43

5.3.4 Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :

Tableau 4- 16-Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai

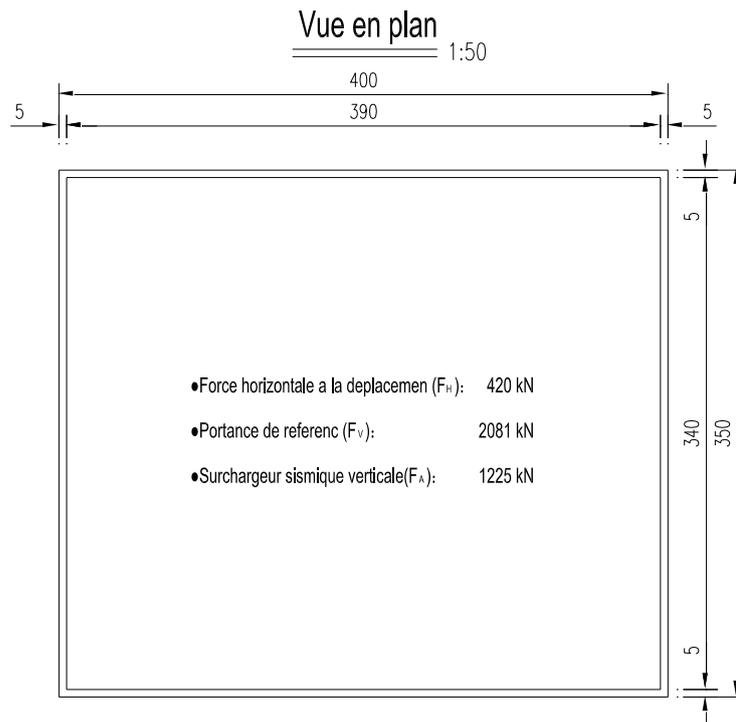
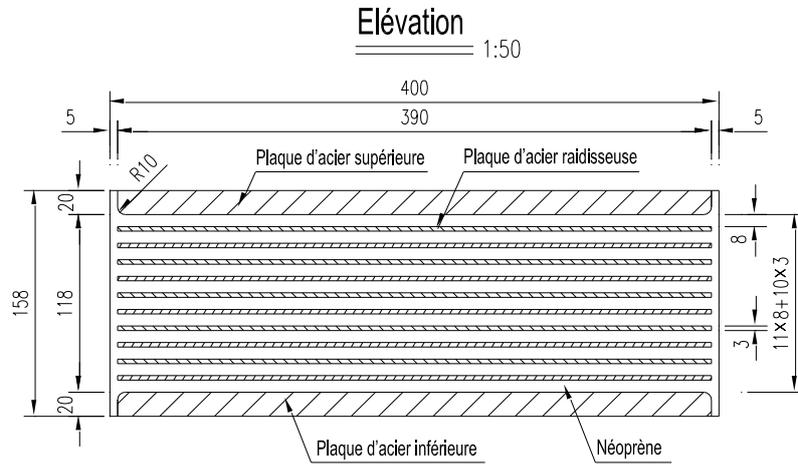
	Appui de la PILE N°1	Appui de la pile N°2
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L1 (kN)	161.858	121.503
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L2 (kN)	157.725	118.610
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L3 (kN)	144.679	123.845
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L4 (kN)	107.005	105.221
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L5(kN)	72.744	74.437
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L6(kN)	52.686	53.158
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L7(kN)	-37.266	-36.205

5.3.5 Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :

5.3.5.1 Type des appuis :

JBZC350×400×88.

Schéma d'aménagement des plaques d'appui rectangulaires en néoprène JBZC350x400x88



5.3.5.2 Calcul de valeurs des paramètres :

Les valeurs des paramètres de la déformation verticale des appuis de l'essai :

Tableau 4- 17-Paramètre des appuis sur les points de mesure T1 et T3

Paramètre	Valeur	Unité
G_{ELU}	0.9	Mpa
E_b	2000	Mpa
t_i	8	Mm
a'	340	Mm
b'	390	Mm
t_e	11.2	Mm

5.3.5.3 Valeur théorique du calcul :

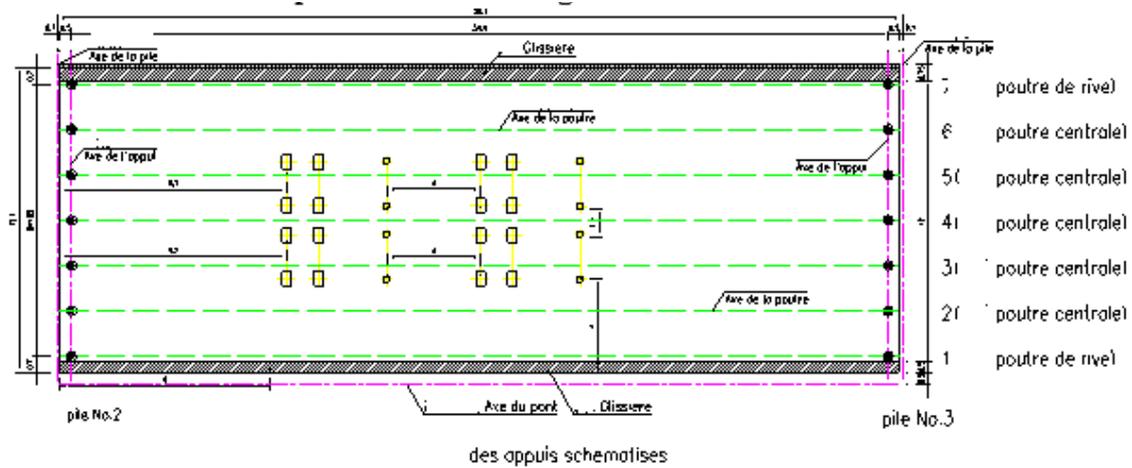
Cas N°2-1 Tableau de l'affaissement des points de mesure

Tableau 4- 18-L'affaissement des points de mesure

Point de mesure	Réaction des appuis (kN)	Déformation sur les points de mesure sous la charge d'essai (mm)
SPAN2-L1-T1	161.858	0.262
SPAN2-L1-T3	121.503	0.196
SPAN2-L4-T1	107.005	0.173
SPAN2-L4-T3	105.221	0.170

5.4 Cas N°2-2 : chargement sur la poutre L4 (poutre centrale) de la travée SPAN2, valable pour toutes les travées centrales.

5.4.1 Plan d'implantation de la charge d'essai :



5.4.2 Valeur de la charge d'essai :

Les valeurs de la charge d'essai considérée étant celles relatives aux poids des camions définis ci haut

5.4.3 Déformation des points de mesure sous la charge d'essai :

Cas N°2-2 a Tableau des déformations au milieu de travée pour ES= 36620 Mpa

Tableau 4- 19-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN2-L1-T2	SPAN2-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	5.06	8.95

Cas N°2-2b Tableau des déformations au milieu de travée pour ES = 37000 MPa

Tableau 4- 20-Déformation au milieu de travée

Point de mesure	SPAN2-L1-T2	SPAN2-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	4.19	7.42

Cas N°2-2c Tableau des déformations au milieu de travée pour ES = 37620MPa

Point de mesure	SPAN2-L1-T2	SPAN2-L4-T2
Déformation des points de mesure sous la charge d'essai (mm)	4.13	7.30

5.4.1 Valeur de réaction des appuis sous la charge d'essai :

5.4.2 Calcul de l'affaissement sous la charge d'essai :

Tableau 4- 21-L'affaissement sous la charge d'essai

	Appui de la PILE N°2	Appui de la pile N°3
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L1 (kN)	10.215	3.062
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L2 (kN)	111.107	93.379
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L3 (kN)	145.408	105.869
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L4 (kN)	166.173	115.747
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L5(kN)	145.408	105.869
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L6(kN)	111.107	93.379
Réaction sur le point d'appui de la poutre de L7(kN)	10.215	3.062

5.4.2.1 Type des appuis :

Comme Cas N°2-1.

5.4.2.2 Calcul de valeurs des paramètres :

Identique que le cas N°2-1.

5.4.2.3 Valeur théorique du calcul :

Cas N°2-2 Tableau de l'affaissement des points de mesure

Tableau 4- 22-L'affaissement des points de mesure

Point de mesure	Réaction des appuis (kN)	Déformation sur les points de mesure sous la charge d'essai (mm)
SPAN2-L1-T1	10.215	0.0165
SPAN2-L1-T3	3.062	0.0049
SPAN2-L4-T1	166.173	0.269
SPAN2-L4-T3	115.747	0.187

5.5 Autres cas :

Le chargement du tablier droit comme celui du tablier gauche. Le chargement sur chaque travée de rive comme cas N°1-1 et N°1-2, le chargement sur chaque travée centrale comme cas N°2-1 et N°2-2.

Il faut tenir compte du sens de la position du véhicule pendant le chargement.

6 Méthode de calcul de la déformation verticale des appuis sous la charge d'essai :

Selon la norme En 1337-3, article 5.3.3.7, la déformation verticale totale des appuis sous la charge d'essai V_c est le total des déformations verticales de chaque couche, elle est exprimée par :

$$v_c = \sum \frac{F_z \cdot t_i}{A'} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S_1^2} + \frac{1}{E_b} \right)$$

Où :

V_c est la déformation verticale totale des appuis sous la charge d'essai, en mm ;

F_z est la charge verticale des appuis sous la charge d'essai, en N ;

t_i est l'épaisseur de caoutchouc d'une seule couche dans l'appui uni, en mm ;

A' est la surface valable de la couche portante (surface de plaque d'acier), en mm ;

G est la valeur nominale du module de cisaillement conventionnel des appuis, en Mpa,

ELU $G=0.9$, ELA, $G=1.2$,

E_b est le module d'élasticité de volume, en MPa

En général, on prend $E_b=2000\text{MPa}$,

S_1 est le coefficient de forme dans la couche la plus épaisse (En 1337-3 5.3.3.1), calculé par

l'expression
$$S = \frac{A_1}{l_p \times t_e} ;$$

A_1 est la surface valable des appuis, soit la surface commune entre le corps élastique et la plaque d'acier, à l'exclusion de la surface du trou qui n'est pas bouché dans la suite.

$A_1=a' \times b'$, a' est la largeur valable de l'appui (largeur de la plaque d'acier), b' est la longueur valable de l'appui (longueur de la plaque d'acier) ;

l_p est le périmètre non portant de l'appui, inclut le trou qui n'est pas bouché dans la suite. $l_p=2(a'+b')$;

t_e est l'épaisseur valable du corps élastique portant de chaque couche ; elle est l'épaisseur réelle dans l'appui uni ; on prend t_i pour la couche interne ; on prend $1.4 t_i$ pour la couche externe d'une épaisseur plus de 3mm.

CHAPITRE 5

SYNTHESE ET ANALYSE COMPARATIVE

1 Discussion et analyse Comparative des résultats :

L'analyse des résultats a porté sur la confrontation des résultats issus de la modélisation de l'ouvrage du PK93 avec ceux de l'épreuve de chargement. Les tableaux ci-après récapitulent les résultats trouvés :

Tableau5- 1-Confrontation des résultats de flèches utilisant un module de déformation de E=36 620 MPA

Module de déformation E=36 620 MPa		Flèche (mm) Travée de rive			Flèche (mm) Travée intermédiaire		
		PFE	Epreuve	%	PFE	Epreuve	%
CHARGE N° 01 (04 camions)	P-rive	10.77	9.90	8%	10.77	8.80	22,38%
	P-cent	8.24	6.89	19.59%	8.24	7.11	15.89%
CHARGE N° 02 (05 camions)	P-rive	5.06	3.16	60.12%	5.06	3.835	31.94%
	P-cent	8.95	7.11	27.87%	8.95	6.94	28.96%

Tableau5- 2- Confrontation des résultats de flèches un module de déformation de E=37000MPa

Module de déformation E=37 000MPa		Flèche (mm) Travée de rive			Flèche (mm) Travée intermédiaire		
		PFE	Epreuve	%	PFE	Epreuve	%
CHARGE N° 01 (04 camions)	P-rive	10.23	9.90	3.33 %	10.23	8.80	16.25%
	P-cent	7.83	6.89	13.64 %	7.83	7.11	10.12%
CHARGE N° 02 (05 camions)	P-rive	4.19	3.16	32.59 %	4.19	3.835	9.25%
	P-cent	7.42	7.11	4.36 %	7.42	6.94	6.91%

Tableau5- 3-Confrontation des résultats de flèches un module de déformation de E=37 620 MPA

Module de déformation E=37 620MPa		Flèche (mm) Travée rive			Flèche (mm) Travée intermédiaire		
		PFE	Epreuve	%	PFE	Epreuve	%
CHARGE N° 01 (04 camions)	P-rive	9.70	9.90	2.00 %	9.7	8.80	10.22 %
	P-cent	7.43	6.89	7.83 %	7.43	7.11	4.50 %
CHARGE N° 02 (04 camions)	P-rive	4.13	3.16	30.69 %	4.13	3.835	7.69 %
	P-cent	7.30	7.11	2.67 %	7.3	6.94	5.18 %

Notons que 03 valeurs du module de déformation ont été utilisés en vue de calibrer le modèle le plus approprié de l'ouvrage étudié. Il est à noter que dans cette analyse, on s'est basé sur la note de calcul de l'entreprise de réalisation Citic Crcc, les valeurs de flèches issues de modélisation ainsi celles des épreuves. Rappelons également que deux types de chargement ont été effectués soit 04 camions pour le chargement centré et 05 camions pour le chargement excentré. L'analyse des résultats nous a permis de relever les remarques suivantes :

- a) Les résultats du tableau N°1 montrent des écarts importants de flèches, où 7 valeurs sur 8 dépassent les 10 % de différence. Le plus grand écart a été enregistré au droit de la poutre de rive pour le cas d'un chargement de 05 camions. L'écart de flèche est de 60.12 %. Hormis l'écart le plus petit de 8% pour le cas de chargement N°1 (poutre de rive) les autres valeurs enregistrées restent relativement importantes. Nous signalons que les flèches issues de modélisation sont largement supérieures à celles des épreuves dues vraisemblablement à la valeur du module de déformation prise. Il est à noter que la valeur du module de déformation prise dans cette partie est de 36 620 MPa. Cette valeur correspond à une résistance de béton de 35MPa (28j).
- b) Cette valeur du module de déformation ($E=36\ 620$ MPa) correspond à la résistance requise pour les poutres prise dans les calculs de l'Entreprise de réalisation soit 35 MPa. Les écarts de flèches trouvés montrent bien que cette valeur théorique n'est pas très représentative et la rigidité est ainsi sous-évaluée.
- c) L'augmentation du module de déformation à 37000 MPa soit une majoration de 1.03% a relativement diminué les écarts de flèches. En effet, 03 valeurs sont inférieures ou égale à 10 %. Néanmoins, certains écarts restent plus aux importants. A ce titre, on peut citer la poutre de rive du chargement N°2 (05 camions) où un écart de 32.59 % a été enregistré.
- d) Pour le 3eme cas utilisant un module de déformation de 37620 MPa, on note que les écarts de flèches ont été sensiblement diminué où 07 valeurs sur 08 sont inférieures à 10%. Ceci montre le calage du modèle a été correctement effectué en faisant à chaque augmenter la valeur du module de déformation.
- e) La valeur du module de déformation prise dans le 3eme cas soit 37620 MPa correspond à une résistance de 40 MPa à 28 j, ce qui est correct en voyant les résultats des essais à la compression des éprouvettes relatives au poutres. Ces résultats sont joints en Annexe 3 : « Extraits du rapport de résistance à la compression des éprouvettes de béton ».
- f) On note que le calage du modèle a été effectué en majorant le module de déformation de 2.66 %, ce qui montre que les résultats trouvés sont très sensibles vis-à-vis la variation de ces paramètres.
- g) Les écarts importants trouvés dans les deux premiers modèles montrent que la rigidité des poutres a été sous-estimée ce qui s'est traduit par des valeurs excessives de flèches, nettement supérieures à celles relevées lors des épreuves de chargement.

2 La présentation graphique des flèches :

Différence relative

Module de déformation de béton $E=36\ 620\ \text{MPa}$ ($F_{c28}=35\text{MPa}$)

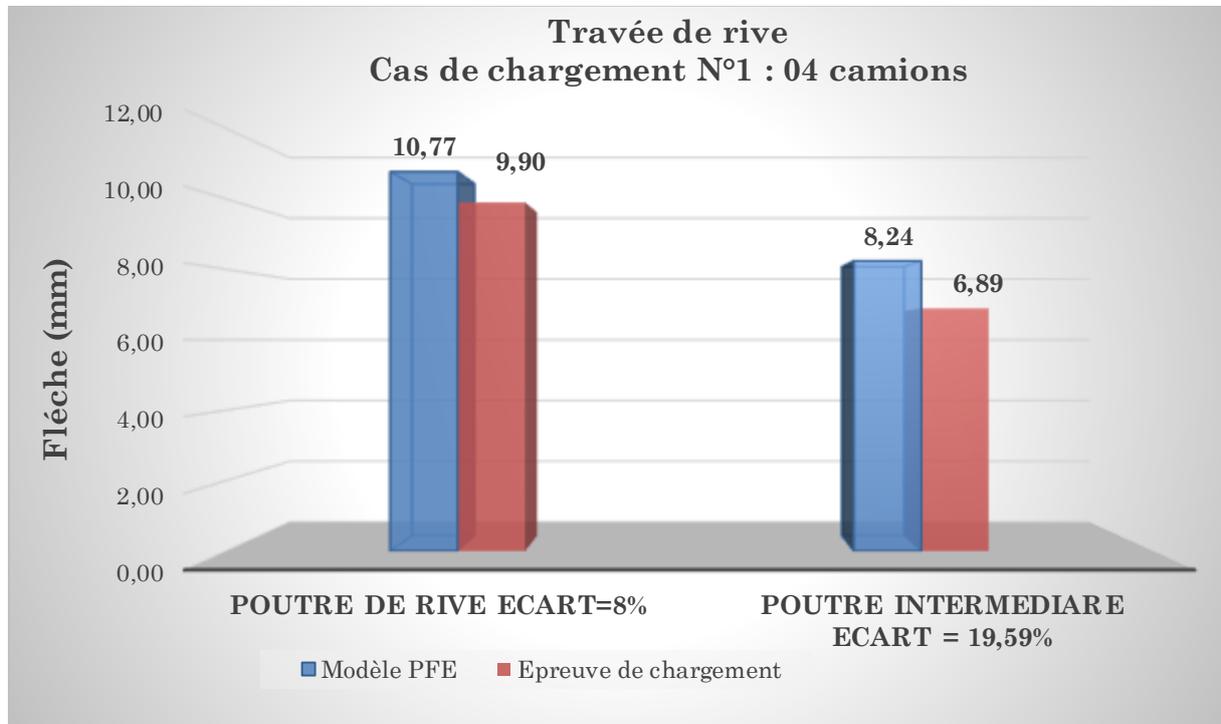


Figure5- 1- Travée de rive Cas de chargement N°1 (4camion)

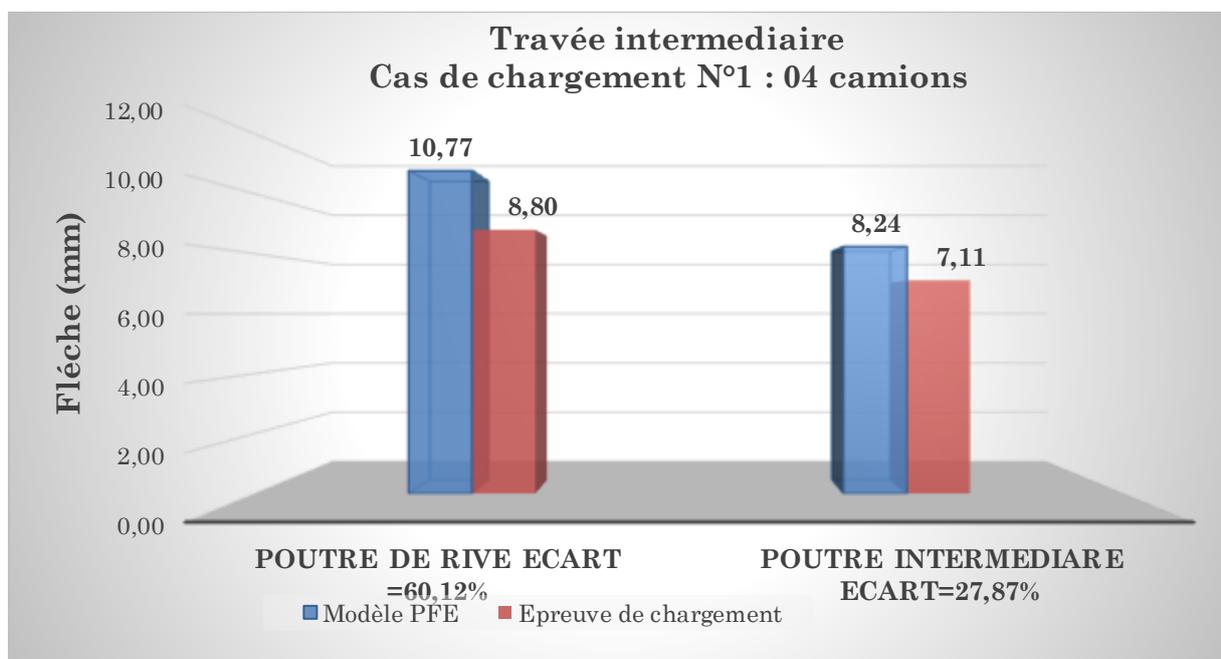


Figure5- 2-Travée intermédiaire Cas de chargement N°1 (4camion)

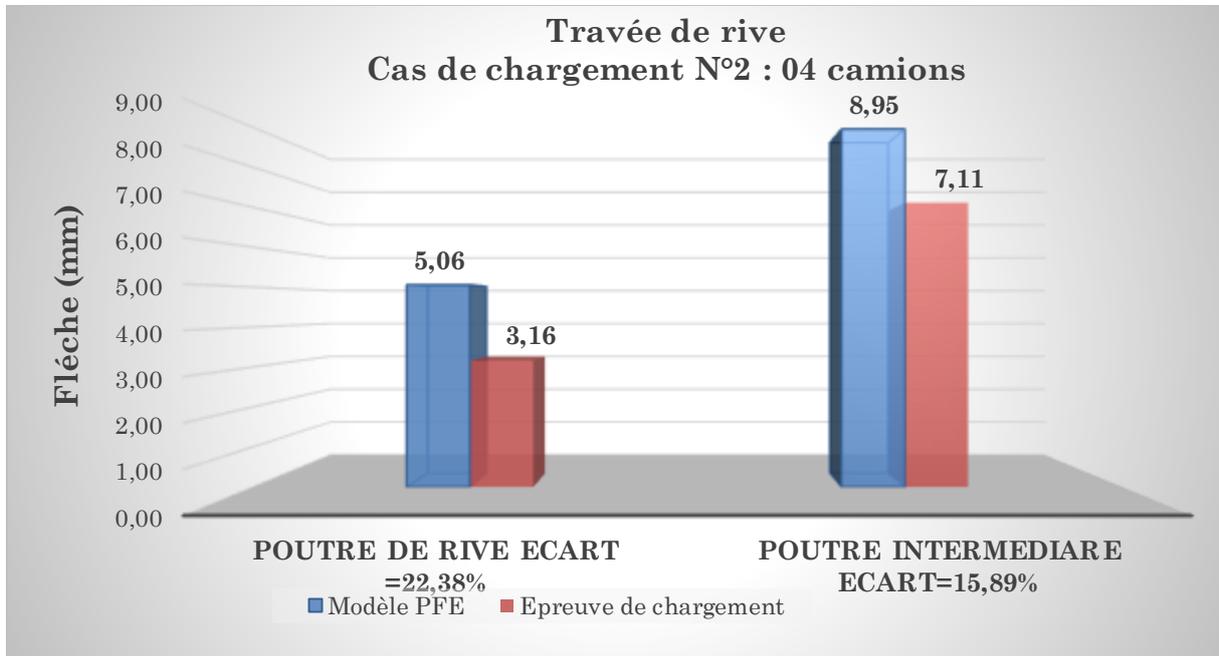


Figure5- 3-Travée de rive Cas de chargement N°2 (4camion)

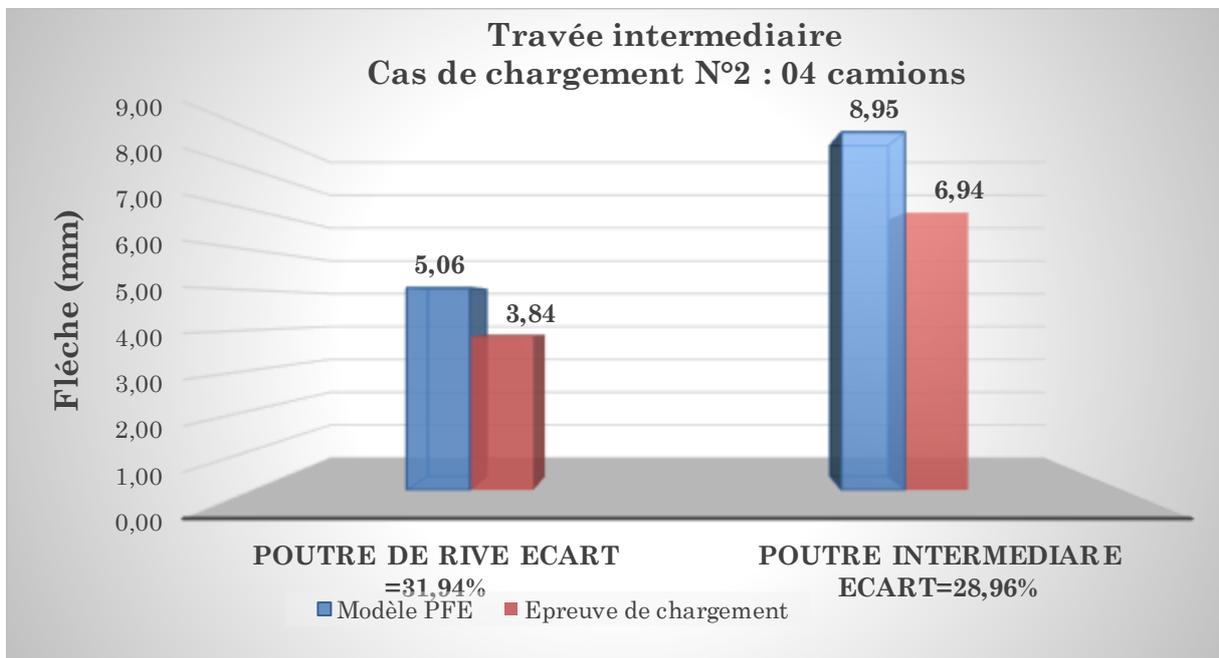


Figure5- 4-Travée intermédiaires de chargement N°2 (4camion)

Différence relative

Module de déformation de béton $E=37\ 000\ \text{MPa}$ ($F_{c28}=38\text{MPa}$)

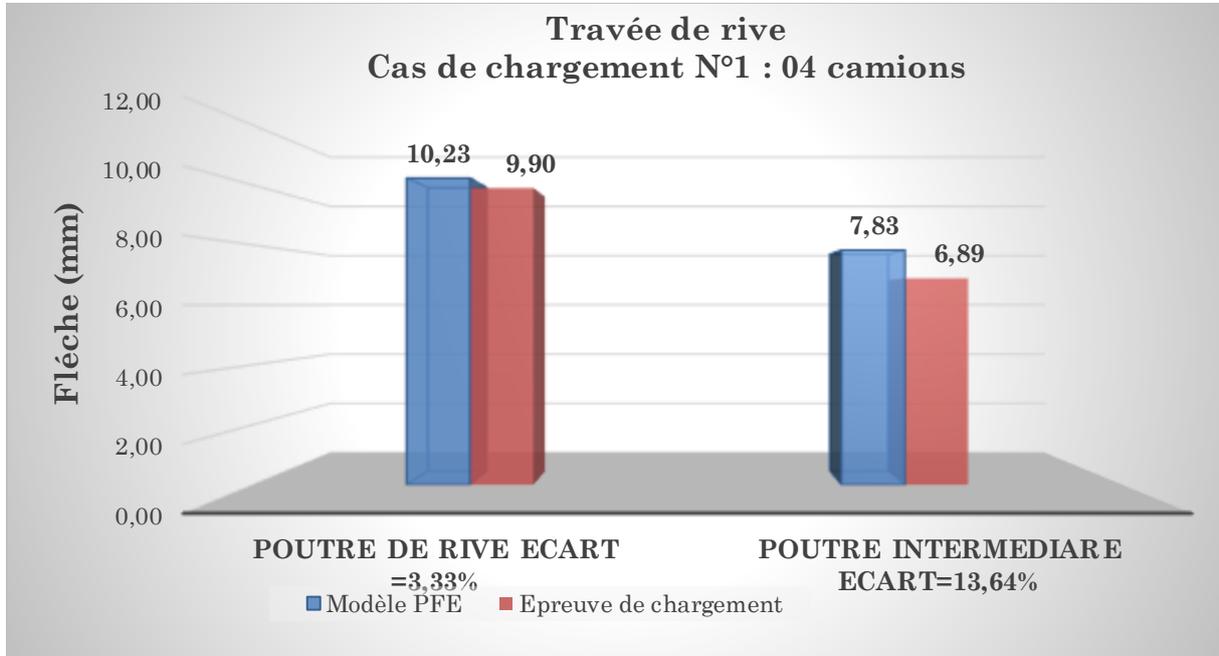


Figure5- 5-Travée de rive Cas de chargement N°1 (4camion)

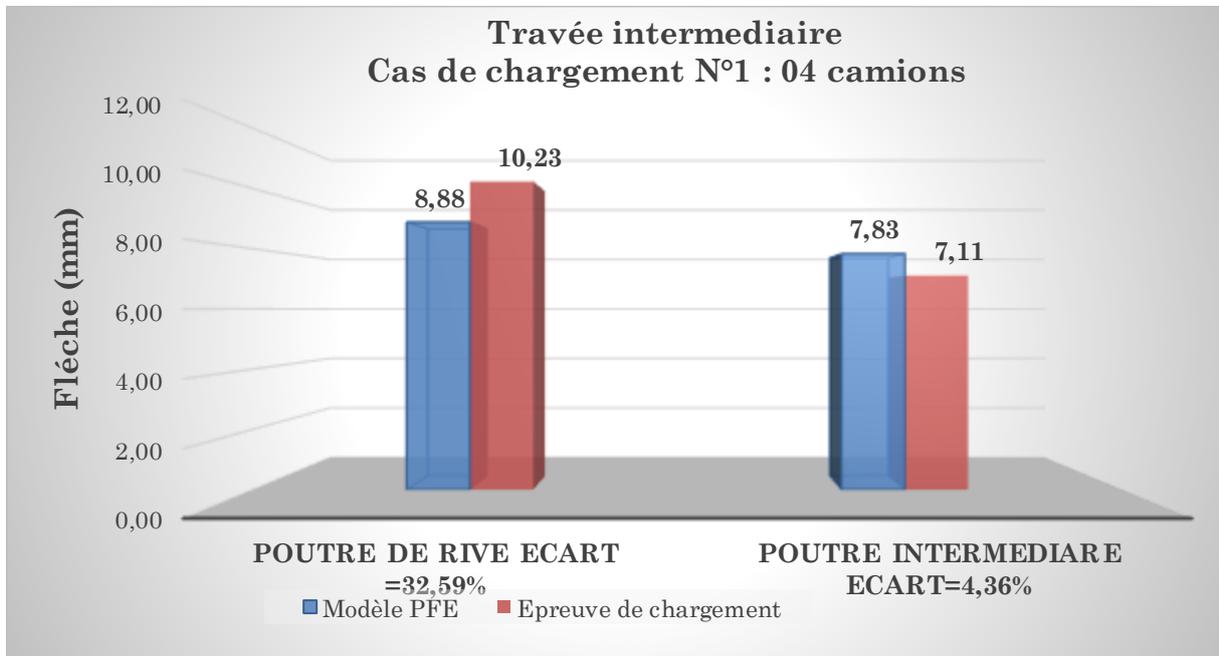


Figure5- 6-Travée intermédiaire Cas de chargement N°1 (4camion)

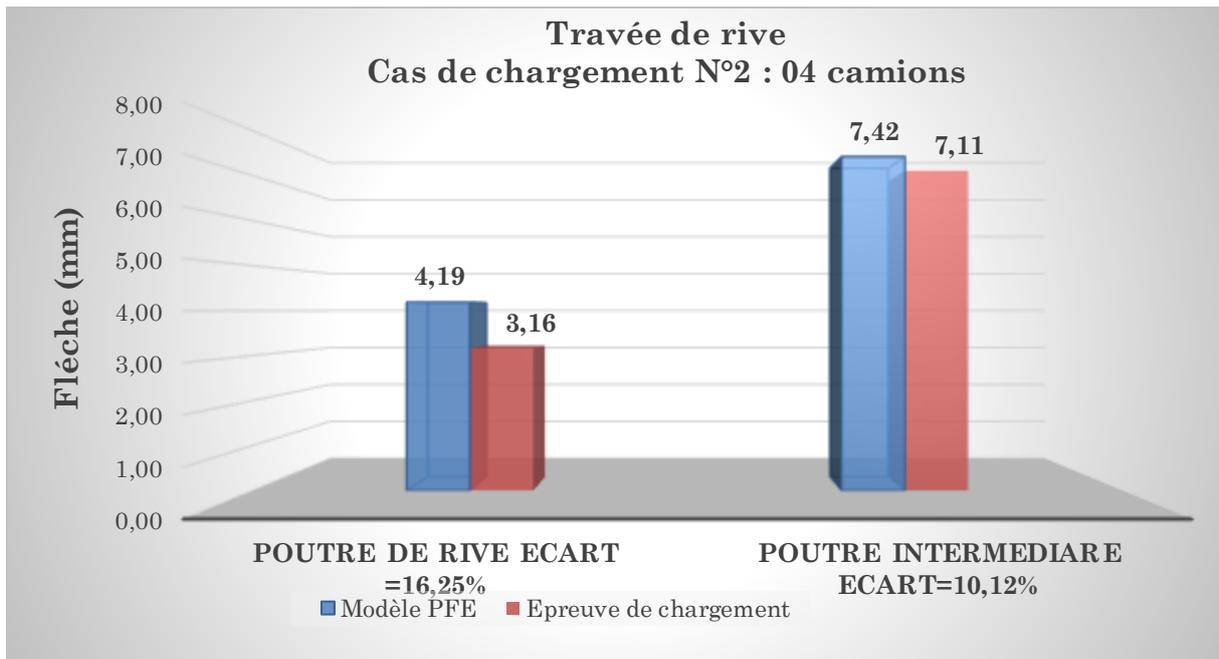


Figure5- 7-Travée de rive Cas de chargement N°2 (4camion)

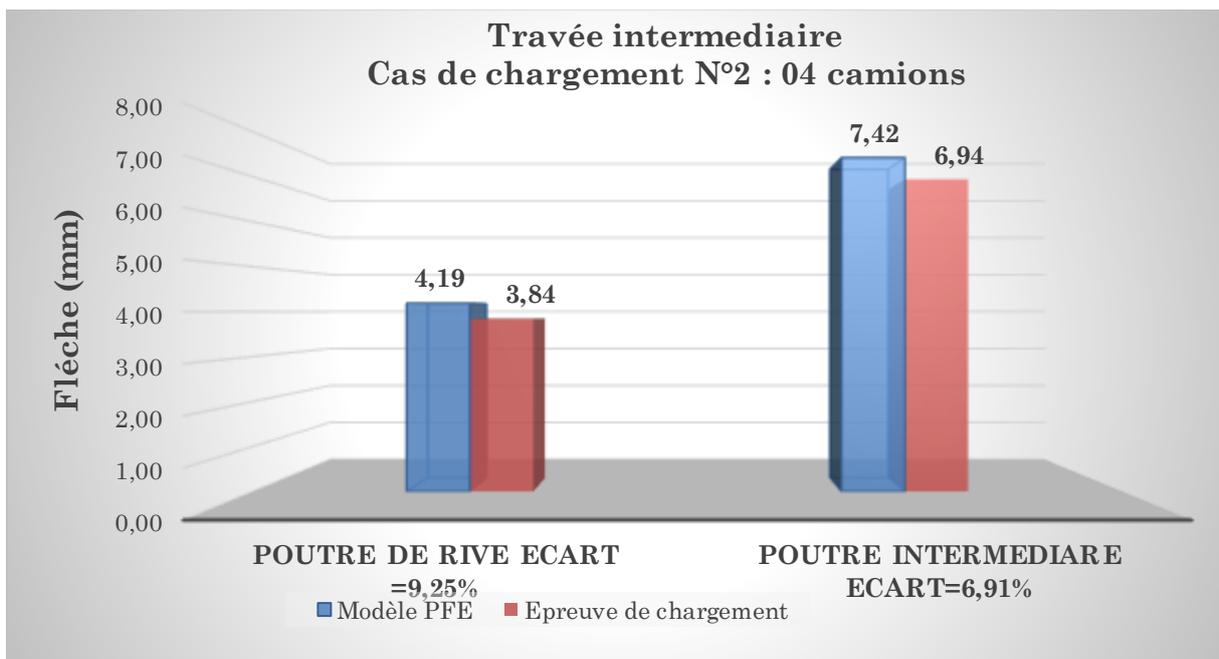


Figure5- 8-Travée intermédiaire Cas de chargement N°2 (4camion)

Différence relative

Module de déformation de béton $E=37\ 620\ \text{MPa}$ ($F_{c28}=40\text{MPa}$)

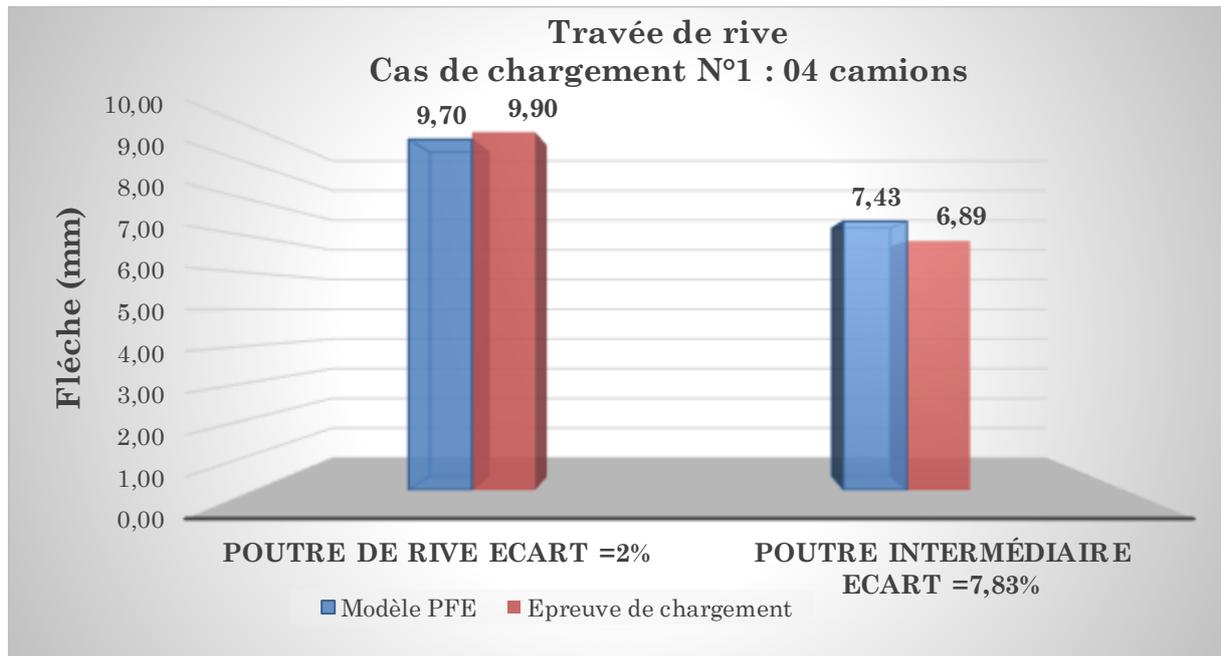


Figure5- 9-Travée de rive Cas de chargement N°1 (4camion)

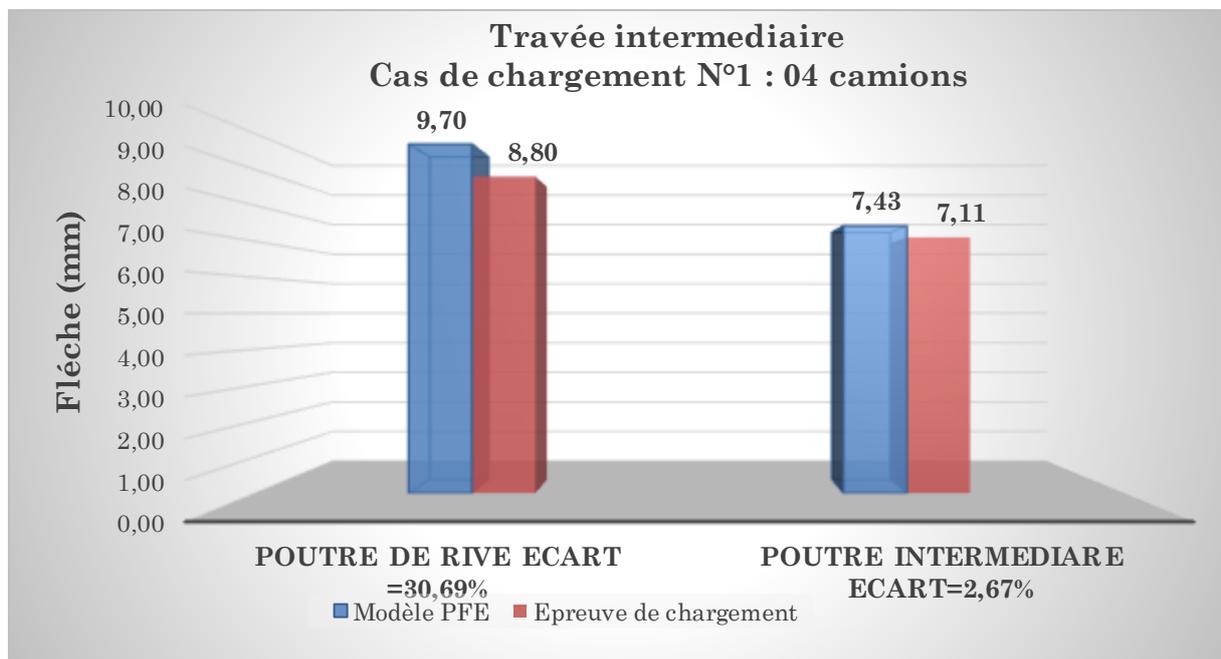


Figure5- 10-Travée intermédiaire Cas de chargement N°1 (4camion)

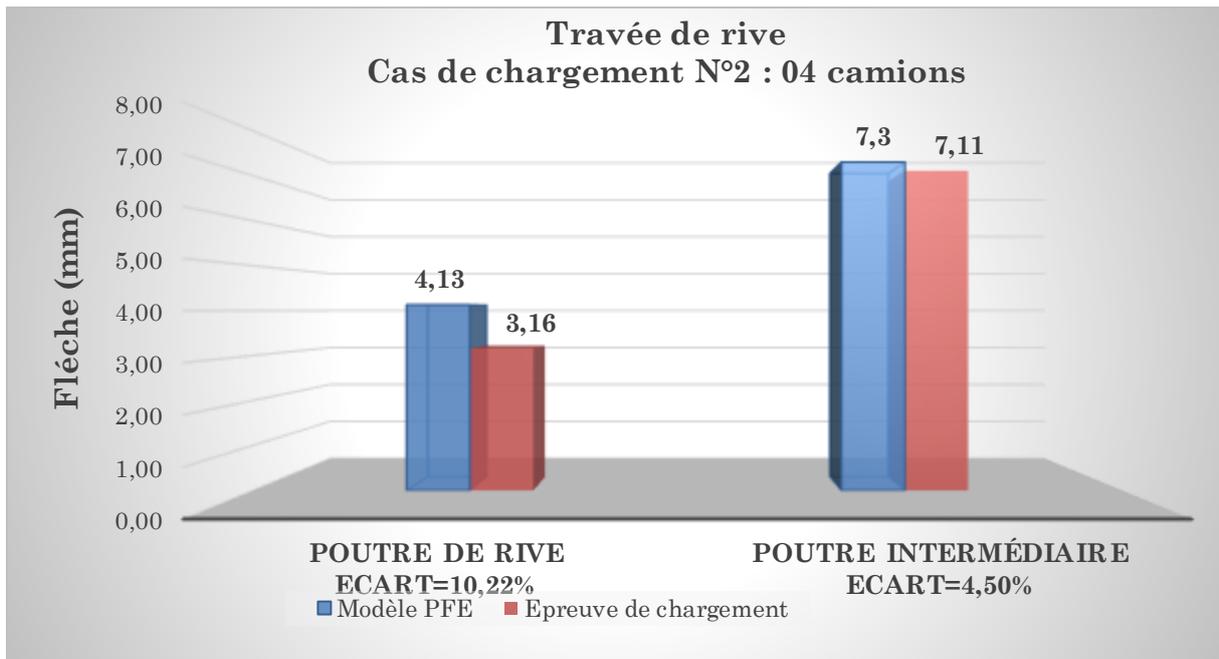


Figure5- 11-Travée de rive Cas de chargement N°2 (4camion)

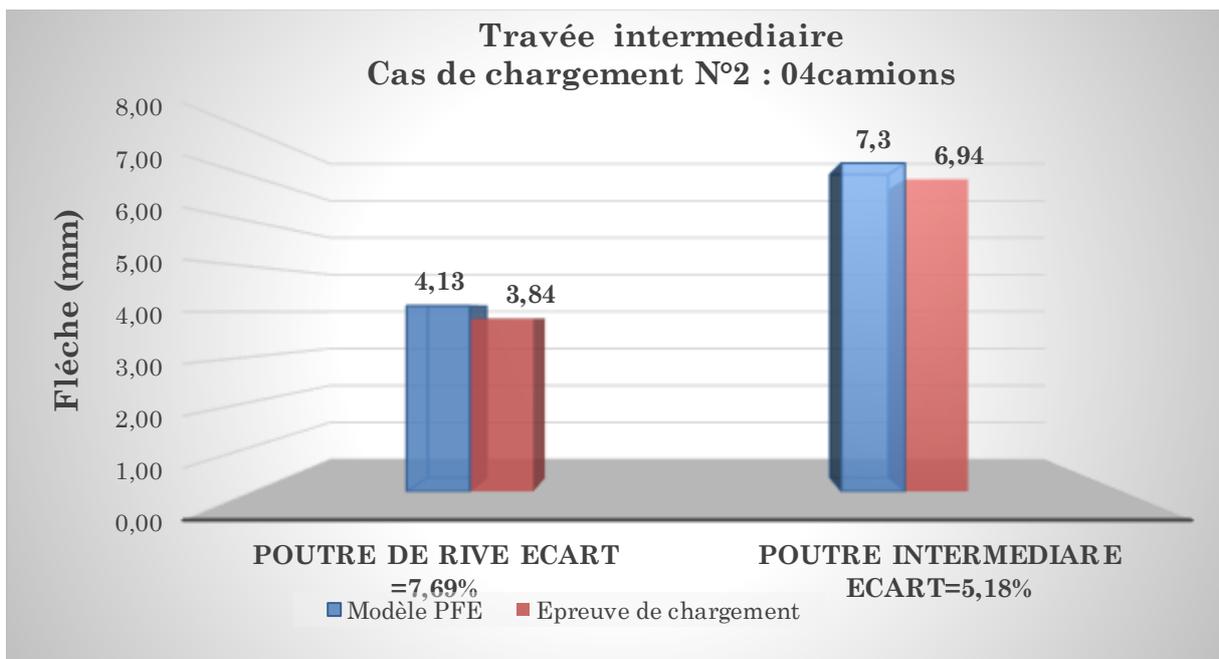


Figure5- 12-Travée intermédiaire Cas de chargement N°2 (4camion)

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés à la modélisation numérique du viaduc du point kilométrique 93.296 situé à l'autoroute Est Ouest d'Algérie, pour nous permettre de vérifier son fonctionnement mécanique sous un chargement type Bc. Une attention particulière a été accordée à la vérification et au calage du modèle numérique par rapport aux grandeurs mesurées lors des épreuves de chargement.

Un descriptif général des épreuves de chargement a été présenté, en décrivant les différentes phases de réalisation, leur consistance, les moyens et matériels utilisés. Les objectifs recherchés consistant au contrôle à la fois de la bonne conception et de la bonne exécution des ponts par l'examen de leur comportement sous des charges normales, ont été évoqués également.

La description des cas différents cas de charge a été succinctement présentée. Il s'agit des charges civiles type A, B, Mc, celles du matériel militaire lourd soit Mc 80 et Mc 120 ou de convois exceptionnels type D280, D240, E400, E360.

Par la suite, un descriptif détaillé de l'épreuve de chargement au niveau du viaduc PK93 a été présenté ainsi que la définition des différentes parties de l'ouvrage et le matériel utilisé également. Cette épreuve a été effectuée s'est déroulée en 02 jours soit le 21 et 22/05/2014 à l'autoroute Est Ouest d'Algérie -Tlemcen.

La description de la modélisation en éléments finis, par le code de calcul SAP 2000, du viaduc étudié a été succinctement présentée. Notons que cette phase reste une étape cruciale dans l'étude du comportement de l'ouvrage sous chargement statique.

Cette étude a révélé que les écarts importants trouvés dans les deux premiers modèles ayant un module de déformation de 36 620 MPa et 37000 MPa respectivement, montrent que la rigidité des poutres a été sous-évaluée ce qui s'est traduit par des valeurs excessives de flèches. Ces dernières sont nettement supérieures par rapport à celles relevées lors des épreuves de chargement. Cependant, les écarts de flèches ont été sensiblement diminués dans le 3ème cas en prenant un module de déformation de 37620 MPa. Les résultats trouvés sont conformes aux recommandations du service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements « SETRA ».

Enfin, nous notons qu'il ne faut pas oublier que les résultats découlent dans leur majorité des caractéristiques des ouvrages. De ce fait, une attention particulière doit être donnée au choix des paramètres numériques du modèle élément finis afin d'obtenir des réponses correctes et réelles des structures. Quant à la note de calcul des épreuves de chargement, les caractéristiques réelles doivent être prises, le module de déformation réel en fait partie.

Nous notons que ce travail ouvre aussi des voies pour des travaux de recherche en perspective. On peut citer par exemple :

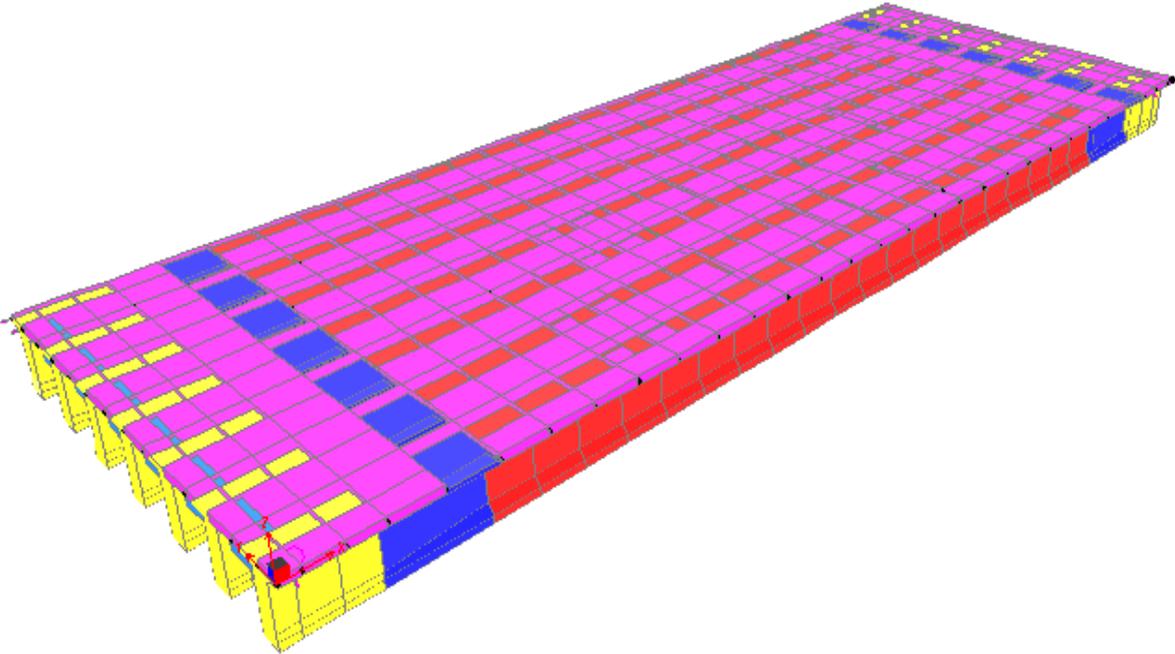
- Comparaison des résultats trouvés des autres ouvrages de l'autoroute Est Ouest d'Algérie.
- L'étude du comportement des ouvrages sous chargement dynamique.
- L'étude de l'influence de la géométrie ainsi que la variation des caractéristiques physiques et mécaniques des différents éléments constituant les ouvrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIE

- [1] : **Guide S.E.T.R.A** : Service d'Étude technique des Routes et Autoroutes (Organisation des épreuves par le maître d'œuvre).
- [2] : **Fascicule 61 titres II** : Programmes de Charges et Épreuves des ponts Routes.
- [3] : **Mr. OUJDI.F.**, Modélisation par Sap2000, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen (Algérie)”.2020
- [4] : **Rapports des épreuves de la société Egis**
- [5] : **Bureau d'étude du SEROR** : Note de calcul
- [6] **Les Logiciels** :
- SAP 2000 v14 : Modélisation du Viaduc
 - MICROSOFT office Excel 2016 : Représentation graphique (Cas de chargement).
- [7] : **Mr. TALEB.O.**, ‘Chap. 2, les chargements, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen (Algérie)”.2020
- [8] : **Le règlement** : DTR (document technique réglementaire)
- [9] : **Pdf des épreuves de chargement** : du bureau d'études BOAS
- [10] : Cours des ouvrages d'art de **MICHEL PLACIDI**.
- [11] : Cours SAP2000 de monsieur **BENYACOUB**
- [12] : <https://portail.mtpt.gov.dz> (site officiel du ministère des travaux publics, algerie)
- [13] : Pdf de **Esiris group** (chargement d'ouvrage)

ANNEXES

Annexe 1 : Modélisation du viaduc du PK93 sous le code de calcul SAP2000

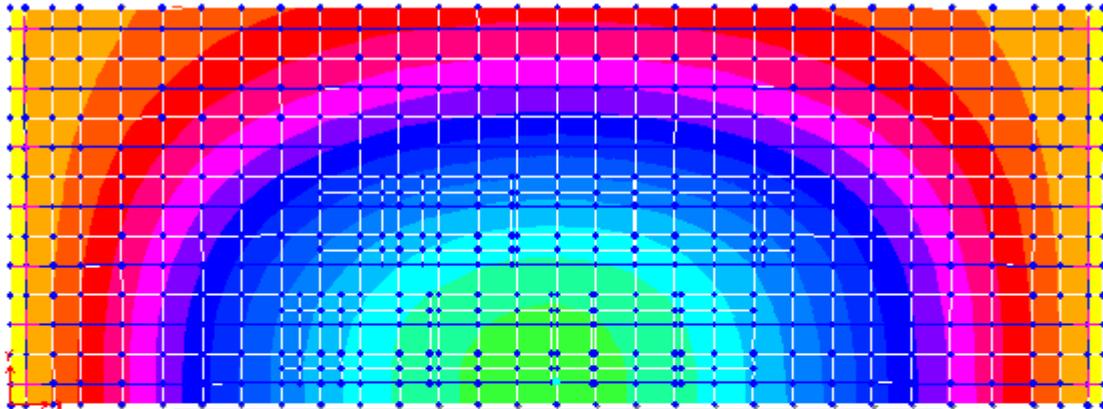


Vue du viaduc PK93 en 3D

Annexe 2 : Exploitation des résultats du viaduc du PK93 sous le code de calcul SAP2000

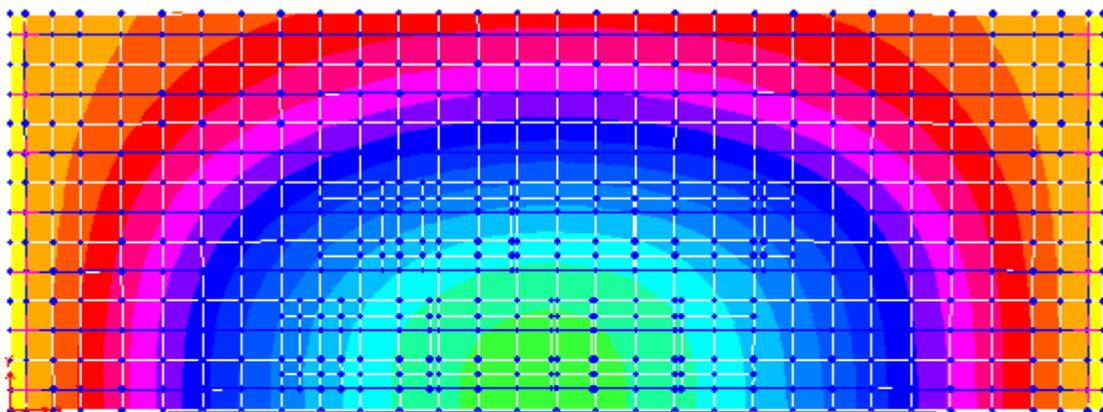
DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT EXCENTRE ES = 36620 MPa

POUTRE RIVE 11 DEPLACEMENT = - 10.77 mm



Joint Displacements			
Joint Object	173	Joint Element	173
	1	2	3
Trans	-3,578E-04	2,706E-04	-0,01077
Rotn	-1,914E-05	-3,853E-05	-2,561E-06

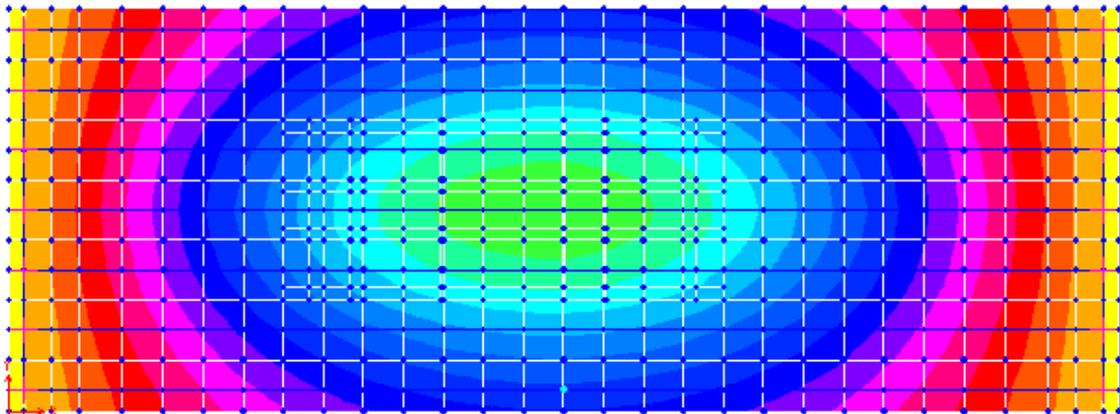
POUTRE CENTRALE L4 DEPLACEMENT = - 8.24 mm ES = 36620MPa



Joint Displacements			
Joint Object	337	Joint Element	337
	1	2	3
Trans	-3,435E-04	2,953E-04	-0,00824
Rotn	9,537E-04	-7,600E-06	-4,773E-06

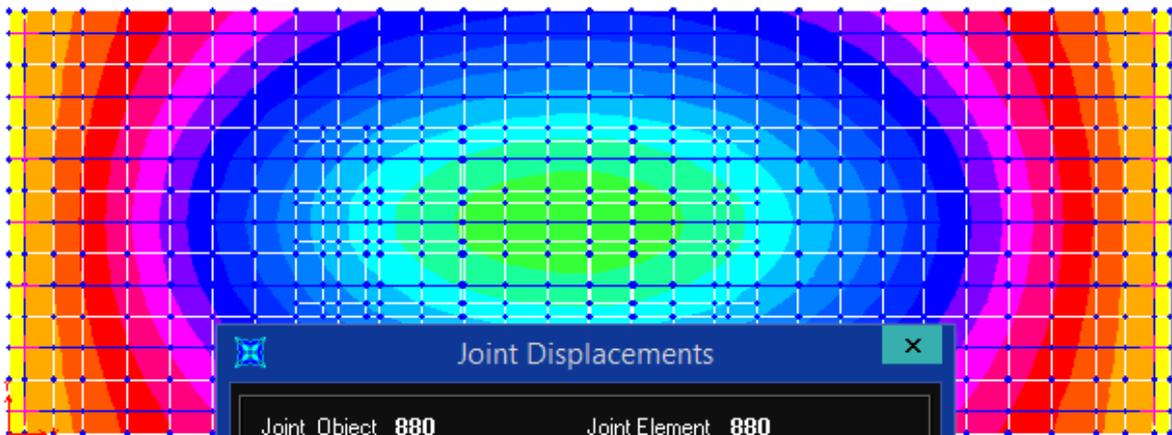
DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT CENTRE ES = 36620MPa

POUTRE RIVE 11 DEPLACEMENT = - 5.06 mm



Joint Displacements			
Joint Object	173	Joint Element	173
	1	2	3
Trans	-3,476E-04	-2,274E-05	-0,00506
Rotn	-7,511E-04	-9,267E-06	3,839E-06

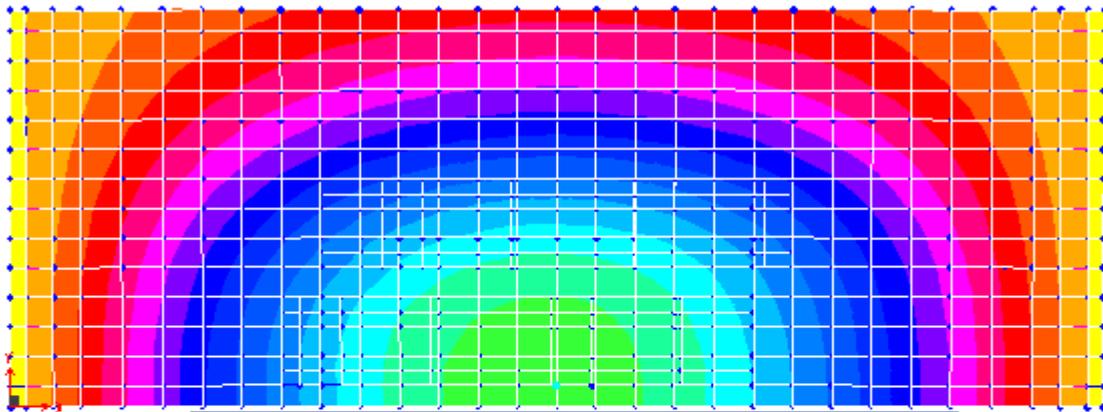
POUTRE CENTRALE L4 DEPLACEMENT = - 8.95 mm ES= 36620 MPa



Joint Displacements			
Joint Object	880	Joint Element	880
	1	2	3
Trans	-3,570E-04	0,00000	-0,00895
Rotn	0,00000	-4,563E-05	0,00000

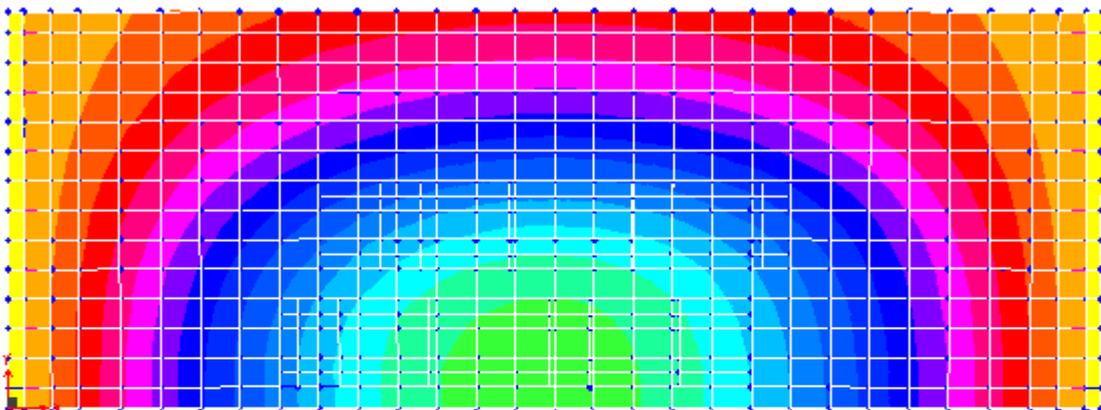
DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT EXCENTRE ES = 37000 MPa

POUTRE RIVE 11 DEPLACEMENT = - 10.23 mm



Joint Object		Joint Element		
173		173		
	1	2	3	
Trans	-3,400E-04	2,571E-04	-0,01023	
Rotn	-1,819E-05	-3,661E-05	-2,433E-06	

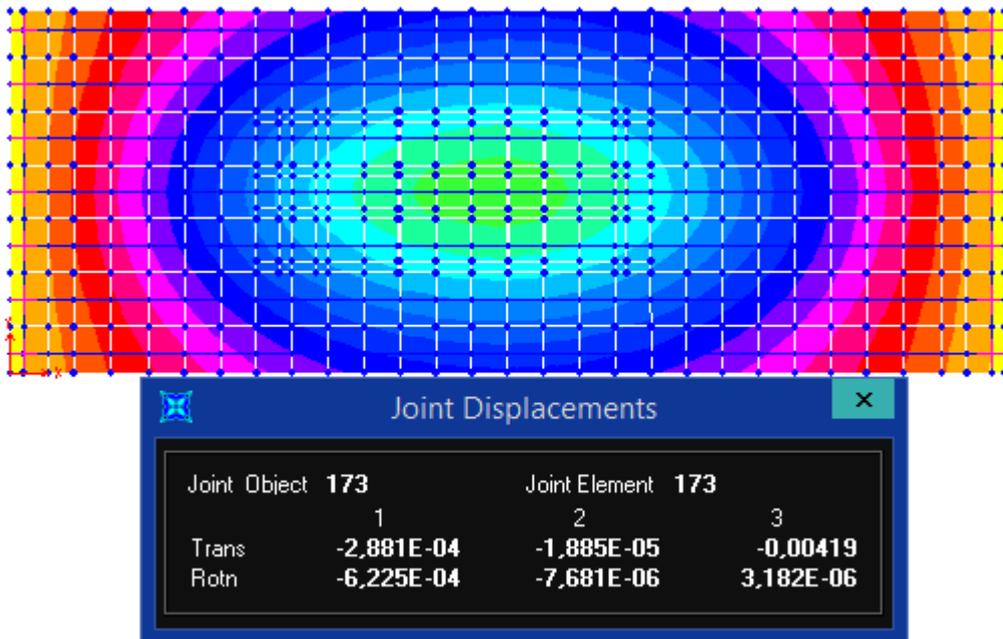
POUTRE CENTRALE L4 DEPLACEMENT = - 7.83 mm ES = 37000 MPa



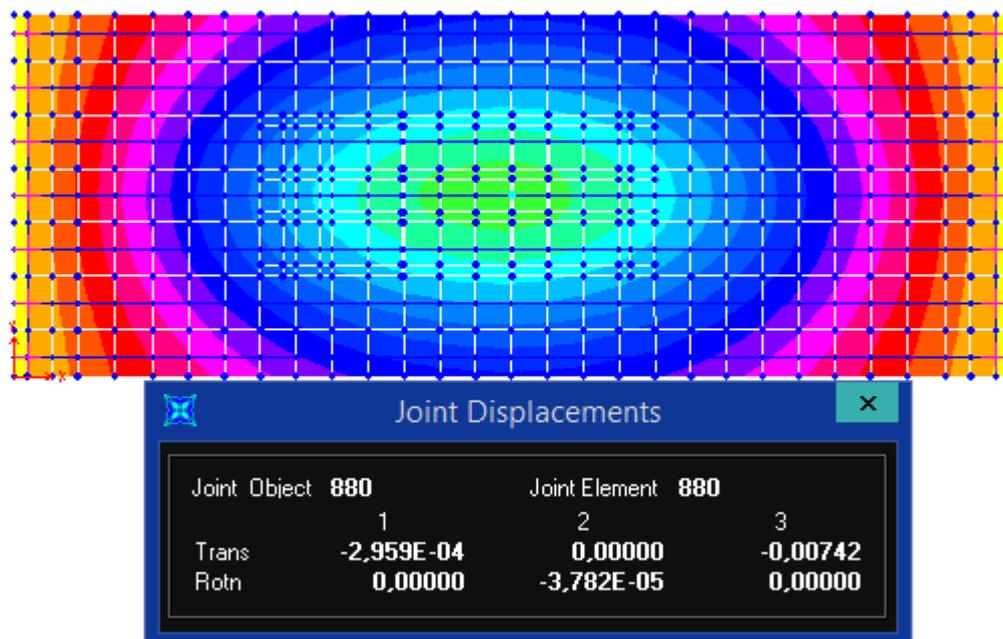
Joint Object		Joint Element		
337		337		
	1	2	3	
Trans	-3,264E-04	2,806E-04	-0,00783	
Rotn	9,061E-04	-7,220E-06	-4,535E-06	

DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT CENTRE ES= 37000 MPa

POUTRE RIVE 11 DEPLACEMENT = - 4.19 mm



POUTRE CENTRALE L4 DEPLACEMENT = - 7.42 mm ES = 37000 MPa



REACTIONS D'APPUI / CHARGEMENT EXCENTRE / CULEE

TABLE : Joint Réactions			
Joint	Output Case	Case Type	F3
Text	Text	Text	KN
2	CEXC4V	LinStatic	107,005
10	CEXC4V	LinStatic	144,679
18	CEXC4V	LinStatic	157,725
26	CEXC4V	LinStatic	161,858
34	CEXC4V	LinStatic	72,744
42	CEXC4V	LinStatic	52,686
50	CEXC4V	LinStatic	-37,266

REACTIONS D'APPUI / CHARGEMENT EXCENTRE / PILE

TABLE : Joint Reactions			
Joint	Output Case	Case Type	F3
Text	Text	Text	KN
5	CEXC4V	LinStatic	105,221
13	CEXC4V	LinStatic	123,845
21	CEXC4V	LinStatic	118,61
29	CEXC4V	LinStatic	121,503
37	CEXC4V	LinStatic	74,437
45	CEXC4V	LinStatic	53,158
53	CEXC4V	LinStatic	-36,205

REACTIONS D ' APPUIS / CHARGEMENT CENTRE / CULEE

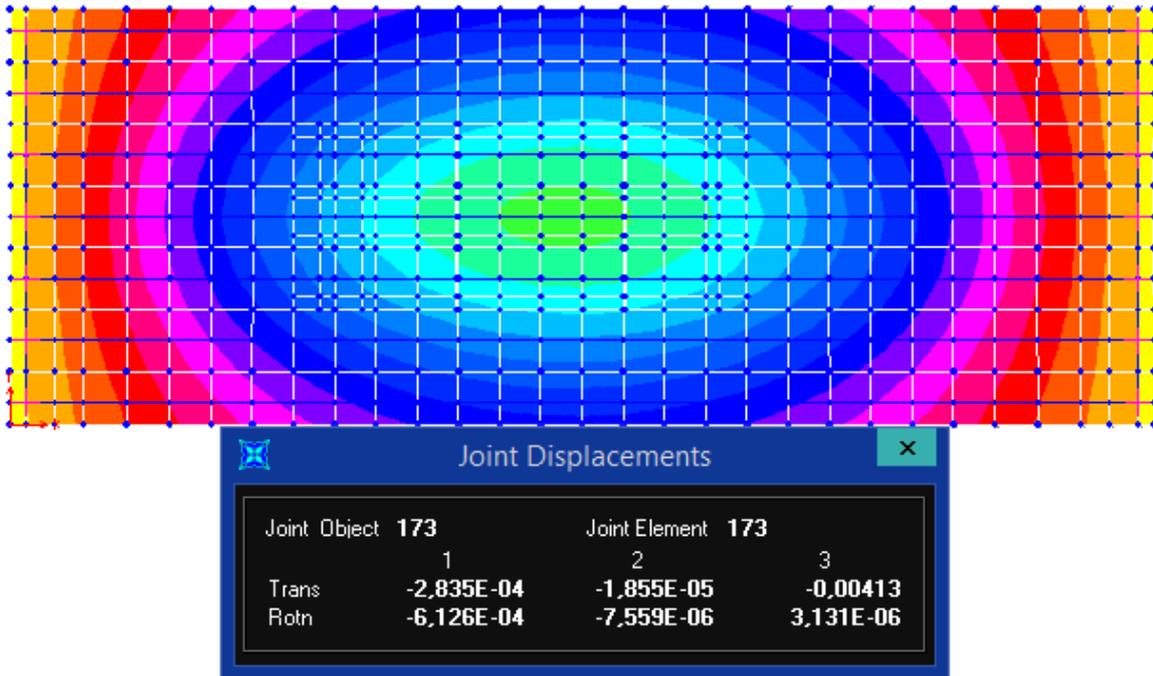
TABLE : Joint Reactions			
Joint	Output Case	Case Type	F3
Text	Text	Text	KN
2	CCEP4VEH	LinStatic	166,173
10	CCEP4VEH	LinStatic	145,408
18	CCEP4VEH	LinStatic	111,107
26	CCEP4VEH	LinStatic	10,215
34	CCEP4VEH	LinStatic	145,408
42	CCEP4VEH	LinStatic	111,107
50	CCEP4VEH	LinStatic	10,215

REACTIONS D'APPUIS / CHARGEMENT CENTRE / PILE

Joint	Output Case	Case Type	F3
Text	Text	Text	KN
5	CCEP4VEH	LinStatic	115,747
13	CCEP4VEH	LinStatic	105,869
21	CCEP4VEH	LinStatic	93,379
29	CCEP4VEH	LinStatic	3,062
37	CCEP4VEH	LinStatic	105,869
45	CCEP4VEH	LinStatic	93,379
53	CCEP4VEH	LinStatic	3,062

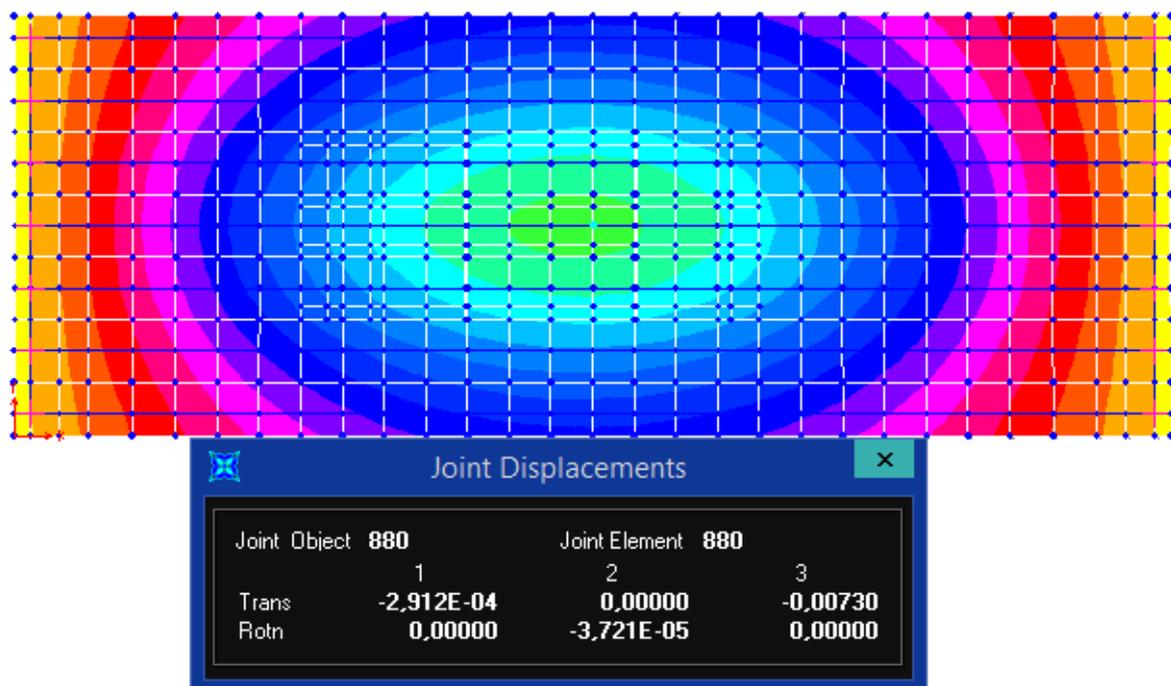
DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT CENTRE ES = 37620MPa

POUTRE RIVE 11 DEPLACEMENT = -4.13 mm



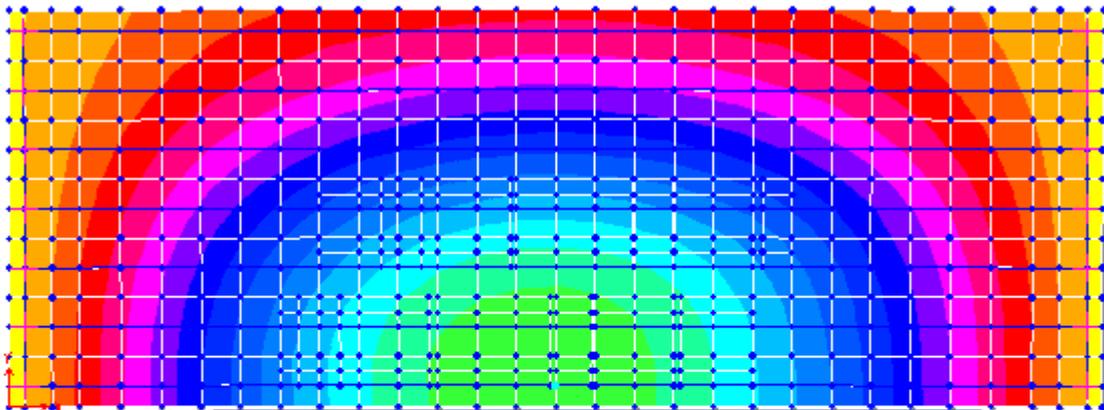
DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT CENTRE ES = 37620 MPa

POUTRE CENTRALE L4 DEPLACEMENT = -7.30 mm



DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT EXCENTRE ES = 37620 MPa

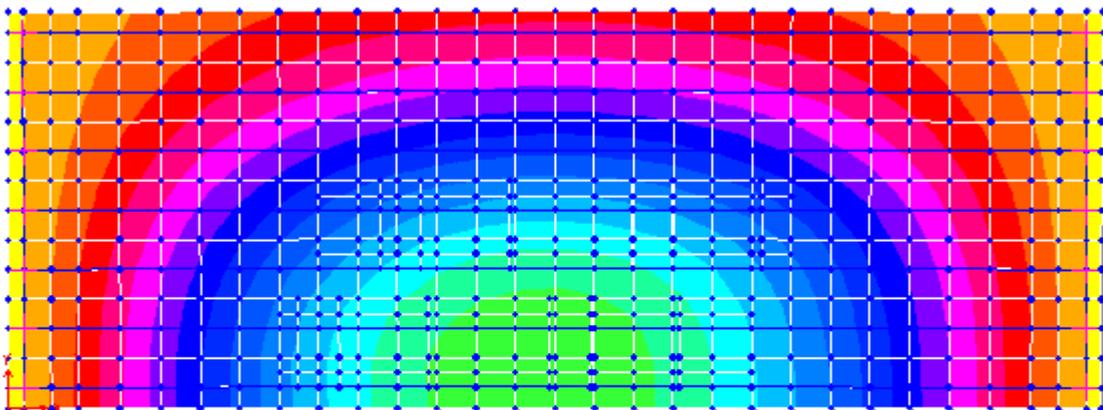
POUTRE RIVE 11 DEPLACEMENT = - 9.70 mm



Joint Displacements			
Joint Object	Joint Element 173		
	1	2	3
Trans	-3,224E-04	2,439E-04	-0,00970
Rotn	-1,725E-05	-3,472E-05	-2,308E-06

DEPLACEMENT EN TRAVEE / CHARGEMENT EXCENTRE ES = 37620 MPa

POUTRE CENTRALE L4 DEPLACEMENT = - 7.43 mm



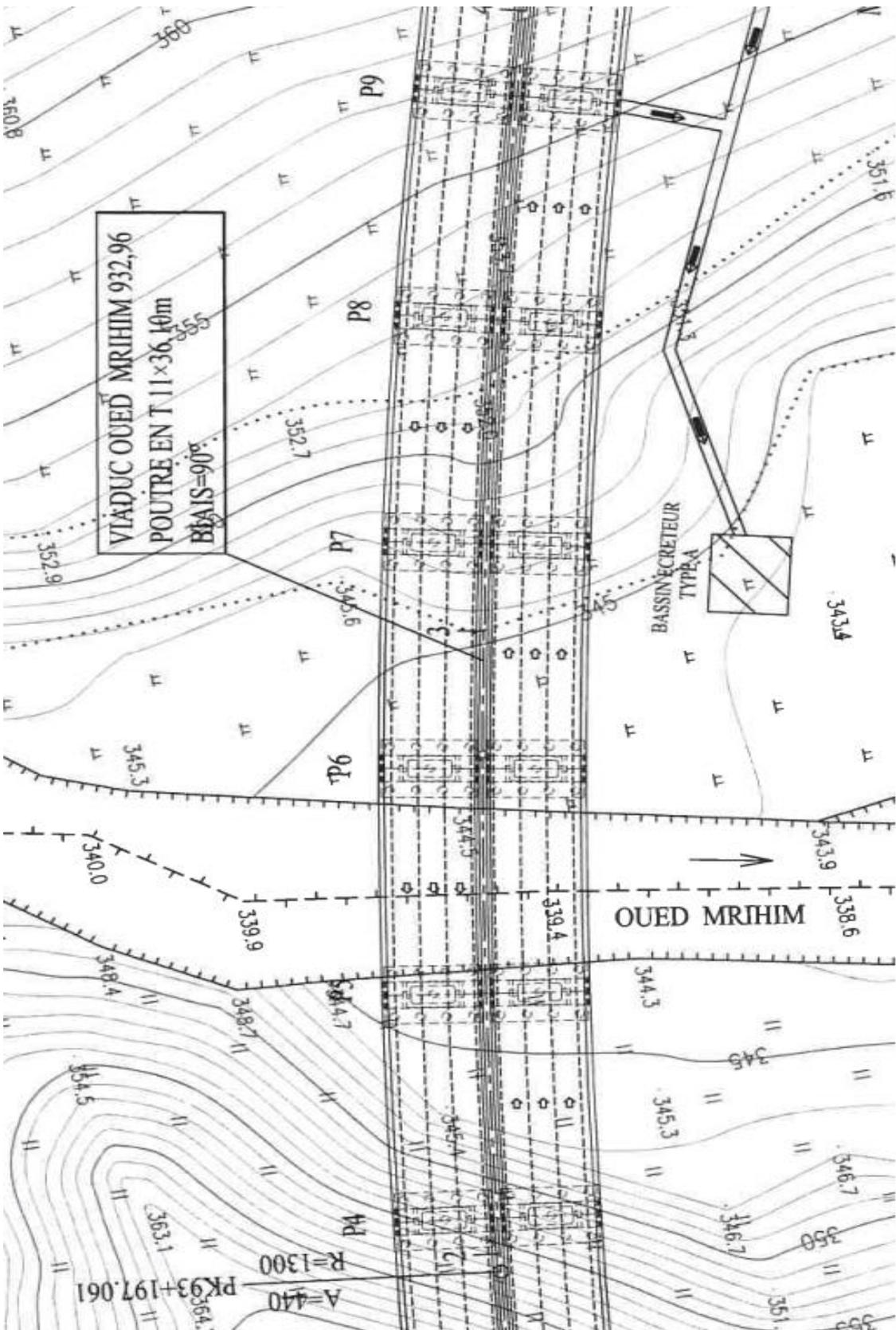
Joint Displacements			
Joint Object	Joint Element 337		
	1	2	3
Trans	-3,095E-04	2,661E-04	-0,00743
Rotn	8,594E-04	-6,848E-06	-4,301E-06

Annexe 3 : Extraits du rapport de résistance à la compression des éprouvettes de béton

RAPPORT DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION D'ÉPROUVETTE DE BETON									
Laboratoire W8					Essai n° 1-B28-1212				
N° SECTION		W8			NORME		NF P18-455		
CONTENU DES TRAVAUX		Poutre			MOYEN D'ENTRETIEN		20±2°C, degré d'humidité > 95%		
POSITION D'OUVRAGE		PK93+296 1—3			LES FACES D'APPUI		Mortier de soufre		
CLASSE DE RESISTANCE D'ETUDE		RN35			Superficie cm ²	Dimen sion cm	201.1 (Φ16/32cm)		
Réf.	Date de coulage	Date d'essai	Age (jour)	Degré d'abram(mm)	Poids (kg)	Densité (kg/m ³)	Charge (KN)	Etat de Ruptures	RC (MPa)
01	29/12/2008	26/01/2009	28	170 180 170	15.28	2376	808.27	correcte	39.8
02					15.32	2382	796.51	correcte	
03					15.29	2377	798.27	correcte	

RAPPORT DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION D'ÉPROUVETTE DE BETON									
Laboratoire W8					Essai n° 1-B28-2096				
N° SECTION		W8			NORME		NF P18-455		
CONTENU DES TRAVAUX		Poutre 5—1			MOYEN D'ENTRETIEN		20±2°C, degré d'humidité > 95%		
POSITION D'OUVRAGE		PK93+296			LES FACES D'APPUI		Mortier de soufre		
CLASSE DE RESISTANCE D'ETUDE		RN35			Superficie cm ²	Dimen sion cm	201.1 (Φ16/32cm)		
Réf.	Date de coulage	Date d'essai	Age (jour)	Degré d'abram(mm)	Poids (kg)	Densité (kg/m ³)	Charge (KN)	Etat de Ruptures	RC (MPa)
01	25/04/2009	23/05/2009	28	190 180	15.31	2380	786.79	correcte	39.0
02					15.37	2390	773.55	correcte	
03					15.35	2387	792.14	correcte	

Annexe 4 : Vue en plan du viaduc du PK93 de l'autoroute Est-Ouest d'Algérie (Tlemcen)



Annexe 5 : Coupe transversale du viaduc de l'autoroute Est-Ouest

D'Algérie Tlemcen

