

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET



FACULTÉ DES SCIENCES
APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE
CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :

OULBACHIR Abdelhakim

HADJAR Mohamed Mounir

Sujet du mémoire

Etude analytique et numérique d'un tablier de pont à poutres
sous chaussée en béton armé

Soutenu devant le jury composé de :

M. MIMOUNI Mohamed

M. ABADA Ghanem

M. KLOUCHE DJEDID Ibrahim

M. BENYAMINA Abdelrahmane

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

PROMOTION : 2022/2023

Remerciements

Avant tout nous remercions ALLAH, le tout-puissant de nous avoir accordé la force et la volonté nécessaire pour finir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre promoteur **Mr ABADA .G** de nous avoir encadré, suivi et soutenu tout le long de ce travail.

Nous remercions nos familles pour les sacrifices qui ont fournis, pour que nous puissions terminer nos études.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements aux membres du Jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nous adressons de chaleureux remerciements à tous les enseignants de la filière Travaux Publics, ainsi qu'aux fonctionnaires et administrateurs du département de génie civil.

Nous remercions aussi tous nos amis pour leurs aides, leurs Patiences, leurs compréhensions et leurs encouragements.

Résumé

Le présent document s'intéresse à l'étude d'un tablier de pont à poutres sous chaussée en béton armé., L'objectif général visé par notre projet de fin d'étude est de faire une étude analytique et une autre numérique, Cette étude comporte une étude bibliographique sur les différents tablier de pont ,un pré-dimensionnement des éléments du tablier , le calcul des charges, surcharges et les efforts longitudinaux dans le tablier , La même procédure de calcul a été faite pour le sens transversal avec la méthode de Guyon Massonnet . Une modélisation numérique a été tentée par le logiciel **Autodesk Robot Structural** avec la comparaison entre les résultats obtenus avec ceux obtenus par la méthode de Guyon Massonnet.

Mots-clés : Poutres, béton armé, Dimensionnement, tablier, Modélisation, Pont à poutres, la méthode de G-Massonnet,

Abstract

This document focuses on the study of a reinforced concrete girder bridge deck., The main goal of our graduation project is to make an analytical study and another digital, This study includes a bibliographic study on the different bridge decks, a pre-dimensioning of the elements of the deck, the calculation of loads, overloads and longitudinal forces in the deck, The same calculation procedure was made for the transverse direction with the method of Guyon Massonnet. A numerical modeling was attempted by the **Autodesk Robot Structural** software with the comparison between the results obtained with those obtained by the method of Guyon Massonnet.

Keywords: Beams, reinforced concrete, Sizing, deck, Modeling, Girder bridge, G-Massonnet method,

ملخص

تركز هذه المذكرة على دراسة سطح جسر بروافد خرسانية مسلحة. الهدف من هذا مشروع هو إجراء دراسة تحليلية وأخرى رقمية ، تتضمن هذه الدراسة دراسة ببليوغرافية على مختلف أسطح الجسور ، وتحديد الأبعاد لعناصر سطح الجسر ، وحساب الأحمال ، الأحمال الزائدة والقوى الطولية في سطح الجسر ، ثم إجراء نفس خطوات الحساب للاتجاه العرضي باستخدام طريقة جويون ماسوني مع المقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة الطريقة التحليلية مع تلك التي تم الحصول عليها عن طريق النمذجة الرقمية بواسطة برنامج أوتودسك روبيو

الكلمات المفتاحية: الروافد ، الخرسانة المسلحة ، التحجيم ، السطح ، النمذجة ، جسر الرافدة ، طريقة جويون ماسوني

SOMMAIRE

Résumé	I
Liste des figures	II
Liste des Tableaux	III
Liste des principales notations et indices.....	IV

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DIFFERENTS TABLIER DE PONT

I.1 Introduction	3
I.2 Définition des tabliers	3
I.2.1 Les tabliers en dalle :.....	4
I.2.2 Les tabliers à poutres sous chaussée :.....	6
I.2.3 Tabliers de ponts à poutres en béton armé.....	7
I.2.4 Les tabliers à poutres latérales	8
I.2.5 Les tabliers métalliques :	9

CHAPITRE II: PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DU TABLIER DU PONT A POUTRES SOUS CHAUSSEE

II.1 Introduction.....	10
II.2 Pré-dimensionnement de la superstructure.....	10
II.2.1 Poutres	10
II.2.2 Entretoises	11
II.2.3 Hourdis	11
II.3 Récapitulatif du pré-dimensionnement.....	12

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

III.1 Introduction.....	13
III.2 Caractéristiques du pont	13
III.3 Calcul des charges.....	14
III.3.1 Charges permanente.....	14
III.3.2 Surcharges d'exploitation et ses coefficients de majoration	17

CHAPITRE IV : REPARTITION LONGITUDINALE DES EFFORTS

IV.1 Introduction	27
IV.2 Calcul des sollicitations dues aux charges permanentes	27

IV.2.1 Poutres de rive	27
IV.2.2 Poutres intermédiaires.....	27
IV.3 Calcul des sollicitations dues aux surcharges routières.....	28
IV.3.1 Système A	28
IV.3.2 Système B	28
IV.3.3 Surcharge Mc120.....	33
IV.3.4 Surcharge Me120.....	34
IV.3.5 Système de convoi exceptionnel de type E	35
IV.3.6 Surcharges des trottoirs.....	36

CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS: METHODE DE GUYON MASSONNET

V.1 Calcul des coefficients de répartition transversale (CRT) de GUYON-MASSONNET	37
V.2 Aperçu général de la méthode Guyon-Massonnet	37
V.3 Paramètres fondamentaux.....	37
V.4 Cas des entretoises d'about.....	39
V.4.1 Calcul des sollicitations réelles dans les poutres	40
V.5 Cas de la dalle	41
V.5.1 Calcul des sollicitations réelles dans les poutres	42

CHAPITRE VI: ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

VI.1 Introduction	47
VI.2 Modélisation	47
VI.2.1 Présentation du logiciel Robot	47
VI.2.2 Modèle de calcul.....	47
VI.2.3 Les étapes de modélisation.....	47

CHAPITRE VII : ETUDE COMPARATIVE ET CONCLUSION

VII.1 Comparaison des efforts longitudinaux	59
VII.2 Comparaison des efforts transversaux	61

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

VIII.1 Calcul du hourdis	66
VIII.1.1 Calcul des charges permanentes du tablier.....	66
VIII.1.2 Calcul des sollicitations du hourdis	67

VIII.1.3 Calcul des moments dans une seule direction	68
VIII.2 Etude des entretoises	70
VIII.2.1 Calcul des sollicitations.....	70
VIII.2.2 Les diagrammes de M et T	76
VIII.2.3 Comparaison des sollicitations analytiques et numériques	78
Conclusion générale	
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1: schéma d'un pont	3
Figure I.2: coupes types d'un pont dalle [7]	4
Figure I. 3: schéma de dalles nervurées [7]	5
Figure I.4: dalles préfabriqués	5
Figure I. 5: schéma d'une dalle élégie [7]	6
Figure I.6: schéma des tabliers de pont à poutre en béton armé [7]	8
Figure I.7: un tablier à poutres latérales	8
Figure I.8: un tablier bipoutre mixte	9
Figure I.9: Tablier orthotrope en acier	9

CHAPITRE III

Figure III.1: Système Bc	20
Figure III.2: Schéma représentatif des éléments du système Bt [2]	21
Figure III.3: Schéma représentatif des éléments du système Br [2]	23
Figure III.4: Schéma représentatif des éléments du système Mc120 [2]	24
Figure III.5: Schéma représentatif des éléments du système Me120 [2]	24
Figure III.6: Système E	25

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Schéma statique représentant la surcharge A(L) [6]	28
Figure IV.2: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bc (Moment flechissant) [6]	29
Figure IV.3: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bc (l'effort tranchant) [6]	30
Figure IV.4: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bt (Moment flechissant) [6]	31
Figure IV.5: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bt [6] (l'effort tranchant)	31
Figure IV.6: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Br (Moment flechissant) [6]	32
Figure IV.7: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Br (l'effort tranchant) [6]	32

Figure IV.8: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Mc120 (Moment flechissant) [6].....	33
Figure IV.9: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Mc120 (l'effort tranchant) [6]	34
Figure IV.10: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Me120 [6] (Moment flechissant)	34
Figure IV.11: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Me120 [6] (l'effort tranchant)	35
Figure IV.12: Schéma statique représentatif du système de convoi exceptionnel de type E [6]	35

CHAPITRE V

Figure V.1: Modèle du tablier de pont d'après Guyon-Massonnet [5]	37
Figure V.2: Histogramme des moments pour la poutre de rive	45
Figure V.3: Histogramme des moments pour la poutre intermédiaire	45
Figure V.4: Histogramme des efforts tranchants pour la poutre de rive	46
Figure V.5: Histogramme des efforts tranchants pour la poutre intermédiaire	46

CHAPITRE VI

Figure VI.1: Définition des unités	48
Figure VI.2: Définition des linges de construction	48
Figure VI.3: Définition de la section de la poutre	49
Figure VI.4: Définir la poutre	49
Figure VI.5: Définir les appuis	50
Figure VI.6: Définition des poutres	50
Figure VI.7: Définir le panneau de dalle	51
Figure VI.8: Modélisation du tablier	51
Figure VI.9: Définir les charges	52
Figure VI.10: Chargement sous le poids du revêtement	52
Figure VI.11: Chargement sous le poids des garde-corps	53
Figure VI.12: Chargement sous le poids des trottoirs	53
Figure VI.13: Chargement sous le poids d'étanchéité	54
Figure VI.14: Chargement sous le système A1	54
Figure VI.15: les charges roulantes	55
Figure VI.16: Chargement sous le système Bc	55

Figure VI.17: Chargement sous le système Bt	56
Figure VI.18: Chargement sous le système Br	56
Figure VI.19: Chargement sous le système Mc120	57
Figure VI.20: Chargement sous le système Me120	57
Figure VI.21: Lancement du calcul	58
Figure VI.22: Extraction des résultats	58
CHAPITRE VII	
Figure VII.1: Histogramme des moments fléchissant	60
Figure VII.2: Histogramme des efforts tranchant	60
Figure VII.3: Histogramme des moments fléchissant pour la poutre de rive	63
Figure VII.4: Histogramme des moments fléchissant pour la poutre intermédiaire	63
Figure VII.5: Histogramme des efforts tranchant pour la poutre de rive	64
Figure VII.6: Histogramme des efforts tranchant pour la poutre intermédiaire	64
CHAPITRE VIII	
Figure VIII.1 : Notations et Conventions de la dalle	66
Figure VIII.2: Moment fléchissant d'une dalle portant dans une seule direction sous l'effet de la charge permanente	67
Figure VIII.3: Courbe enveloppe des moments	68
Figure VIII.4: Courbe des moments	69
Figure VIII.5: Courbe des moments obtenue par ROBOT	69
Figure VIII.6: Poids propre de l'entretoise	71
Figure VIII.7: Schéma de vérinage [3]	71
Figure VIII.8 : schéma statique équivalent	72
Figure VIII.9 : schéma statique pour le système isostatique	74
Figure VIII.10 : schéma statique pour $0 \leq x \leq 1,75\text{m}$	75
Figure VIII.11 : schéma statique pour $01,75\text{m} \leq x \leq 3,00\text{m}$	76
Figure VIII.12 : Diagramme des moments fléchissant et efforts tranchants	76
Figure VIII.13 : Diagramme des moments fléchissant	77
Figure VIII.14 : Diagramme des efforts tranchants	77

Liste des Tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1: Nombre de poutre en fonction de la largeur du tablier [1]	11
Tableau II.2: Epaisseur du hourdis en fonction de l'espacement des poutres [1]	11
Tableau II.3: Récapitulatif du pré-dimensionnement	12

CHAPITRE III

Tableau III.1: Récapitulatif de la descente des charges sur les poutres	16
Tableau III.2: Poids total de la travée	17
Tableau III.3: Valeurs d'a1 en fonction du nombre de voies chargées et de la classe d'un pont [2]	18
Tableau III.4: Récapitulatif des valeurs de V0 en fonction de la classe du pont [2]	18
Tableau III.5: Coefficients bc en fonction de la classe du pont et du nombre de files [2]	20
Tableau III.6: Récapitulatif des coefficients bt en fonction de la classe du pont [2]	22
Tableau III.7: Tableau récapitulatif des coefficients de majoration dynamique	26

CHAPITRE IV

Tableau IV.1: Sollicitations dues aux charges permanentes	27
Tableau IV.2: Expression du moment maximal sous l'effet du convoi Bc dans une poutre à travée indépendante [3]	29
Tableau IV.3: Récapitulatif des sollicitations affectées des coefficients de majoration dynamique	36

CHAPITRE V

Tableau V.1: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre de rive (cas d'entretoises d'about)	39
Tableau V.2: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre intermédiaire (cas d'entretoises d'about)	39
Tableau V.3: Récapitulatif des moments pondérés par les CRT (cas d'entretoises d'about)	40
Tableau V.4: Récapitulatif des efforts pondérés par les CRT (cas d'entretoises d'about)	41
Tableau V.5: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre de rive (cas de la dalle)	41
Tableau V.6: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre intermédiaire (cas de la dalle)	42
Tableau V.7: Récapitulatif des moments pondérés par les CRT (cas de la dalle)	43
Tableau V.8: Récapitulatif des efforts pondérés par les CRT (cas de la dalle)	44

CHAPITRE VII

Tableau VII.1: Comparaison des sollicitations analytiques et numériques dans le tablier du pont sans majoration dynamique59

Tableau VII.2: Comparaison de sollicitations analytiques affectées des CRT et les sollicitations numériques dans le tablier du pont sans majoration dynamique pour la poutre de rive61

Tableau VII.3: Comparaison de sollicitations analytiques affectées des CRT et les sollicitations numériques dans le tablier du pont sans majoration dynamique pour la poutre intermédiaire73

CHAPITRE VIII

Tableau VIII.1 : Comparaison des moments maximaux de la dalle70

Tableau VIII.2 : Les expressions des rotations en fonction de quelques types de chargement73

Tableau VIII.3: Comparaison de sollicitations maximales78

Liste des principales notations et indices

A(L) : système de charges A

BA : Béton Armé

b : demi-largeur active

b₀ : largeur, entraxe entre rangées extérieures de connecteurs

Bc : Système de charges B (camion)

Br : Système de charges B (roue isolée)

Bt : Système de charges B (tandem)

CMD : coefficient de majoration dynamique

CRT : coefficient de répartition transversale

e : épaisseur de dalle en béton

G : Charge permanente

g : charge surfacique

h : hauteur

hb : hauteur du béton

ho : épaisseur du hourdis en béton armé

hr : hauteur revêtement

I : Moment d'inertie

I_p : moment d'inertie de flexion

K_p : moment d'inertie de torsion

L : Portée ; longueur

L_c : Largeur Chargeable

L_r : Largeur roulable

L_t : largeur du tablier

L_{Tr} : largeur du trottoir

M : moment fléchissant

T : effort tranchant

P : valeur d'une charge concentrée

qtr : charge de trottoir

S : surcharge

y : ordonnée de la poutre

α : paramètre de torsion

δ : coefficient de majoration dynamique

θ : paramètre d'entretoisement

ν : le coefficient de poisson

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification

Les ouvrages de franchissement des obstacles naturels ou artificiels tels que les ponts prennent une part prépondérante dans la réussite d'un projet routier. Pour réaliser l'étude de ces structures, il est primordial pour le concepteur de maîtriser les méthodes de calculs. Afin d'éviter un sous dimensionnement qui peut entraîner la ruine précoce de l'ouvrage ou un surdimensionnement avec pour conséquence une surestimation du coût de la réalisation qui a pour corollaire, des difficultés de financement, il est primordial de réaliser une étude structurale. La méthode traditionnelle utilisée est souvent le calcul manuel. Celle-ci s'avère fastidieuse, prend beaucoup de temps avec des risques d'erreurs.

Avec l'essor connu par l'ingénierie informatique de nos jours, la conception assistée par ordinateur vient alléger les multiples tâches qu'assigne l'étude structurale d'un ouvrage, en offrant une rapidité dans le calcul. Mieux, elle permet une simulation aisée de différentes variantes pour une optimisation technico économique.

Cependant faut-il se fier aux résultats des calculs effectués par ces logiciels sans pour autant craindre un surdimensionnement ou un sous dimensionnement?

C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet de fin d'études intitulé « **Etude analytique et numérique d'un tablier de pont en béton armé** ».

2. Objectif général

L'objectif général visé par notre projet de fin d'étude est de faire une étude analytique et une autre numérique par l'utilisation de l'outil informatique à savoir le logiciel **Autodesk Robot Structural dans sa version 14**, d'un tablier de pont en béton armé de portée égale à 20.00m.

3. Méthodologie

Pour mener cette étude, nous avons dans un premier temps procéder à une revue de littérature en regroupant les documents scientifiques qui ont traité les mêmes thématiques.

Après cette synthèse bibliographique, nous avons procédé au calcul manuel du tablier pont puis le calcul avec le logiciel **Autodesk Robot Structural V14**.

Enfin une comparaison des différents calculs des éléments de structure du tablier à savoir les poutres, la dalle et les entretoises a été faite pour apprécier les éventuels écarts.

Notre travail a été organisé en huit (8) chapitres à savoir :

Chapitre I : Etude bibliographique sur les différents tabliers de pont

Chapitre II: Pré-dimensionnement des éléments du tablier à poutres sous chaussée

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre III : Evaluation des charges permanentes et charges d'exploitation

Chapitre IV : Répartition longitudinale des efforts

Chapitre V : Répartition transversale des efforts : **Méthode de Guyon Massonnet**

Chapitre VI : Etude numérique du tablier à l'aide du logiciel Autodesk Robot Structural

Chapitre VII : Etude comparative et conclusion

Chapitre VIII : Etude de la dalle du tablier et des entretoises d'about

**I CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DIFFERENTS TABLIER DE
PONT**

I.1 Introduction

Un pont est un ouvrage en élévation construit in situ, permettant à une voie de circulation (dite voie portée) de franchir un obstacle naturel ou artificiel : rivière, vallée, route, voie ferrée, canal, etc. La voie portée peut être une voie routière (pont-route), piétonne (passerelle), ferroviaire (pont-rail) ou, plus rarement, une voie d'eau (pont-canal).

Quelle que soit leur application : pont-route, pont rail, pont-canal, passerelle piéton, ou autre, les ponts sont constitués de deux éléments principaux :

- Le TABLIER : partie sensiblement horizontale de l'ouvrage qui assure le franchissement,
- Les APPUIS qui peuvent avoir des configurations très variées : voiles, poteaux et chevêtres, piles, pylônes, culées, piles-culées, piédroits...

I.2 Définition des tabliers

Les tabliers de ponts sont la partie principale d'un pont qui supporte les charges de circulation et le poids propre du pont. Ils relient les poutres et les piliers du pont, formant une surface de circulation pour les véhicules et les piétons. Les tabliers de ponts peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux tels que l'acier, le béton, le bois, le verre ou la fibre de verre, chacun ayant des avantages et des inconvénients en termes de coût, de poids, de durabilité et de résistance.

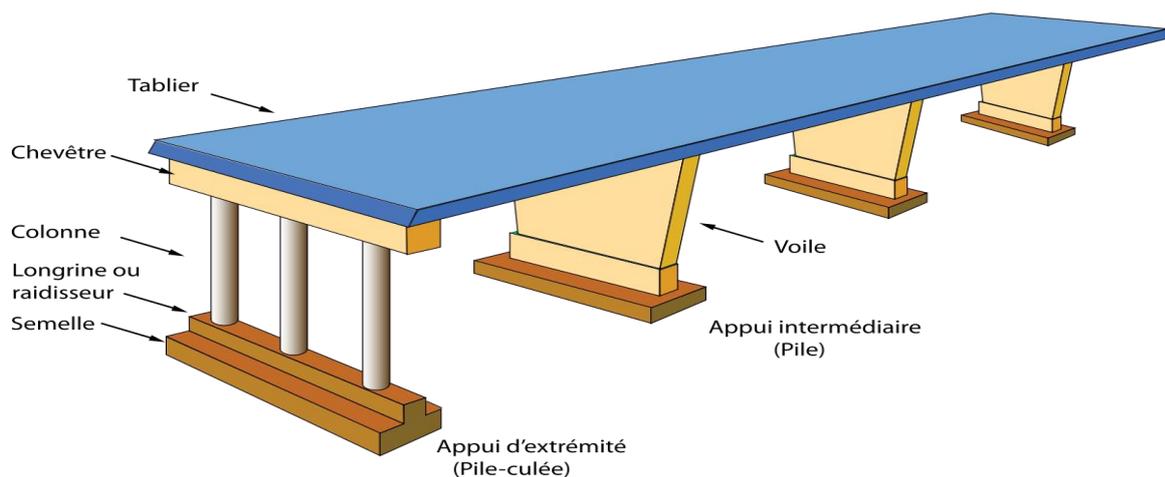


Figure I.10: schéma d'un pont

Il existe plusieurs types de tabliers de pont, chacun ayant des caractéristiques et des utilisations uniques. Les principaux types de tabliers de pont sont :

I.2.1 Les tabliers en dalle :

Les tabliers en dalle sont des types de tabliers de pont qui sont fabriqués à partir de dalles de béton ou de pierre. Ces dalles sont disposées horizontalement sur des poutres ou des arcs en acier ou en béton pour former le tablier du pont. Les tabliers en dalle peuvent être utilisés pour des ponts à faible ou à moyen trafic, et sont souvent utilisés pour des ponts routiers ou des ponts piétonniers

Il existe plusieurs types de tabliers en dalle, y compris :

Tabliers en dalle pleine: Il est formé par des dalles de béton qui sont disposées horizontalement sur des poutres ou des arcs. Ce type de tablier est utilisé pour des ponts à faible trafic [7]

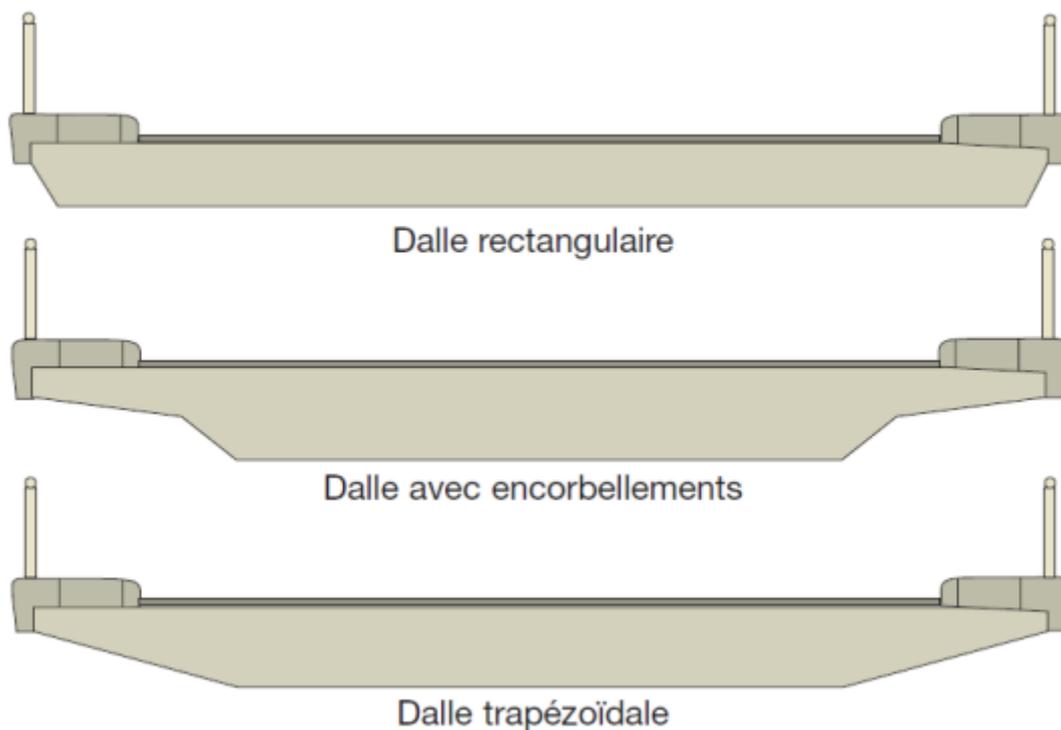


Figure I.11: coupes types d'un pont dalle [7]

Tabliers en dalle nervurée: Il est formé par des dalles de béton qui ont des nervures verticales pour renforcer la résistance. Ce type de tablier est utilisé pour des ponts à moyen trafic.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DIFFERENTS TABLIER DE PONT

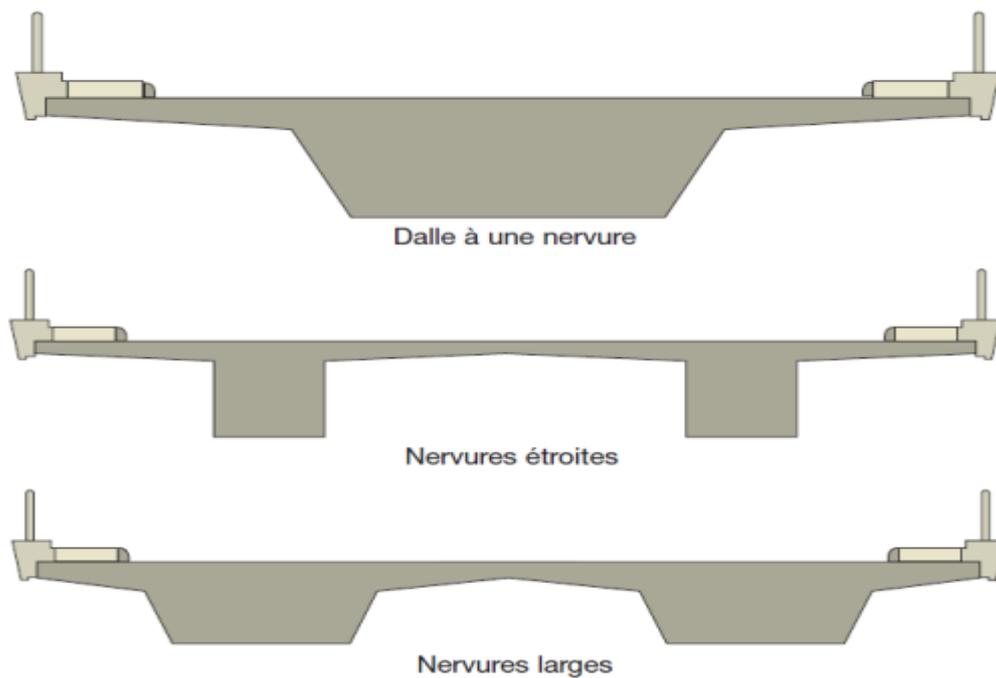


Figure I.12: schéma de dalles nervurées [7]

Tabliers en dalle préfabriquée: Il est formé par des dalles de béton ou de pierre qui sont fabriquées en usine et transportées sur le site pour être installées. Ce type de tablier est utilisé pour des ponts à faible ou à moyen trafic.



Figure 13: dalles préfabriqués

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DIFFERENTS TABLIER DE PONT

Les tabliers en dalles élégies sont un type de tablier de pont qui est fabriqué à partir de dalles en acier ou en aluminium, plutôt que de béton ou de pierre. Les dalles élégies sont disposées horizontalement sur des poutres en acier ou en béton pour former le tablier du pont.

Les tabliers en dalles élégies sont souvent utilisés pour des ponts à faible ou à moyen trafic, et peuvent être utilisés pour des ponts routiers ou des ponts piétonniers.

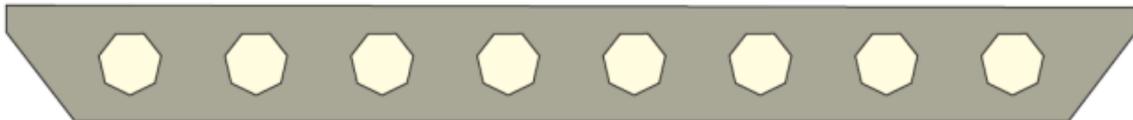


Figure I.14: schéma d'une dalle élégie [7]

Les tabliers en dalle ont l'avantage d'être relativement faciles à construire et peu coûteux, mais ils peuvent être assez lourds et peuvent ne pas être aussi durables que les autres types de tabliers de pont. Il est important de choisir le bon type de tablier en dalle pour répondre aux besoins spécifiques d'un projet.

I.2.2 Les tabliers à poutres sous chaussée :

Les tabliers à poutres sous chaussée sont un type de tablier de pont qui est formé par des poutres en acier ou en béton qui soutiennent les plaques de roulement du pont. Les poutres sont généralement disposées en parallèle les unes aux autres, sous la chaussée du pont, pour former le tablier. Les tabliers à poutres sous chaussée sont souvent utilisés pour des ponts à haut trafic, comme les ponts routiers et les ponts ferroviaires.

Il existe plusieurs types de tabliers à poutres sous chaussée, chacun ayant ses propres avantages et inconvénients :

- Tabliers à poutres en I et en T : Ce type de tablier est formé par des poutres en forme de "I" qui sont disposées en parallèle les unes aux autres sous la chaussée du pont. Ils ont une capacité de charge élevée et sont souvent utilisés pour des ponts à haut trafic.

- Tabliers à poutres en caisson : Ce type de tablier est formé par des caissons en acier ou en béton qui sont remplis de béton pour former les poutres sous la chaussée du pont. Ils ont une capacité de charge élevée.

- Tabliers à poutres en treillis : Ce type de tablier est formé par des poutres en treillis en acier ou en béton qui sont disposées en parallèle les unes aux autres sous la chaussée du pont.

I.2.3 Tabliers de ponts à poutres en béton armé

Les tabliers de ponts à poutres en béton armé sont fabriqués en béton armé. Les poutres en béton armé sont conçues pour résister aux forces de compression, de traction et de flexion, tandis que les barres d'acier renforcent les poutres contre les forces de tension.

Domaine d'emploi

Ce type de tablier permet des franchissements de petites et moyennes portées de 15 à 30 m très souvent utilisé pour le franchissement de petits cours d'eau et comme passage supérieur

Les ponts à poutres sont plus employés lorsque l'esthétique n'est pas demandé et notamment en zone rurale (sur les oueds)

Conception générale

Le tablier comporte une série de poutres en béton armé sous chaussée espacées de 2.5 à 4 m, solidarisées transversalement par le hourdis et des entretoises d'abouts.

Par soucis d'économie des matériaux, la largeur des poutres (les âmes) est variable linéairement à partir des appuis sur le quart de la portée. Cette largeur est constante sur la moitié centrale de la portée et elle est limitée au minimum pour alléger les poutres et limiter les sollicitations dues au poids propre, au niveau des appuis la largeur des poutres est plus importante. Elle est déterminée en fonction des efforts tranchants et des contraintes de cisaillement qu'ils induisent. Cette largeur permet d'augmenter le moment résistant sur appuis dans le cas d'ouvrage continu.

Actuellement et en raison de la complexité des coffrages qu'entraînent les conceptions anciennes, les poutres sont de largeur constante, le surplus de matière consommée est compensé par l'économie réalisée sur les coffrages. Les entretoises intermédiaires sont souvent supprimées et l'hourdis participe à la flexion d'ensemble en assurant le rôle d'entretoisement transversale, ce qui entraîne une épaisseur d'hourdis plus importante.

Les poutres sont de hauteur constante et peuvent comporter dans leur intrados des talons permettant de loger les armatures longitudinales

L'épaisseur de l'hourdis est constante

Le tablier est souvent à travées indépendantes car elles s'accommodent d'un tassement différentiel éventuel et se prêtent bien à la préfabrication

Les trottoirs sont généralement disposés sur la dalle en encorbellement. On s'arrangera toujours de telle sorte que les gargouilles ne traversent pas les poutres

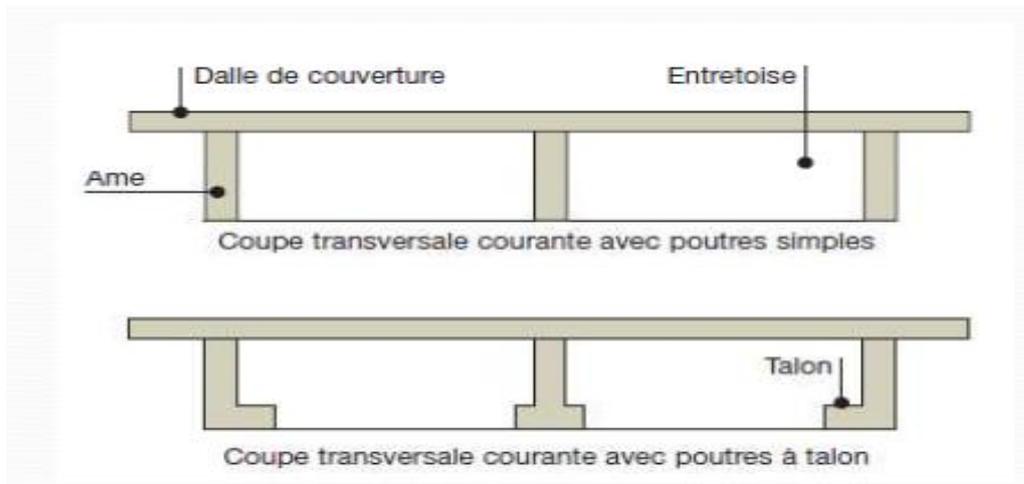


Figure I.15: schéma des tabliers de pont à poutre en béton armé [7]

I.2.4 Les tabliers à poutres latérales

Dont le tablier comprend deux poutres longitudinales situées de part et d'autre de la chaussée.

Ce type d'ouvrage est réalisé aussi bien en béton armé qu'en béton précontraint. Du fait de l'allègement du tablier qui permet les encorbellements latéraux, la déterminante peut atteindre 30 mètres pour le béton précontraint et 15 mètres pour le béton armé. Le recours à ce type d'ouvrage n'est pas toujours dicté par la recherche de performance dans la portée déterminante. En fait il est souvent adopté pour des considérations esthétiques (aspect plus agréable en élévation) ou encore pour réduire l'impact des appuis du pont au sol.



Figure I.16: un tablier à poutres latérales

I.2.5 Les tabliers métalliques :

Les tabliers métalliques sont un type de tablier de pont qui est fabriqué à partir de matériaux métalliques tels que l'acier ou l'aluminium. Ils peuvent être utilisés pour des ponts de différentes tailles et types, allant des ponts pour piétons aux ponts pour véhicules lourds.

Il existe plusieurs types de tabliers métalliques :

I.2.5.1 Tabliers mixtes :

Dont le tablier associe deux matériaux : bipoutres métallique et dalle en béton armé.



Figure I. 17: un tablier bipoutre mixte

I.2.5.2 Tabliers orthotropes tout acier :

Le tablier orthotrope en acier est une solution à haut potentiel pour le remplacement ou la réhabilitation rapide d'un pont.

Plus léger et flexible que son équivalent conventionnel en béton, le tablier orthotrope en acier réduit le temps de travail au chantier et limite les perturbations de la circulation routière.



Figure I.18: Tablier orthotrope en acier

CHAPITRE II: PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DU TABLIER DU PONT A POUTRES SOUS CHAUSSEE

II CHAPITRE II: PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DU TABLIER DU PONT A POUTRES SOUS CHAUSSEE

II.1 Introduction

Le pré-dimensionnement se base sur des normes déjà établies et publiées par le SETRA pour la détermination des dimensions économiques des ouvrages d'art dits courants. Le dit pré-dimensionnement suivra cette logique : poutres hourdis- entretoises.

II.2 Pré-dimensionnement de la superstructure

Etant donné que notre pont a une longueur de 20m, nous choisissons concevoir le tablier avec une seule travée indépendante.

II.2.1 Poutres

-Elancement de la poutre H_p

L'élancement des poutres dépend essentiellement de leur portée et des contraintes admissibles du béton qui les constitue. Pour un béton dosé à 400 kg/m^3 avec une résistance $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$, l'élancement de la poutre est défini comme suit :

$$\frac{1}{17}L \leq H_p \leq \frac{1}{15}L \Rightarrow 0,88\text{m} \leq H_p \leq 1\text{m}$$

Où H_p désigne la hauteur de la poutre sans hourdis et L la portée. Convenons donc de prendre comme hauteur des poutres **$H_p=0,9\text{m}$** .

-Epaisseur de l'âme de la poutre B_p

Elle se détermine par la formule suivante :

$$B_p \geq \frac{1}{3}H_p \Rightarrow B_p \geq 0,3$$

Convenons donc de prendre comme épaisseur des poutres **$B_p=0,4\text{m}$** .

-Nombre de poutres

Le nombre de poutres est défini en fonction de la largeur du tablier. Le tableau ci-dessous proposé par Jeans Armand Calgaro donne les correspondances suivantes :

CHAPITRE II: PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DU TABLIER DU PONT A POUTRES SOUS CHAUSSEE

Tableau II.1: Nombre de poutre en fonction de la largeur du tablier [1]

L Tablier(m)	<6	6-9	9-11	11-14
Nombre de poutres	2	3	4	5

Dans notre cas d'étude, la largeur du tablier étant de 10m, on devra donc placer **N=04 poutres** Au total dont **02 de rives et 02 intermédiaires**.

-Espacement des poutres

Le tablier comporte quatre (04) poutres sous chaussée. On adoptera un espacement entre axe de $e= 2,5m$ entre chacune des poutres.

II.2.2 Entretoises

-Hauteur de l'entretoise

La hauteur des entretoises sera prise égale à celle des poutres c'est-à-dire **$H_e=0,9m$** .

-Largeur de l'entretoise

La largeur des entretoises sera prise égale à celle des poutres à savoir **$B_e=0,4cm$** . Nous en placerons au niveau des appuis et ce qui fera donc un total de 2 entretoises.

II.2.3 Hourdis

-Epaisseur du hourdis

L'épaisseur (**eh**) du hourdis est donnée en fonction de l'entraxe (a) des poutres. Selon le tableau proposé par Calgaro, on a :

Tableau II.2: Epaisseur du hourdis en fonction de l'espacement des poutres [1]

a (m)	2	2,5	3,0	3,5
eh(cm)	16	18	20	22

Comme l'entraxe $a=2,5m$, nous avons d'après le tableau ci-dessus, **eh=18cm**. Mais convenons de prendre **eh=20cm** pour des dispositions constructives.

CHAPITRE II: PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS DU TABLIER DU PONT A POUTRES SOUS CHAUSSEE

II.3 Récapitulatif du pré-dimensionnement

Les dimensions des parties du tablier sont présentées par le tableau suivant:

Tableau II.3: Récapitulatif du pré-dimensionnement

Elément	Dimensions		
Poutres	Nombre de poutres	N_p	4
	Elancement poutre	H_p	0.90m
	Epaisseur âme	B_p	0.40m
	Ecartement des poutres	E	2.5m
Hourdis	Epaisseur hourdis	e_h	0.20m
Entretoises	Nombre d'entretoises	N_e	2
	Hauteur de l'entretoise	H_e	0.90m
	Largeur entretoise	B_e	0.40m
	Longueur entretoise	L_e	7,5m

**III CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET
CHARGES D'EXPLOITATION**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va calculer les charges et les surcharges que le pont doit supporter, car il a une fonction porteuse. Les actions appliquées à un ouvrage peuvent être permanentes ou variables.

III.2 Caractéristiques du pont

-Largeur roulable L_r

Il s'agit de la largeur mesurée entre bordures ou dispositifs de retenue. Dans le cas présent, on a selon les plans soumis à notre étude :

$$L_r = 7,5\text{m}$$

-Largeur chargeable L_c

$L_c = L_r$ s'il y a des bordures ou L_r diminuée de 50cm le long de chaque dispositif de retenue,

Lorsqu'il existe. Etant donné qu'ici il n'existe pas de dispositif de retenue alors on a :

$$L_c = L_r = 7,5\text{m}$$

-Nombre de voies N_v

Par convention le nombre de voies de circulation des chaussées N_v est tel que :

$$N_v = E\left(\frac{L_c}{3}\right)$$

Le symbole **E** désigne la partie entière et ici $L_c=7,5\text{m}$, on a :

$$N_v = E(7,5/3) = 2; N_v = 2 \text{ voies}$$

-Largeur d'une voie L_v

La largeur d'une voie est déterminée par la formule suivante :

$$L_v = \frac{L_c}{N_v} = \frac{7,5}{2} = 3,75\text{m}$$

La largeur d'une voie est donc : **$L_v = 3,75\text{m}$**

-Classe d'un pont

On distingue essentiellement trois classes de ponts rangés selon leur largeur roulable **L_r** , et leur destination :

-1^{ère} classe

Les ponts de première classe sont ceux pour lesquels la largeur roulable **$L_r \geq 7\text{m}$** . Il s'agit

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

également des ponts dont L_r peut être $< 7m$, mais qui sont désignés par les règlements car, soumis à une accumulation de poids lourds.

-2^{ème} classe

Les ponts de la 2^{ème} classe sont les ponts autres que ceux de la 1^{ère} classe à deux (2) voies et supportant des chaussées telles que : **$5,5 m < L_r < 7 m$** .

-3^{ème} classe

Les ponts de la 3^{ème} classe sont ceux portant des chaussées à une ou deux voies avec **$L_r \leq 5,5m$** .

Dans notre cas nous avons une largeur roulable de 7,5m. Nous avons donc un pont de la première classe. [2]

III.3 Calcul des charges

III.3.1 Charges permanente

Elles concernent toutes les charges qui restent invariables durant toute la vie de l'ouvrage, elles sont constituées des :

- Eléments porteurs : poids propre de tablier (poutres, entretoises, hourdis).
- Eléments non porteurs : la superstructure qui est constituée à son tour de (trottoirs, garde-corps, revêtement, étanchéité).

III.3.1.1 Poutres de rive

-Poids propre

$H_p=0,9 m$; $B_p=0,40 m$; $\gamma=25 kN/m^3$, avec γ le poids volumique du béton armé. Soit G_{pp} le poids propre de la poutre de rive, alors on a :

$$G_{pp}=H_p \times B_p \times \gamma$$

$$G_{pp}=0,90 \times 0,40 \times 25$$

$$G_{pp}= 9 kN/ml$$

-Revêtement

Nous prévoyons comme revêtement, du béton bitumineux (BB) de 8cm d'épaisseur. Le poids Volumique est de $22kN/m^3$. Soit G_r la charge du revêtement alors on a :

$$G_r=0,08 \times (2,5-1,25) \times 22$$

$$G_r= 2,2 kN/ml$$

-Etanchéité

Il est prévu une étanchéité d'une épaisseur de 3cm. Le poids volumique est de $22kN/m^3$. Soit $G_{ét}$ la charge de la couche d'étanchéité alors on a :

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

$$G_{ét}=0,03 \times (2,5-1,25) \times 22$$

$$G_{ét}= 0,825 \text{ kN/ml}$$

-Hourdis

Le poids volumique est de 25 kN/m^3 . Soit G_H la charge du hourdis alors on a :

$$G_H=0,20 \times 2,5 \times 25$$

$$G_H= 12,5 \text{ kN/ml}$$

-Trottoir

Nous avons un trottoir de $1,25 \text{ m}$ de large et de $0,20 \text{ m}$ de hauteur. Le poids volumique est de 25 kN/m^3 . Soit G_{Tr} la charge du trottoir alors on a :

$$G_{Tr}=0,20 \times 1,25 \times 25$$

$$G_{Tr}= 6,25 \text{ kN/ml}$$

-Garde-corps

Le poids propre des gardes corps type BN4 que nous avons choisi ici est de 65 kg/ml . Soit :

$$G_{GC} = 0,65 \text{ kN/ml}$$

III.3.1.2 Poutres intermédiaires

-Poids propre

$H_p=0,9 \text{ m}$; $B_p=0,40 \text{ m}$; $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$, avec γ le poids volumique du béton armé. Soit G'_{pp} le poids propre de la poutre intermédiaire, alors on a :

$$G'_{pp}=H_p \times B_p \times \gamma$$

$$G'_{pp}=0,90 \times 0,40 \times 25$$

$$G'_{pp}= 9 \text{ kN/ml}$$

-Revêtement

Nous prévoyons comme revêtement, du béton bitumineux (BB) de 8 cm d'épaisseur. Le poids Volumique est de 22 kN/m^3 . Soit G'_r la charge du revêtement alors on a :

$$G'_r=0,08 \times 2,5 \times 22$$

$$G'_r= 4,4 \text{ kN/ml}$$

-Etanchéité

Il est prévu une étanchéité d'une épaisseur de 3 cm . Le poids volumique est de 22 kN/m^3 . Soit $G'_{ét}$ la charge de la couche d'étanchéité alors on a :

$$G'_{ét}=0,03 \times 2,5 \times 22$$

$$G'_{ét}= 1,65 \text{ kN/ml}$$

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

-Hourdis

Le poids volumique est de 25kN/m^3 . Soit $G'H$ la charge du hourdis alors on a:

$$G'_H = 0,20 \times 2,5 \times 25$$

$$G'_H = 12,5 \text{ kN/m}$$

- Entretoises

On prévoit des entretoises d'about aux extrémités de la travée. Soit GE la charge de la couche d'étanchéité alors on a:

$$G_E = 0,40 \times 0,9 \times 7,5 \times 25$$

$$G'_{ét} = 67,5 \text{ kN/ml}$$

Les résultats des calculs ci-dessus sont regroupés dans le tableau suivant:

Tableau III.1: Récapitulatif de la descente des charges sur les poutres

Poids des éléments en tonne(t)			
Poutre derive		Poutre intermédiaire	
Poids propre de la poutre	0,9	Poids propre de la poutre	0,9
Revêtement de chaussée	0,22	Revêtement de chaussée	0,44
Etanchéité	0,0825	Etanchéité	0,165
Hourdis	1,25	Hourdis	1,25
Trottoir	0,65		
Garde-corps	0,065		
Poids total(t/ml)	3,1675	Poids total(t/ml)	2,436
Poids total(t)	63,35	Poids total(t)	48,72

Le poids total pour une travée entière de 20ml est résumé dans le tableau ci-dessous :

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

Tableau III.2: Poids total de la travée

Eléments	Poids unitaire (t)	Nombre	Poids total (t)
Poutres de rive	63,35	2	126,7
Poutres intermédiaires	48,72	2	97,44
Entretoises	6,75	2	13,5
Poids total de la travée en tonne (t)			237,64

III.3.2 Surcharges d'exploitation et ses coefficients de majoration

Les surcharges prises en compte dans les calculs sont celles préconisées dans le fascicule 61 titre II relatives aux surcharges routières. Les dites surcharges routières prises en compte sont celles de type A, B, Mc et Me définies par le fascicule 61 titre II du CPC.

Pour le calcul des poutres, nous utiliserons les cinq (5) systèmes de surcharges suivants :

- Le système A ;
- Le système B avec ses sous-systèmes Bc, Bt et Br ;
- Le système militaire ;
- Le système de convoi exceptionnel ;
- Les surcharges de trottoir qui comprend deux types de surcharges, les surcharges locales et les surcharges générales [2]

III.3.2.1 Système A

-Calcul de A(L)

Pour les ponts comportant des portées unitaires atteignant au plus 200 m, la chaussée supporte une charge uniforme A(l) donnée par l'expression :

$$A(l) = 230 + \frac{36000}{l + 12} \text{ en Kg} \\ m^2$$

La surcharge A(l) doit être majorée par un coefficient de dégressivité transversale a_1 dépendant de la classe du pont et du nombre de voies chargées et d'un coefficient d'uniformisation a_2 à calculer pour obtenir l'intensité de la charge uniforme supportée par la chaussée A(L). Soit :

$$A(L) = a_2 * \max \left[a_1 \left(230 + \frac{36000}{l + 12} \right); (400 - 0,2l) \right]$$

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

Où l représente la longueur de la travée et a_1 un coefficient de correction dont les valeurs sont données dans le tableau ci-dessous:

Tableau III.3: Valeurs d' a_1 en fonction du nombre de voies chargées et de la classe d'un pont [2]

		Nombre de voies chargées				
		1	2	3	4	≥ 5
Classe Du pont	1 ^{ère}	1	1	0,9	0,75	0,7
	2 ^{ème}	1	0,9	---	---	---
	3 ^{ème}	0,9	0,8	---	---	---

Etant donné que dans notre cas il s'agit d'un pont de 1^{ère} classe et que nous avons deux 02 Voies chargées, alors nous déduisons que $a_1=1$.

Le coefficient a_2 quant à lui est défini par la formule :

$$a_2 = \frac{V_0}{V}$$

Où V représente la moitié de la largeur chargeable et V_0 est fonction de la classe du pont et de la largeur d'une voie. Le tableau ci-dessus nous donne les valeurs de V_0 :

Tableau III.4: Récapitulatif des valeurs de V_0 en fonction de la classe du pont [2]

Classe du pont	1 ^{ère} classe	2 ^{ème} classe	3 ^{ème} classe
V_0 (m)	3,5	3	2,75

Notre pont étant de 1^{ère} classe, nous pouvons alors déduire :

$$V_0 = 3,5\text{m et } V = \frac{L_c}{2} = 3,75\text{m}$$

D'où on a :

$$a_2 = \frac{V_0}{V} = \frac{3,5}{3,75} = 0,93$$

Alors on a par suite :

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

$$\begin{aligned} A(L) &= \max \left[a_1 \times a_2 \times \left(230 + \frac{36000}{l + 12} \right); (400 - 0,2l) \right] \\ &= \max \left[0,93 \times 1 \times \left(230 + \frac{36000}{20 + 12} \right); (400 - 0,2 \times 20) \right] \\ &= \max[1453,9; 396] \\ A(L) &= 1260,15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 1,2601 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

En chargeant sur la largeur roulable on a :

$$A(L) = 1260,15 \times 7,5$$

$$A(L) = 9,45 \text{ t/ml}$$

III.3.2.2 Système B

Le système de charges B comprend les surcharges civiles qui peuvent sollicitées et qui se composent entrais (3) types de systèmes distincts :

- Le système Bc qui se compose de camions types (30 t).
- Le système Bt se compose de groupes de 2 essieux dits (essieux tandems) (32 t).
- Le système Br se compose d'une roue isolée (10 t).

-Surcharge Bc

Un camion type du système Bc comporte trois essieux, et 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 : 2,5 m
- Distance des essieux arrière : 1,5 m
- Distance de l'essieu avant au premier essieu arrière : 4,5 m
- Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu : 2m
- Surface d'impact d'une roue arrière : carré de 0,25 m de côté.
- Surface d'impact d'une roue avant : carré de 0,20 m de côté. [2]

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

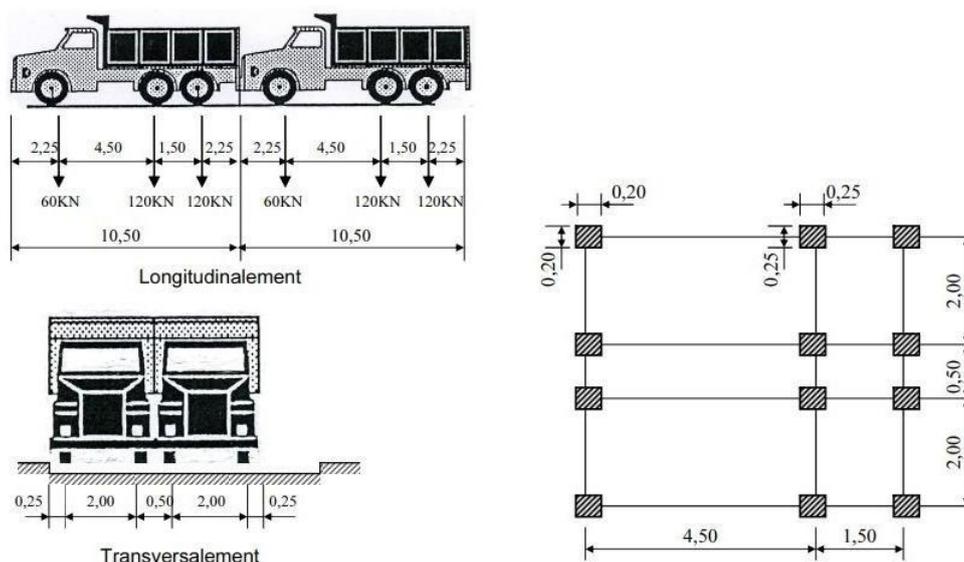


Figure III.1: Système Bc

Nous disposerons transversalement sur la chaussée autant de files de camions Bc que la chaussée comporte de voies de circulation. Longitudinalement le nombre de camions par file sera limité à 2.

Les charges de ce système sont affectées d'un coefficient de pondération b_c , qui dépend de la classe du pont et du nombre de files de camions disposées transversalement. Les valeurs données à ces coefficients sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.5: Coefficients b_c en fonction de la classe du pont et du nombre de files [2]

Classe du pont	Nombre de files disposées transversalement				
	1	2	3	4	5
1^{ère} classe	1,20	1,10	0,95	0,80	0,70
2^{ème} classe	1,00	1,00	-	-	-
3^{ème} classe	1,00	0,80	-	-	-

On a un pont de classe I et deux (2) files de camions disposées transversalement, donc $b_c=1,10$.

Finalement s'agissant de la surcharge **SB_c**, étant donné que nous avons donc 02 files de 02 camions on a :

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

$$S_{Bc} = 1,10 \times 30 \times 4 = 132t$$

Le poids total d'une travée est $G = 181,6 t$ et la longueur de la travée est $L=20m$.

Alors le coefficient de majoration dynamique donne :

$$\delta_{Bc} = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 20} + \frac{0,6}{1 + 4 \times \frac{237,64}{132}}$$

$$\delta_{Bc} = 1 + 0,08 + 0,073$$

$$\delta_{Bc} = \mathbf{1,153}$$

-Surcharge Bt

Le système Bt se compose de groupes de deux essieux dénommés essieux-tandems. Il est à noter que le système Bt ne s'applique qu'aux ponts de première ou de deuxième classe. Un tandem du système Bt comporte deux essieux tous deux à roues simples munies de pneumatiques et répondant aux caractéristiques suivantes :

- Masse portée par chaque essieu 16 t ;
- Distance des deux essieux 1,35 m ;
- Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu 2 m.

Selon le Fascicule 61 titre II, on ne peut disposer plus d'un tandem par voie et dans notre cas, nous ne pouvons disposer que deux tandems en raison d'un tandem par voie.

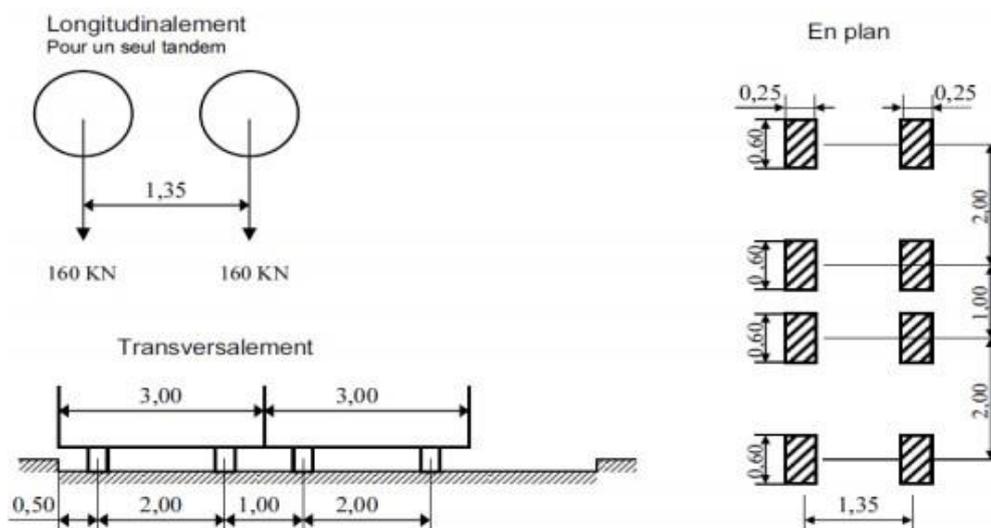


Figure III.2: Schéma représentatif des éléments du système Bt [2]

Avec 02 tandems, à raison de 01 par voie, nous avons comme surcharge pour le système Bt :

$$S_{Bt} = b_t \times 2 \times 32$$

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

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

Tableau III.6: Récapitulatif des coefficients b_t en fonction de la classe du pont [2]

Classe du pont	1 ^{ère} classe	2 ^{ème} classe
Valeur du b_t	1,00	0,90

Pour un pont de 1^{ère} classe nous avons un coefficient $b_t = 1,00$. Ce qui implique que :

$$S_{B_t} = 1 \times 2 \times 32$$

$$S_{B_t} = 64 \text{ t}$$

Le poids total d'une travée est $G = 181,6\text{t}$ et la longueur de la travée est $L=20\text{m}$. Alors le coefficient de majoration dynamique donne :

$$\delta_{B_t} = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 20} + \frac{0,6}{1 + 4 \times \frac{237,64}{64}}$$

$$\delta_{B_t} = 1 + 0,08 + 0,037$$

$$\delta_{B_t} = 1,117$$

-Système B_r

Le système B_r se compose quant à lui d'une roue isolée et s'applique à tous les ponts quel que soit leur classe.

La roue isolée, qui constitue le système B_r porte une masse de 10 tonnes. Sa surface d'impact sur la chaussée est un rectangle uniformément chargé dont le côté transversal mesure 0,60 m et le côté longitudinal 0,30 m. Le rectangle d'impact de la roue B_r , disposé normalement à l'axe longitudinal de la chaussée, peut être placé n'importe où sur la largeur roulable.

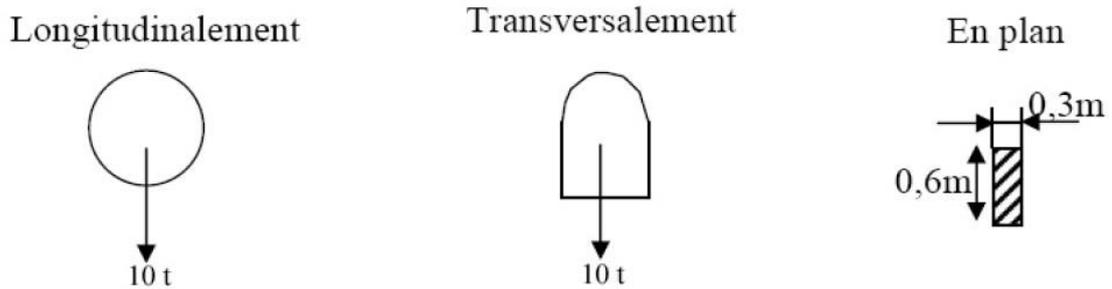


Figure III.3: Schéma représentatif des éléments du système Br [2]

Pas de pondération pour le système B_r donc $S_{B_r}=10t$.

D'où le coefficient de majoration dynamique pour le système B_r est :

$$\delta_{B_r} = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 20} + \frac{0,6}{1 + 4 \times \frac{237,64}{10}}$$

$$\delta_{B_r} = 1 + 0,08 + 0,006$$

$$\delta_{B_r} = \mathbf{1,086}$$

III.3.2.3 Surcharge militaire

-Surcharge Mc120

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

- Masse totale $S_{Mc120} = 110 t$;
- Longueur d'une chenille 6,10 m ;
- Largeur d'une chenille 1 m ;
- Distance d'axe en axe des deux chenilles 3,30 m.

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

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

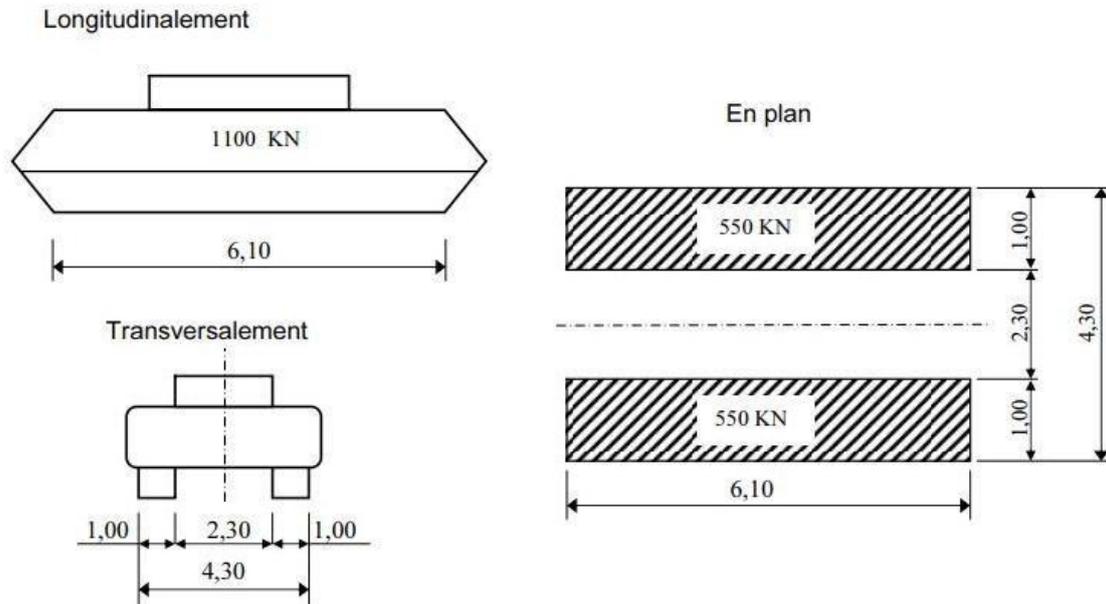


Figure III.4: Schéma représentatif des éléments du système Mc120 [2]

Le coefficient de majoration dynamique est :

$$\delta_{Mc_{120}} = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 20} + \frac{0,6}{1 + 4 \times \frac{237,64}{110}}$$

$$\delta_{Mc_{120}} = 1 + 0,08 + 0,06$$

$$\delta_{Mc_{120}} = 1,142$$

-Surcharge Me120

Les deux essieux qui constituent le système Me 120 sont distants de 1,80 m d'axe en axe et sont assimilés chacun à un rouleau. Chaque essieu porte une masse de 33 tonnes, sa largeur est un rectangle uniformément chargé dont le côté transversal mesure 4 m et le côté longitudinal 0,15 m.

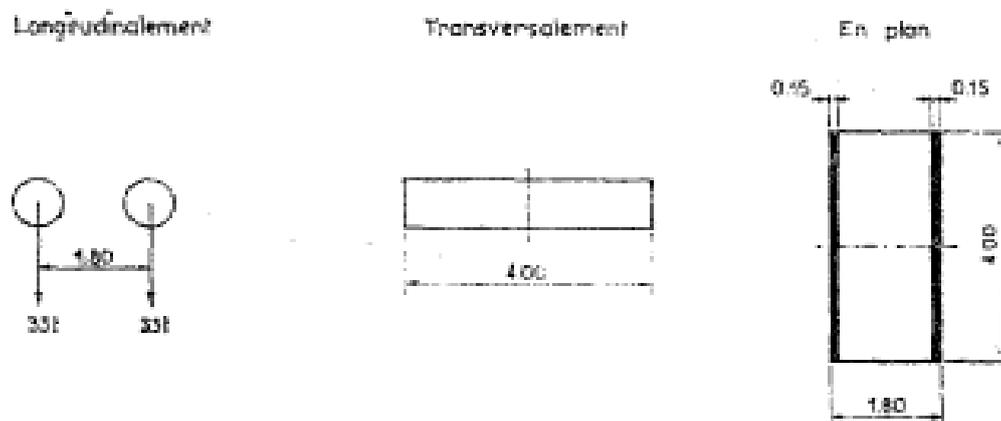


Figure III.5: Schéma représentatif des éléments du système Me120 [2]

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

Le coefficient de majoration dynamique est :

$$\delta_{Me_{120}} = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \times 20} + \frac{0,6}{1 + 4 \times \frac{237,64}{66}}$$

$$\delta_{Me_{120}} = 1 + 0,08 + 0,038$$

$$\delta_{Me_{120}} = 1,118$$

III.3.2.4 Système de convoi exceptionnel E

Certains itinéraires permettent la circulation des convois exceptionnels du type D et E. Ce type de charge est indiqué par le CPS du projet à réaliser.

Les charges exceptionnelles ne sont pas concernées par la majoration dynamique. Un seul convoi exceptionnel est placé sur le pont quel que soit sa longueur.

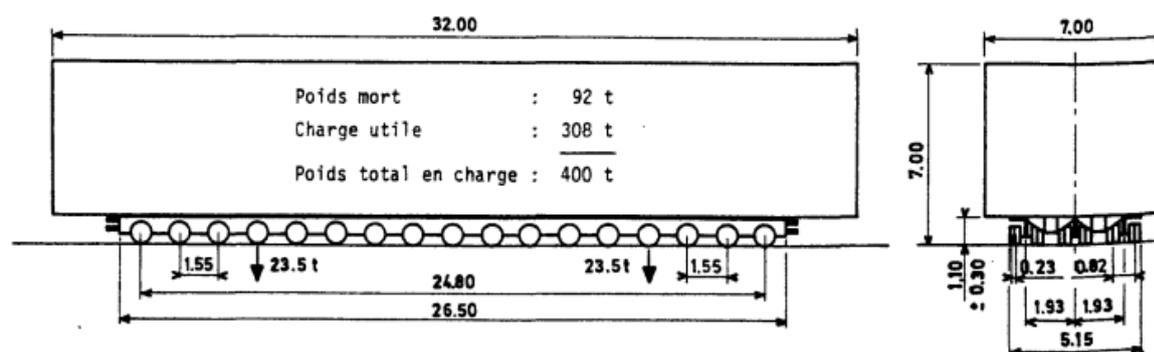


Figure III.6: Système E

III.3.2.5 Surcharges des trottoirs

Selon le fascicule 61 titre II, nous distinguons deux types de surcharges de trottoir:

- les charges générales.
- les charges locales.

Pour la justification des fermes maîtresses du tablier seules les surcharges générales sont prises en compte. Quant aux charges locales elles sont utilisées pour le calcul des éléments du pont à savoir le hourdis et la partie de la dalle en encorbellement.

-Charges générales

Les charges générales comprennent la surcharge de 150 kg/m² et la surcharge A(l). La seconde surcharge est utilisée pour le calcul des ponts réservés uniquement à la circulation des piétons et cyclistes (passerelles). Ce qui veut dire que dans notre cas, seule la charge 150 kg/m² sera

CHAPITRE III : EVALUATION DES CHARGES PERMANENTES ET CHARGES D'EXPLOITATION

prise en compte.

Le principe de calcul des sollicitations est le même que celui de la surcharge civile A(L).

-Calcul du poids du trottoir au ml

La largeur du trottoir est de 1,25m ici donc nous avons :

$$Str=0,15 \times 1,25 = 0,187 \text{ t/ml}$$

Tableau III.7: Tableau récapitulatif des coefficients de majoration dynamique

Type de système	SurchargeS	Coefficient demajoration dynamique
Système Bc	132 t	1,153
Système Bt	64 t	1,117
Système Br	10 t	1,086
Système Mc120	110 t	1,142
Système Me 120	66 t	1,118

IV CHAPITRE IV : REPARTITION LONGITUDINALE DES EFFORTS

IV.1 Introduction

Le calcul consiste à déterminer les efforts internes dans les différentes sections des poutres et cela en considérant le tablier comme une seule poutre reposant sur deux appuis simples. Les efforts ainsi obtenus seront divisés par le nombre de poutres.

Les charges et surcharges à prendre en considération sont calculées dans le chapitre précédent.

IV.2 Calcul des sollicitations dues aux charges permanentes

Les charges permanentes comprennent le poids propre de la poutre et celui des différents éléments supportés par celles-ci, à savoir : la dalle, le trottoir et ses accessoires, l'enrobé et l'étanchéité. Les poutres de rive et intermédiaire n'étant pas soumises aux mêmes sollicitations, nous évaluerons leur charge séparément afin d'en déduire la poutre la plus chargée.

IV.2.1 Poutres de rive

-Moment fléchissant

$$M = \frac{Pl^2}{8} = \frac{3,1675 \times 20^2}{8} = 158,37t.m$$

-Effort tranchant

$$T = \frac{Pl}{2} = \frac{3,1675 \times 20}{2} = 31,67t$$

IV.2.2 Poutres intermédiaires

-Moment fléchissant

$$M = \frac{Pl^2}{8} = \frac{2,436 \times 20^2}{8} = 121,8t.m$$

-Effort tranchant

$$T = \frac{Pl}{2} = \frac{2,436 \times 20}{2} = 24,36t$$

Dans le tableau ci-dessous sont récapitulées les sollicitations dues aux charges permanentes.

Tableau IV.1: Sollicitations dues aux charges permanentes

	Moments fléchissants (t.m)	Efforts tranchants (t)
Poutres de rive	158,37	31,67
Poutres intermédiaires	121,8	24,36

IV.3 Calcul des sollicitations dues aux surcharges routières

IV.3.1 Système A

Nous allons évaluer l'effort tranchant maximal et le moment fléchissant maximal.

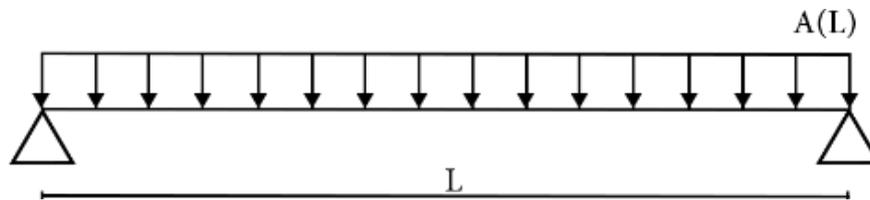


Figure IV.1: Schéma statique représentant la surcharge A(L) [6]

-Moment fléchissant maximal M_{max}

La surcharge A(L) étant une charge uniformément répartie, le moment maximal est donné par la formule :

$$M_{max} = \frac{A(L) \times L^2}{8} = \frac{9,45 \times 20^2}{8} = 472,5 \text{ t.m}$$

$$M_{max} = \mathbf{472,5 \text{ t.m}}$$

-Effort tranchant maximal T_{max}

$$T_{max} = \frac{A(L) \times L}{2} = \frac{9,45 \times 20}{2} = 94,5t$$

$$T_{max} = \mathbf{94,5t}$$

IV.3.2 Système B

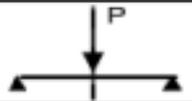
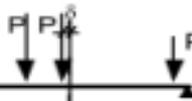
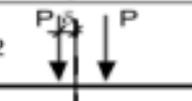
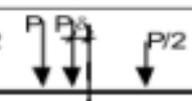
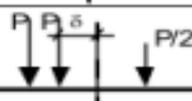
-Sous-système Bc

On dispose deux (2) files de deux (2) camions chacune

- Moment fléchissant maximal M_{max}

Une étude, basée sur le théorème de Barré, a été faite pour le convoi réglementaire Bc. Les dispositions les plus défavorables des essieux pour différentes longueurs de travées et les expressions des moments maximaux correspondants sont données dans le tableau suivant pour le cas de travée indépendante :

Tableau IV.2: Expression du moment maximal sous l'effet du convoi Bc dans une poutre à travée indépendante [3]

Portées (Lc en m)	Dispositions des essieux	δ (m)	Moments maximaux (M _{max})
0 < Lc < 2,56 m		0	M = 0,25 P Lc
2,56 < Lc < 9,19		0,375	M = P (0,50 Lc + $\frac{0,281}{Lc}$ - 0,75)
9,19 < Lc < 11,75		0,15	M = P (0,625 Lc + $\frac{0,056}{Lc}$ - 1,875)
11,75 < Lc < 17,44		0,375	M = P (0,75 Lc + $\frac{0,422}{Lc}$ - 3,375)
17,44 < Lc < 18,38		0,844	M = P (Lc + $\frac{2,848}{Lc}$ - 7,875)
18,38 < Lc		1,725	M = P (1,25 Lc + $\frac{14,878}{Lc}$ - 13,125)

Le moment fléchissant maximum développé par le convoi Bc dans une travée indépendante de 20m est donné par l'expression:

$$M_{\max} = P \left(1,25L + \frac{14,878}{L} - 13,125 \right)$$

$$M_{\max} = 12 \left(1,25 \times 20 + \frac{14,878}{20} - 13,125 \right)$$

$$M_{\max} = 151,43 \text{ t.m}$$

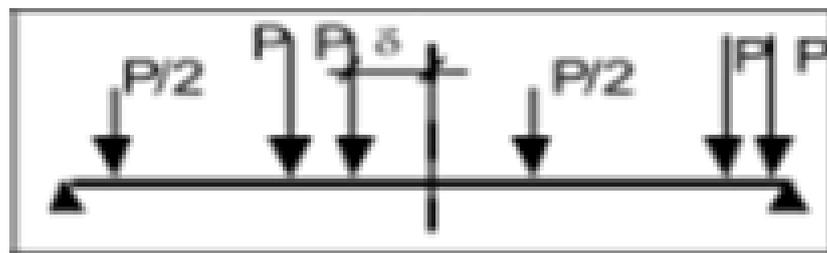


Figure IV.2: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bc (Moment flechissant) [6]

-Effort tranchant maximal T_{max}

L'effort tranchant maximum sur appui dû au convoi B_c est obtenu par la disposition suivante des essieux :

L'effort tranchant maximal correspond à la réaction d'appui. Pour avoir l'effort tranchant

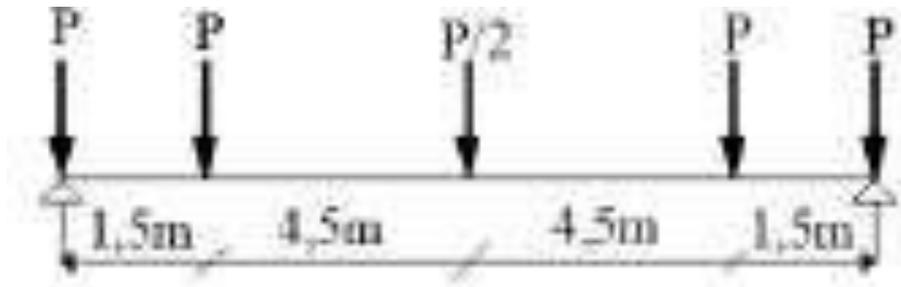


Figure IV.3: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour B_c (l'effort tranchant) [6]

Maximum, on place une roue sur l'une des extrémités de la poutre. Il est donnée par :

$$T_{max} = P \left(4,5 - \frac{27}{L} \right)$$

Avec $P=12t$ et $L=20m$, on a alors :

$$T_{max} = 12 \left(4,5 - \frac{27}{20} \right)$$

$$T_{max} = 37,8t$$

-Sous-système B_t

-Moment fléchissant maximal M_{max}

Deux (2) essieux sont disposés longitudinalement. Le moment maximal est donné par l'expression:

$$M_{max} = \frac{PL}{2} \left(1 - \frac{a}{2L} \right)^2$$

Avec $P=16t$, $a=1,35m$ et $L=20m$ alors on a :

$$M_{max} = \frac{16 \times 20}{2} \left(1 - \frac{1,35}{2 \times 20} \right)^2$$

$$M_{max} = 160 \times 0,933$$

$$M_{max} = 149,28t.m$$

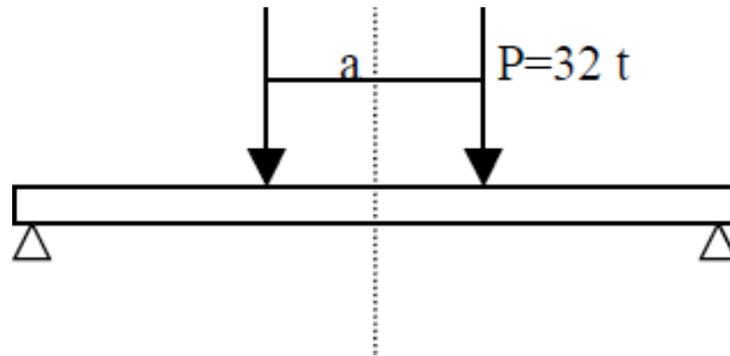


Figure IV.4: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bt (Moment flechissant) [6]

-Effort tranchant maximal T_{\max} :

L'effort tranchant est maximum lorsque l'une des charges est placée sur appui. Il est donné par l'expression :

$$T_{\max} = P \left(2 - \frac{a}{L} \right)$$

Avec $P=16t$, $a=1,35m$ et $L=20m$ alors on a :

$$\begin{aligned} T_{\max} &= 16 \times \left(2 - \frac{1,35}{20} \right) \\ T_{\max} &= 16 \times 1,932 \\ T_{\max} &= \mathbf{30,91t} \end{aligned}$$

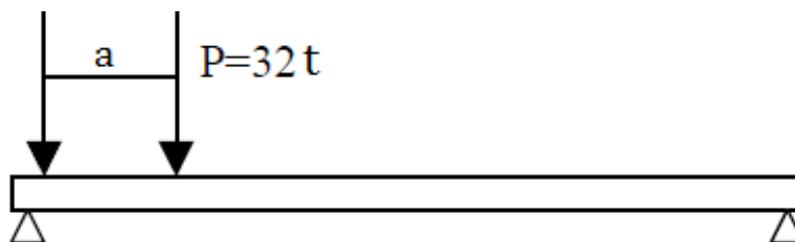


Figure IV.5: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Bt (l'effort tranchant) [6]

-Sous-système B_r

-Moment fléchissant maximal M_{\max}

Le moment fléchissant maximum est obtenu lorsque la roue se trouve à l'axe transversal de la travée, comme l'illustre la figure ci-dessous :

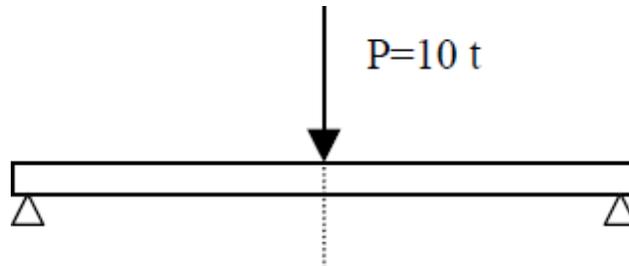


Figure IV.6: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Br (Moment fléchissant) [6]

On a comme moment fléchissant :

$$M_{\max} = \frac{PL}{4}$$

Avec P=10t et L=20m alors on a :

$$M_{\max} = \frac{10 \times 20}{4}$$
$$M_{\max} = 50t \cdot m$$

-Effort tranchant maximal T_{\max}

On obtient l'effort tranchant maximum quand la charge isolée est placée sur un des appuis soit : $T_{\max} = P = 10t$

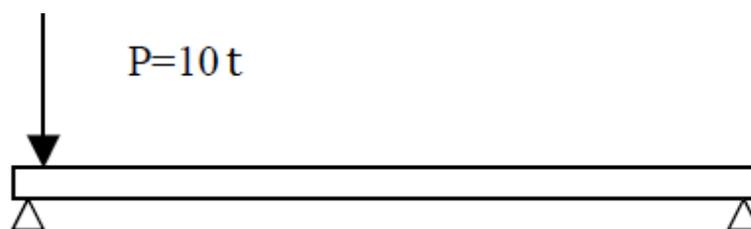


Figure IV.7: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Br (l'effort tranchant) [6]

IV.3.3 Surcharge Mc120

-Moment fléchissant maximal M_{max}

Le moment fléchissant le plus défavorable intervient quand la résultante P du convoi est située dans l'axe longitudinal de la travée. On a :

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \left(1 - \frac{b}{2L}\right)$$

Avec b la longueur d'une chenille $b = 6,10\text{m}$ et $P = S_{Mc120} = 110\text{t}$. On a alors :

$$M_{max} = \frac{110 \times 20}{4} \left(1 - \frac{6,10}{2 \times 20}\right)$$

$$M_{max} = 550 \times 0,8475$$

$$M_{max} = 466,12 \text{ t.m}$$

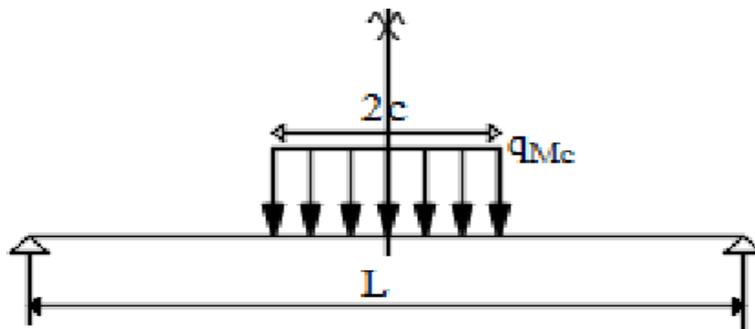


Figure IV.8: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Mc120 (Moment flechissant) [6]

-Effort tranchant maximal T_{max}

L'effort tranchant maximal est donné par l'expression suivante :

$$T_{max} = Pb' \left(1 - \frac{b}{2L}\right)$$

Avec b la longueur d'une chenille $b = 6,10\text{m}$, b' la largeur d'une chenille $b' = 1\text{m}$ et $P = S_{Mc120} = 110\text{t}$. On a alors :

$$T_{max} = 110 \times 1 \times \left(1 - \frac{6,10}{2 \times 20}\right)$$

$$T_{max} = 93,22\text{t}$$

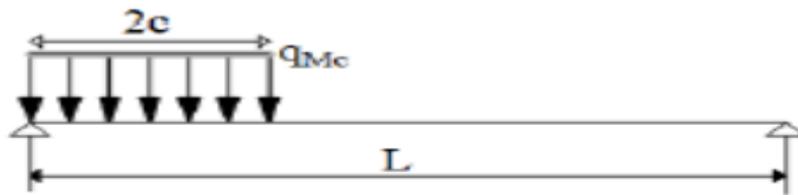


Figure IV.9: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Mc120 (l'effort tranchant) [6]

IV.3.4 Surcharge Me120

-Moment fléchissant maximal M_{max}

Le moment maximum M_{max} est obtenu quand les deux essieux sont placés à égale distance du milieu de la travée. Il est donné, pour ce cas de surcharge, par la formule suivante :

$$M_{\max} = \frac{PL}{2} \left(1 - \frac{a}{2L}\right)^2$$

Avec P = 33t ; a = 1,8m et L = 20m. On a alors :

$$M_{\max} = \frac{33 \times 20}{2} \left(1 - \frac{1,8}{2 \times 20}\right)^2$$

$$M_{\max} = 330 \times 0,912$$

$$M_{\max} = 300,96 \text{ t.m}$$

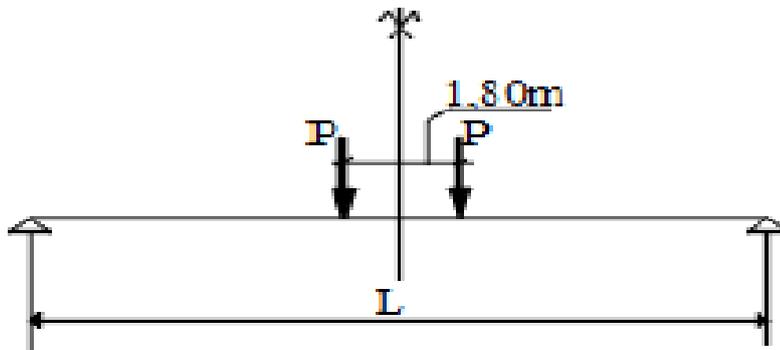


Figure IV.10: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Me120 (Moment flechissant) [6]

-Effort tranchant maximal T_{max}

Il correspond à la réaction d'appui. Pour avoir l'effort tranchant maximum, on place un essieu sur l'extrémité de la poutre.

$$T_{\max} = P \left(2 - \frac{a}{L} \right)$$

$$T_{\max} = 33 \times \left(2 - \frac{1,8}{20} \right)$$

$$T_{\max} = 63,03t$$

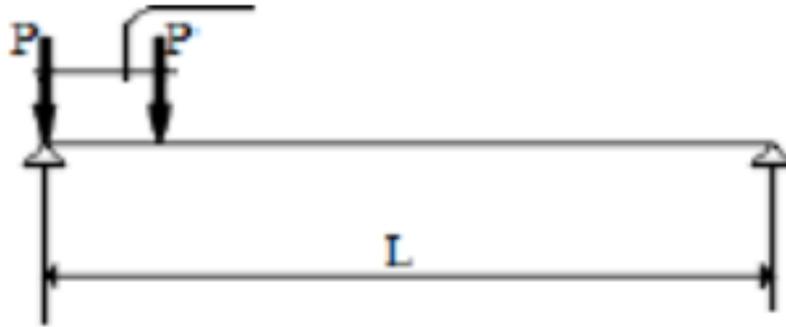


Figure IV.11: Schéma statique représentatif pour le cas le plus défavorable pour Me120 (l'effort tranchant) [6]

IV.3.5 Système de convoi exceptionnel de type E

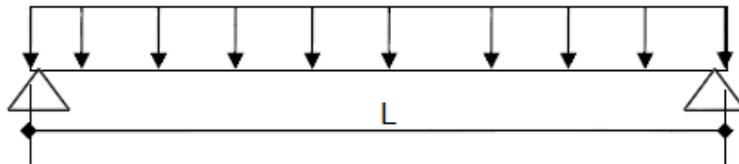


Figure IV.12: Schéma statique représentatif du système de convoi exceptionnel de type E [6]

-Moment fléchissant maximal M_{\max}

$$M_{\max} = \frac{Pl^2}{8}$$

Avec $P=p/L'$, p étant le poids d'une remorque qui est égal à 200t et L' la longueur du rectangle représentant la surface d'impact. Soit :

$$P = \frac{200}{20} = 10t$$

$$M_{\max} = \frac{Pl^2}{8} = \frac{10 \times 20^2}{8} = 500t.m$$

-Effort tranchant maximal T_{\max}

$$T_{\max} = \frac{Pl}{2} = \frac{10 \times 20}{2} = 100t$$

IV.3.6 Surcharges des trottoirs

-Moment fléchissant maximal M_{max}

$$M_{max} = \frac{S_{tr}l^2}{8} = \frac{0,187 \times 20^2}{8} = 9,35t.m$$

-Effort tranchant maximal T_{max}

$$T_{max} = \frac{S_{tr}l}{2} = \frac{0,187 \times 20}{2} = 1,87t$$

Récapitulons dans le tableau ci-après les différentes sollicitations affectées des coefficients de majoration dynamique.

Tableau IV.3: Récapitulatif des sollicitations affectées des coefficients de majoration dynamique

Surcharges		Coefficient de majoration	Moment fléchissant (t.m)		Effort tranchant (t)	
			Non- majoré	Majoré	Non- majoré	Majoré
Surcharges civiles	A	-	472,5	472,5	94,5	94,5
	Bc	1,153	151,43	174,6	37,8	44,30
	Bt	1,117	149,28	166,75	30,91	34,87
	Br	1,086	50	54,3	10	10,88
Surcharges militaires	Mc120	1,142	440	502,48	76,45	87,91
	Me120	1,118	300,96	336,47	63,03	71,16
Surcharges exceptionnelles	Type E	-	500	500	100	100
Surcharges de trottoirs	Charges générales	-	9,35	9,35	1,87	1,87

CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS: METHODE DE GUYON MASSONNET

V CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS: METHODE DE GUYON MASSONNET

V.1 Calcul des coefficients de répartition transversale (CRT) de GUYON-MASSONNET

Le moment fléchissant et l'effort tranchant d'un tablier peuvent être déterminés par les lignes d'influence en n'importe quelle abscisse x le long du tablier. Mais le problème qui se pose est comment répartir ce moment et cet effort entre les poutres ? En d'autres termes connaître les valeurs de sollicitations dans chaque poutre. Plusieurs méthodes ont essayé de répondre à cette question, parmi lesquelles celle de Guyon-Massonnet. Elle permet de déterminer un coefficient correctif appelé « Coefficient de Répartition Transversale (CRT) » qui montre la portion des surcharges transmises dans la poutre considérée. [4]

V.2 Aperçu général de la méthode Guyon-Massonnet

C'est la méthode la plus répandue et est largement employée dans les calculs des grillages formés par les poutres, entretoises et dalles. Elle suppose que l'entretoise est de rigidité finie, cas courant des tabliers en béton. [4]

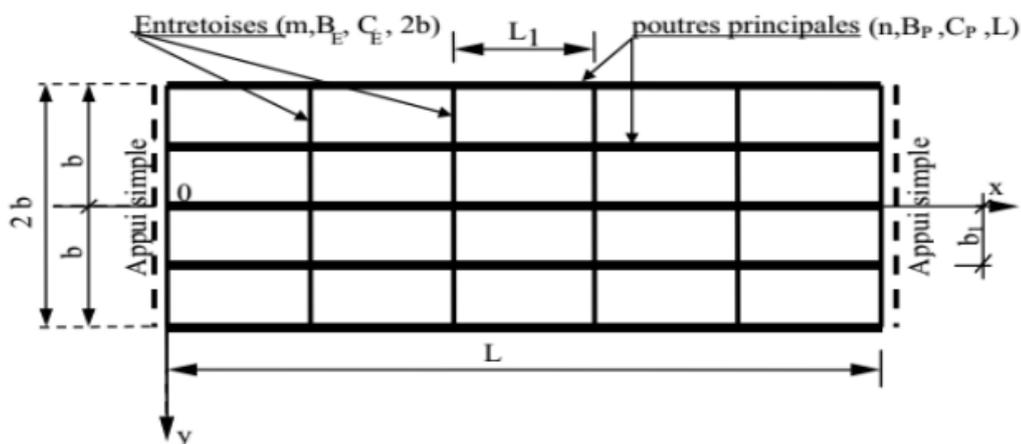


Figure V.1: Modèle du tablier de pont d'après Guyon-Massonnet [5]

V.3 Paramètres fondamentaux

On considère une travée indépendante de portée L , de largeur $2b$ dont l'ossature est constituée par une poutraison croisée de n poutres longitudinales (portée L , espacement b_1) de m entretoises (portées $2n$, espacement L_1) intermédiaires, disposées transversalement.

Toutes les poutres sont identiques et caractérisées par :

-Leur rigidité à la flexion : $B_P = E \times I_P$

-Leur rigidité à la torsion : $C_P = G \times K_P$

CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS: METHODE DE GUYON MASSONNET

Les entretoises sont elles aussi identiques et sont caractérisées par :

-Leur rigidité à la flexion : $BE=E \times IE$

-Leur rigidité à la torsion : $CE=G \times KE$ Avec : $E=$ module de young

$G =$ module de torsion $= \frac{E}{2(1 + \nu)^2}$, où $\nu =$ coefficient de poisson.

Par unité de longueur, ces rigidités deviennent :

Rigidité de flexion : $\rho_p = \frac{B_p}{b_1} = \frac{E \times I_p}{b_1}$; $\rho_E = \frac{B_E}{L_1} = \frac{E \times I_E}{L_1}$

Rigidité de torsion : $\gamma_p = \frac{C_p}{b_1} = \frac{G \times K_p}{b_1}$; $\gamma_E = \frac{C_E}{L_1} = \frac{G \times K_E}{L_1}$

On suppose que le coefficient du matériau constitutif est nul ($\nu=0$) donc : $G = \frac{E}{2}$

Pour arriver à complètement définir le comportement du pont, on va évaluer les deux (2) importants paramètres suivants :

-le paramètre de torsion :

$$\alpha = \frac{\gamma_p + \gamma_E}{2 \times \sqrt{\rho_p \times \rho_E}}$$

- le paramètre d'entretoisement :

$$\theta = \frac{b}{L} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_E}}$$

On calcule par la suite le coefficient K obtenu grâce aux tableaux numériques de Guyon-Massonnet, et qui finalement, dépend de :

-la valeur du paramètre de torsion α ;

-la valeur du paramètre d'entretoisement θ ;

-l'excentricité de la charge e ;

-l'ordonnée de la poutre considérée y .

Pour $\alpha = 0$, on a $K_0=0$ et pour $\alpha = 1$, on a $K_1=1$.

Pour α quelconque, l'interpolation n'est pas nécessaire. Elle est donnée par les tables de

Massonnet. Au même titre que K_0 et K_1 qui elles, sont fonction de θ , e et y .

Enfin, les coefficients K sont divisés par le nombre de poutres pour obtenir le CRT. En

D'autres termes, $CRT = \eta \frac{K}{n}$, n étant le nombre de poutres.

CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS: METHODE DE GUYON MASSONNET

Nous allons donc calculer le CRT pour la poutre de rive et la poutre intermédiaire afin de retenir les valeurs de CRT les plus grandes.

$b_1 = b_0 = 2,5m$ et le nombre des poutres est $n = 4$

$2b =$ largeur active pour Guyon – Massonnet $= 7,5 + (2 \times 1.25) = 10m$ alors $b = 5m$

Les caractéristiques géométriques de la poutre et les calculs et les courbes ont été regroupés en annexe 1.

Les coefficients de répartition transversale des deux cas pour les différents cas de chargement sur les poutres de rive et intermédiaire sont résumés dans les tableaux suivants :

V.4 Cas des entretoises d'about

Tableau V.1: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre de rive (cas d'entretoises d'about)

Charges	CRT
A_L	0,23
q_{tr}	0,60
B_c	0,65
B_t	0,57
B_r	0,54
M_{c120}	0,36
M_{e120}	0,41

Tableau V.2: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre intermédiaire (cas d'entretoises d'about)

Charges	CRT
A_L	0,27
Q_{tr}	0,39
B_c	0,62
B_t	0,59
B_r	0,34
M_{c120}	0,30
M_{e120}	0,38

CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS:

METHODE DE GUYON MASSONNET

V.4.1 Calcul des sollicitations réelles dans les poutres

Le calcul du CRT étant fait pour les différentes poutres, il s'agit de le prendre en compte dans l'évaluation des sollicitations dans les poutres. Ainsi, nous avons les moments affectés des CRT dans le tableau suivant : (Les valeurs des moments sont en t.m)

Tableau V.3: Récapitulatif des moments pondérés par les CRT (cas d'entretoises d'about)

	Charges permanentes	Surcharges civiles				Surcharges militaires		Surcharge de trottoir
		A_L	B_c	B_t	B_r	M_{c120}	M_{e120}	Charges générales
Moments non majorés par les CMD (M_T)	-	472,5	151,43	149,28	50	440	300,96	9,35
Poutre de rive								
CRT pour les poutres de rive (η_{pr})	-	0,23	0,65	0,57	0,54	0,36	0,41	0,60
Moments affectés des CRT	158,37	108,68	98,43	85,09	27	158,4	123,39	5,61
Poutre intermédiaire								
CRT pour les poutres intermédiaires	-	0,27	0,62	0,59	0,34	0,30	0,38	0,39
Moments affectés des CRT	121,8	127,58	93,89	88,08	17	132	114,36	3,65

Nous avons dans le tableau suivant, les efforts tranchants par poutre :

**CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS:
METHODE DE GUYON MASSONNET**

Tableau V.4: Récapitulatif des efforts pondérés par les CRT (cas d'entretoises d'about)

		Charges permanentes	Surcharges civiles				Surcharges militaires		Surcharge de trottoir
			A _L	B _c	B _t	B _r	Mc ₁₂₀	Me ₁₂₀	Charges générales
Efforts non majorés par les CMD			94,5	37,8	30,91	10	76,45	63,03	1,87
Poutre de rive									
Efforts tranchants par poutres		31,67	21,74	24,57	17,62	5,4	27,52	25,84	1,122
Poutre intermédiaire									
Efforts tranchants par poutres		24,36	25,52	23,44	18,24	3,4	22,94	23,95	0,73

V.5 Cas de la dalle

Tableau V.5: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre de rive (cas de la dalle)

Charges	CRT
A _L	0,23
q _{tr}	0,64
B _c	0,64
B _t	0,55
B _r	0,55
Mc ₁₂₀	0,35
Me ₁₂₀	0,40

**CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS:
METHODE DE GUYON MASSONNET**

Tableau V.6: Tableau récapitulatif des CRT pour la poutre intermédiaire (cas de la dalle)

Charges	CRT
A_L	0,27
q_{tr}	0,35
B_c	0,64
B_t	0,61
B_r	0,36
M_{c120}	0,31
M_{e120}	0,40

V.5.1 Calcul des sollicitations réelles dans les poutres

Le calcul du CRT étant fait pour les différentes poutres, il s'agit de le prendre en compte dans l'évaluation des sollicitations dans les poutres. Ainsi, nous avons les moments affectés des CRT dans le tableau suivant : (Les valeurs des moments sont en t.m)

**CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS:
METHODE DE GUYON MASSONNET**

Tableau V.7: Récapitulatif des moments pondérés par les CRT (cas de la dalle)

	Charges permanentes	Surcharges civiles				Surcharges militaires		Surcharge de trottoir
		AL	Bc	Bt	Br	Me120	Me120	Charges générales
Moments non majorés par les CMD (M_T)	-	472,5	151,43	149,28	50	440	300,96	9,35
Poutre de rive								
CRT pour les poutres derive (η_{Pr})	-	0,23	0,64	0,55	0,55	0,35	0,40	0,64
Moments affectés des CRT	158,37	108,68	96,92	82,10	27,5	154	120,38	5,98
Poutre intermédiaire								
CRT pour les poutres intermédiaires	-	0,27	0,64	0,61	0,36	0,31	0,40	0,35
Moments affectés des CRT	121,8	127,58	96,92	91,06	18	136,4	120,38	3,27

**CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS:
METHODE DE GUYON MASSONNET**

Nous avons dans le tableau suivant, les efforts tranchants par poutre :

Tableau V.8: Récapitulatif des efforts pondérés par les CRT (cas de la dalle)

		Charges permanentes	Surcharges civiles				Surcharges militaires		Surcharge de trottoir
			A _L	B _c	B _t	B _r	Mc ₁₂₀	Me ₁₂₀	Charges générales
Efforts non majorés par les CMD			94,5	37,8	30,91	10	76,45	63,03	1,87
Poutre de rive									
Efforts tranchants par poutres		31,67	21,74	24,19	17	5,5	26,76	25,21	1,19
Poutre intermédiaire									
Efforts tranchants par poutres		24,36	25,52	24,19	18,86	3,6	23,69	25,21	0,65

**CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS:
METHODE DE GUYON MASSONNET**

-Histogrammes des moments

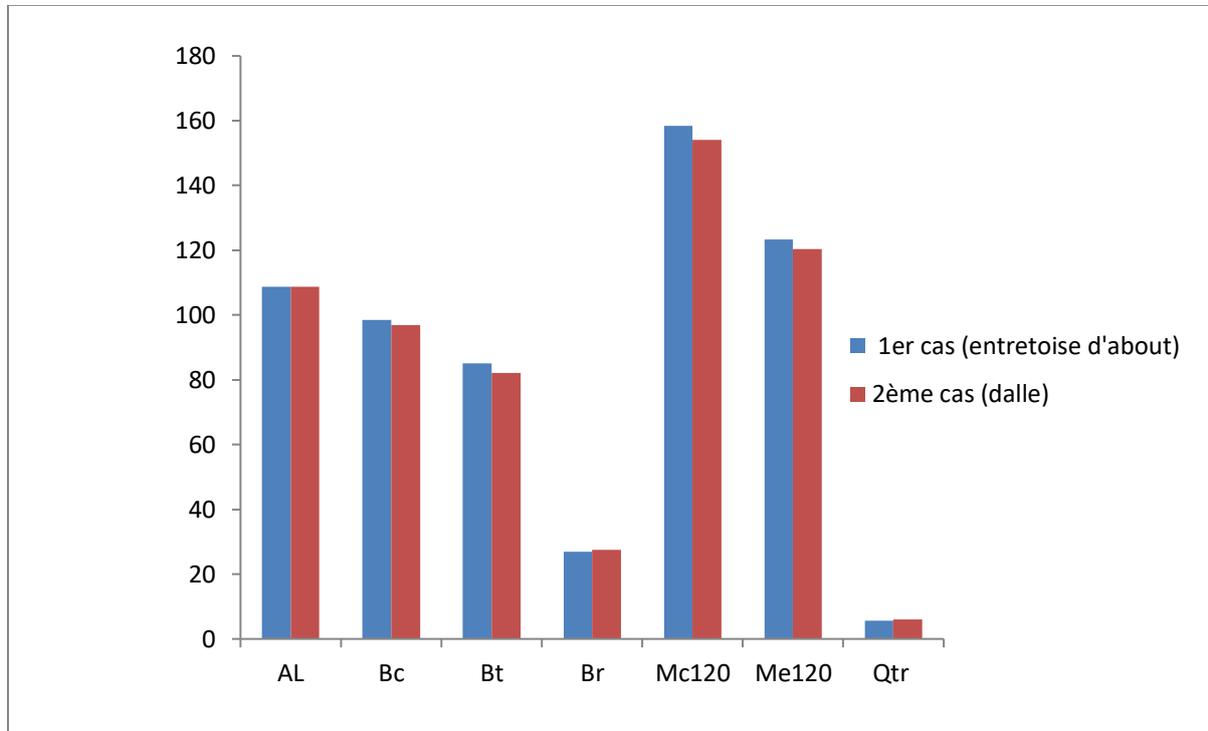


Figure V.2: Histogramme des moments pour la poutre de rive

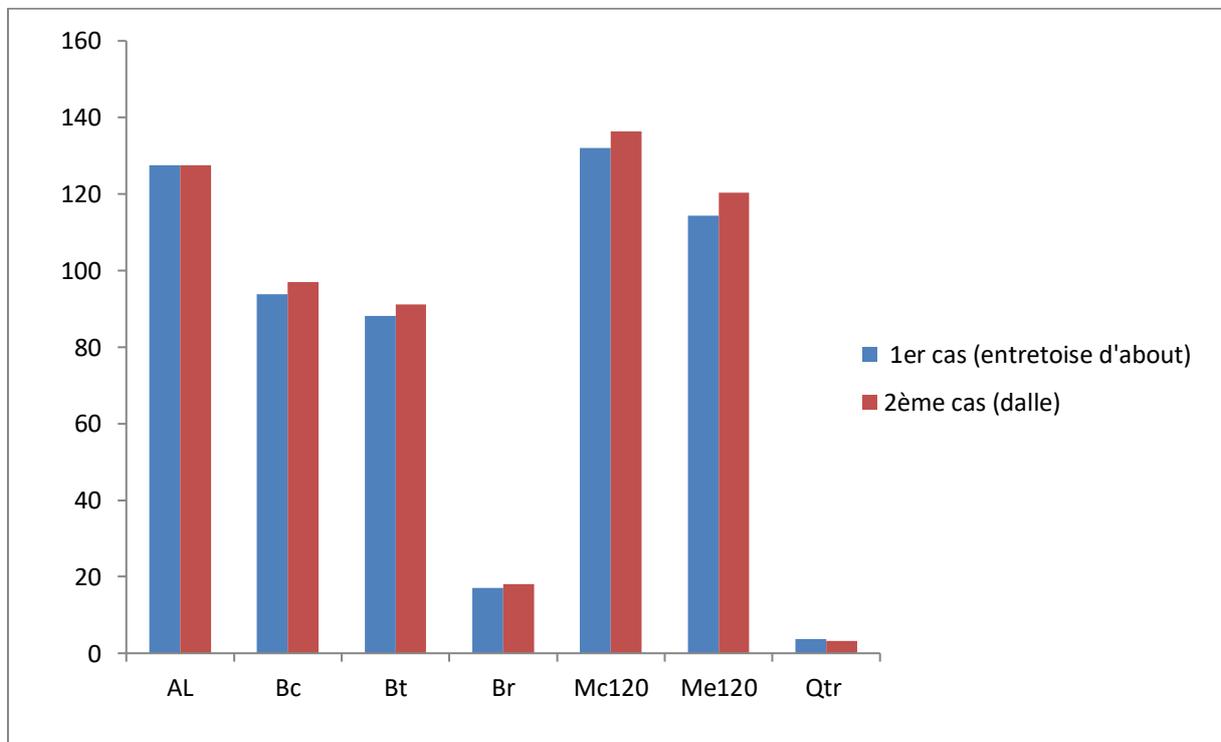


Figure V.3: Histogramme des moments pour la poutre intermédiaire

CHAPITRE V : REPARTITION TRANSVERSALE DES EFFORTS: METHODE DE GUYON MASSONNET

-Histogrammes des efforts tranchants

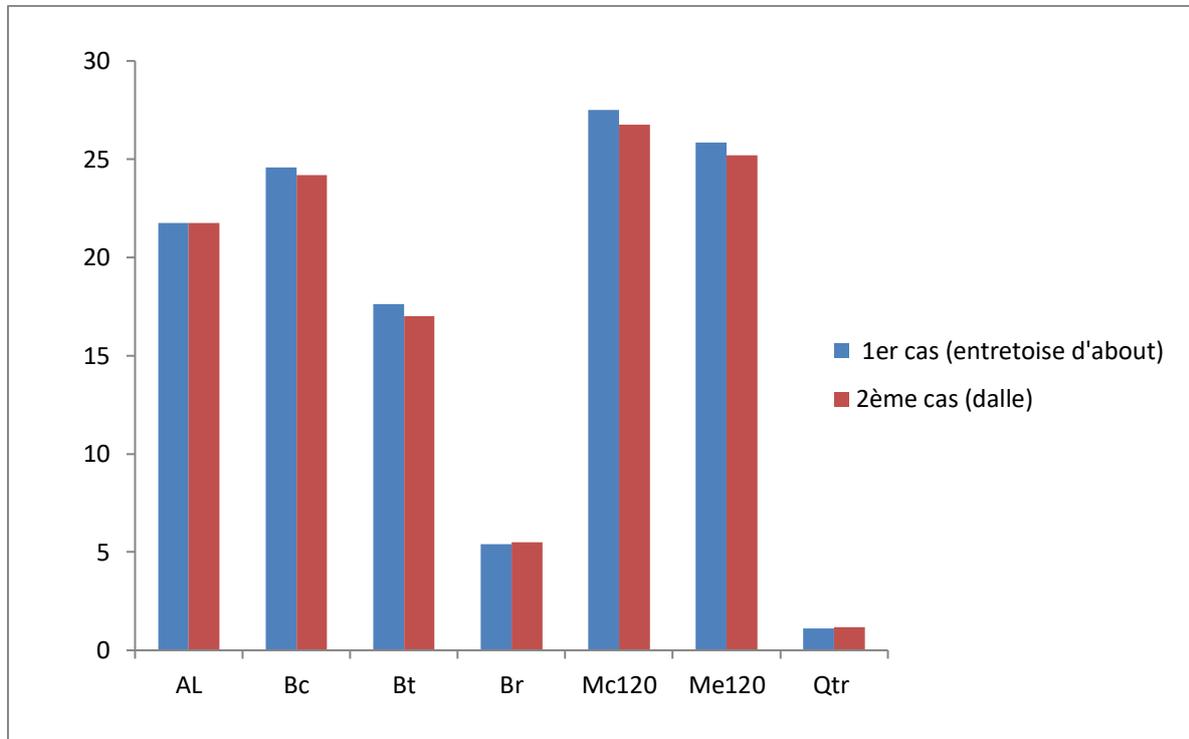


Figure V.4: Histogramme des efforts tranchants pour la poutre de rive

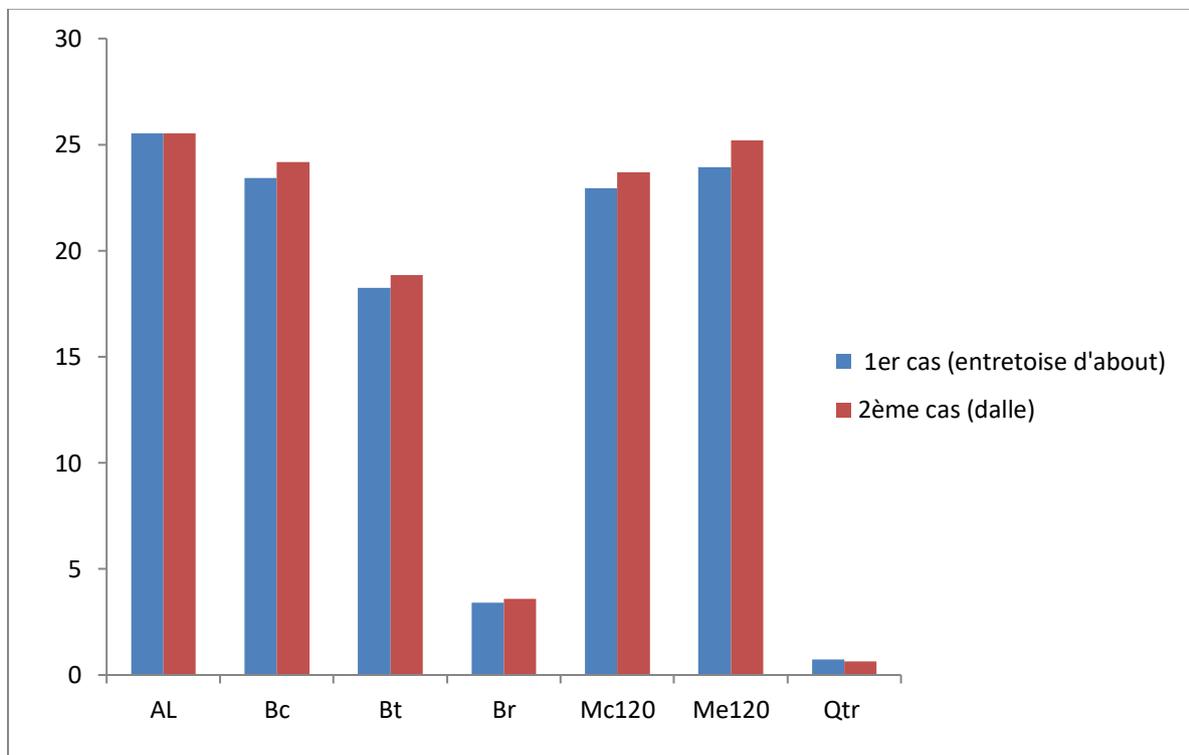


Figure V.5: Histogramme des efforts tranchants pour la poutre intermédiaire

**VI CHAPITRE VI: ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL
AUTODESK ROBOT STRUCTURAL**

VI.1 Introduction

Pour modéliser le tablier du pont on a opté pour le calcul numérique on utilisant le programme aux éléments finis Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014.

VI.2 Modélisation

VI.2.1 Présentation du logiciel Robot

Le logiciel Autodesk Robot Structural Analysis est un programme destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot permet de créer les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée.

Robot utilise la méthode d'analyse par éléments finis pour étudier les structures planes et spatiales de type :

Treillis, Portiques, Structures mixtes, Grillages de poutres, Plaques, Coques, Contraintes planes, Déformations planes, Eléments axisymétriques, Eléments Volumiques.

VI.2.2 Modèle de calcul

Pour calculer les efforts dans la structure (M, N, T), Le modèle numérique a été généré en utilisant un ensemble d'éléments finis. Des éléments finis bidimensionnels ont été utilisé pour la dalle (élément plaque) et éléments barres pour les poutres. Chaque élément fini est décrit par nœuds et des caractéristiques mécaniques données calculées à partir des matériaux et des sections adéquatement introduites dans le modèle de calcul.

Le tablier est modélisé par des poutres et une dalle supportée par sept appuis, les poutres sont modélisées par des éléments (barre) et la dalle est modélisée par des éléments panneau à 4 nœuds.

VI.2.3 Les étapes de modélisation

On a modélisé suivant les étapes ci-après :

-1ère étape

Le logiciel nécessite la définition des caractéristiques (préférences de l'affaire) :

- Définition des caractéristiques des matériaux.
- Définition des unités.

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

-Définition des normes et des règlements.

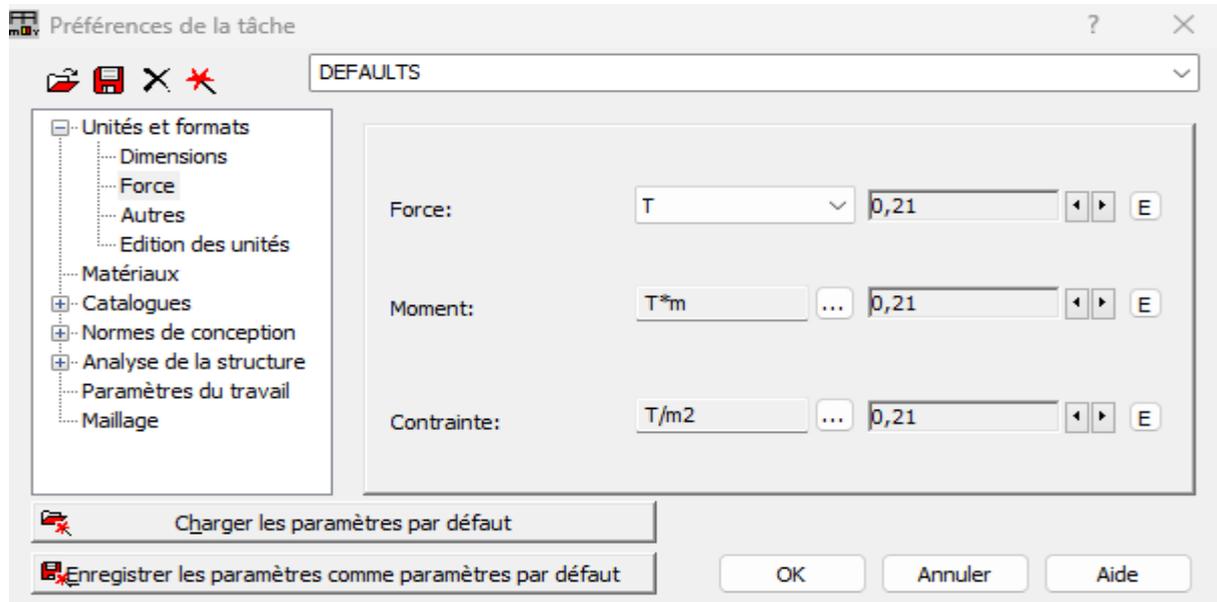


Figure VI.1: Définition des unités

-2ème étape

La définition de la structure (les lignes de constructions, éléments verticaux et éléments horizontaux).

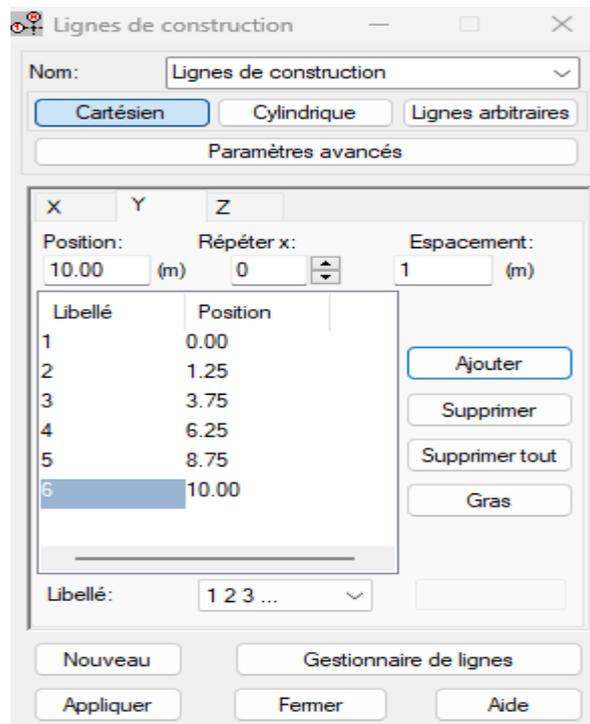


Figure VI.2: Définition des lignes de construction

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

-3ème étape

Définition des poutres en considérant leur section équivalente.

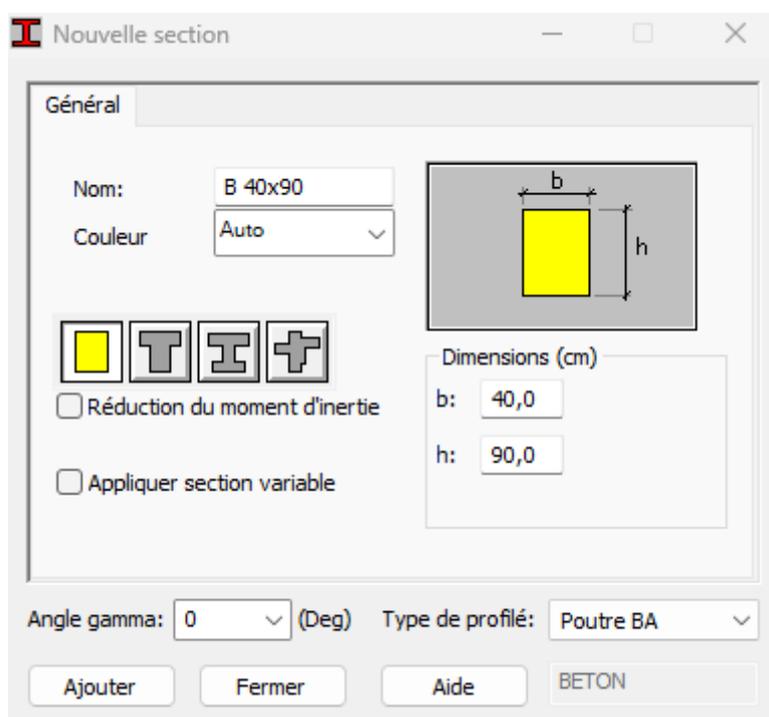


Figure VI.3: Définition de la section de la poutre

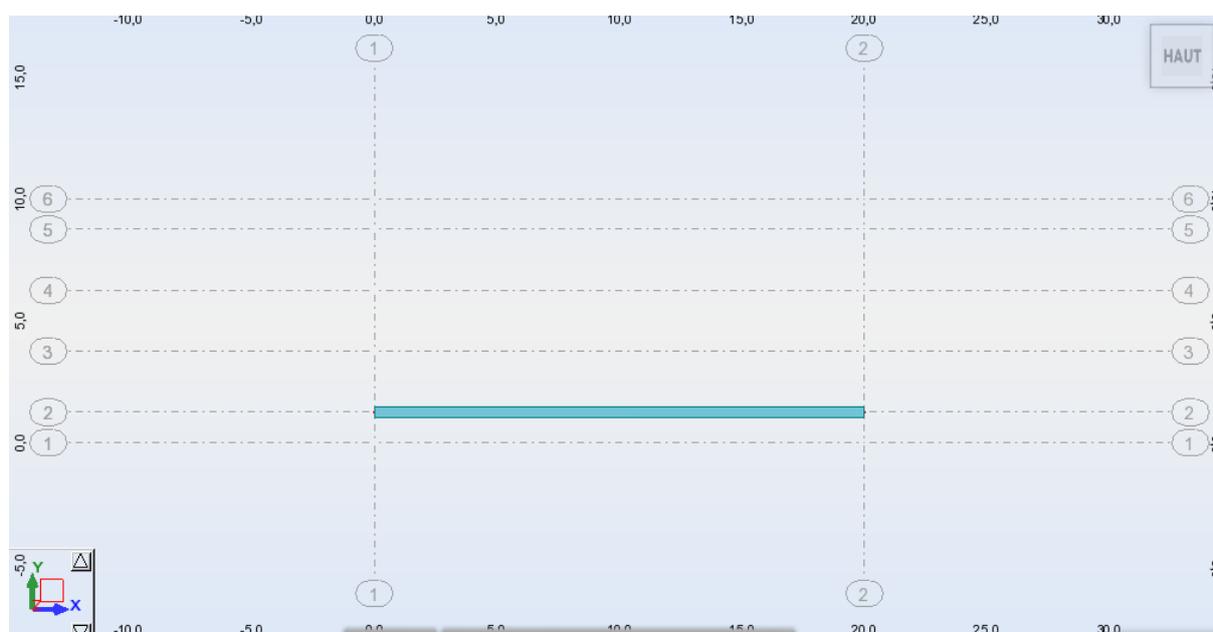


Figure VI.4: Définir la poutre

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

• 4ème étape

Définition des appuis

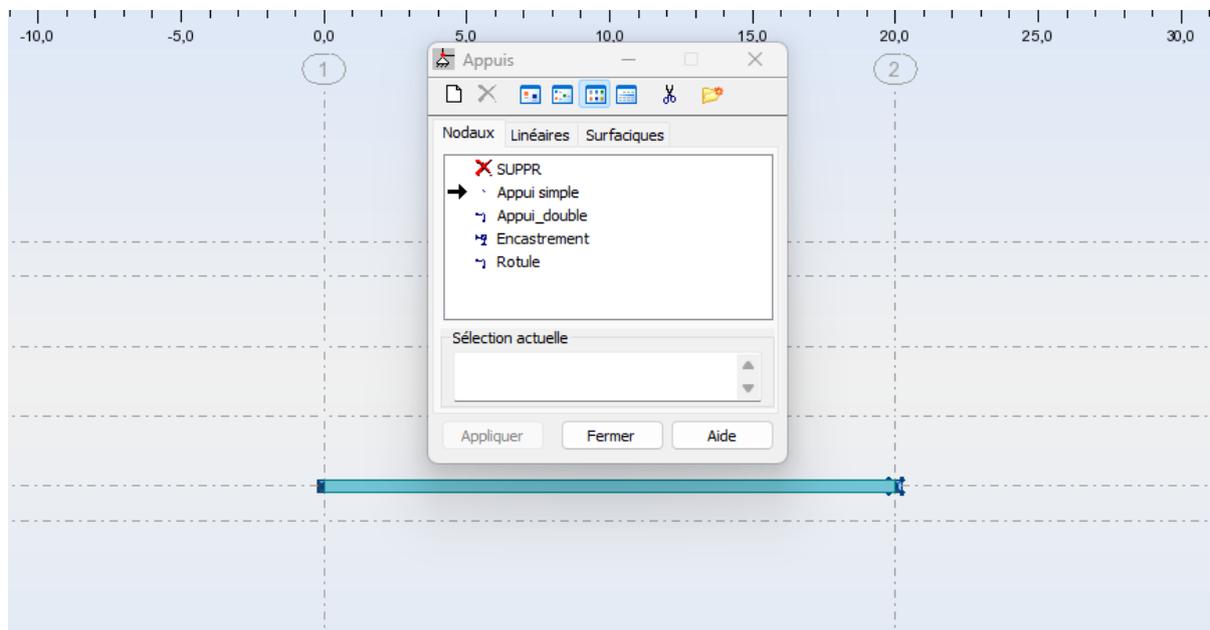


Figure VI.5: Définir les appuis

-Modélisation du tablier

Définir les 4 poutres

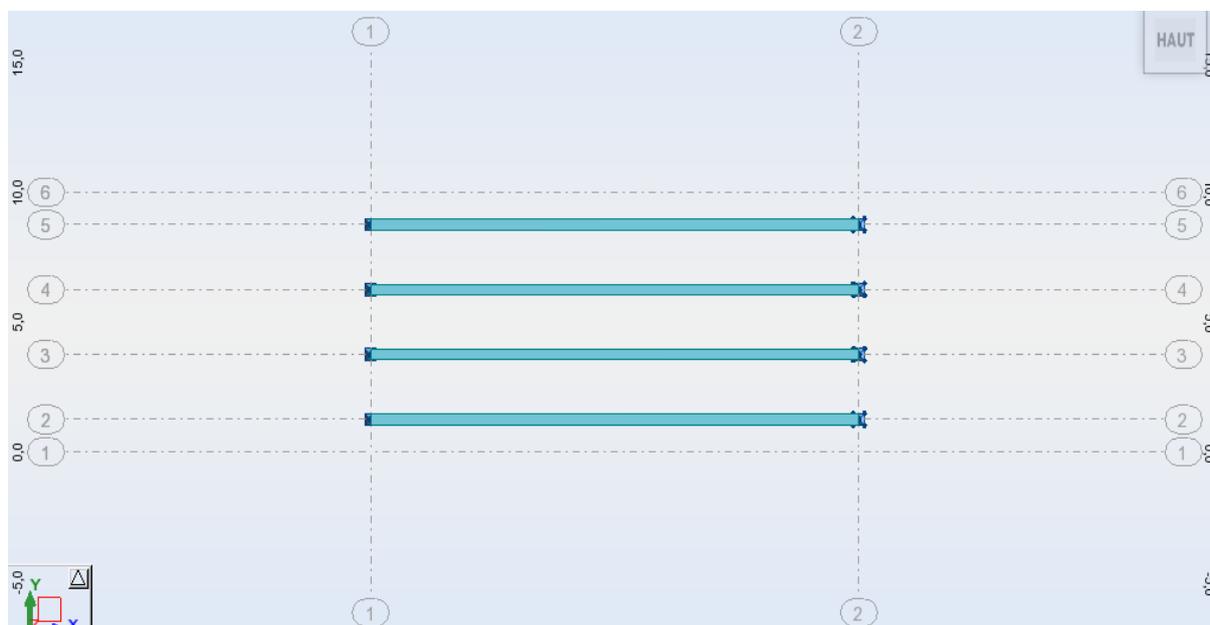


Figure VI.6: Définition des poutres

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

-5ème étape

Modélisation du panneau de dalle

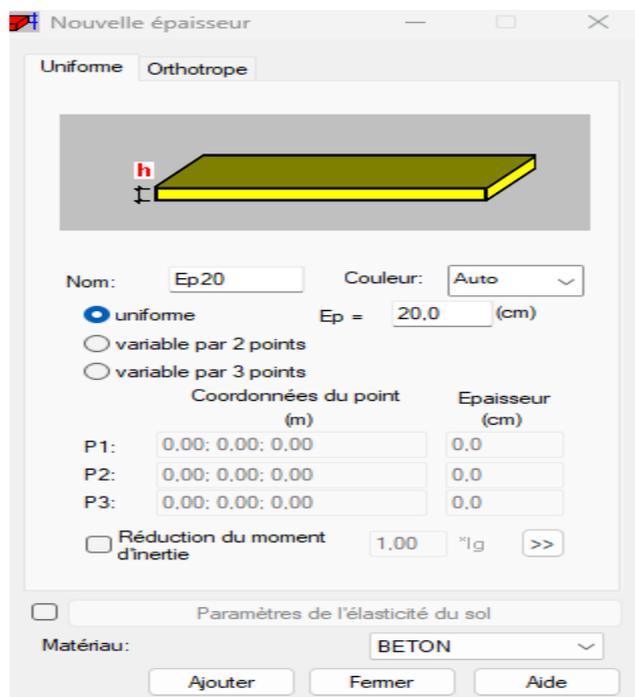


Figure VI.7: Définir le panneau de dalle

-6ème étape

Modélisation du tablier :

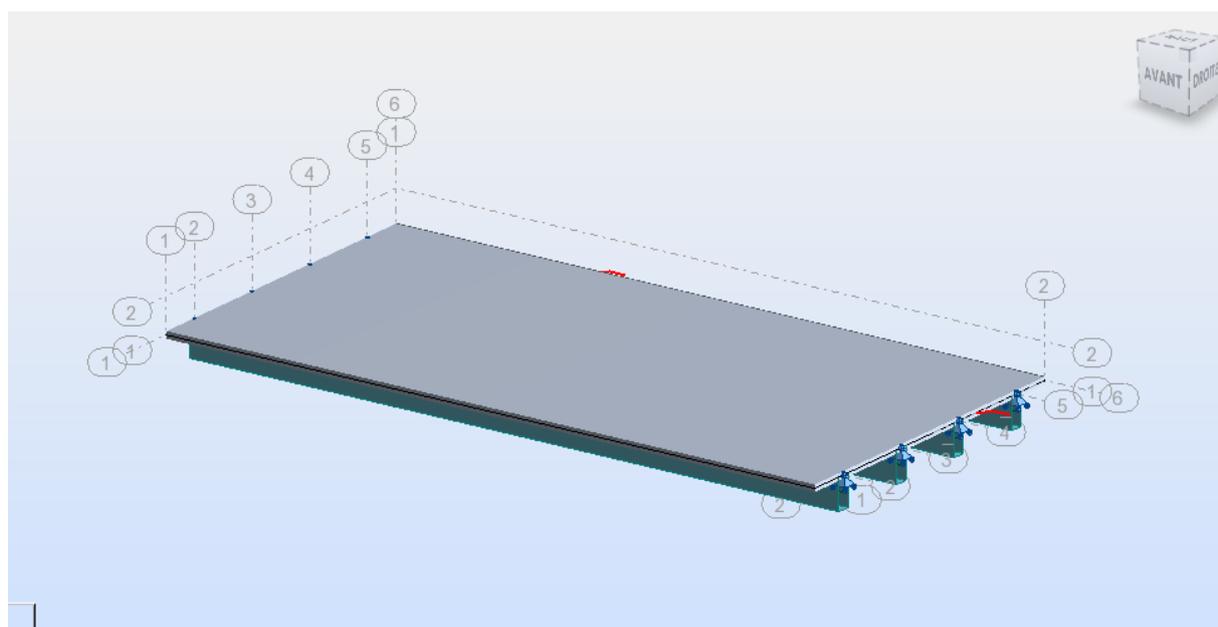


Figure VI.8: Modélisation du tablier

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

-7ème étape

Une fois le tablier modélisé, il faut définir et appliquer les différents chargements de la structure

-Poids propre du tablier G

Cette charge est générée automatiquement par le logiciel.

-Les charges permanentes

Elles sont définies comme suit

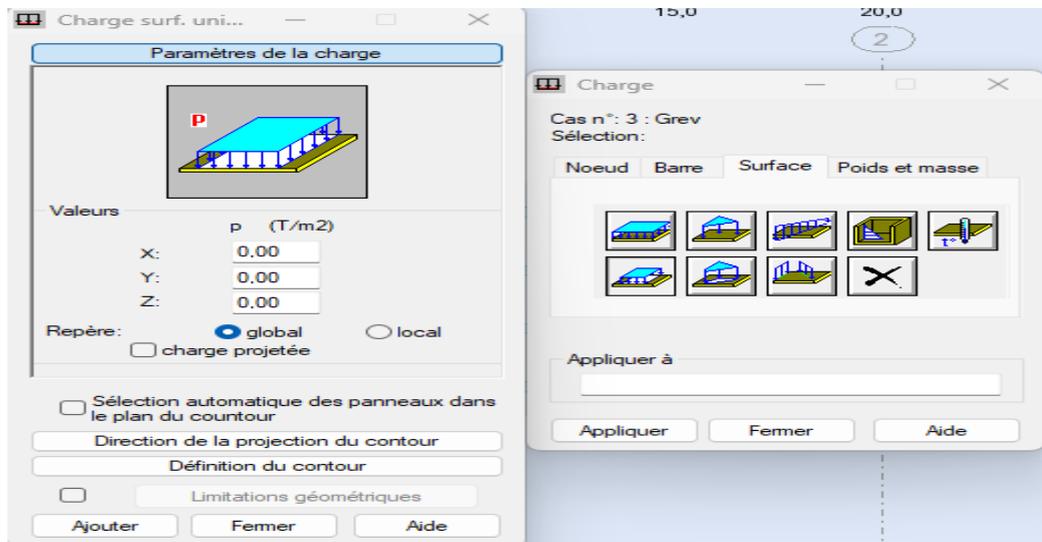


Figure VI.9: Définir les charges

-Revêtement

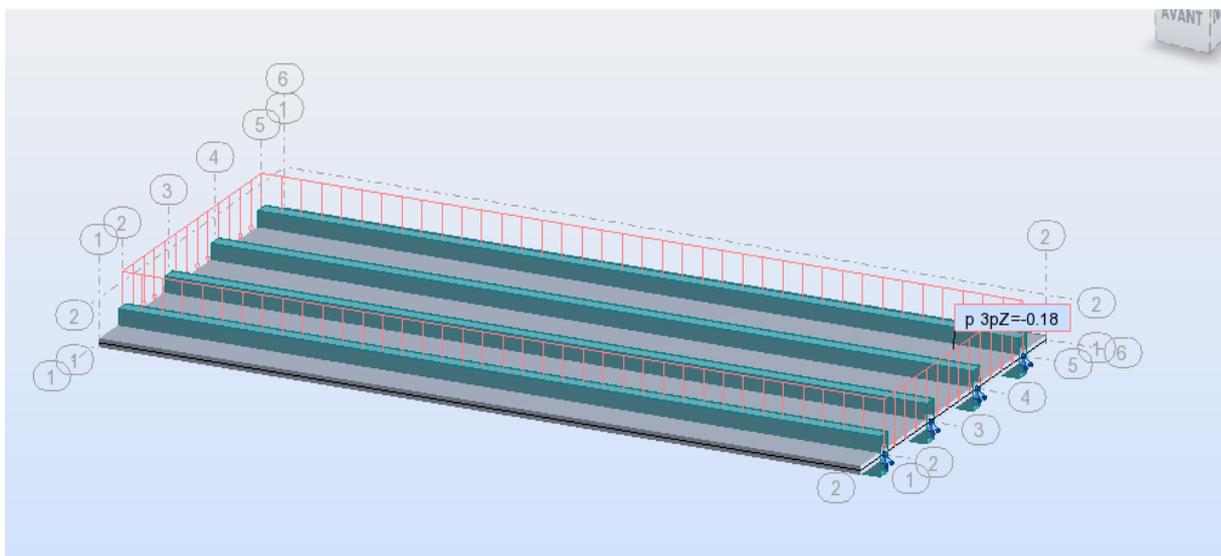


Figure VI.10: Chargement sous le poids du revêtement

-Garde-corps

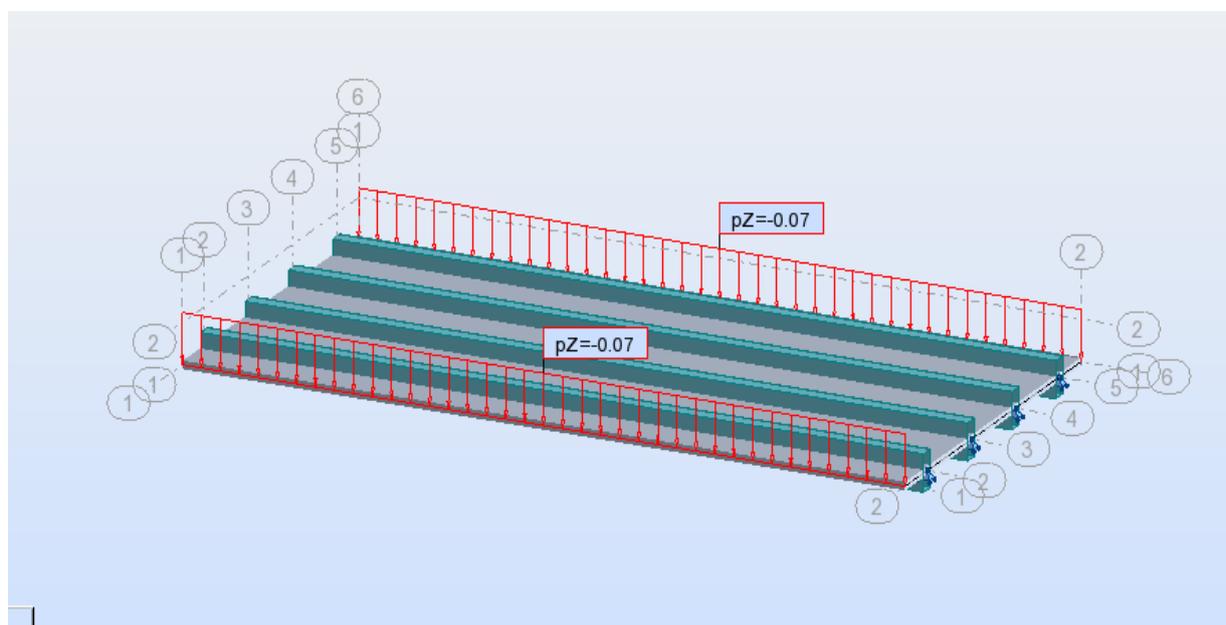


Figure VI.11: Chargement sous le poids des garde-corps

-Les trottoirs

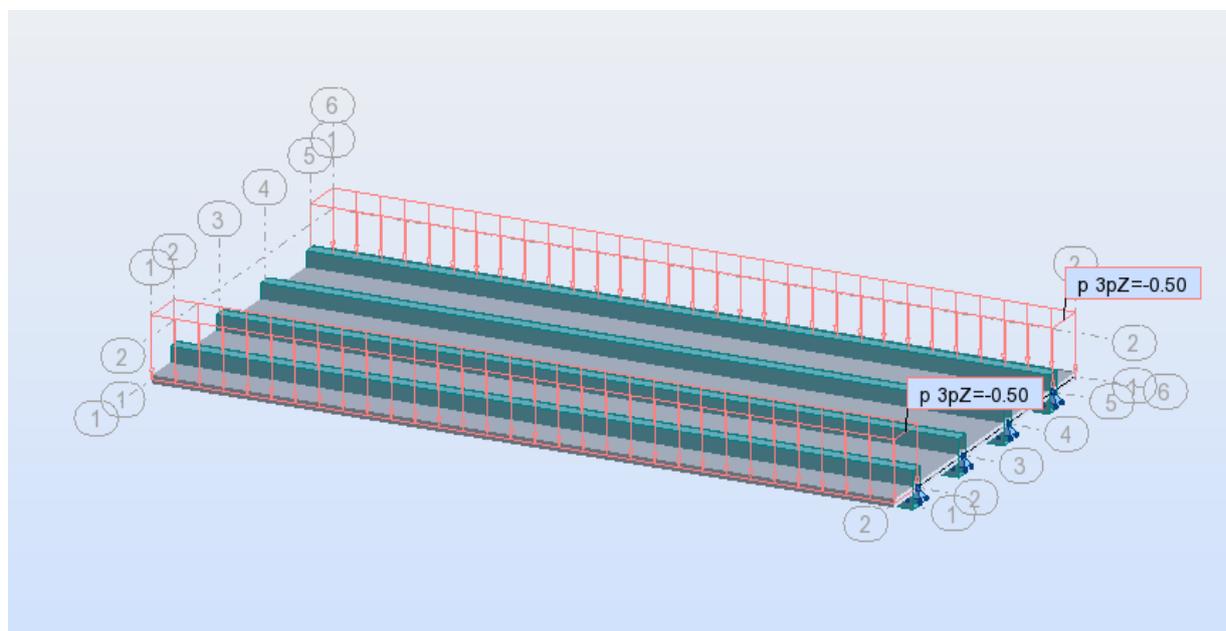


Figure VI.12: Chargement sous le poids des trottoirs

-Etanchéité

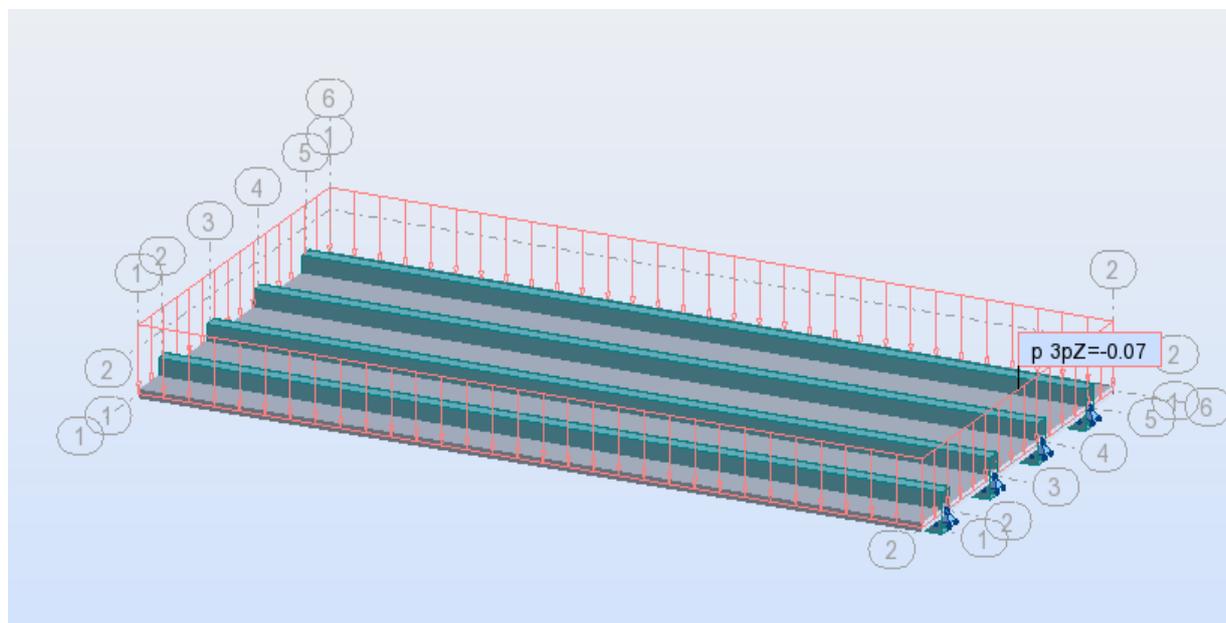


Figure VI.13: Chargement sous le poids d'étanchéité

-Les charges d'exploitations

-Système de charges A(I)

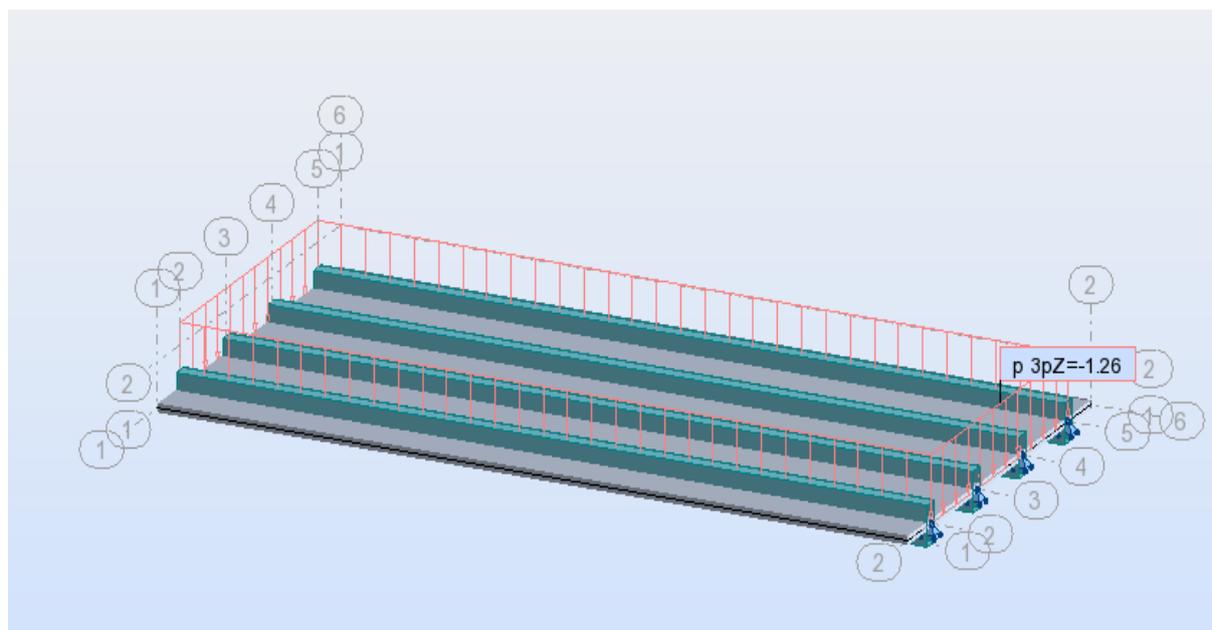


Figure VI.14: Chargement sous le système A(I)

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

-Les charges roulantes

Elles sont définies comme suit :

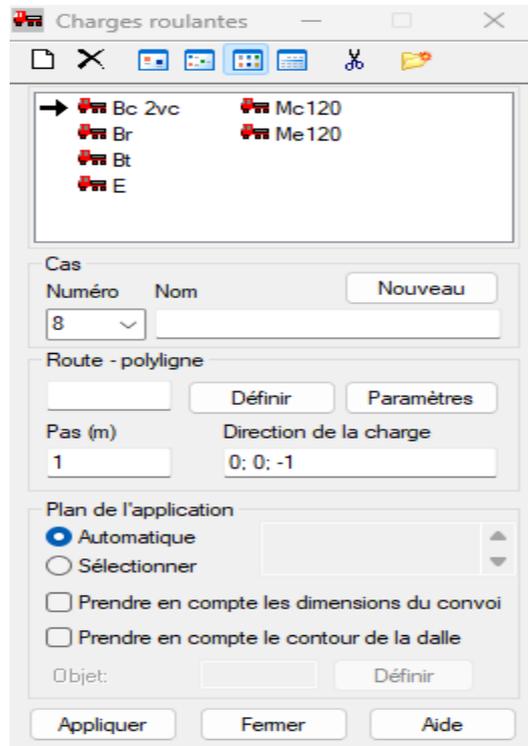


Figure VI.15: les charges roulantes

-Systèmes de charges B

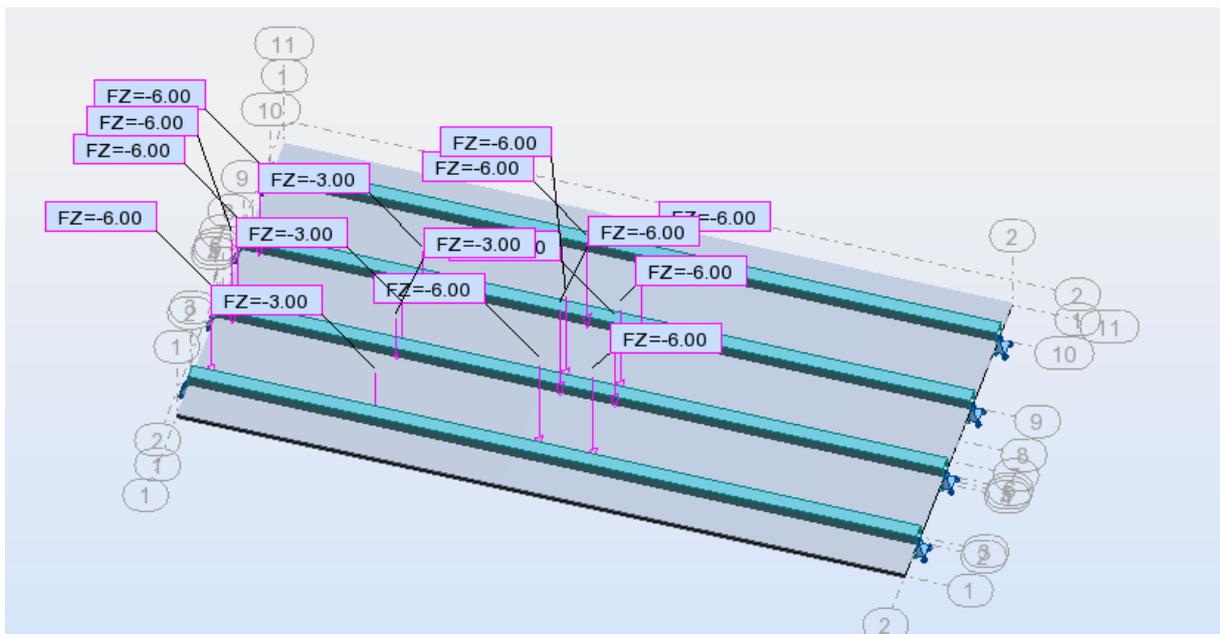


Figure VI.16: Chargement sous le système Bc

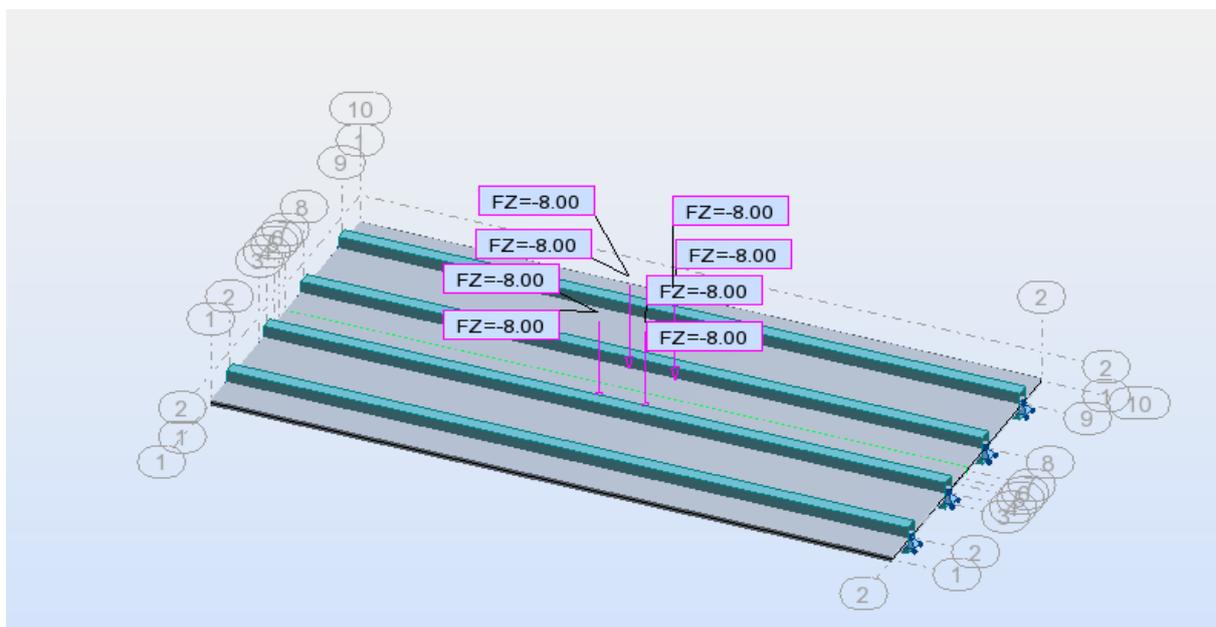


Figure VI.17: Chargement sous le système Bt

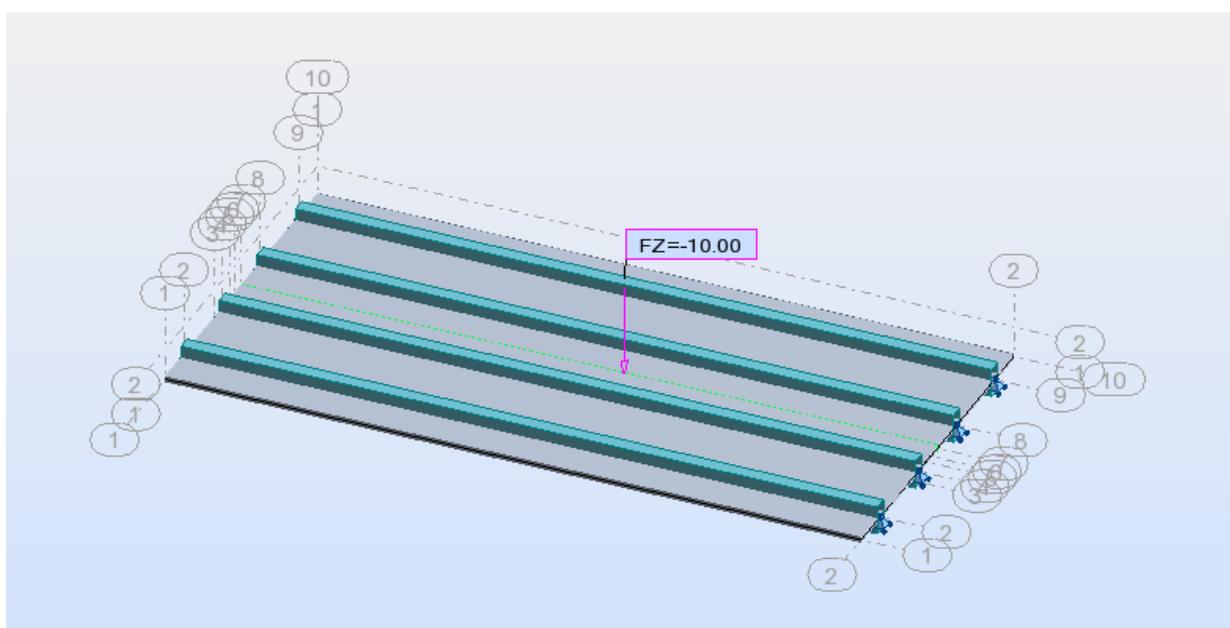


Figure VI.18: Chargement sous le système Br

-Système de charge Militaire

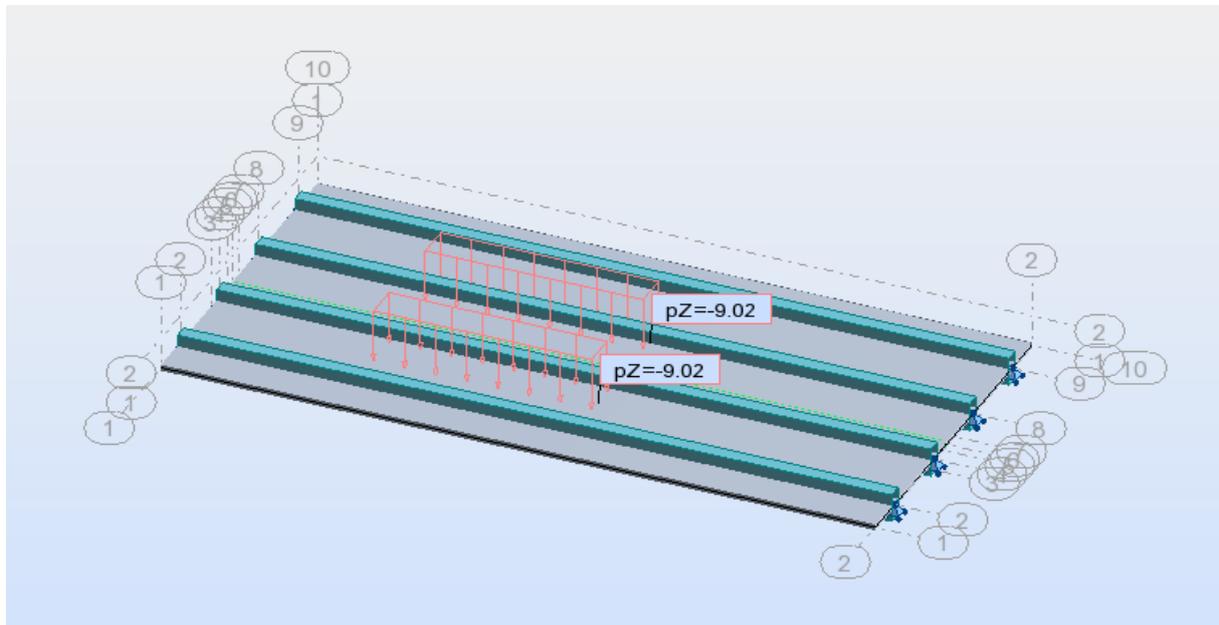


Figure VI.19: Chargement sous le système Mc120

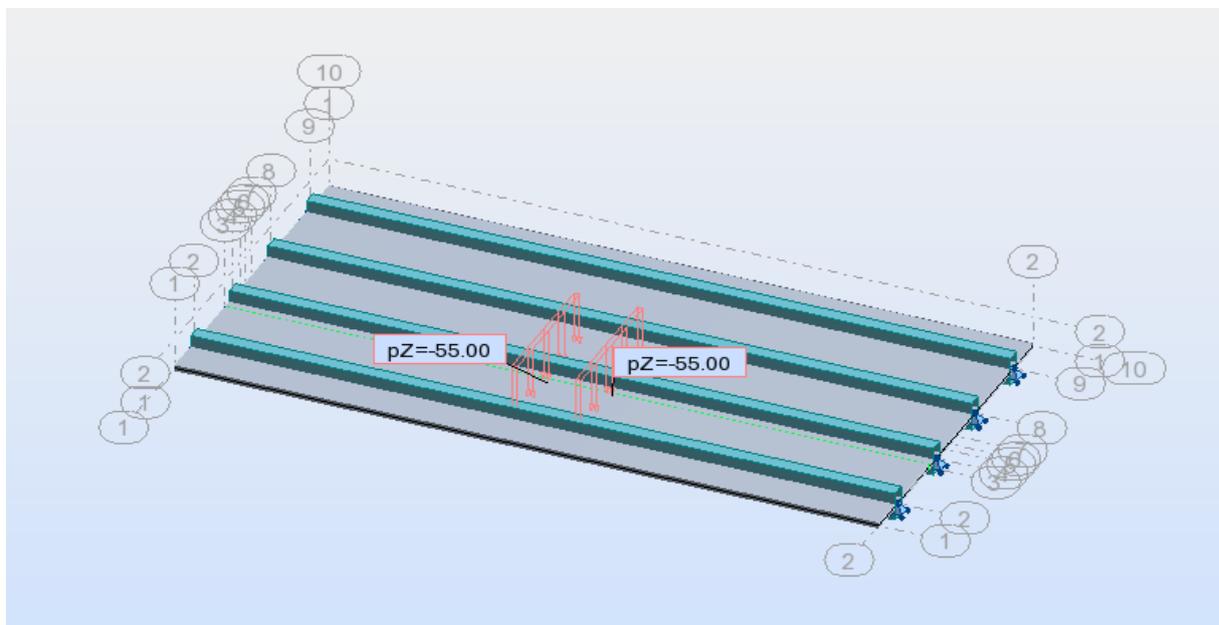


Figure VI.20: Chargement sous le système Me120

CHAPITRE VI : ETUDE NUMERIQUE DU TABLIER A L'AIDE DU LOGICIEL AUTODESK ROBOT STRUCTURAL

-8ème étape

Lancement du calcul

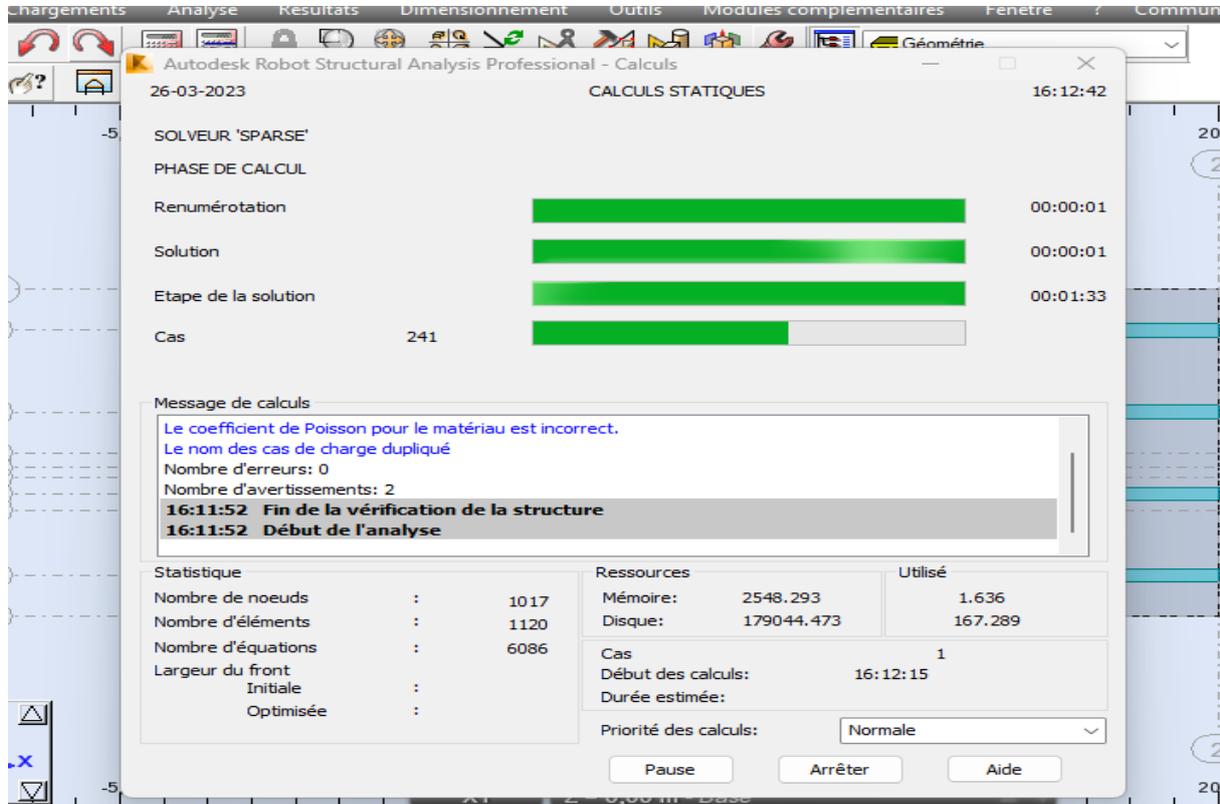


Figure VI.21: Lancement du calcul

-9ème étape

Affichage des résultats

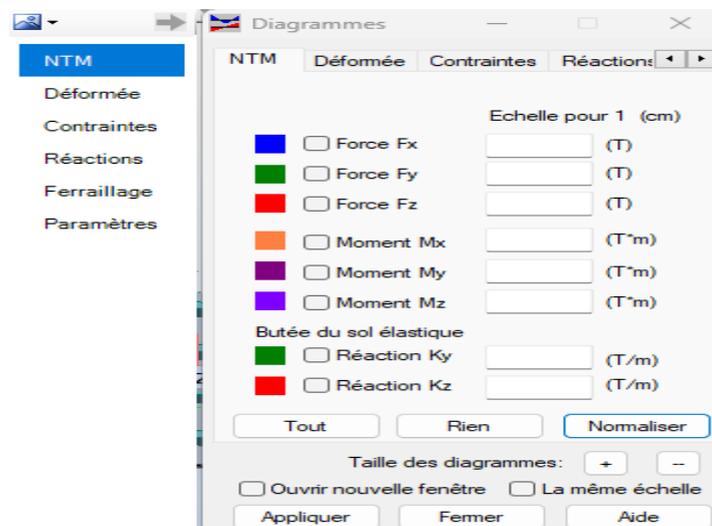


Figure VI.22: Extraction des résultats

VII CHAPITRE VII : ETUDE COMPARATIVE ET CONCLUSION

VII.1 Comparaison des efforts longitudinaux

Tableau VII.1: Comparaison des sollicitations analytiques et numériques dans le tablier du pont sans majoration dynamique

Surcharges		Moment fléchissant (T.m)			Effort tranchant (T)		
		Etude analytique	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)	Etude analytique	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)
Surcharges civils	A	472,5	472,5	0	94,5	94,5	0
	B _c	151,43	151,14	0,1	37,8	37,35	1,1
	B _t	149,28	149,37	0,06	30,91	30,92	0
	B _r	50	50	0	10	10	0
Surcharges militaires	Mc ₁₂₀	466,12	466,13	0	93,22	93,22	0
	Me ₁₂₀	300,96	300,5	0,15	63,03	62,37	1
Surcharges except.	Type E	500	500	0	100	100	0
Surcharges de trottoirs	Charges générales	9,35	9,35	0	1,87	1,87	0

CHAPITRE VII : ETUDE COMPARATIVE ET CONCLUSION

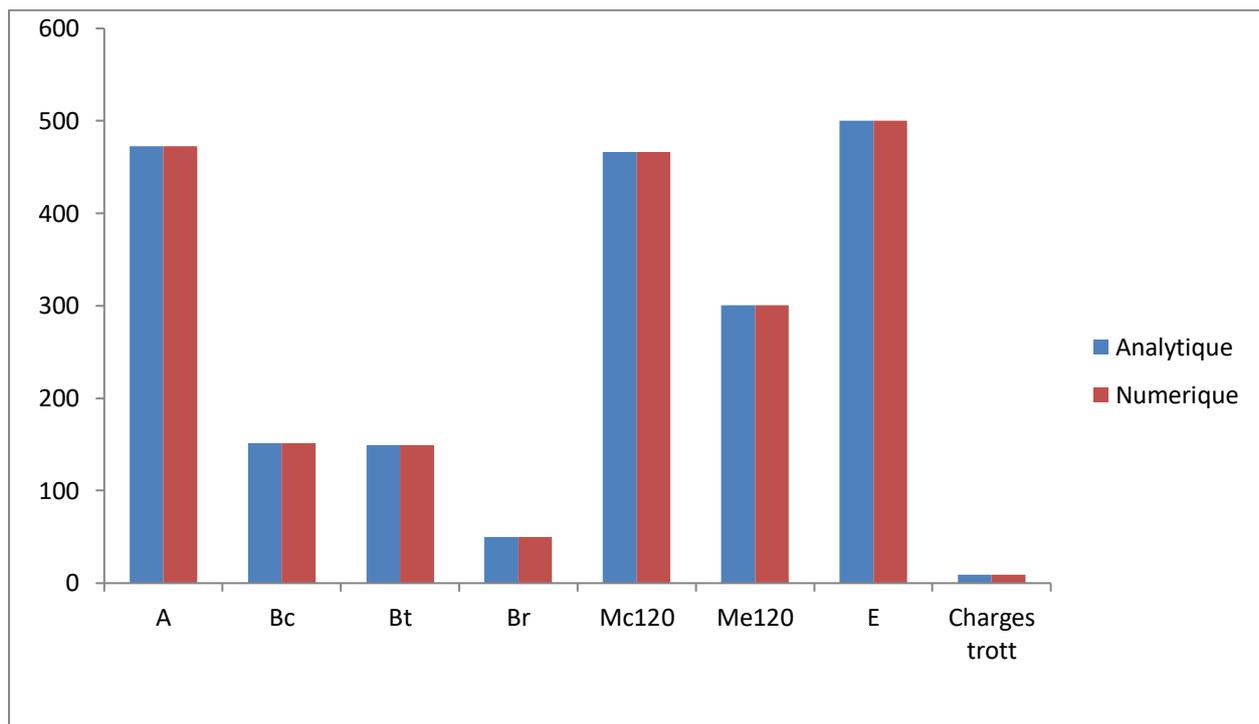


Figure VII.1: Histogramme des moments fléchissant

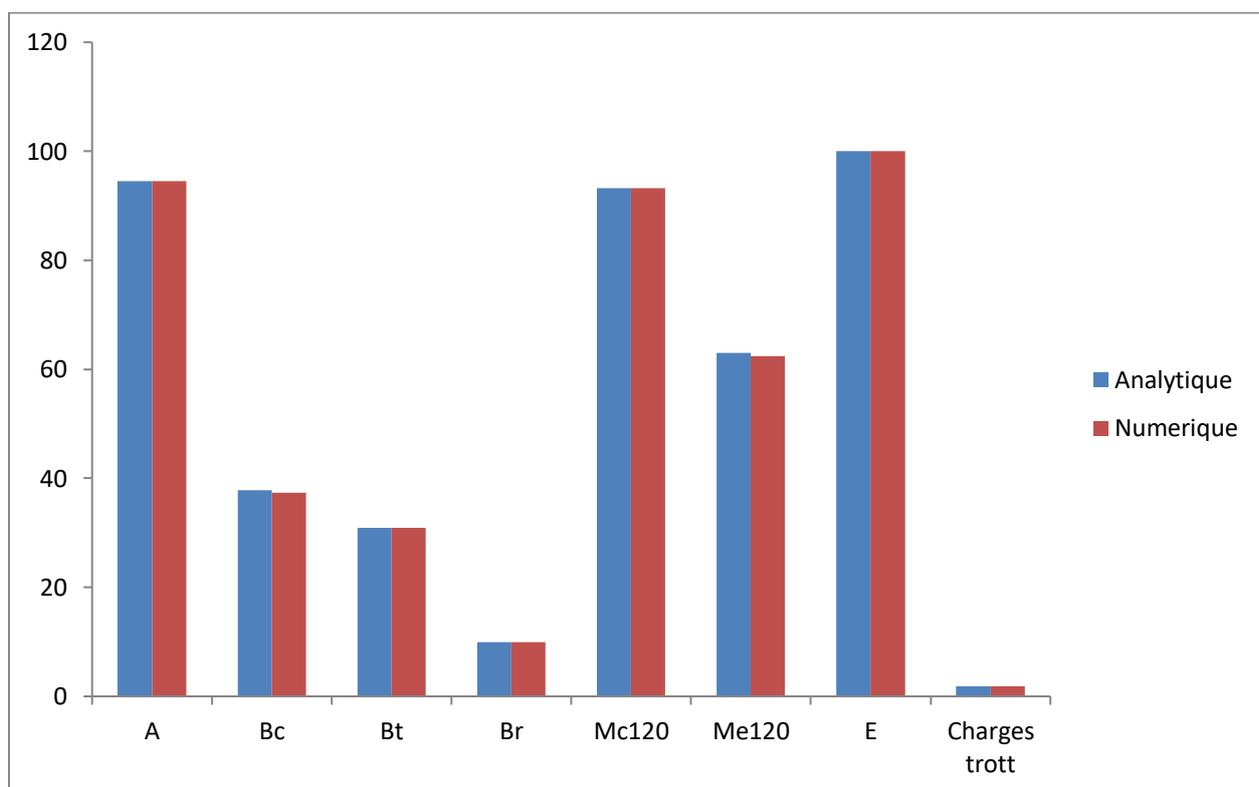


Figure VII.2: Histogramme des efforts tranchant

VII.2 Comparaison des efforts transversaux

Tableau VII.2: Comparaison de sollicitations analytiques affectées des CRT et les sollicitations numériques dans le tablier du pont sans majoration dynamique pour la poutre de rive

Surcharges		Moment fléchissant (T.m)			Effort tranchant (T)		
		Etude analytique. Moment fléchissant Affectés des CRT Guyon-Massonnet	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)	Etude analytique Effort tranchant Affectés des CRT Guyon-Massonnet	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)
Surcharges civils	A	108,68	104,36	3,9	21,74	16,30	15,77
	B_c	96,92	92,53	4,5	24,19	19,40	19,8
	B_t	82,10	79,27	3,4	17	12,53	26,2
	B_r	27,5	31,52	14,61	5,5	4,42	19,63
Surcharges militaires	M_{c120}	163,142	168,14	3,06	32,63	32,86	0,70
	M_{e120}	120,38	105,97	11,97	25,21	18,39	27
Surcharges de trottoirs	Charges générales	5,98	5,80	3,01	1,20	1,69	40,8

Tableau VII.3: Comparaison de sollicitations analytiques affectées des CRT et les sollicitations numériques dans le tablier du pont sans majoration dynamique pour la poutre intermédiaire

Surcharges		Moment fléchissant (T.m)			Effort tranchant (T)		
		Etude analytique. Moment fléchissant Affectés des CRT Guyon-Massonnet	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)	Etude analytique Effort tranchant Affectés des CRT Guyon-Massonnet	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)
Surcharges civils	A	127,58	129,45	1,46	25,52	29,39	15,16
	B _c	96,92	101,32	4,5	24,19	22,32	7,7
	B _t	91,06	96,92	6,4	18,86	24,70	30,9
	B _r	18	24,19	34,38	3,6	4,73	31,38
Surcharges militaires	Mc ₁₂₀	144,50	145,08	0,40	28,90	32,76	13,35
	Me ₁₂₀	120,384	112,55	6,50	25,21	34,11	35,30
Surcharges de trottoirs	Charges générales	3,27	4,73	30,8	0,65	0,67	3,07

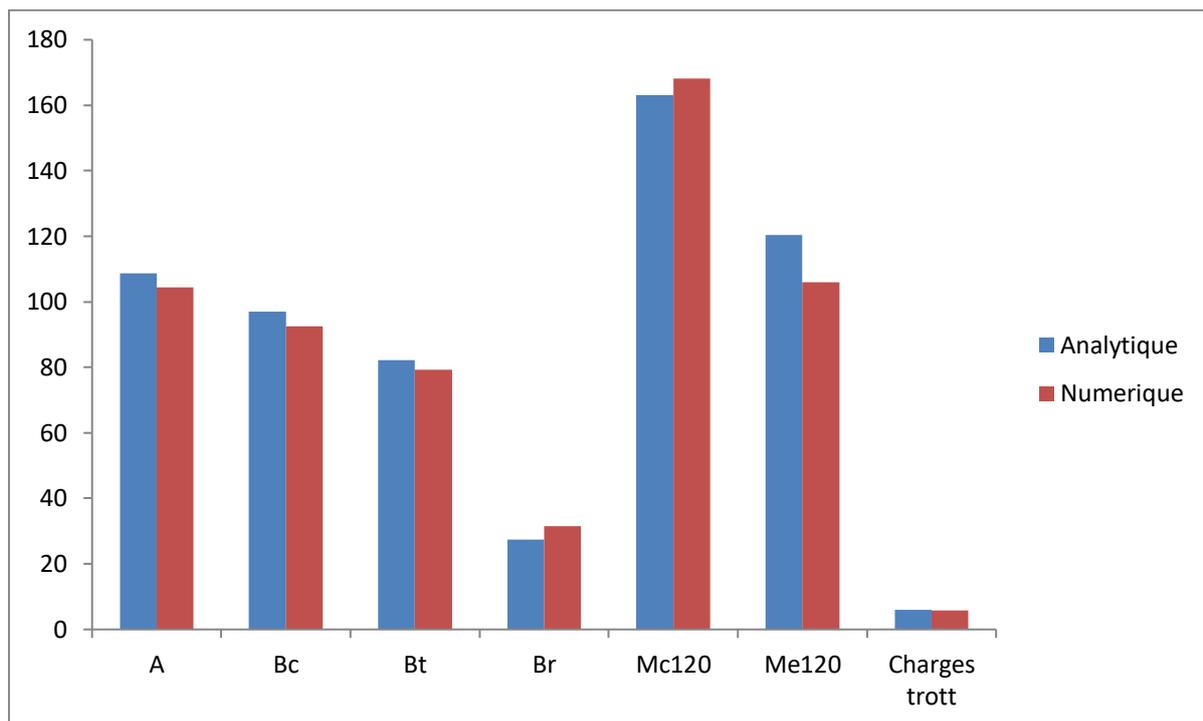


Figure VII.3: Histogramme des moments fléchissant pour la poutre de rive

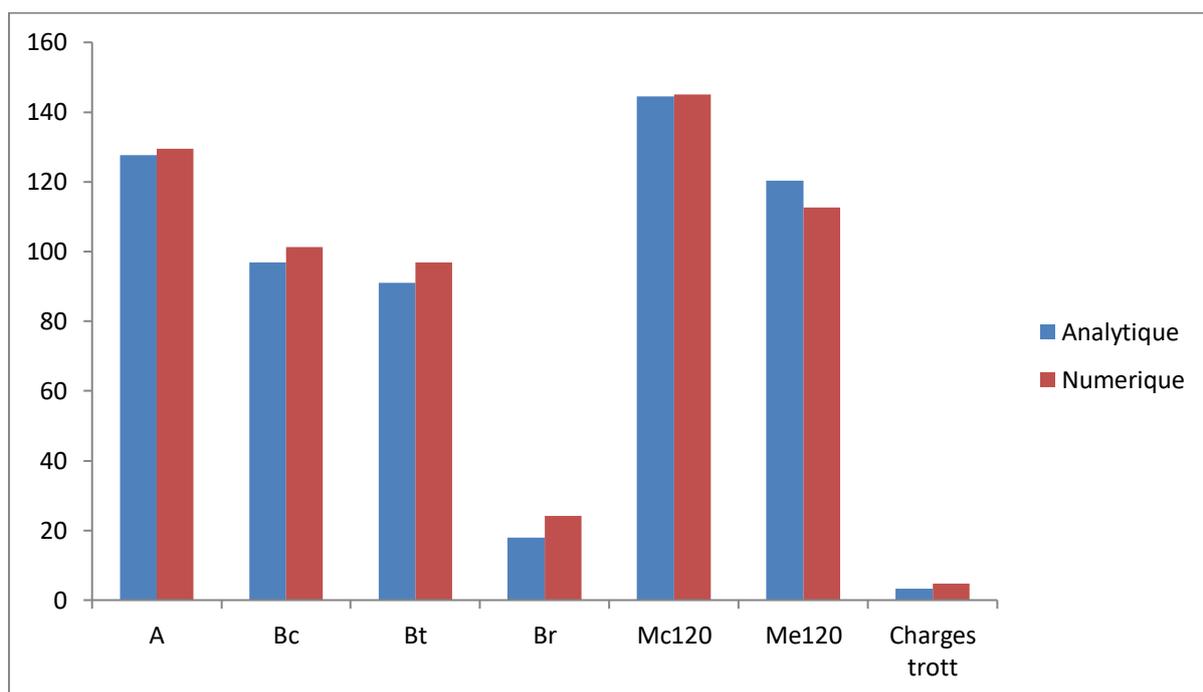


Figure VII.4: Histogramme des moments fléchissant pour la poutre intermédiaire

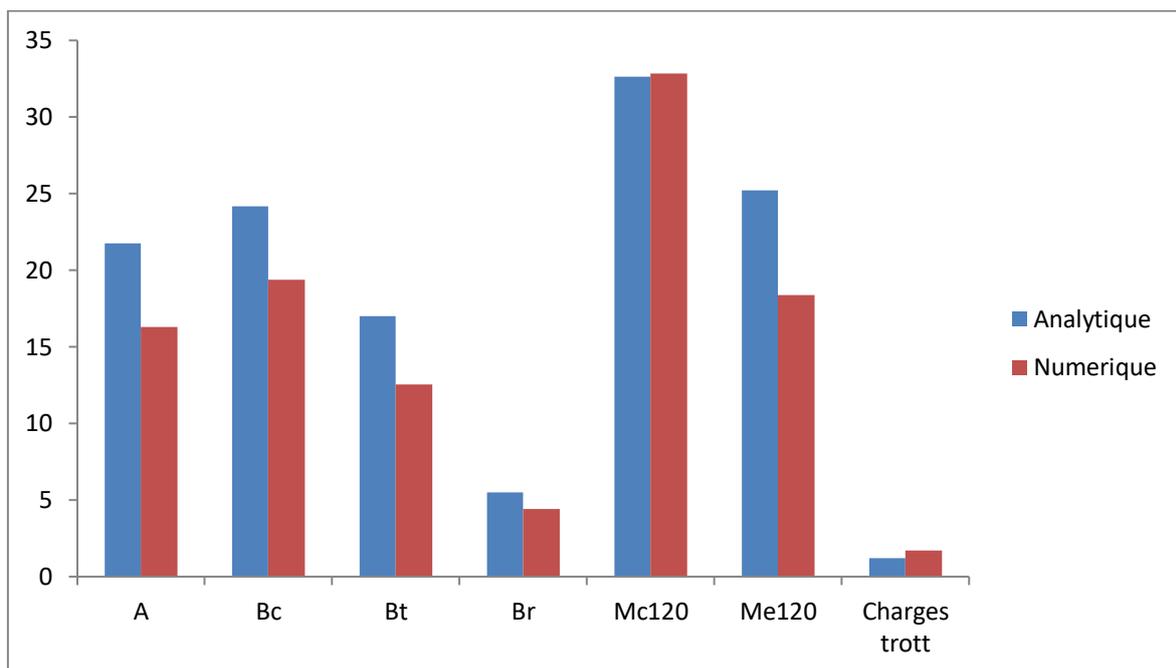


Figure VII.5: Histogramme des efforts tranchant pour la poutre de rive

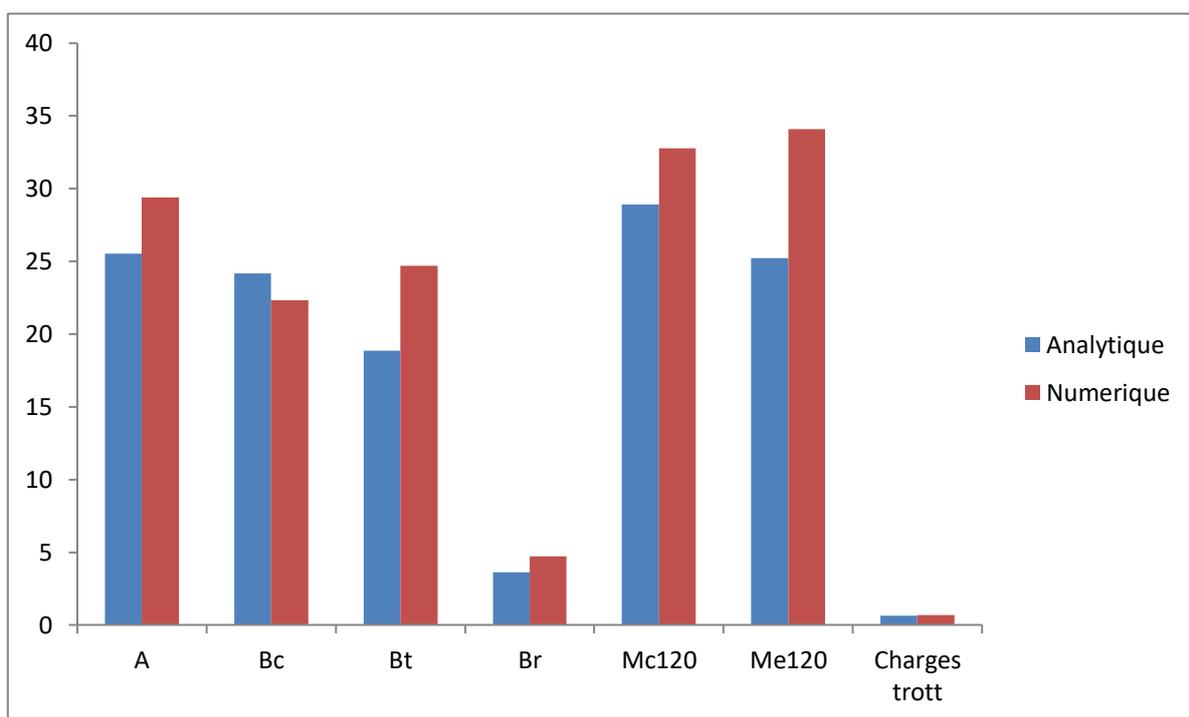


Figure VII.6: Histogramme des efforts tranchant pour la poutre intermédiaire

Conclusion

On observe que les résultats analytiques et numériques de la répartition longitudinale sont identiques car on a précisé la position la plus défavorable des différents convois dans les deux méthodes analytique et numérique.

Par contre une différence de résultats observée dans la répartition transversale qui peut se justifier par :

Calcul manuel

Les sollicitations sont affectées d'un coefficient de répartition transversale dans le calcul manuel. Ces coefficients sont calculés en tenant compte d'un certain nombre de paramètres à savoir le paramètre d'entretoisement, le paramètre de torsion, la position du chargement et d'autres paramètres. Ces paramètres sont utilisés pour déterminer les lignes d'influences. Les coordonnées des points constituant ces lignes d'influences sont calculées par interpolation à partir des tables de Guyon Massonnet. L'interpolation des données de ces tables peut affecter la précision des calculs manuels.

Calcul numérique

Le logiciel effectue le calcul par la méthode des éléments finis. Cette option prend en compte les caractéristiques géométriques des poutres de la manière la plus précise. Cette modélisation génère les sollicitations résultantes des différents cas de charges envisagés lors de notre étude. Par ailleurs, le logiciel Robot détermine pour chaque position les efforts dans la poutre et donc détecte automatiquement la position la plus défavorable des différents convois.

VIII CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES
ENTRETOISES D'ABOUT

VIII.1 Calcul du hourdis

Nous considérons un panneau de 2,50 m de largeur et 20 m de long simplement appuyé sur ses quatre côtés. Selon les règles de la RDM.

on note l_x , le petit côté, tel que $l_x = \text{Inf}(b-b_0; a-b_E)$; Le cas courant est d'avoir $l_x=b-b_0$ puis on note l_y , le grand côté, tel que $l_y = \text{Sup}(b-b_0; a-b_E)$; Le cas courant est d'avoir $l_y=a-b_E$.

Ainsi on a :

$\alpha = \frac{l_x}{l_y} = \frac{2,1}{19,6} = 0,11 < 0,4$ On considère que la dalle porte dans un seul sens, celui de la plus petite portée.

On en déduit donc que pour les charges uniformément réparties la dalle porte dans une seule direction L_x .

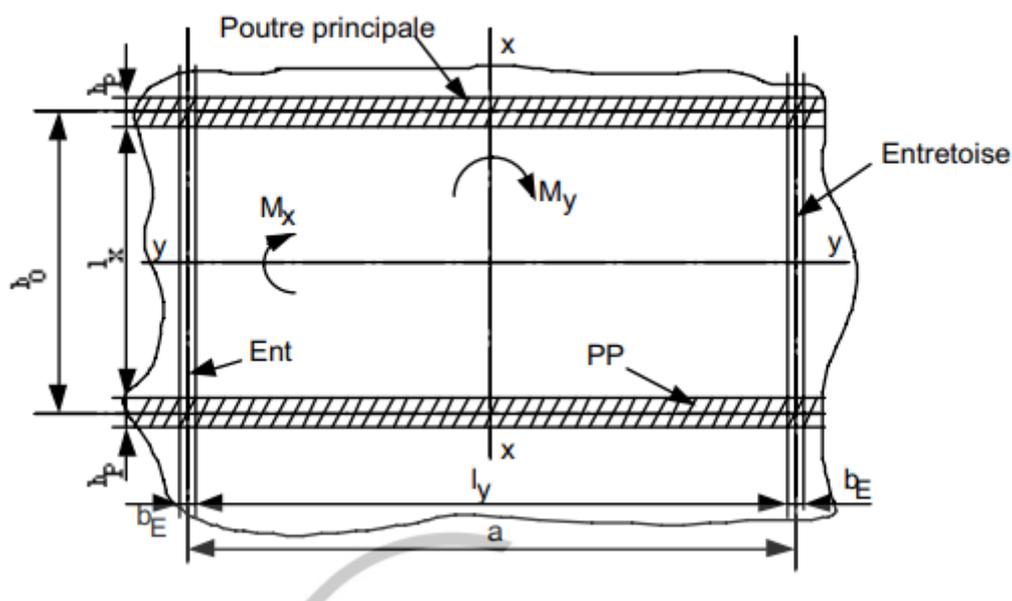


Figure VIII .1 : Notations et Conventions de la dalle

VIII.1.1 Calcul des charges permanentes du tablier

Nous évaluons dans cette partie, les sollicitations dues aux charges permanentes. Ainsi nous avons :

-Revêtement

Nous envisageons mettre comme revêtement, du béton bitumineux (BB) de 8cm d'épaisseur.

Le poids volumique est de 22KN/m^3

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

$$G_R = 22 \times 0,08 \times 7,5 \times 20$$
$$G_R = 264 \text{ kN}$$

-Etanchéité

$$G_E = 22 \times 0,03 \times 7,5 \times 20$$
$$G_E = 99 \text{ kN}$$

-Trottoir

$$G_T = 25 \times 0,20 \times 1,25 \times 2 \times 20$$
$$G_T = 250 \text{ kN}$$

-Hourdis

$$G_H = 25 \times 0,20 \times 10 \times 20$$
$$G_H = 1000 \text{ kN}$$

-Garde-corps

$$G_{GC} = 0,65 \times 2 \times 20$$
$$G_{GC} = 26 \text{ kN}$$

On a alors :

$$G = 264 + 99 + 250 + 1000 + 26 = 1621 \text{ kN} = 162,1 \text{ t}$$

D'où la charge surfacique nous donne :

$$g = \frac{1621 \text{ kN}}{10 \times 20} \Rightarrow g = 8,105 \text{ kN/m}^2 = 0,81 \text{ t/m}^2$$

VIII.1.2 Calcul des sollicitations du hourdis

VIII.1.2.1 Moment fléchissant

Le moment fléchissant est donné par :

$$M_{0x} = \frac{g \cdot l_x^2}{8} = \frac{8,105 \times 2,1^2}{8} = 4,47 \text{ kN.m} = 0,447 \text{ t.m}$$

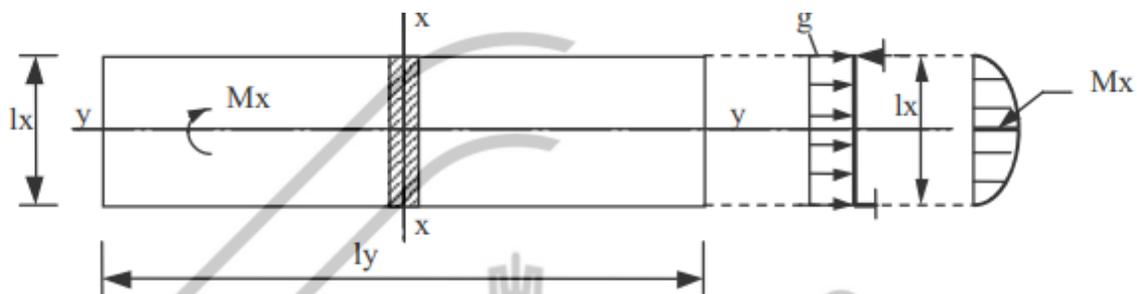


Figure VIII.2: Moment fléchissant d'une dalle portant dans une seule direction sous l'effet de la charge permanente

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

VIII.1.2.2 Effort tranchant

L'effort tranchant est donné par :

$$T = \frac{g \cdot l_x}{2} = \frac{8,105 \times 2,1}{2} = 8,51 \text{ kN} = 0,851 \text{ t}$$

VIII.1.3 Calcul des moments dans une seule direction

Dans les travées

Dans la direction l_x

Travée de rive : $M^{\text{tr}} = 0,80M_{\text{OX}} = 0,80 \times 4,47 = 3,58 \text{ kN.m} = 0,35 \text{ t.m}$

Travée intermédiaire : $M^{\text{tr}} = 0,55M_{\text{OX}} = 0,55 \times 4,47 = 2,46 \text{ kN.m} = 0,24 \text{ t.m}$

Sur les appuis

Dans la direction l_x

$M^{\text{ap}} = -0,50M = -0,5 \times 4,47 = -2,24 \text{ kN.m} = -0,22 \text{ t.m}$

Par l'application de la méthode forfaitaire on trouve les courbes suivantes :

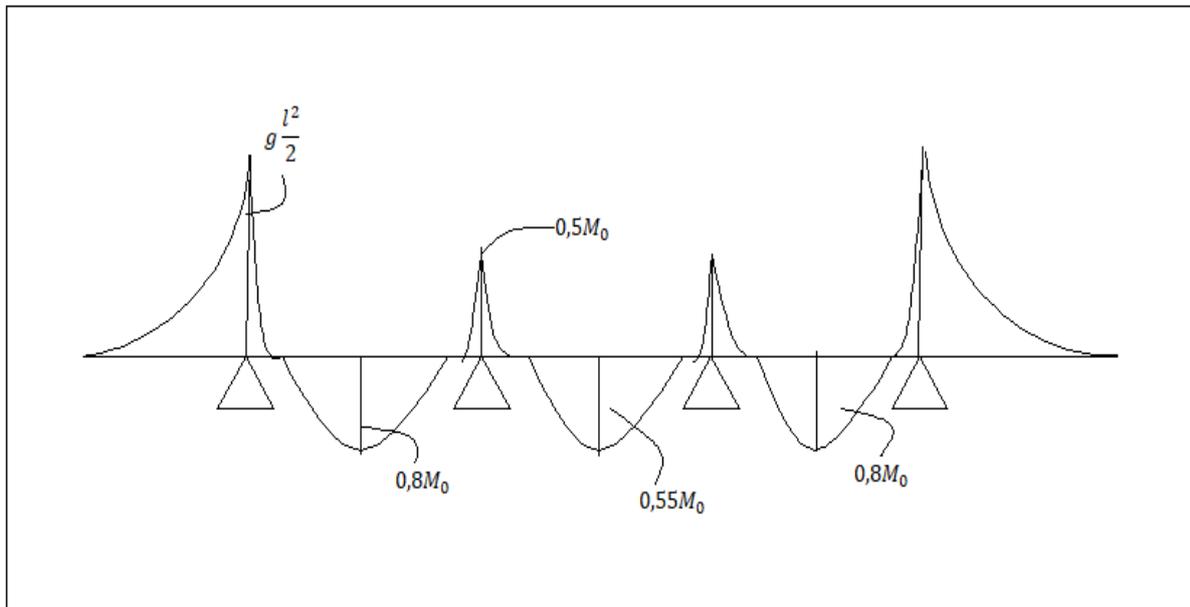


Figure VIII.3: Courbe enveloppe des moments

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

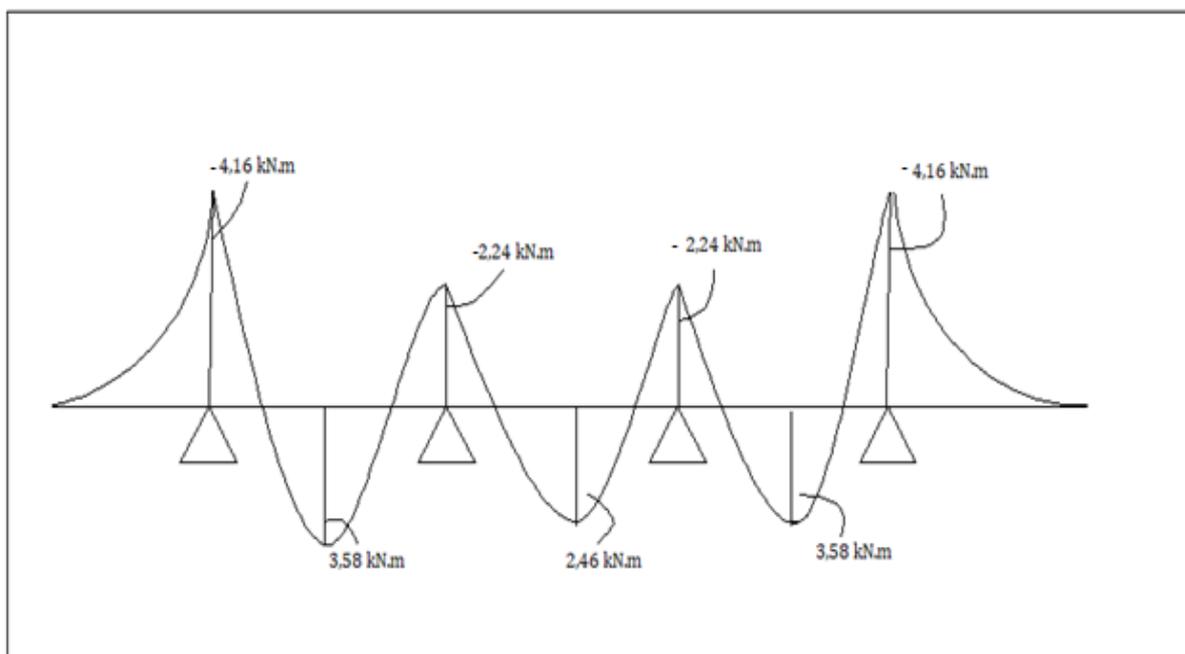


Figure VIII.4: Courbe des moments

La courbe obtenue par le logiciel ROBOT

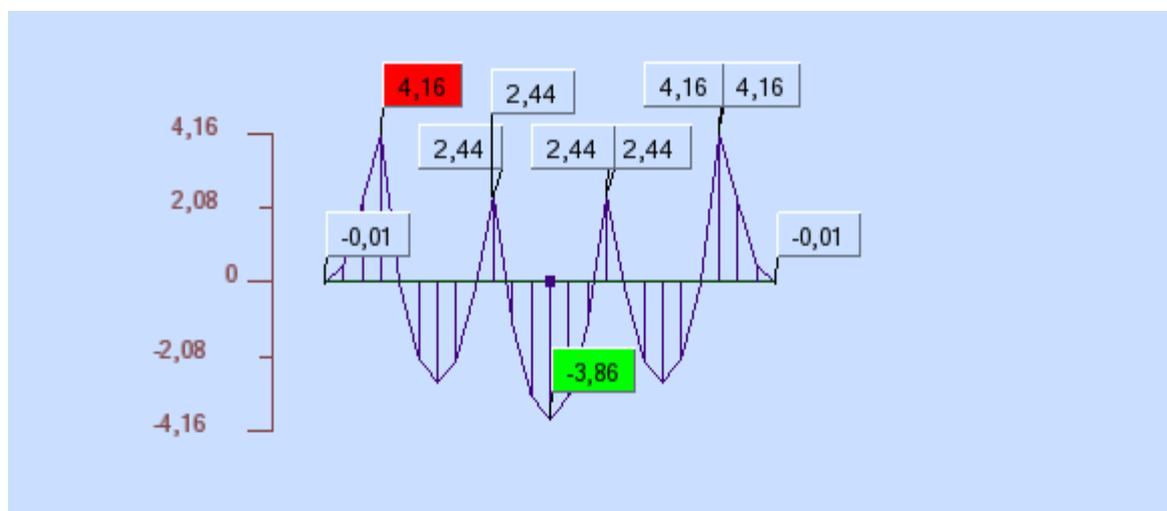


Figure VIII.5: Courbe des moments obtenue par ROBOT

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

Tableau VIII.1: Comparaison des moments maximaux pour la dalle

	Moment fléchissant (kN.m)		
	Résultats analytique	Résultats numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)
Sur appui	-2,44	-2,24	8,1
En travée	3,58	3,86	7,8

VIII.2 Etude des entretoises

Les entretoises situées au droit des appuis, ont pour rôle d'encastrement les poutres à la torsion, de rigidifier les extrémités du hourdis et de permettre le vérinage du tablier pour des dispositions d'entretien

VIII.2.1 Calcul des sollicitations

On va considérer l'entretoise comme une poutre encadrée aux deux cotés (bi-encadrée) afin de pouvoir calculer le moment sur appui. S'agissant du calcul du moment en travée, on considère que la poutre est isostatique, tout en multipliant le moment isostatique M_0 par 0,8

VIII.2.1.1 Sollicitations sous charges permanentes

-Poids propre de l'entretoise

Nous avons donc :

$$\text{Poids propre de l'entretoise} = 25 \times 0,4 \times 0,9 = 9 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Réaction poutre de rive} = 3,1675 \times 10 = 31,675 \text{ t} = 316,75 \text{ kN}$$

$$\text{Réaction poutre intermédiaire} = 2,436 \times 10 = 24,36 \text{ t} = 243,6 \text{ kN}$$

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

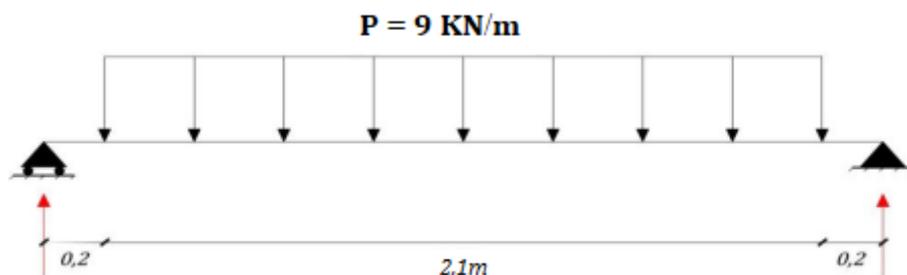


Figure VIII.6: Poids propre de l'entretoise

On a un vérin à côté de chaque poutre de rive (0,75 m) et un vérin au milieu du pont (à 0,75 m d'une poutre centrale). L'entretoise est considérée comme une poutre continue sur 3 appuis avec 2 petites consoles. Lorsque le nombre des poutres est pair, le vérin intermédiaire est placé au milieu de l'entretoise

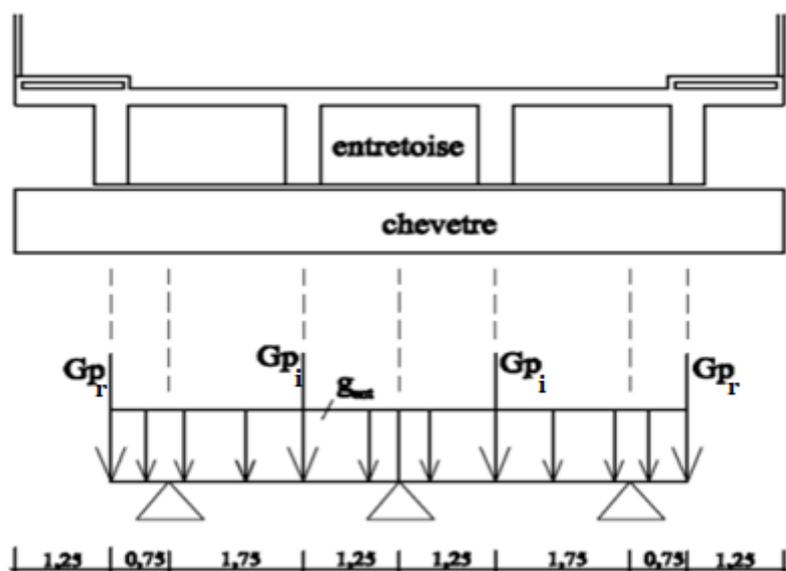


Figure VIII.7: Schéma de vérinage [3]

Le même schéma statique est équivalent à :

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

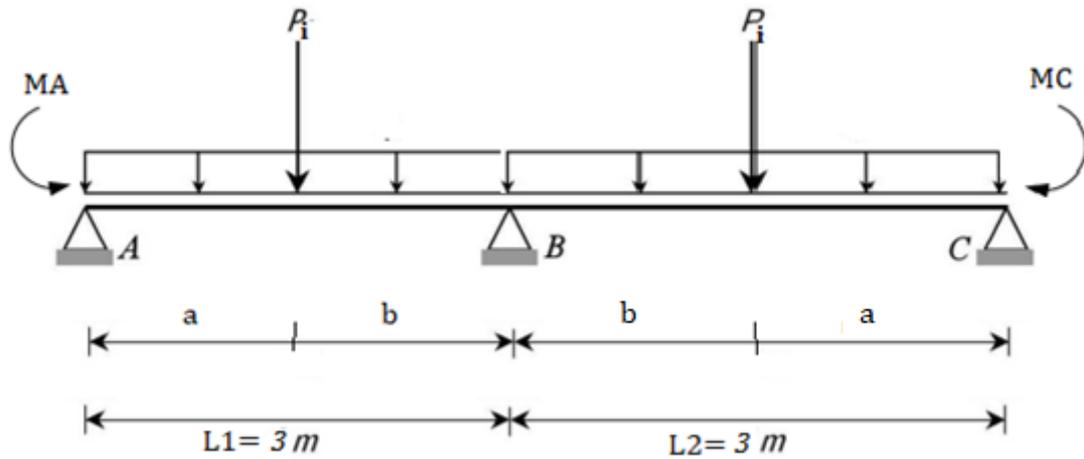


Figure VIII.8 : schéma statique équivalent

Avec : $a = 1,75\text{ m}$, $b = 1,25\text{ m}$, $L_1 = L_2 = 3\text{ m}$, $L_c = 0,75\text{ m}$ longueur de la console

$$M_A = M_C = -P_i \times L_c - \frac{g \times L_c^2}{2}$$

$$M_A = M_C = -316,75 \times 0,75 - \frac{9 \times 0,75^2}{2} = -240,09\text{ kN}$$

Le système est une fois hyperstatique, on utilise alors l'équation de Clapton ou l'équation des trois moments pour sa résolution l'équation s'écrit :

$$M_A L_1 + 2M_B (L_1 + L_2) + M_C L_2 = 6EI(\omega_B^d - \omega_B^g)$$

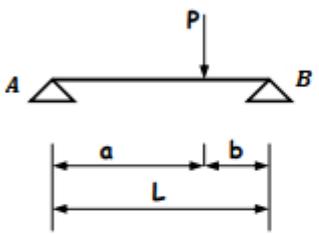
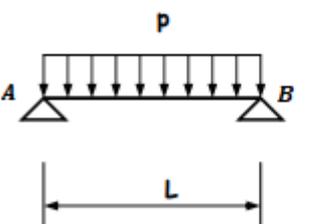
$$M_B = \frac{6EI(\omega_B^d - \omega_B^g) - M_A L_1 - M_C L_2}{2(L_1 + L_2)}$$

ω_B^d et ω_B^g sont les rotations au niveau de l'appui B des poutres droites et gauches dues seulement aux charges, agissant dans les travées respectives.

Selon le formulaire RDM nous avons :

**CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES
ENTRETOISES D'ABOUT**

**Tableau VIII.2 : les expressions des rotations en fonction de quelques types de
chargement**

Cas de charge	W_A	W_B
	$-\frac{P\alpha(\ell-\alpha)(2\ell-\alpha)}{6EI\ell}$	$\frac{P\alpha(\ell-\alpha)(\ell+\alpha)}{6EI\ell}$
	$-\frac{pL^3}{24EI}$	$\frac{pL^3}{24EI}$

VIII.2.1.2 Calcul des rotations

Cas de charge repartie :

$$\omega_B^d = -\frac{gL^3}{24EI} = -\frac{9 \times 3^3}{24EI} = -10,125/EI$$

$$\omega_B^g = \frac{gL^3}{24EI} = \frac{9 \times 3^3}{24EI} = 10,125/EI$$

Cas de charge concentre :

$$\omega_B^d = -\frac{P \times \alpha(L-\alpha)(2L-\alpha)}{6EIL} = -\frac{243,6 \times 1,75(3-1,75)(6-1,75)}{18EI} = -140,62/EI$$

$$\omega_B^g = \frac{P \times \alpha(L-\alpha)(L+\alpha)}{6EIL} = \frac{243,6 \times 1,75(3-1,75)(3+1,75)}{18EI} = 140,62/EI$$

Alors les valeurs des rotations sont :

$$\omega_B^d = -150,75/EI$$

$$\omega_B^g = 150,75/EI$$

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

Donc :

$$M_B = \frac{6EI(\omega_B^d - \omega_B^g) - M_A L_1 - M_C L_2}{2(L_1 + L_2)}$$

$$= \frac{6(-150,75 - 150,75) - (-240,09 \times 3) - (-240,09 \times 3)}{2(3+3)}$$

$$M_B = -30,70 \text{ kN}$$

Une fois le moment sur l'appui B déterminé, le système devient isostatique avec le schéma statique suivant :

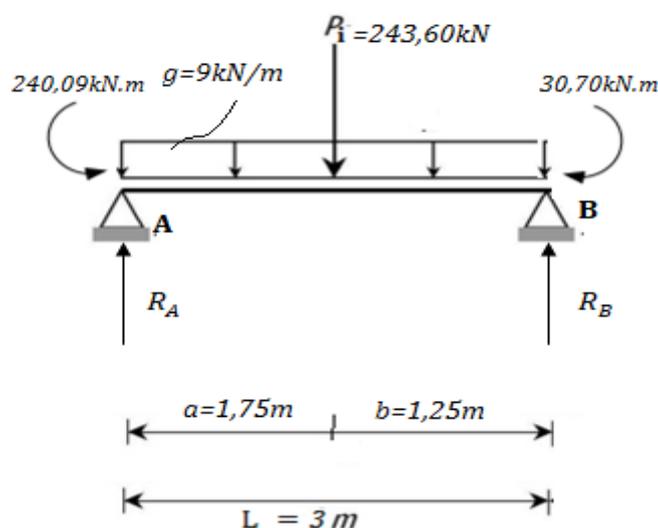


Figure VIII.9 : schéma statique pour le système isostatique

VIII.2.1.3 Détermination des réactions d'appuis

Les équations d'équilibre nous donnent :

$$1) \sum F_{y=0} \longrightarrow R_A + R_B - g * L - P_i = 0$$

$$R_A + R_B = P_i + g * L$$

$$2) \sum F_{M/B} = 0 \longrightarrow R_A * L - g * L * \frac{L}{2} - P_i * b - 240,09 + 30,70 = 0$$

$$R_A = \frac{g * \frac{L^2}{2} + P_i * b - 209,39}{L}$$

$$R_A = 184,80 \text{ kN}$$

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

De l'équation (1) on aura : $R_B = 85,80 \text{ kN}$

VIII.2.1.4 Evaluation des moments fléchissant et efforts tranchants

- Si $0 \leq x \leq 1,75\text{m}$

$$M(x) = R_A * x - g * x * \frac{x}{2} - 240,09$$

$$M(x) = 184,80x - 4,5x^2 - 240,09$$

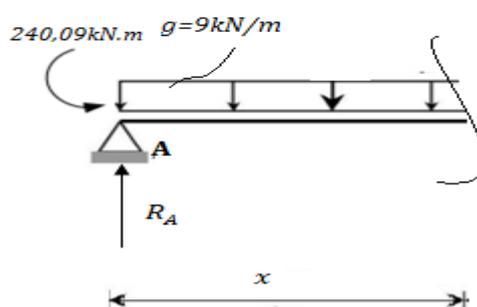


Figure VIII.10 : schéma statique pour $0 \leq x \leq 1,75\text{m}$

Pour $x = 0$ $\longrightarrow M(0) = -240,09 \text{ kN.m}$

Pour $x = 1,75\text{m}$ $\longrightarrow M(1,75) = +69,53 \text{ kN.m}$

L'équation de l'effort tranchant est :

$$T(x) = \frac{d(M)}{d(x)} = 184,80 - 9x$$

Pour $x = 0$ $\longrightarrow T(0) = +184,80 \text{ kN}$

Pour $x = 1,75\text{m}$ $\longrightarrow T(1,75) = +169,05 \text{ kN}$

- Si $1,75\text{m} \leq x \leq 3,00\text{m}$

$$M(x) = R_A * x - g * x * \frac{x}{2} - 240,09 - P_i(x - 1,75)$$

$$M(x) = 184,80x - 4,5x^2 + 186,21$$

Pour $x = 1,75\text{m}$ $\longrightarrow M(1,75) = +69,53 \text{ kN.m}$

Pour $x = 3,00\text{m}$ $\longrightarrow M(3,00) = -30,70 \text{ kN.m}$

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

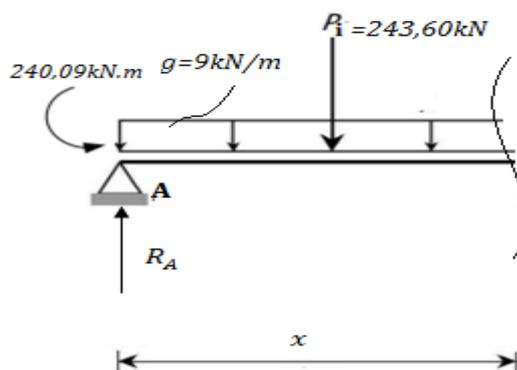


Figure VIII.11 : schéma statique pour $0,75\text{m} \leq x \leq 3,00\text{m}$

L'équation de l'effort tranchant est :

$$T(x) = \frac{d(M)}{d(x)} = 58,80 - 9x$$

Pour $x = 1,75\text{m}$ \longrightarrow $T(1,75) = -74,55 \text{ kN}$

Pour $x = 3,00\text{m}$ \longrightarrow $T(3,00) = -85,80 \text{ kN}$

VIII.2.2 Les diagrammes de M et T

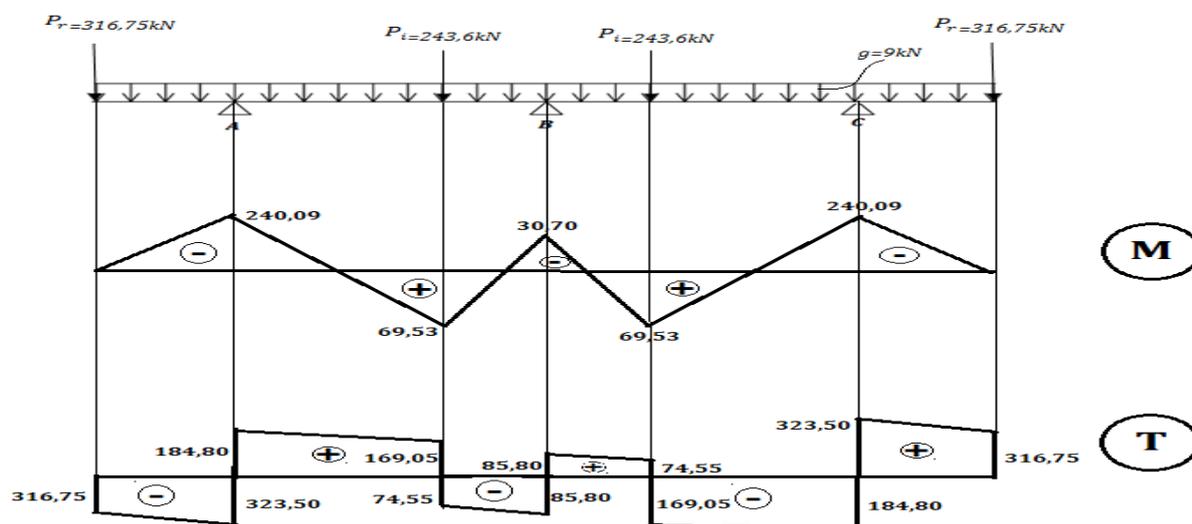


Figure VIII.12 : Diagramme des moments fléchissant et efforts tranchants

CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES ENTRETOISES D'ABOUT

Les diagrammes obtenus après modélisation sont présentés ci-après :

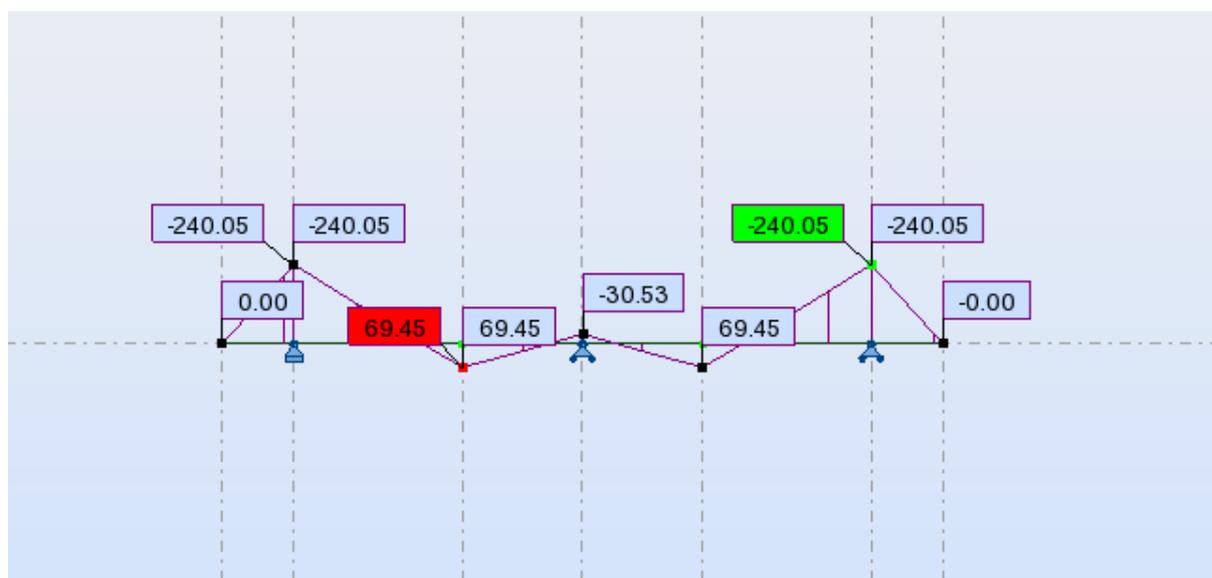


Figure VIII.13 : Diagramme des moments fléchissant

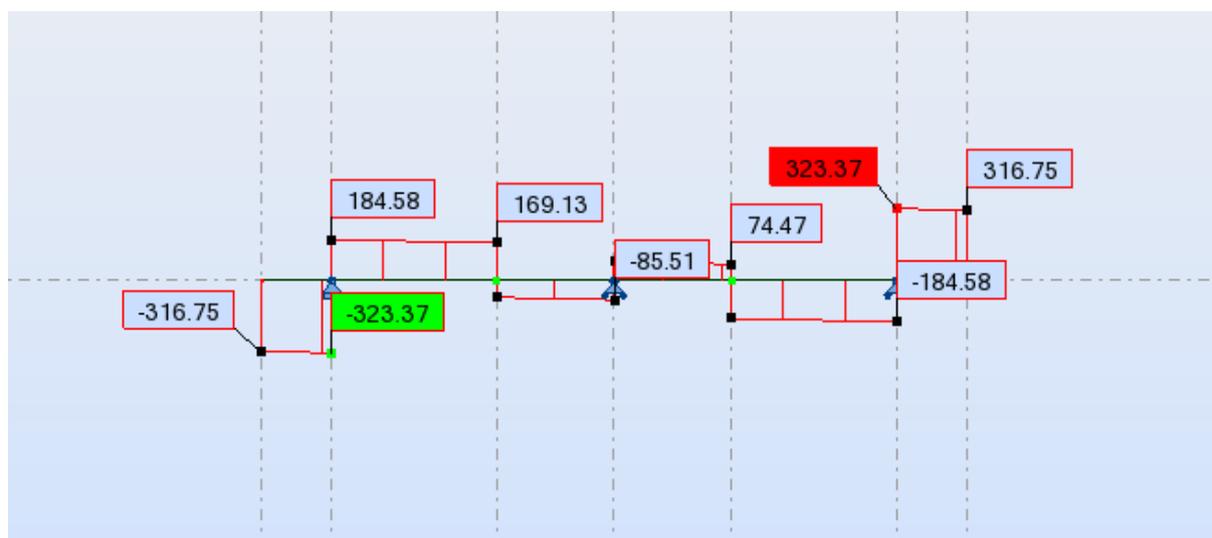


Figure VIII.14 : Diagramme des efforts tranchants

**CHAPITRE VIII : ETUDE DE LA DALLE DU TABLIER ET DES
ENTRETOISES D'ABOUT**

VIII.2.3 Comparaison des sollicitations analytiques et numériques

Tableau VIII.3: Comparaison de sollicitations maximales

	Moment fléchissant (kN.m)			Effort tranchant (kN)		
	Etude analytique	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)	Etude analytique	Etude numérique (A l'aide du logiciel Robot)	Ecart relatif (%)
Sur appui	-240,09	-240,05	0,01	323,50	323,37	0,04
En travée	69,53	69,45	0,1			

Conclusion

Le calcul analytique et le calcul numérique sont identiques.

CONCLUSION GENERALE

Après la comparaison entre les résultats des deux méthodes de calcul du tablier de pont à poutre, nous avons réalisé que l'accomplissement d'un des objectifs initiaux nous a permis de constater certaines variations dans les considérations de calcul

Le logiciel robot effectué son calcul suivant les méthodes des éléments finis alors que dans le calcul manuel, c'est la méthode de Guyon Massonnet qui est utilisée et qui tient compte de la flexion locale et de la flexion globale pour déterminer les sollicitations réelles du fait de la considération du hourdis comme jouant le rôle d'entretoise intermédiaire.

Dans le calcul numérique des poutres, la méthode des éléments finis est utilisée, tandis que dans le calcul manuel les coefficients de répartition transversale sont utilisés pour influencer les résultats obtenus par la méthode des résistances des matériaux (RDM).

Le logiciel effectue le calcul en prenant tout le tablier dans son ensemble pour créer un modèle de d'élément finis, alors que pour le calcul manuel, les opérations sont menées séparément. Ceci est à la base de l'écart observé dans les deux méthodes de calcul.

En définitive la méthode par le logiciel est plus judicieuse. Toutefois, il est impérative de maîtriser parfaitement les deux méthodes de calcul car la précision obtenue par le logiciel est conséquente à un bon paramétrage pendant la conception, celui-ci passe la maîtrise parfaite de la méthode manuelle.

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques acquises durant notre formation et relatives au calcul et au dimensionnement des ouvrages d'arts. Il était aussi une grande occasion pour nous de maîtriser le logiciel Autodesk Robot Structural dans sa version 14.

Nous espérons que ce modeste travail sera un guide précieux pour les futures promotions.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et mémoires

- [1] J. Calgaro, Projet et construction des ponts. Paris, 2000.
- [2] calcul et épreuves des ouvrages d'art-T. I. FASCICULE 61 Conception, "Programmes de charges et épreuves des ponts-routes."
- [3] M. BEN OUEZDOU, "Cours d'ouvrages d'art, Tome 2: Dimensionnement," 2008.
- [4] R. GUIRBAYE, "Etude technique de construction d'un pont en béton armé de 79ml de longueur pour le franchissement de la rivière Bam-Bam à Mongo au centre du," p. 163, 2012.
- [5] R. Bares et Ch. Massonnet, "le Calcul des Grillages de Poutres et Dalles Orthotropes", Dunod, Paris 1966. Code ENIT: D13.
- [6] ODRAN W. GBEOU, "Etude et conception d'un ouvrage de franchissement de 30ml sur la bretelle AGOUNA frontière Togo" p.51, 55, 57, 59, 61,63, 2019
- [7] Technique Cimbéton : Bétons et Ouvrages d'Art, tome 1 : Les ponts courants en béton, tome 41,2005

Logiciels

- Robot Autodesk Structural Analysis Professional 2014 : Logiciel de calcul.
- Microsoft office 2007 (Word, Excel).

ANNEXE 1 : ETUDE STRUCTURALE DES POUTRES

-Calcul des coefficients de répartition transversale (CRT) de GUYON-MASSONNET

- Moment d'inertie de flexion de la poutre I_p :

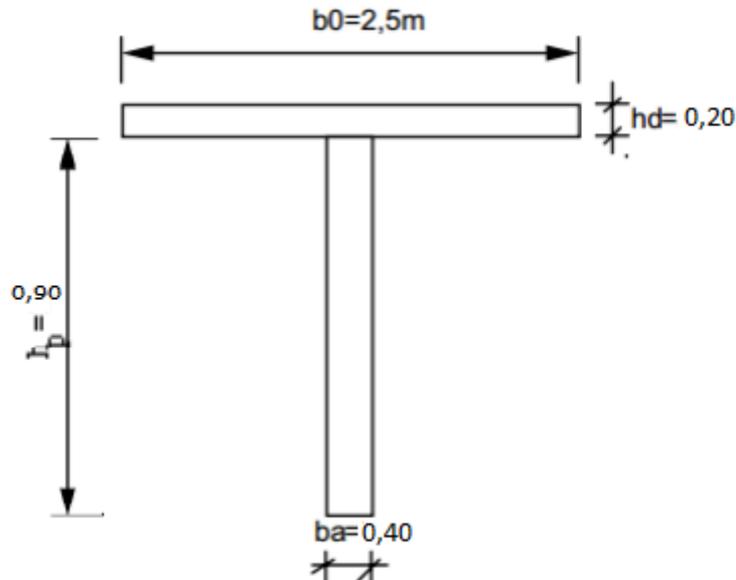


Figure: Géométrie de la section de la poutre en T

Son expression est la suivante :

$$I_p = \frac{1}{3} [(b_0 - b_a) \cdot h_d^3 + b_a \cdot h_p^3] - \frac{1 [(b_0 - b_a) \cdot h_d^2 + b_a \cdot h_p^2]^2}{4 [(b_0 - b_a) \cdot h_d + b_a h_p]}$$

- b_0 : largeur de la poutre ;
- b_a : largeur de l'âme de la poutre ;
- h_d : hauteur de la dalle ;
- h_p : hauteur de la poutre.

$$I_p = \frac{1}{3} [(2,5 - 0,40) \times 0,2^3 + (0,4 \times 1,1^3)] - \frac{1 [(2,5 - 0,4) \times 0,2^2 + 0,4 \times 1,1^2]^2}{4 [(2,5 - 0,4) \times 0,2 + 0,4 \times 1,1]}$$

$$I_p = \frac{1}{3} [0,308] - \frac{1 [0,408]^2}{4 \cdot 0,78}$$

$$I_p = 0,103 - 0,053$$

$$I_p = 0,089m^4$$

-Calcul de l'inertie de torsion de la poutre K_p :

L'inertie de torsion d'un rectangle de longueur b et de largeur a est donnée par :

$$T = k \left(\frac{b}{a} \right) b a^3$$

Où k est une fonction du rapport b/a. Il est calculé à l'aide de la formule de Sâada qui stipule que :

$$k = \frac{1}{3} - \frac{64 a}{\pi^5 b} \operatorname{tgh} \left(\frac{\pi b}{2 a} \right)$$

Nous avons alors :

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2} \frac{1}{3} b_0 h_d^3 \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times 2,5 \times 0,2^3 \\ T_1 &= 3,33 \cdot 10^{-3} m^4 \\ T_2 &= k \left(\frac{2(h_p - h_d)}{b_a} \right) \cdot (h_p - h_d) b_a^3 \\ &= k \left(\frac{2(1,1 - 0,2)}{0,40} \right) \times (1,1 - 0,2) \times 0,4^3 \\ T_2 &= k(4,5) \times 0,9 \times 0,4^3 \end{aligned}$$

D'après la formule de VIPP, nous pouvons calculer k à partir de l'expression suivante :

$$k = \frac{1}{3} - \left(0,051 + \frac{0,168}{5,6} \right) e^{-0,13R}$$

Avec R=b/a ; ce qui implique que R=4,5 car k(b/a)=k(4,5) et :

$$\begin{aligned} k(4,5) &= \frac{1}{3} - \left(0,051 + \frac{0,168}{5,6} \right) e^{-0,13 \times 4,5} \\ k &= \frac{1}{3} - 0,045 = 0,288 \end{aligned}$$

Alors on a :

$$\begin{aligned} T_2 &= k(4,5) \times 0,9 \times 0,4^3 \\ T_2 &= 0,288 \times 0,9 \times 0,4^3 \\ T_2 &= 0,017 \end{aligned}$$

Nous avons donc :

$$\begin{aligned} K_p &= T_1 + T_2 = 3,33 \cdot 10^{-3} + 0,017 \\ K_p &= 0,020 m^4 \end{aligned}$$

-Calcul des paramètres de torsion et d'entretoisement

- **Cas des entretoises d'about**

Ces deux paramètres constituent les paramètres fondamentaux pour le calcul du CRT. Ils définissent le comportement du pont.

-Paramètre de torsion α

Ce paramètre caractérise l'influence de la torsion et sa valeur est comprise entre 0 et 1. Son expression est la suivante :

$$\alpha = \frac{\gamma_p + \gamma_E}{2 \times \sqrt{\rho_p + \rho_E}}$$

-Paramètre d'entretoisement θ

Il permet de choisir la méthode de calcul du CRT. Son expression est la suivante :

$$\theta = \frac{b^L}{L} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_E}}$$

Si $\theta > 0,3$ on fait recours à la méthode de Guyon-Massonnet ; Si $\theta < 0,3$ on fait recours à la méthode de courbon. Ainsi on a :

-Rigidités de torsion :

$$\gamma_p = \frac{C_p}{b_1} = \frac{G \times K_p}{b_1}$$

Nous avons posé plus haut l'hypothèse selon laquelle le coefficient du matériau constitutif Serait nul ($\nu=0$) donc $G = E/2$ et on a :

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \frac{C_p}{b_1} = \frac{G \times K_p}{b_1} = \frac{E \times K_p}{2b_1} \\ &= \frac{0,020 \times E}{2 \times 2,5} \\ \gamma_p &= \mathbf{0,004E} \\ \gamma_E &= \frac{C_E}{L_1} = \frac{G \times K_E}{L_1} = \frac{K_E \times E}{2L_1} \\ \gamma_E &= \frac{K_E \times E}{40} = \frac{0,0138 \times E}{40} \\ \gamma_E &= \mathbf{3,45 \cdot 10^{-4}E} \end{aligned}$$

-Rigidités de flexion :

$$\rho_p = \frac{B_p}{b_1} = \frac{E \times I_p}{b_1}$$

$$\rho_p = \frac{0,089 \times E}{2,5}$$

$$\rho_p = 0,036E$$

$$\rho_E = \frac{E \times I_E}{L_1}$$

$$\rho_E = \frac{E \times 0,0243}{20}$$

$$\rho_E = 1,215 \cdot 10^{-3}E$$

Le paramètre de torsion nous donne alors:

$$\alpha = \frac{\gamma_p + \gamma_E}{2 \times \sqrt{\rho_p \times \rho_E}} = \frac{0,004E + 3,45 \cdot 10^{-4}E}{2 \times \sqrt{0,036E \times 1,215 \cdot 10^{-3}E}}$$

$$\alpha = 0,33$$

Le paramètre d'entretoisement quant à lui est donné par la formule :

$$\theta = \frac{b^4}{L} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_E}} = \frac{5^4}{20} \sqrt{\frac{0,036E}{1,215 \cdot 10^{-3}E}}$$

$$\theta = 0,58$$

Nous remarquons bien que $\theta = 0,58 > 0,33$, nous utiliserons alors la méthode de Guyon-Massonnet pour le calcul du CRT.

-Interpolation suivant α

-Nous Ligne d'influence du coefficient K pour la poutre de rive

allons utiliser la formule de Sattler qui propose des relations en fonction de la valeur de θ telles que :

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{0,05}; \text{ si } 0 \leq \theta \leq 0,1 \text{ (a)}$$

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{(1-e^{\theta_0})} \text{ avec } \theta_0 = \frac{0,065 - \theta}{0,663}; \text{ si } 0,1 < \theta < 1 \text{ (b)}$$

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\sqrt{\alpha}; \text{ si } \theta \geq 1 \text{ (c)}$$

Où K0 et K1 sont donnés par les tables de Guyon-Massonnet en fonction de θ , e et y.

Nous avons $\theta = 0,58$ alors la formule de Sattler la mieux indiquée est la formule (b). Soit :

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{(1-e^{\theta_0})}$$

Avec :

$$\theta_0 = \frac{0,065-\theta}{0,663} = \frac{0,065-0,58}{0,663} = -0,78$$

Ce qui implique :

$$K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0) \times 0,33^{(1-e^{\theta_0})}$$

$$K_\alpha = 0,45K_0 + 0,55K_1$$

-Interpolation suivant θ

On a $\theta = 0,58$ donc l'interpolation se fera entre les valeurs suivantes :

$\theta_1 = 0,55$ et $\theta_2 = 0,60$. Ainsi :

$$K_\theta = K_{\theta_1} + (K_{\theta_2} - K_{\theta_1}) \frac{0,58 - 0,55}{0,60 - 0,55}$$

$$K_\theta = K_{\theta_1} + (K_{\theta_2} - K_{\theta_1}) \times 0,6$$

$$K_\theta = 0,4K_{\theta_1} + 0,6K_{\theta_2}$$

-Interpolation suivant y (la position de la poutre)

$$y = 1,25 + 2,5 = 3,75m \text{ et } \frac{y}{3,75} = \frac{b}{5} \text{ alors } y = 0,75b$$

Les valeurs de K pour $y=3,75$ sont directement recopiées à partir des tableaux de Massonnet.

Nous n'avons donc pas besoin de faire une interpolation sur y . On a : $K_{|y=0} = K_{|y=3b/4}$

En résumé on a deux interpolations à effectuer. On choisit par ordre :

1) $K_\alpha = 0,45K_0 + 0,55K_1$

2) $K_\theta = 0,4K_{\theta_1} + 0,6K_{\theta_2}$

Nous déterminerons tout d'abord un tableau pour $\theta_1 = 0,55$ et pour $\theta_2 = 0,60$. Les valeurs de K_0 et de K_1 seront directement lues dans les tableaux de Massonnet après s'être fixé la valeur de $y=0,75b=3b/4$. On effectue ensuite l'interpolation sur α en utilisant les lignes de K.

ANNEXES

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,55$ après une interpolation sur α pour la poutre de rive

$\theta = 0,55$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,8871	-0,5279	-0,1538	0,2657	0,7666	1,3746	2,0885	2,8585	3,6081
K_1	0,3922	0,4737	0,5777	0,7192	0,9069	1,1411	1,4071	1,6611	1,852
K_α	-0,1835	0,0230	0,2485	0,5151	0,8438	1,2462	1,7137	2,1999	2,6422

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,60$ après une interpolation sur α pour la poutre de rive

$\theta = 0,60$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,7808	-0,4806	-0,1615	0,2154	0,6968	1,3177	2,0778	2,9106	3,7122
K_1	0,3362	0,4171	0,5243	0,6761	0,8839	1,151	1,4582	1,7518	1,9607
K_α	-0,1665	0,0131	0,2157	0,4688	0,7997	1,2260	1,7370	2,2733	2,7489

On effectue à présent une dernière interpolation sur θ en utilisant la dernière ligne de chaque tableau. Pour cela nous allons considérer les dernières lignes des deux tableaux précédents.

Nous avons ainsi les valeurs de K en fonction de e dans le tableau suivant :

Tableau: Récapitulatif des valeurs de $K=K(e)$ pour $\theta = 0,58$ pour la poutre de rive

$\theta = 0,58$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K	-0,1733	0,0171	0,2288	0,4873	0,8173	1,2341	1,7277	2,2439	2,7062

A partir des valeurs obtenues dans le tableau précédent, traçons à présent la courbe $K = K(e)$ représente la ligne d'influence (Li) de K pour la poutre de rive n°1. Les valeurs trouvées de K sont arrondies à 2 chiffres après la virgule pour qu'on puisse tracer la courbe de K.

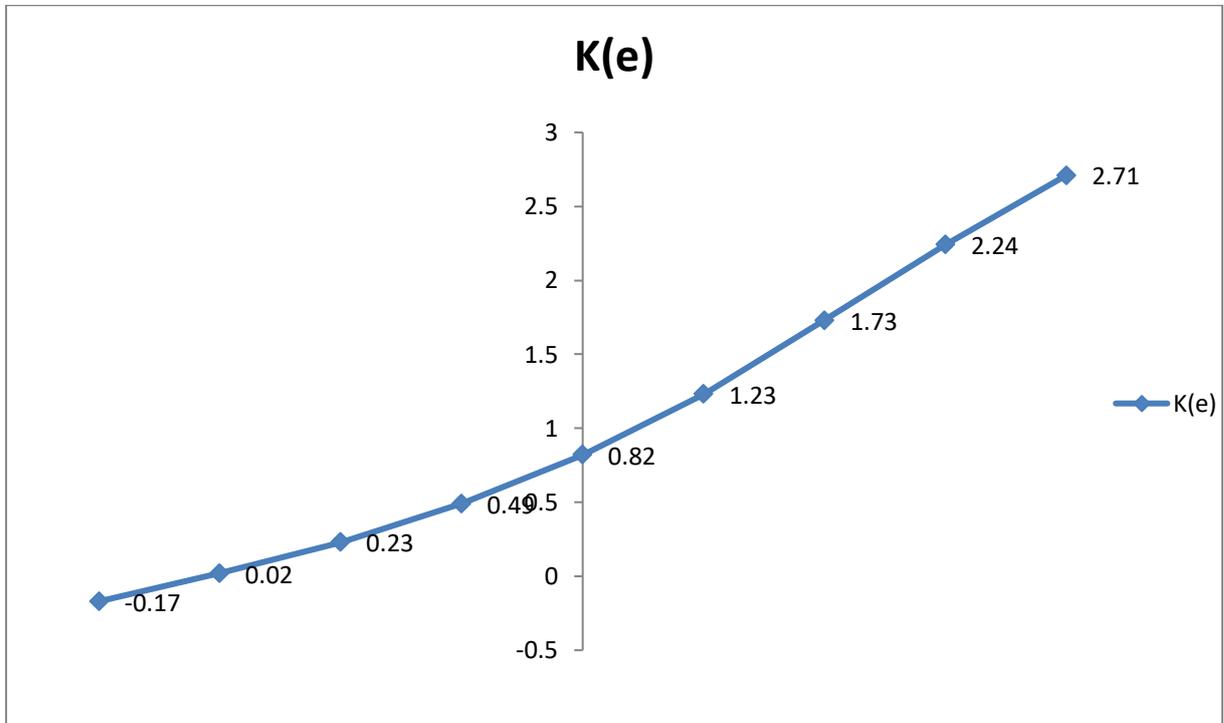


Figure: Ligne d'influence de K pour la poutre de rive (1er cas)

-Détermination des CRT pour la poutre de rive

-Charge AL

On place la charge $A(L)$ suivant les règles de chargement de la manière la plus défavorable. Nous allons donc essayer différents cas de chargement (1voie et 2voies chargées) comme le coefficient a_1 varie en fonction du nombre de voies chargées.

Rappelons les caractéristiques du pont :

- largeur chargeable est la même que celle roulable : $L_{ch} = 7,5m$;
- le nombre de voies est de deux (2) et la largeur d'une voie $L_v = 3,75m$;
- le pont est de la 1ère classe.

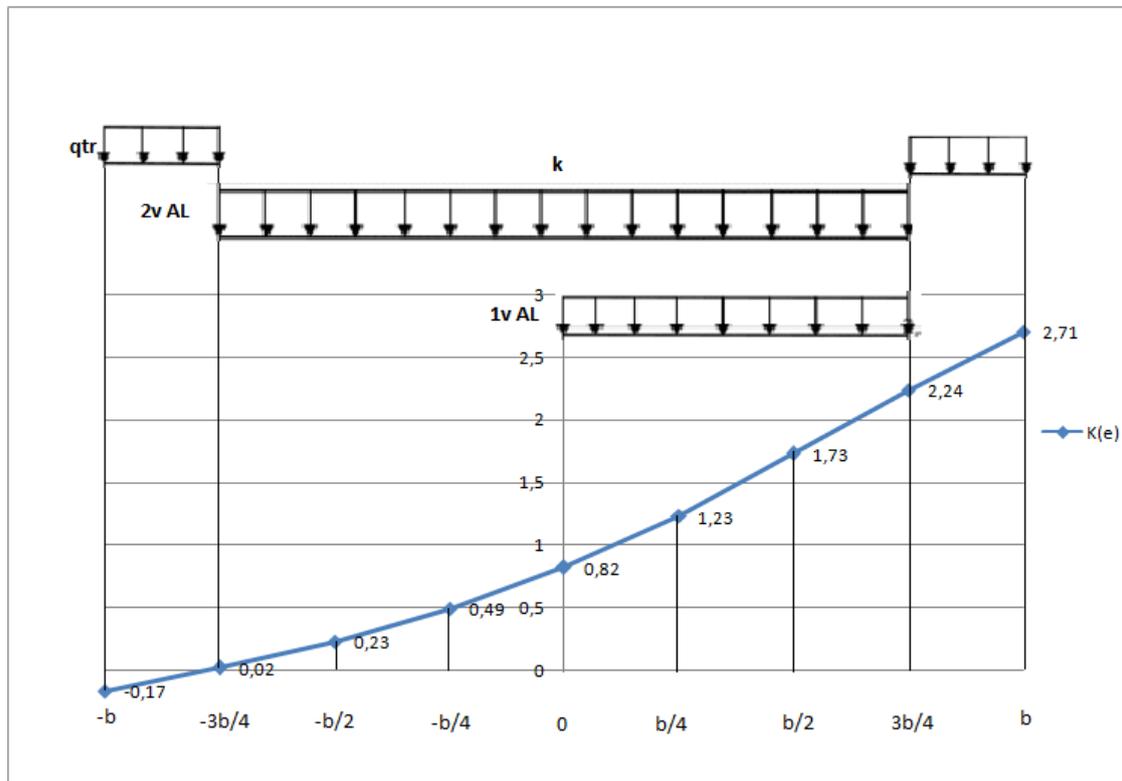


Figure: Application de la charge A(L) et celle du trottoir qtr sur la Li de K pour la poutre de rive (1er cas)

-1^{er} cas : une voie chargée de largeur $L_{AL} = 3,75\text{m}$

Etant donné que le pont est de la 1^{ère} classe et 1 voie chargée alors $a_1=1,0$. Ici, la fin de la voie chargée coïncide avec $e = b - (L_{tr} + L_v) = 0$.

Le coefficient K pour ce chargement de AL est l'air ω_{AL} de la ligne d'influence correspondant à la charge divisée par la largeur du chargement, soit :

$$K_{AL} = \frac{\omega_{AL}}{L_{AL}}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K(e=0) + K\left(e = \frac{b}{4}\right) + K\left(e = \frac{b}{2}\right) + \frac{1}{2} K(e = b - L_{tr}) \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 0,82 \right) + 1,23 + 1,73 + \left(\frac{1}{2} \times 2,24 \right) \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times 4,49 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \mathbf{1,50}$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{1,50}{4} = 0,38$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,38 \times 3,75 = 1,43$$

-2^{ème} cas : deux voies chargées de largeur totale $L_{AL} = 7,5\text{m}$

Le pont est de la 1^{ère} classe et 2 voies chargées alors $a_1=1,0$.

La fin des deux voies chargées coïncide avec $e = b - (L_{tr} + 2V)$. On a alors :

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K(e = b - L_{tr} - 2V) + K\left(e = -\frac{b}{2}\right) + K\left(e = -\frac{b}{4}\right) + K(e = 0) + K\left(e = \frac{b}{4}\right) + \right] \frac{b}{4}$$

$$+ K\left(e = \frac{b}{2}\right) + \frac{1}{2} K(e = b - L_{tr})$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 0,02\right) + 0,23 + 0,49 + 0,82 + 1,23 + 1,73 + \left(\frac{1}{2} \times 2,24\right) \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times 5,63 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \mathbf{0,94}$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{0,92}{4} = 0,24$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,24 \times 7,5 = 1,8$$

Nous concluons donc que le deuxième cas est le plus défavorable et nous avons donc pour le CRT :

$$\eta_{AL} = \mathbf{0,24} \text{ avec } a_1 = \mathbf{1,0} \text{ et } L_{AL} = \mathbf{7,5m}$$

-Charge de trottoir q_{tr}

La largeur du trottoir est $L_{tr} = 1,25\text{m}$ et le cas le plus défavorable est le chargement des deux trottoirs simultanément.

Les extrémités des chargements correspondent au début et la fin des trottoirs, ceci coïncide avec $e = b$ et $e = b - L_{tr}$ pour le trottoir de droite et avec $e = -b$ et $e = -b + L_{tr}$ pour le trottoir de gauche. De même que pour A_L , le coefficient K est le rapport entre l'aire ω_{tr} de la ligne d'influence correspondant au chargement du trottoir par sa largeur L_{tr} . On a :

$$K_{tr} = \frac{\omega_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})] \frac{L_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})]$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [2,71 + 2,24 - 0,17 - 0,02]$$

$$K_{tr} = 2,38$$

Le CRT η_{tr} est donc :

$$\eta_{tr} = \frac{K_{tr}}{n} = \frac{2,38}{4} = 0,60$$

On retient donc que : $\eta_{tr} = 0,60$ avec $L_{tr} = 1,25m$

-Charge B_c

Le coefficient bc dépend du nombre de files de camions à placer.

A cause de la variation de bc, on essaye 2 cas différents (1 file et 2 files de B_c). On place les différentes files de roues sur la largeur chargeable de la manière la plus défavorable selon les règles de chargement. Donc on place les convois de B_c décalés à droite en prenant soin de laisser 0,25 m entre le bord du trottoir et la première file de roues.

-1^{er} cas : 01 file de B_c avec bc = 1,2

$$K_{BC} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_1 + K_2) = \frac{1}{2} (1,31 + 2,15) = 1,73$$

On rappelle que le facteur 1/2 est introduit pour indiquer que longitudinalement on prend la charge d'un essieu et non pas d'une roue. Les K_i sont déterminées graphiquement sur la figure.

Ainsi le CRT η_{Bc} est:

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{BC}}{n} = \frac{1,73}{4} = 0,43$$

Pour la comparaison on utilisera bc.η_{Bc} et on a :

$$bc \cdot \eta_{Bc} = 1,2 \times 0,43 = 0,52$$

-2^{ème} cas : 02 files de B_c avec bc = 1,1

$$K_{BC} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 K_i = \frac{1}{2} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) = \frac{1}{2} (1,31 + 2,15 + 1,14 + 0,55) = 2,58$$

Le CRT η_{Bc} est :

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{2,58}{4} = 0,65$$

Ce qui implique :

$$b_c \cdot \eta_{Bc} = 1,1 \times 0,65 = 0,72$$

On remarque que des deux cas $\eta_{Bc} = 0,65 > \eta_{Bc} = 0,43$, le cas le plus défavorable est celui où nous avons 02 files de Bc. On retient donc que :

$$\eta_{Bc} = 0,65 \text{ avec } b_c = 1,1$$

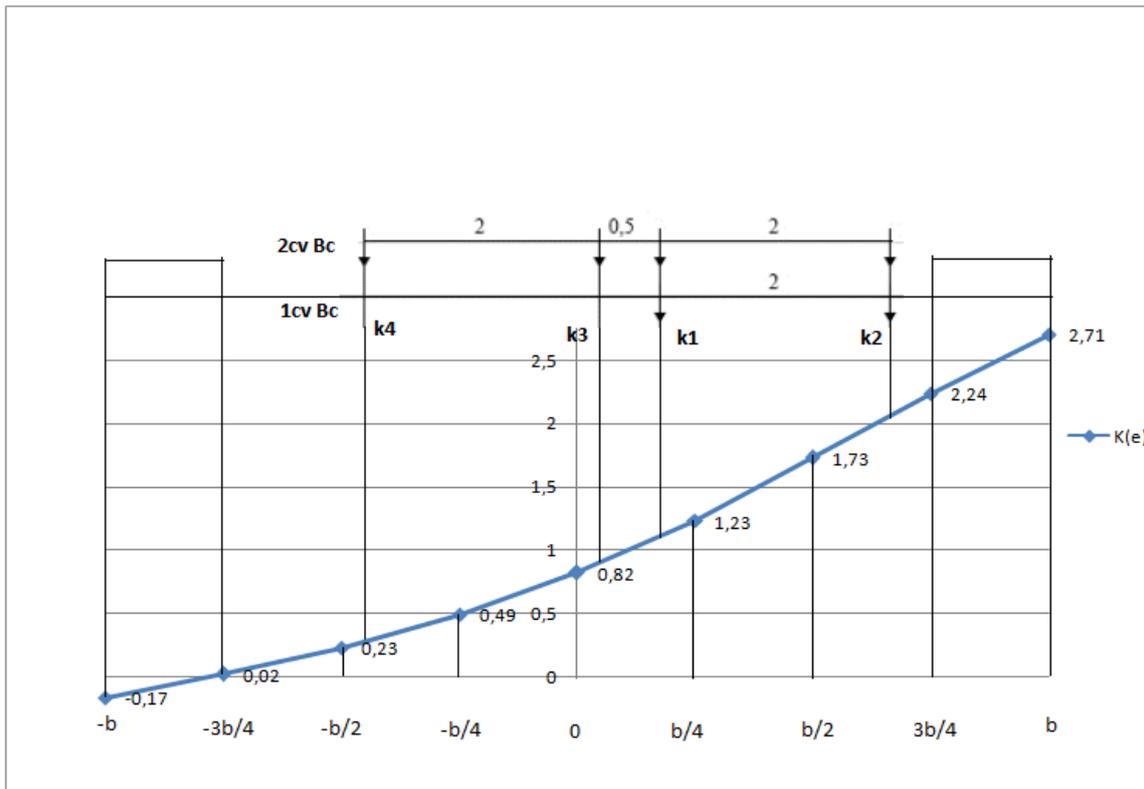


Figure: Disposition de Bc sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (1er cas)

-Charge B_t

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_5 + K_6 + K_7 + K_8)$$

Les valeurs de K sont directement lues sur le graphique, chaque coefficient étant la projection de l'essieu sur la ligne d'influence Li de K tracée.

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_5 + K_6 + K_7 + K_8) = \frac{1}{2} (0,37 + 0,89 + 1,23 + 2,05)$$

$$K_{Bt} = 2,27$$

Le CRT η_{Bt} est :

$$\eta_{Bt} = \frac{K_{Bt}}{n} = \frac{2,27}{4} = 0,57$$

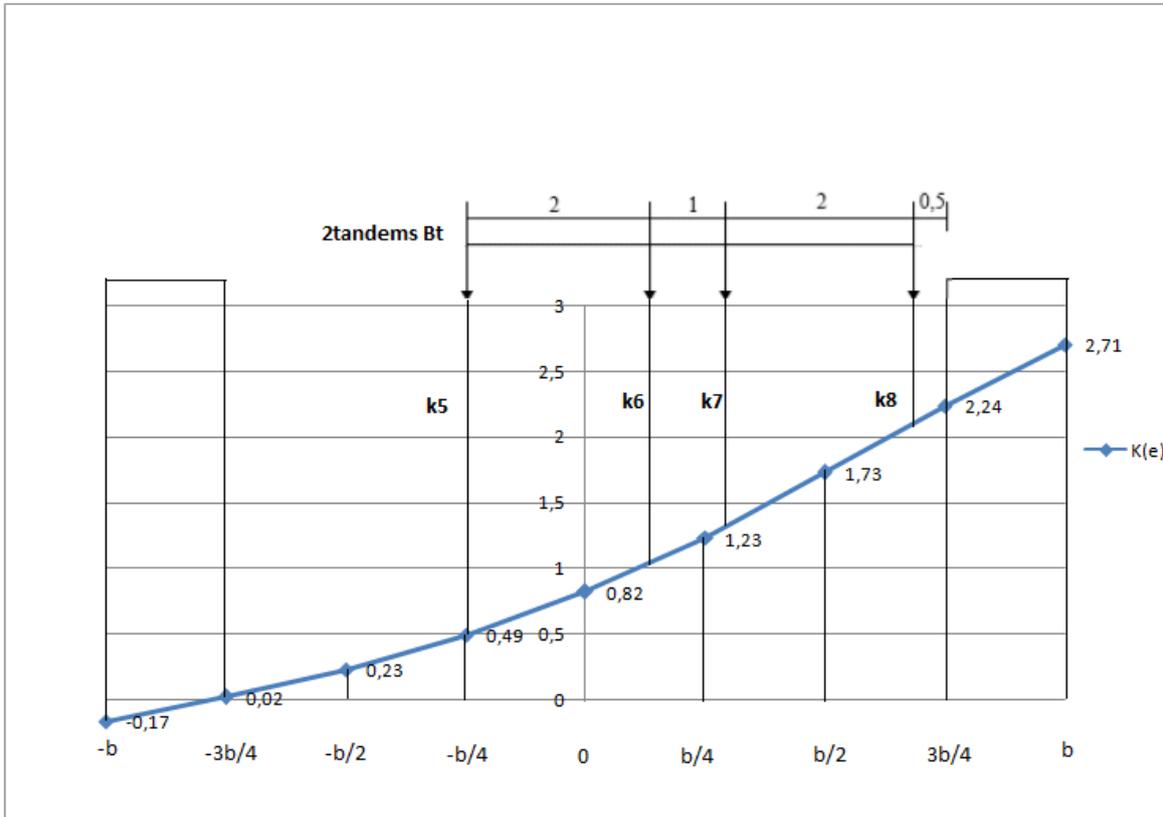


Figure: Disposition de Bt sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (1er cas)

-Charge Br

Le coefficient est déterminé graphiquement comme dans le cas de Bc de manière à se placer le plus proche possible de la poutre de rive. Nous avons $K_{Br}=2,15$ et donc

$$\eta_{Br} = \frac{K_{Br}}{n} = \frac{2,15}{4} = 0,54$$

-Charge Mc120

Pour la détermination du CRT, on calcule l'aire sous les chenilles comme dans le cas de AL. Le CRT correspond au rapport de l'aire sous les chenilles sur la surface d'influence par la largeur des chenilles. On place donc un char, c'est-à-dire deux chenilles avec $L_{Mc} = 1m$.

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{2} \frac{L_{Mc}}{L_{Mc}} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} K_i = \frac{1}{4} (K_9 + K_{10} + K_{11} + K_{12})$$

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{4} (0,68 + 0,94 + 1,80 + 2,24)$$

$$K_{Mc_{120}} = 1,42$$

Le CRT $\eta_{Mc_{120}}$ est :

$$\eta_{Mc_{120}} = \frac{K_{Mc_{120}}}{n} = \frac{1,42}{4} = 0,36$$

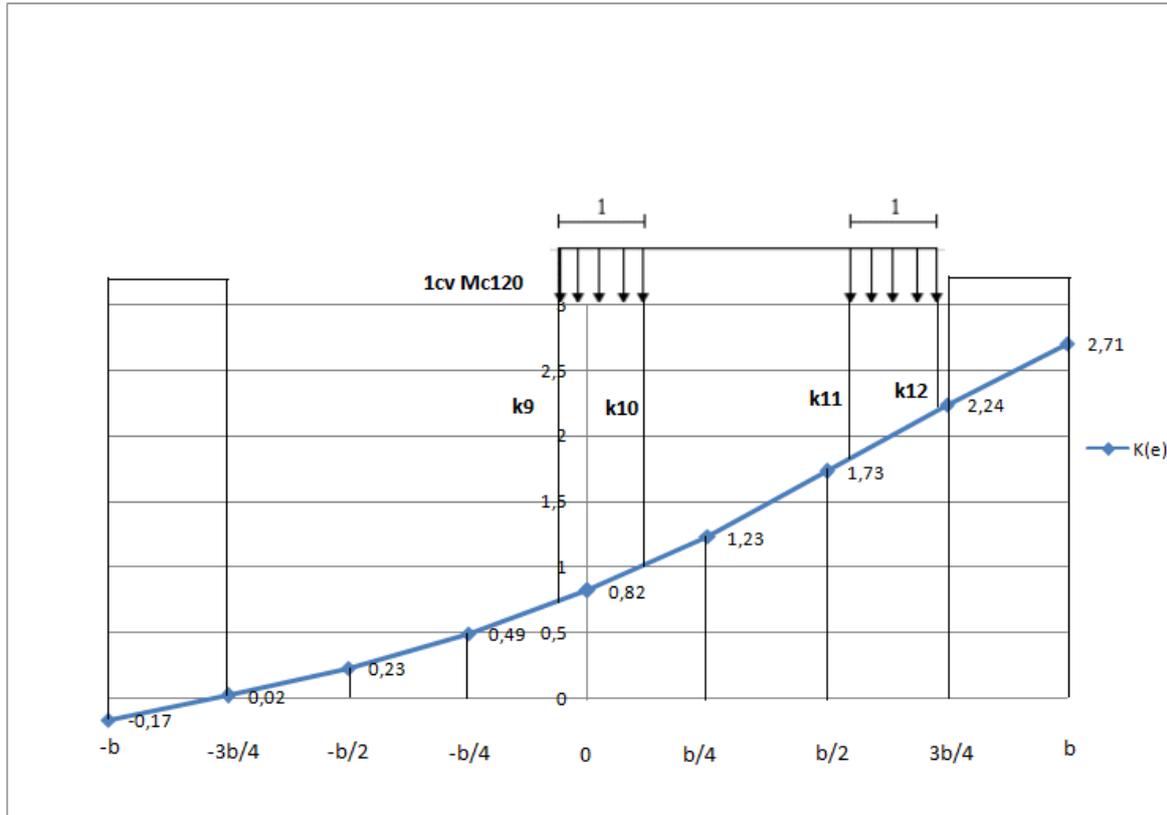


Figure: Disposition de Mc120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (1er cas)

-Charge Me120

Pour la détermination du CRT, on calcule l'aire sous les chenilles comme dans le cas de A_L . La largeur chargée est $L_{Me_{120}}=4m$

$$K_{Me_{120}} = \frac{\omega_{Me_{120}}}{L_{Me_{120}}}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{L_{Me_{120}}} \left[\frac{1}{2} K_{13} + K_{14} + K_{15} + K_{16} + \frac{1}{2} K_{17} \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} \times 0,76 + 0,82 + 1,23 + 1,73 + \frac{1}{2} \times 2,24 \right] \frac{5}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{4} \times 5,28 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = 1,65$$

Le CRT $\eta_{Me_{120}}$ est :

$$\eta_{Me_{120}} = \frac{K_{Me_{120}}}{n} = \frac{1,65}{4} = 0,41$$

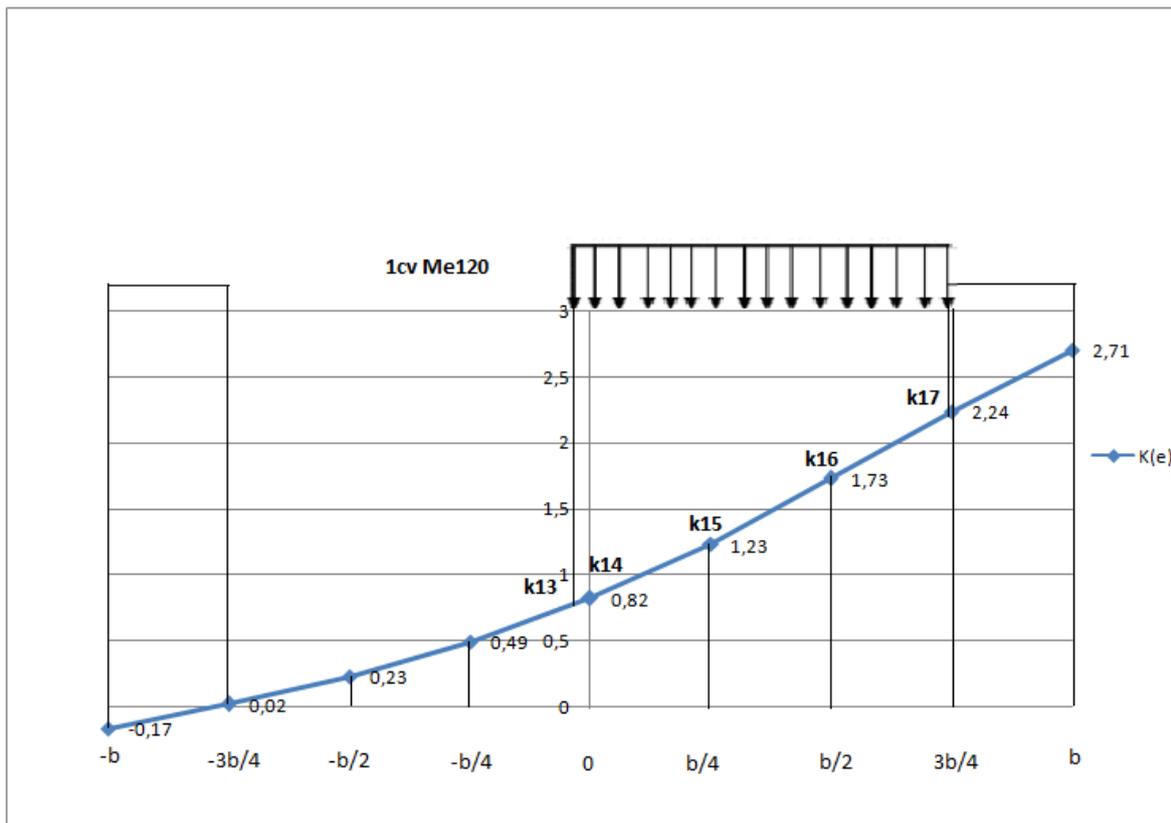


Figure: Disposition de Me120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (1er cas)

-Détermination des CRT pour la poutre intermédiaire

Les paramètres α et θ conservent les mêmes valeurs que pour celle de la poutre de rive c'est-à-dire que $\alpha = 0,33$ et $\theta = 0,58$. Par conséquent, les interpolations sur α et θ restent les mêmes que pour la poutre de rive n°1 telles que :

$$1) K_{\alpha} = 0,45K_0 + 0,55K_1$$

$$2) K_{\theta} = 0,4K_{\theta_1} + 0,6K_{\theta_2}$$

Seule la position de la poutre change et devient $y = 1,25b/5$. $b = b/4$. Les tableaux de Massonnet donnent directement les valeurs de K pour $y = b/4$.

En suivant le même principe que pour la poutre de rive, nous déterminerons tout d'abord un tableau pour $\theta_1 = 0,55$ et pour $\theta_2 = 0,60$. Les valeurs de K_0 et de K_1 seront directement lues dans les tableaux de Massonnet après s'être fixé la valeur de $y = 0,25b = b/4$. On effectue ensuite l'interpolation sur α en utilisant les lignes de K.

ANNEXES

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,55$ après une interpolation sur α pour la poutre intermédiaire

$\theta = 0,55$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,0883	0,2657	0,6183	0,9592	1,2556	1,4423	1,4571	1,3746	1,2654
K_1	0,6309	0,7192	0,8275	0,9595	1,0981	1,194	1,1902	1,1411	1,0889
K_α	0,3073	0,5151	0,7334	0,9594	1,1690	1,3057	1,3103	1,2462	1,1683

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,60$ après une interpolation sur α pour la poutre intermédiaire

$\theta = 0,60$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,1808	0,2154	0,6119	0,9977	1,3316	1,5237	1,4853	1,3177	1,1155
K_1	0,5792	0,6761	0,7992	0,9545	1,1215	1,2361	1,2207	1,151	1,0792
K_α	0,2372	0,4688	0,7149	0,9739	1,2160	1,3655	1,3398	1,2260	1,0955

Tableau: Récapitulatif des valeurs de $K=K(e)$ pour $\theta = 0,58$ pour la poutre intermédiaire

$\theta = 0,58$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K	0,2652	0,4873	0,7223	0,9681	1,1972	1,3416	1,328	1,2341	1,1246

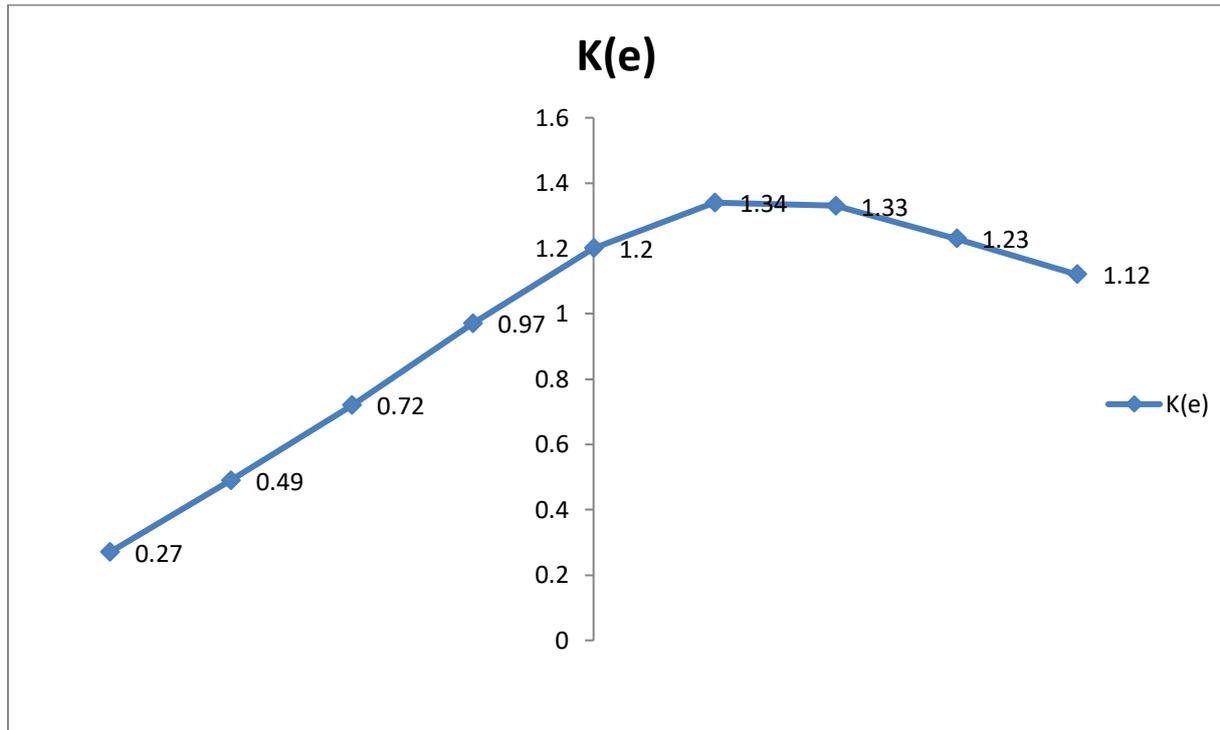


Figure: Ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (1er cas)

-Charge AL

On placera à nouveau la charge A(L) suivant les règles de chargement de la manière la plus défavorable. Nous allons donc essayer différents cas de chargement (1 voie et 2 voies chargées) comme nous l'avons fait pour la poutre de rive.

Le pont conserve les mêmes caractéristiques à savoir :

- largeur chargeable est la même que celle roulable : $L_{ch} = 7,5m$;
- le nombre de voies est de deux (2) et la largeur d'une voie $L_v = 3,75m$;
- le pont est de la 1ère classe.

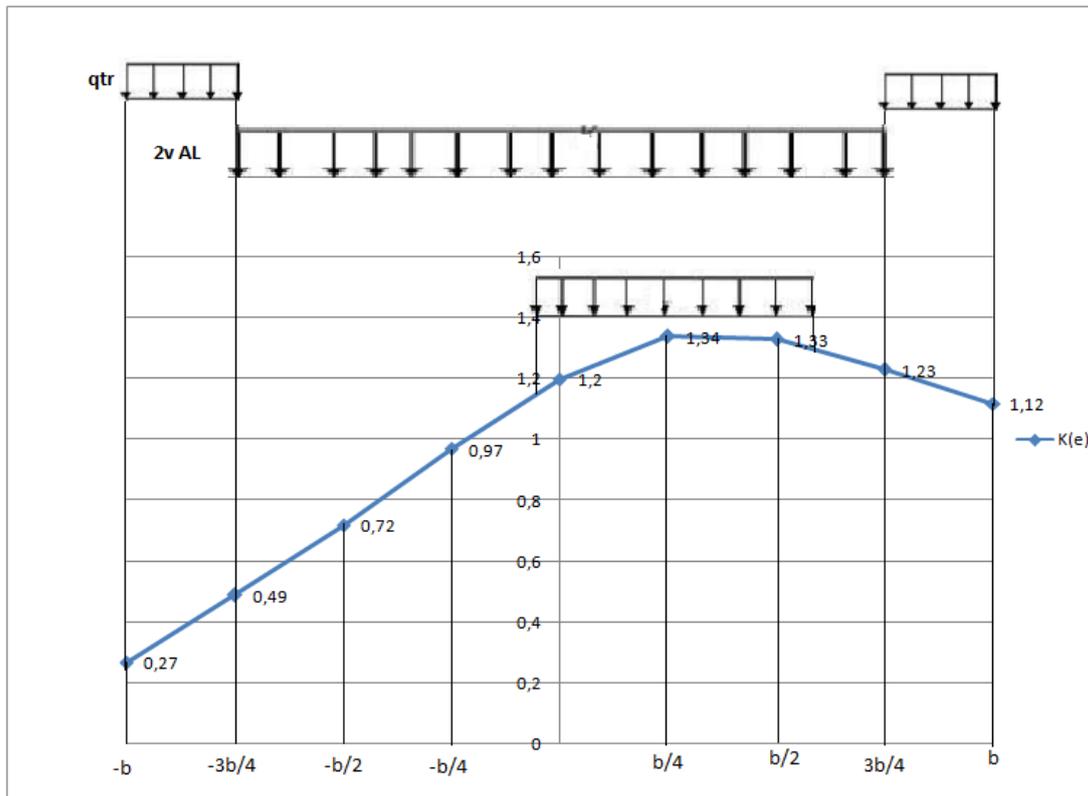


Figure: Application de la charge A(L) et celle du trottoir qtr sur la Li de K pour la poutre intermédiaire (1er cas)

-1^{er} cas : une voie chargée de largeur $L_{AL} = 3,75\text{m}$

Etant donné que le pont est de la 1^{ère} classe et 1 voie chargée alors $a_1=1,0$.

On remarque que la charge est centrée sur l'axe de la poutre qui est à $b/4$, le début et la fin de

la voie chargée correspondent alors respectivement à $e = \frac{b}{4} - \frac{L_V}{2}$ et à $e = \frac{b}{4} + \frac{L_V}{2}$

Ainsi, on a le coefficient K pour ce chargement de A_L est l'air ω_{AL} de la ligne d'influence Correspondant à la charge divisée par la largeur du chargement, soit :

$$K_{AL} = \frac{\omega_{AL}}{L_{AL}}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K \left(e = \frac{b}{4} - \frac{L_V}{2} \right) + K(e = 0) + K \left(e = \frac{b}{4} \right) + K \left(e = \frac{b}{2} \right) + \frac{1}{2} K \left(e = \frac{b}{4} + \frac{L_V}{2} \right) \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times \left[\frac{1}{2} \times 1,09 + 1,20 + 1,34 + 1,33 + \frac{1}{2} \times 1,28 \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times 5,055 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = 1,80$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{1,69}{4} = 0,42$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,42 \times 3,75 = 1,58$$

-2^{ème} cas : deux voies chargées de largeur totale $L_{AL} = 7,5m$

Le pont est de la 1^{ère} classe et 2 voies chargées alors $a_1=1,0$.

La fin des deux voies chargées coïncide avec $e = b - (L_{tr} + 2L_V)$. On a alors :

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K(e = b - L_{tr} - 2L_V) + K\left(e = -\frac{b}{2}\right) + K\left(e = -\frac{b}{4}\right) + K(e = 0) + \frac{b}{4} \right]$$

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[K\left(e = \frac{b}{4}\right) + K\left(e = \frac{b}{2}\right) + \frac{1}{2} K(e = b - L_{tr}) \right]$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 0,49\right) + 0,72 + 0,97 + 1,20 + 1,34 + 1,33 + \left(\frac{1}{2} \times 1,23\right) \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times 6,42 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \mathbf{1,07}$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{1,07}{4} = 0,27$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,27 \times 7,5 = 2$$

Nous concluons donc que le deuxième cas est le plus défavorable et nous avons donc pour le CRT :

$$\eta_{AL} = \mathbf{0,27} \text{ avec } \mathbf{a_1 = 1,0} \text{ et } \mathbf{L_{AL} = 7,5m}$$

-Charge de trottoir q_{tr}

La largeur du trottoir est $L_{tr} = 1,25m$ et le cas le plus défavorable est le chargement des deux trottoirs simultanément.

Les extrémités des chargements correspondent au début et la fin des trottoirs, ceci coïncide avec $e = b$ et $e = b - L_{tr}$ pour le trottoir de droite et avec $e = -b$ et $e = -b + L_{tr}$ pour le trottoir de gauche. De même que pour A_L , le coefficient K est le rapport entre l'aire ω_{tr} de la ligne d'influence correspondant au chargement du trottoir par sa largeur L_{tr} . On a :

$$K_{tr} = \frac{\omega_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})] \frac{L_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})]$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [1,12 + 1,23 + 0,27 + 0,49]$$

$$K_{tr} = 1,56$$

Le CRT η_{tr} est donc :

$$\eta_{tr} = \frac{K_{tr}}{n} = \frac{1,56}{4} = 0,39$$

On retient donc que :

$$\eta_{tr} = 0,39 \text{ avec } L_{tr} = 1,25\text{m}$$

-Charge Bc

Le coefficient bc dépend du nombre de files de camions à placer.

A cause de la variation de bc, on essaye 2 cas différents (1 file et 2 files de Bc). Tout comme avec la poutre de rive, on place les différentes files de roues sur la largeur chargeable de la manière la plus défavorable selon les règles de chargement comme indiqué sur la figure suivante :

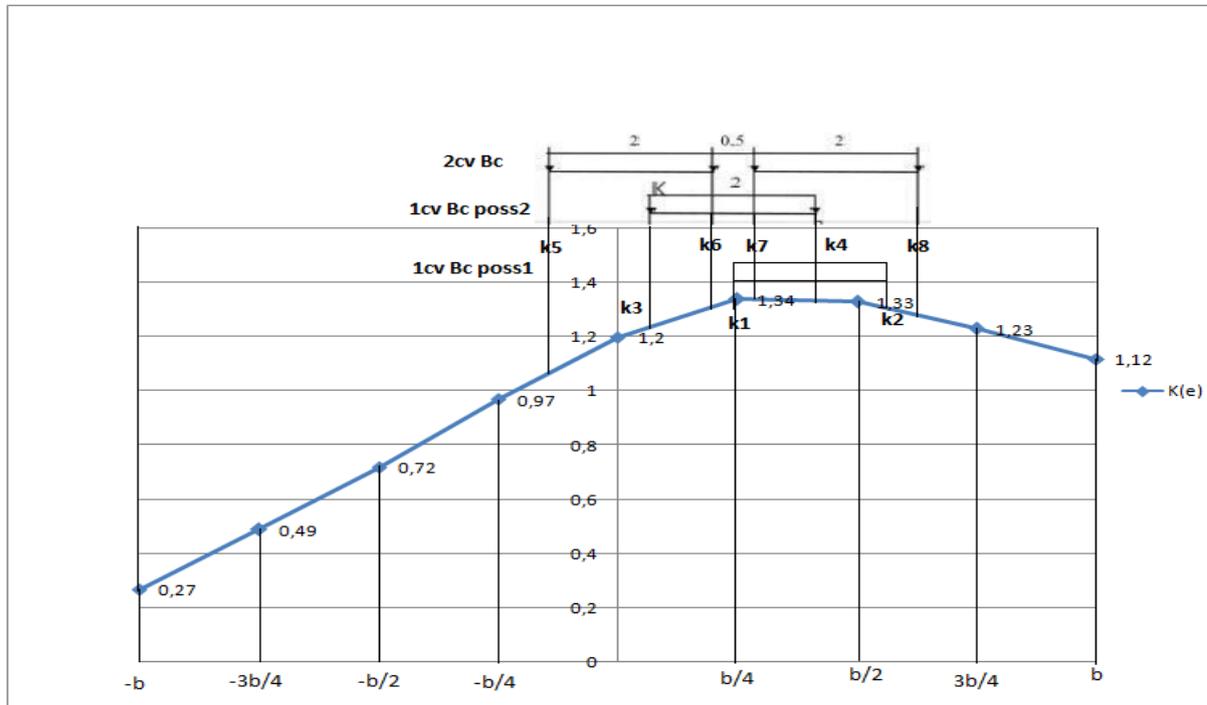


Figure: Disposition de Bc sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (1er cas)

-1^{er} cas : 01 file de Bc avec $bc = 1,2$

-1^{ère} disposition : 01 file de roue placée sur l'axe de la poutre

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_1 + K_2) = \frac{1}{2} (1,34 + 1,27) = 1,31$$

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{1,31}{4} = 0,33$$

$$bc \cdot \eta_{Bc} = 1,2 \times 0,33 = 0,40$$

-2^{ème} disposition : 02 files placées symétriquement par rapport à l'axe centrale de la Poutre

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_3 + K_4) = \frac{1}{2} (1,23 + 1,33) = 1,28$$

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{1,28}{4} = 0,32$$

$$bc \cdot \eta_{Bc} = 1,2 \times 0,32 = 0,38$$

-2^{ème} cas : 02 files de Bc avec $bc = 1,1$

Les 2 convois de Bc placés symétriquement par rapport à l'axe central.

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 K_i = \frac{1}{2} (K_5 + K_6 + K_7 + K_8) = \frac{1}{2} (1,01 + 1,31 + 1,34 + 1,25) = 2,46$$

Le CRT η_{Bc} est :

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{2,46}{4} = 0,62$$

Ce qui implique :

$$bc \cdot \eta_{Bc} = 1,1 \times 0,62 = 0,68$$

On remarque que des deux cas, le cas le plus défavorable est celui où nous avons 02 files de Bc.

On retient donc que :

$$\eta_{Bc} = 0,62 \text{ avec } bc = 1,1$$

-Charge B_t

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_9 + K_{10} + K_{11} + K_{12})$$

Les valeurs de K sont directement lues sur le graphique, chaque coefficient étant la projection de l'essieu sur la ligne d'influence Li de K tracée.

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_9 + K_{10} + K_{11} + K_{12}) = \frac{1}{2} (0,87 + 1,23 + 1,34 + 1,27)$$

$$K_{Bt} = 2,36$$

Le CRT η_{Bt} est :

$$\eta_{Bt} = \frac{K_{Bt}}{n} = \frac{2,36}{4} = 0,59$$

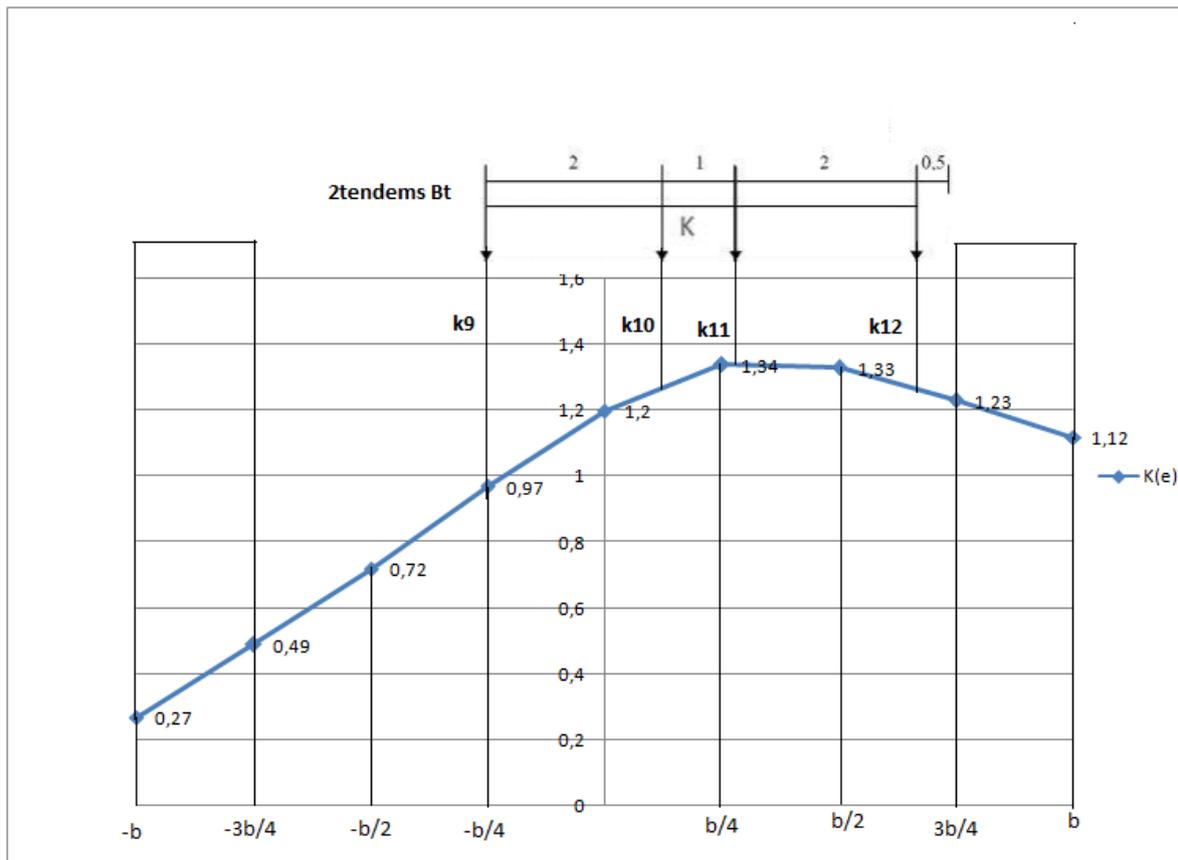


Figure: Disposition de Bt sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (1er cas)

-Charge B_r

Le coefficient est déterminé graphiquement comme dans le cas de B_c de manière à se placer le plus proche possible de la poutre d'intermédiaire. Nous avons $K_{Br}=1,34$ et donc :

$$\eta_{Br} = \frac{K_{Br}}{n} = \frac{1,34}{4} = 0,34$$

-Charge Mc120

Le cas le plus défavorable est celui où nous avons deux chenilles placées symétriquement par

rapport à l'axe central. On a :

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{4}(K_{13} + K_{14} + K_{15} + K_{16})$$

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{4}(1,04 + 1,21 + 1,33 + 1,26)$$

$$K_{Mc_{120}} = 1,21$$

Le CRT $\eta_{Mc_{120}}$ est :

$$\eta_{Mc_{120}} = \frac{K_{Mc_{120}}}{n} = \frac{1,21}{4} = 0,30$$

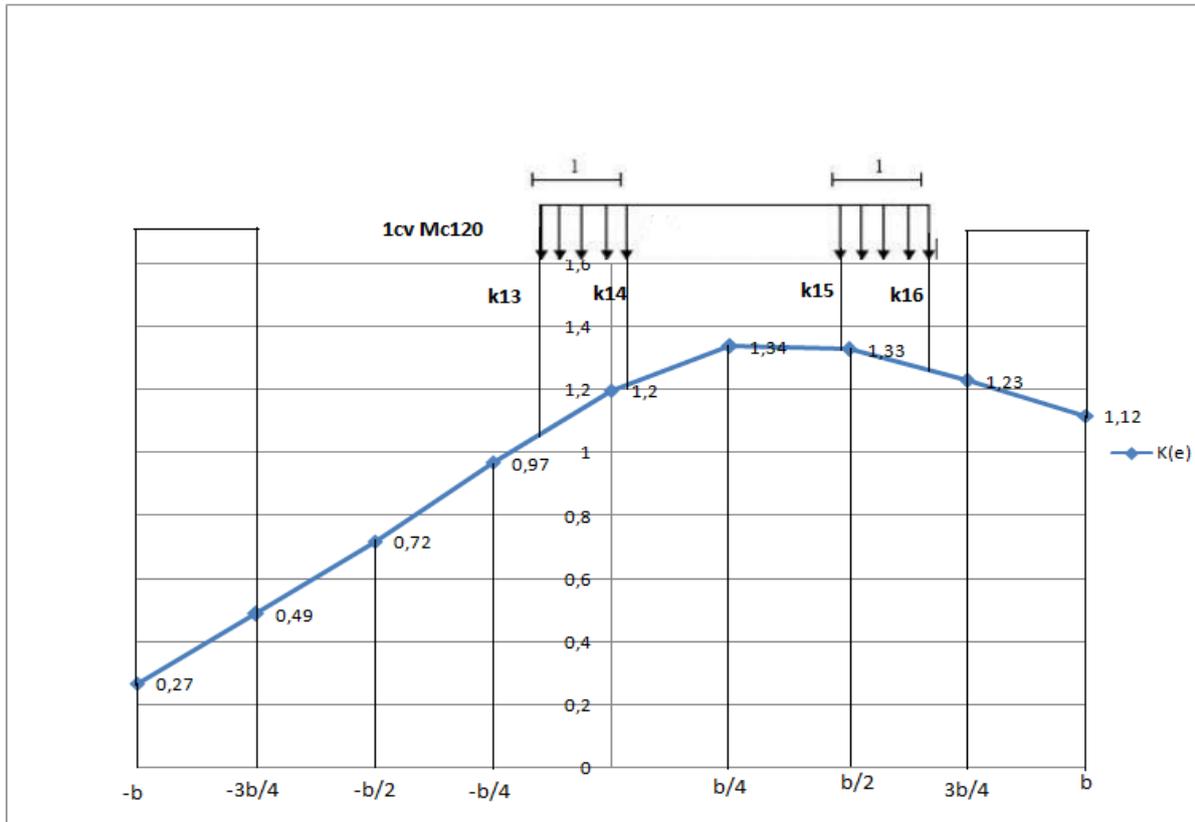


Figure: Disposition de Mc120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (1er cas)

-Charge Me120

Une chenille placée symétriquement par rapport à l'axe central.

$$K_{Me_{120}} = \frac{\omega_{Me_{120}}}{L_{Me_{120}}}$$

$$K_{Me_{120}} = 2 \times \frac{1}{L_{Me_{120}}} \left[\frac{1}{2} K_{17} + K_{18} + \frac{1}{2} K_{19} \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \times 1,07 + 1,20 + \frac{1}{2} \times 1,34 \right] \frac{5}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = 1,50$$

Le CRT $\eta_{Me_{120}}$ est :

$$\eta_{Me_{120}} = \frac{K_{Me_{120}}}{n} = \frac{1,50}{4} = 0,38$$

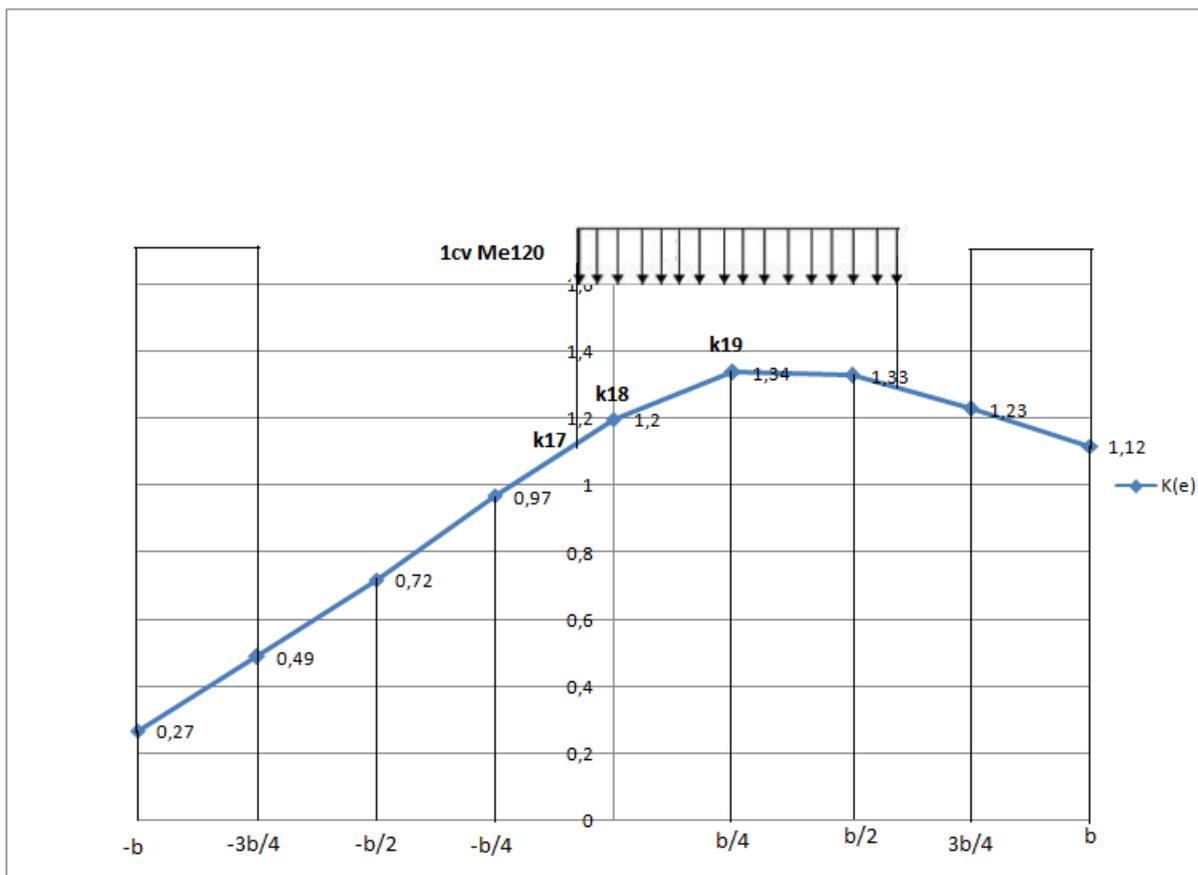


Figure: Disposition de Me120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (1er cas)

- Cas de la dalle

-Rigidités de torsion :

$$\gamma_p = \frac{C_p}{b_1} = \frac{G \times K_p}{b_1}$$

Nous avons posé plus haut l'hypothèse selon laquelle le coefficient du matériau constitutif serait nul ($\nu=0$) donc $G = E/2$ et on a :

$$\gamma_p = \frac{C_p}{b_1} = \frac{G \times K_p}{b_1} = \frac{E \times K_p}{2b_1}$$

$$\gamma_p = \frac{0,020 \times E}{2 \times 2,5}$$

$$\gamma_p = \mathbf{0,004E}$$

$$\gamma_E = \frac{C_E}{L_1} = \frac{G \times K_E}{L_1} = \frac{h_d 3 \times E}{12}$$

$$\gamma_E = \frac{h_d 3 \times E}{12} = \frac{0,20^3 \times E}{12}$$

$$\gamma_E = \mathbf{6,67 \cdot 10^{-4}E}$$

-Rigidités de flexion :

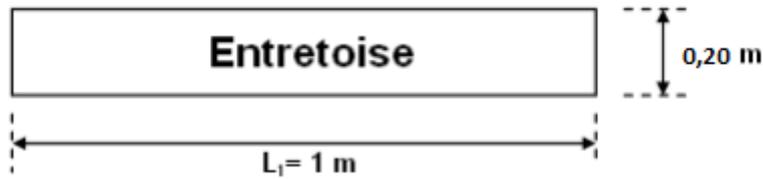


Figure: Les dimensions de l'entretoise

$$\rho_p = \frac{B_p}{b_1} = \frac{E \times I_p}{b_1}$$

$$\rho_p = \frac{0,089 \times E}{2,5}$$

$$\rho_p = 0,036E$$

$$\rho_E = \gamma_E = \mathbf{6,6710^{-4}E}$$

Et puisque entretoise = hourdis

$$\rho_E = \gamma_E = \mathbf{6,6710^{-4}E}$$

Le paramètre de torsion nous donne alors:

$$\alpha = \frac{\gamma_p + \gamma_E}{2 \times \sqrt{\rho_p \times \rho_E}} = \frac{0,004E + 6,67 \cdot 10^{-4}E}{2 \times \sqrt{0,036E \times 6,67 \cdot 10^{-4}E}}$$

$$\alpha = \mathbf{0,48}$$

Le paramètre d'entretoisement quant à lui est donné par la formule :

$$\theta = \frac{b}{L} \sqrt[4]{\frac{\rho_p}{\rho_E}} = \frac{5}{20} \sqrt[4]{\frac{0,036E}{6,67 * 10^{-4}E}}$$

$$\theta = 0,68$$

Nous remarquons bien que $\theta = 0,68 > 0,3$, nous utiliserons alors la méthode de Guyon-Massonnet pour le calcul du CRT.

-Interpolation suivant α

-Nous Ligne d'influence du coefficient K pour la poutre de rive

allons utiliser la formule de Sattler qui propose des relations en fonction de la valeur de θ telles que :

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{0,05}; \text{ si } 0 \leq \theta \leq 0,1 \text{ (a)}$$

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{(1-e^{\theta_0})} \text{ avec } \theta_0 = \frac{0,065 - \theta}{0,663}; \text{ si } 0,1 < \theta < 1 \text{ (b)}$$

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\sqrt{\alpha}; \text{ si } \theta \geq 1 \text{ (c)}$$

Où K_0 et K_1 sont donnés par les tables de Guyon-Massonnet en fonction de θ , e et y .

Nous avons $\theta = 0,68$ alors la formule de Sattler la mieux indiquée est la formule (b). Soit :

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)\alpha^{(1-e^{\theta_0})}$$

Avec :

$$\theta_0 = \frac{0,065 - \theta}{0,663} = \frac{0,065 - 0,68}{0,663} = -0,93$$

Ce qui implique :

$$K_\alpha = K_0 + (K_1 - K_0) \times 0,48^{(1-e^{-0,93})}$$

$$K_\alpha = 0,36K_0 + 0,64K_1$$

-Interpolation suivant θ

On a $\theta = 0,68$ donc l'interpolation se fera entre les valeurs suivantes :

$\theta_1 = 0,65$ et $\theta_2 = 0,70$. Ainsi :

$$K_\theta = K_{\theta_1} + (K_{\theta_2} - K_{\theta_1}) \frac{0,68 - 0,65}{0,70 - 0,65}$$

$$K_\theta = K_{\theta_1} + (K_{\theta_2} - K_{\theta_1}) \times 0,6$$

$$K_\theta = 0,4K_{\theta_1} + 0,6K_{\theta_2}$$

- Interpolation suivant y (la position de la poutre)

$$y = 1,25 + 2,5 = 3,75m \text{ et } \frac{y}{3,75} = \frac{b}{5} \text{ alors } y = 0,75b$$

Les valeurs de K pour $y=3,75$ sont directement recopiées à partir des tableaux de Massonnet.

ANNEXES

Nous n'avons donc pas besoin de faire une interpolation sur y . On a : $K_{y=0} = K_{y=3b/4}$

En résumé on a deux interpolations à effectuer. On choisit par ordre :

1) $K_\alpha = 0,36K_0 + 0,64K_1$

2) $K_\theta = 0,4K_{\theta_1} + 0,6K_{\theta_2}$

Nous déterminerons tout d'abord un tableau pour $\theta_1 = 0,65$ et pour $\theta_2 = 0,70$. Les valeurs de K_0 et de K_1 seront directement lues dans les tableaux de Massonnet après s'être fixé la valeur de $y=0,75b=3b/4$. On effectue ensuite l'interpolation sur α en utilisant les lignes de K .

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,65$ après une interpolation sur α pour la poutre de rive

$\theta = 0,65$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,6691	-0,4303	-0,169	0,1624	0,6223	1,2565	2,0666	2,9669	3,8208
K_1	0,286	0,3648	0,4734	0,633	0,8588	1,1561	1,5073	1,8418	2,0659
K_α	-0,0578	0,0786	0,2421	0,4636	0,7737	1,1922	1,7086	2,2468	2,6977

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,70$ après une interpolation sur α pour la poutre de rive

$\theta = 0,70$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,5575	-0,3794	-0,1756	0,1095	0,5464	1,1934	2,0554	3,0254	3,9282
K_1	0,2417	0,3171	0,4253	0,5905	0,8319	1,1589	1,5539	1,9305	2,1668
K_α	-0,0460	0,0664	0,2090	0,4173	0,7291	1,1713	1,7344	2,3247	2,8009

On effectue à présent une dernière interpolation sur θ en utilisant la dernière ligne de chaque tableau. Pour cela nous allons considérer les dernières lignes des deux tableaux précédents.

Nous avons ainsi les valeurs de K en fonction de e dans le tableau suivant :

Tableau: Récapitulatif des valeurs de $K=K(e)$ pour $\theta = 0,68$ pour la poutre de rive

$\theta = 0,68$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K	-0,0507	0,0713	0,2222	0,4358	0,7469	1,1797	1,7241	2,2935	2,7596

A partir des valeurs obtenues dans le tableau précédent, traçons à présent la courbe $K = K(e)$ représente la ligne d'influence (Li) de K pour la poutre de rive n°1. Les valeurs trouvées de K sont arrondies à 2 chiffres après la virgule pour qu'on puisse tracer la courbe de K .

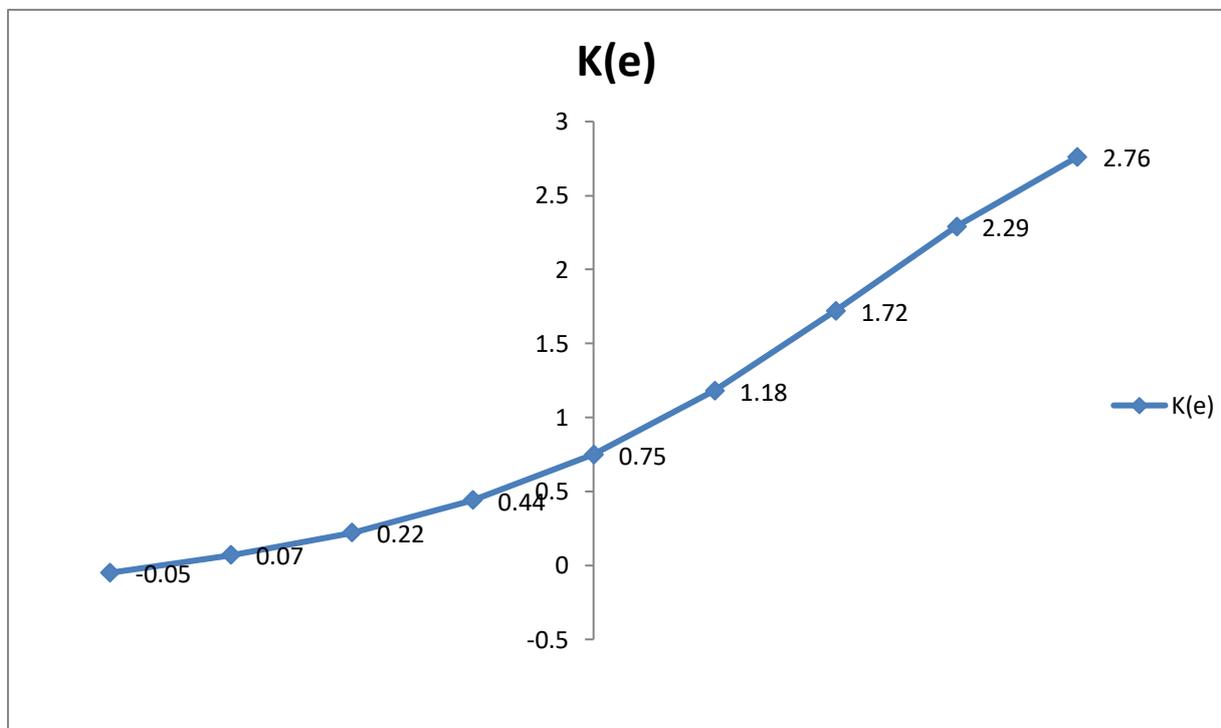


Figure: Ligne d'influence de K pour la poutre de rive (2ème cas)

-Détermination des CRT pour la poutre de rive

-Charge AL

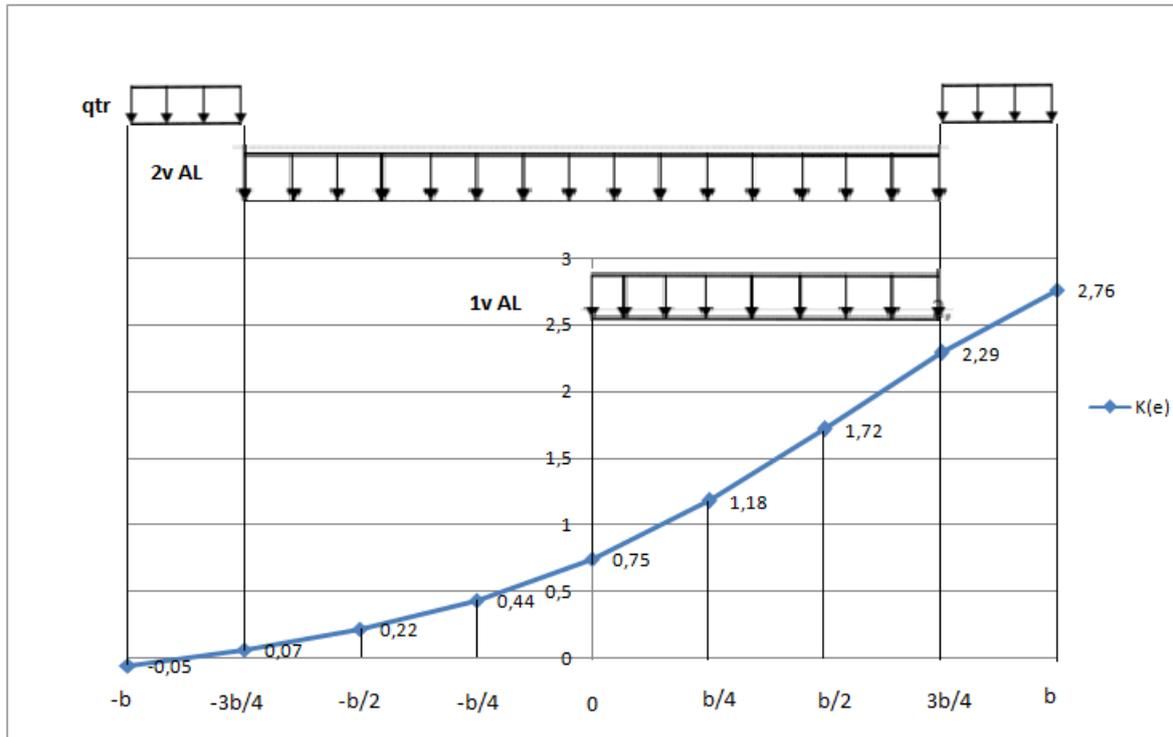


Figure: Application de la charge A(L) et celle du trottoir qtr sur la Li de K pour la poutre de rive (2ème cas)

-1^{er} cas : une voie chargée

$$K_{AL} = \frac{\omega_{AL}}{L_{AL}}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K(e=0) + K\left(e = \frac{b}{4}\right) + K\left(e = \frac{b}{2}\right) + \frac{1}{2} K(e = b - L_{tr}) \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 0,75\right) + 1,18 + 1,72 + \left(\frac{1}{2} \times 2,29\right) \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times 4,42 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = 1,47$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{1,47}{4} = 0,37$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,37 \times 3,75 = 1,39$$

-2^{ème} cas : deux voies chargées

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K(e = b - L_{tr} - 2V) + K\left(e = -\frac{b}{2}\right) + K\left(e = -\frac{b}{4}\right) + K(e = 0) + K\left(e = \frac{b}{4}\right) + \right] \frac{b}{4}$$

$$+ K\left(e = \frac{b}{2}\right) + \frac{1}{2} K(e = b - L_{tr})$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 0,07\right) + 0,22 + 0,44 + 0,75 + 1,18 + 1,72 + \left(\frac{1}{2} \times 2,29\right) \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times 5,49 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \mathbf{0,92}$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{0,92}{4} = 0,23$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,23 \times 7,5 = 1,73$$

Nous concluons donc que le deuxième cas est le plus défavorable et nous avons donc pour le CRT :

$$\eta_{AL} = \mathbf{0,23} \text{ avec } a_1 = \mathbf{1,0} \text{ et } L_{AL} = \mathbf{7,5m}$$

-Charge de trottoir q_{tr}

$$K_{tr} = \frac{\omega_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})] \frac{L_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})]$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [2,76 + 2,29 - 0,05 + 0,07]$$

$$K_{tr} = \mathbf{2,54}$$

Le CRT η_{tr} est donc :

$$\eta_{tr} = \frac{K_{tr}}{n} = \frac{2,54}{4} = 0,64$$

On retient donc que : $\eta_{tr} = \mathbf{0,64}$ avec $L_{tr} = \mathbf{1,25m}$

-Charge B_c

-1^{er} cas : 01 file de B_c avec $b_c = 1,2$

$$K_{BC} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_1 + K_2) = \frac{1}{2} (1,27 + 2,20) = 1,74$$

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{1,74}{4} = 0,44$$

Pour la comparaison on utilisera $b_c \cdot \eta_{Bc}$ et on a :

$$b_c \cdot \eta_{Bc} = 1,2 \times 0,44 = 0,53$$

-2^{ème} cas : 02 files de Bc avec $b_c = 1,1$

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 K_i = \frac{1}{2} (K_1 + K_2 + K_3 + K_4) = \frac{1}{2} (1,27 + 2,20 + 1,11 + 0,50) = 2,54$$

Le CRT η_{Bc} est :

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{2,54}{4} = 0,64$$

Ce qui implique :

$$b_c \cdot \eta_{Bc} = 1,1 \times 0,64 = 0,70$$

On remarque que des deux cas $\eta_{Bc} = 0,64 > \eta_{Bc} = 0,44$, le cas le plus défavorable est celui où nous avons 02 files de Bc. On retient donc que :

$$\eta_{Bc} = 0,64 \text{ avec } b_c = 1,1$$

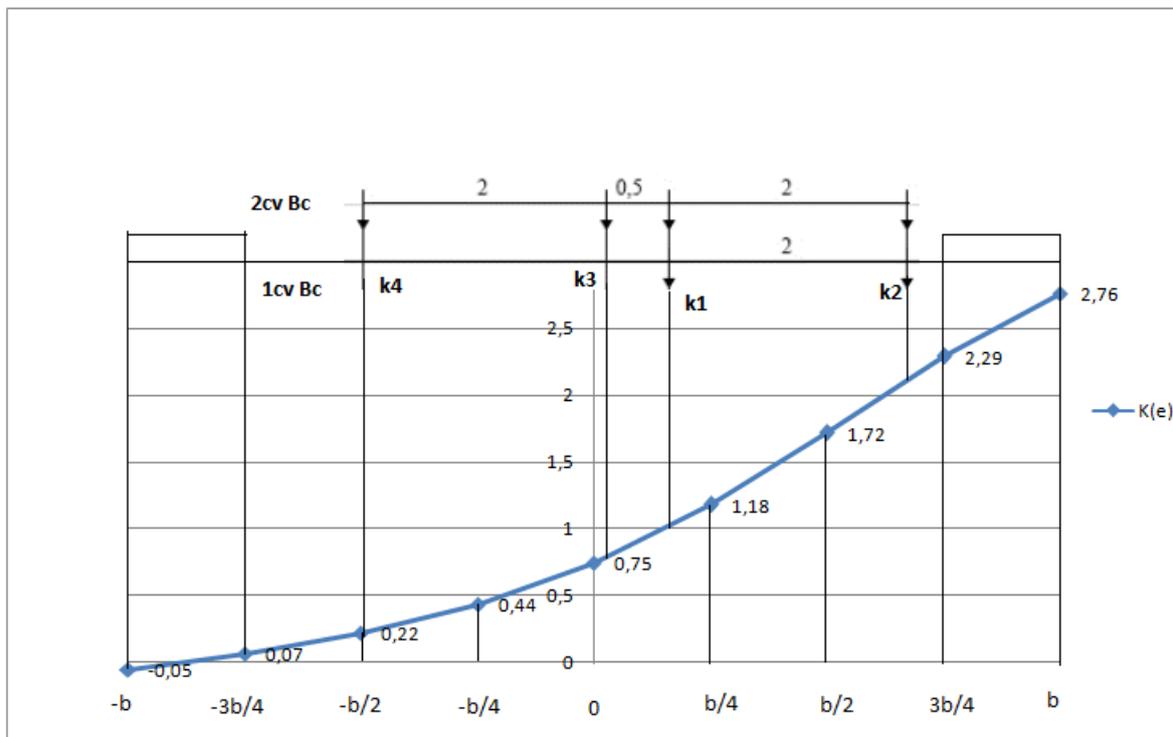


Figure: Disposition de Bc sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (2ème cas)

-Charge B_t

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_5 + K_6 + K_7 + K_8)$$

Les valeurs de K sont directement lues sur le graphique, chaque coefficient étant la projection de l'essieu sur la ligne d'influence Li de K tracée.

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_5 + K_6 + K_7 + K_8) = \frac{1}{2} (0,35 + 0,81 + 1,18 + 2,08)$$

$$K_{Bt} = 2,21$$

Le CRT η_{Bt} est :

$$\eta_{Bt} = \frac{K_{Bt}}{n} = \frac{2,21}{4} = 0,55$$

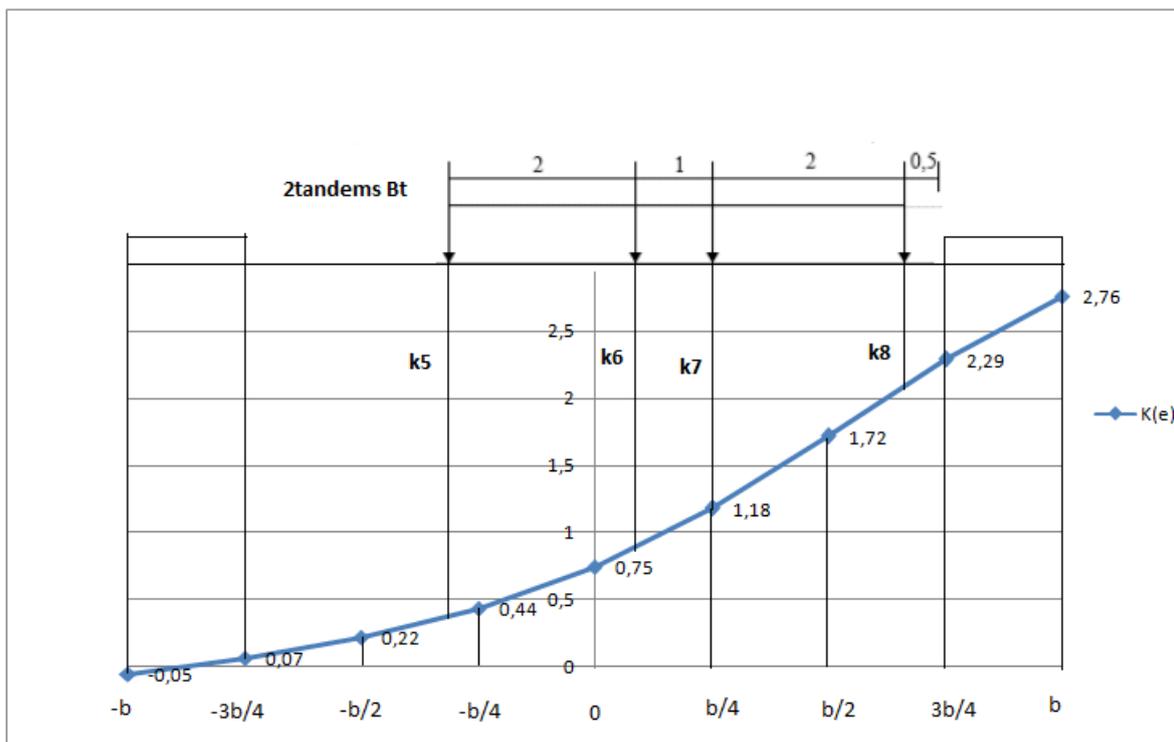


Figure: Disposition de B_t sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (2^{ème} cas)

-Charge B_r

Le coefficient est déterminé graphiquement comme dans le cas de B_c de manière à se placer le plus proche possible de la poutre de rive. Nous avons K_{Br}=2,20 et donc

$$\eta_{Br} = \frac{K_{Br}}{n} = \frac{2,20}{4} = 0,55$$

-Charge Mc120

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{2} \frac{L_{Mc}}{L_{Mc}} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} K_i = \frac{1}{4} (K_9 + K_{10} + K_{11} + K_{12})$$

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{4} (0,60 + 0,88 + 1,80 + 2,26)$$

$$K_{Mc_{120}} = 1,39$$

Le CRT $\eta_{Mc_{120}}$ est :

$$\eta_{Mc_{120}} = \frac{K_{Mc_{120}}}{n} = \frac{1,39}{4} = 0,35$$

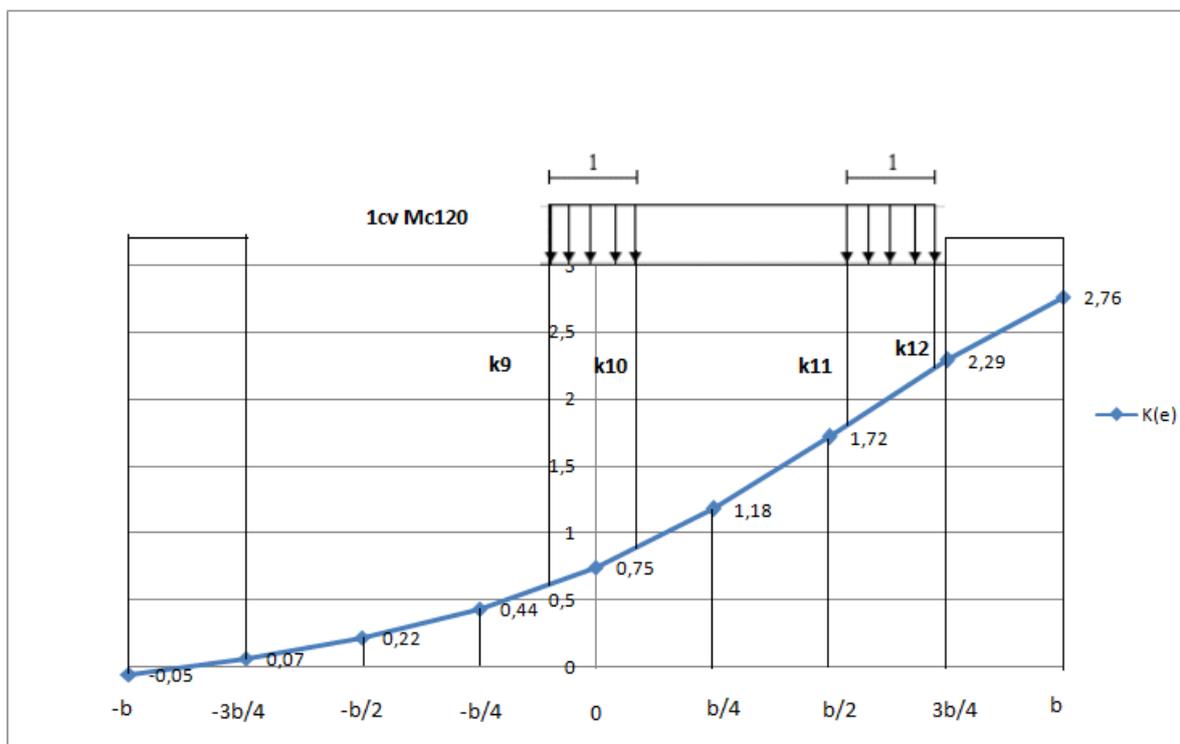


Figure: Disposition de Mc120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (2éme cas)

-Charge Me120

$$K_{Me_{120}} = \frac{\omega_{Me_{120}}}{L_{Me_{120}}}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{L_{Me_{120}}} \left[\frac{1}{2} K_{13} + K_{14} + K_{15} + K_{16} + \frac{1}{2} K_{17} \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} \times 0,68 + 0,75 + 1,18 + 1,72 + \frac{1}{2} \times 2,26 \right] \frac{5}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{4} \times 5,12 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = 1,60$$

Le CRT $\eta_{Me_{120}}$ est :

$$\eta_{Me_{120}} = \frac{K_{Me_{120}}}{n} = \frac{1,60}{4} = 0,40$$

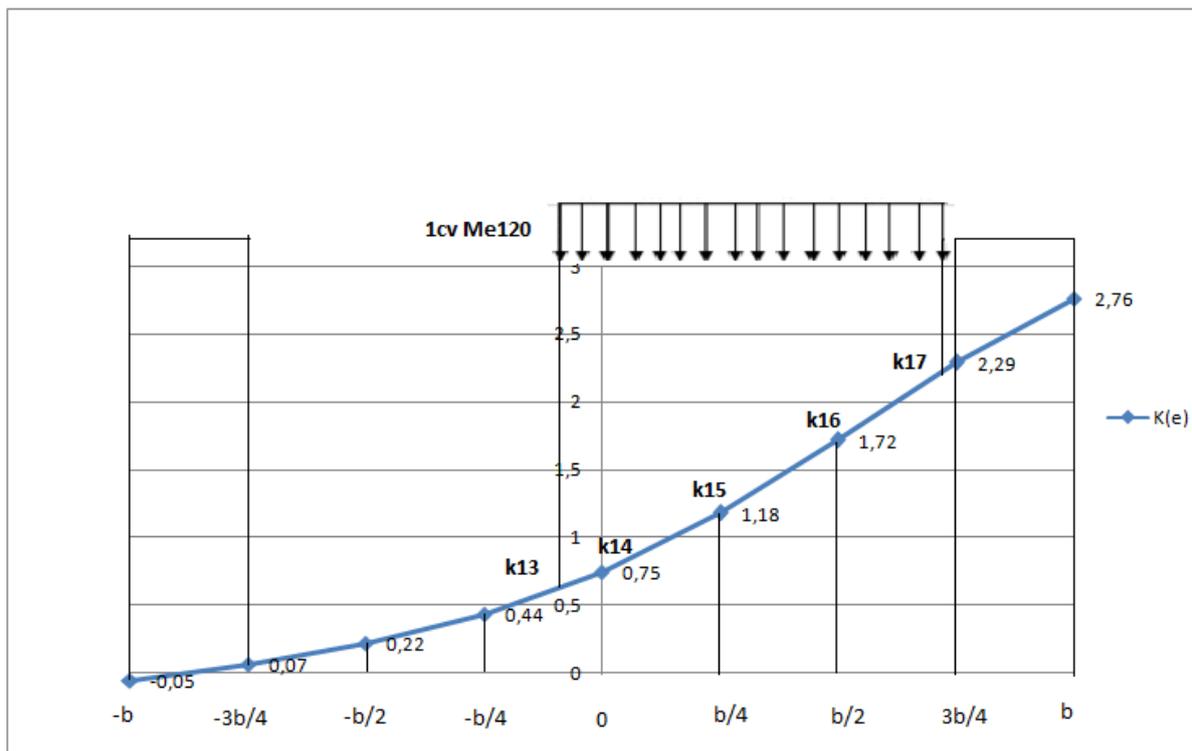


Figure: Disposition de Me120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre de rive (2ème cas)

Les coefficients de répartition transversale pour les différents cas de chargement sont résumés dans le tableau suivant :

-Détermination des CRT pour la poutre intermédiaire

Les paramètres α et θ conservent les mêmes valeurs que pour celle de la poutre de rive c'est-à-dire que $\alpha = 0,48$ et $\theta = 0,68$. Par conséquent, les interpolations sur α et θ restent les mêmes que pour la poutre de rive n°1 telles que :

1) $K_\alpha = 0,36K_0 + 0,64K_1$

2) $K_\theta = 0,4K_{\theta_1} + 0,6K_{\theta_2}$

Seule la position de la poutre change et devient $y = 1,25b/5$ $b=b/4$. Les tableaux de Massonnet donnent directement les valeurs de K pour $y=b/4$.

En suivant le même principe que pour la poutre de rive, nous déterminerons tout d'abord un tableau pour $\theta_1 = 0,65$ et pour $\theta_2 = 0,70$. Les valeurs de K_0 et de K_1 seront directement lues dans les tableaux de Massonnet après s'être fixé la valeur de $y=0,25b=b/4$. On effectue ensuite l'interpolation sur α en utilisant les lignes de K.

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,65$ après une interpolation sur α pour la poutre intermédiaire

$\theta = 0,65$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,2731	0,1624	0,6014	1,0347	1,4121	1,6143	1,518	1,2565	0,952
K_1	0,5289	0,633	0,7702	0,9493	1,1468	1,2818	1,2516	1,1561	1,0648
K_α	0,2402	0,4636	0,7094	0,9800	1,2423	1,4015	1,3475	1,1922	1,0242

Tableau: Récapitulatif des valeurs de K pour $\theta_1 = 0,70$ après une interpolation sur α pour la poutre intermédiaire

$\theta = 0,70$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K_0	-0,3589	0,1095	0,5862	1,067	1,4938	1,7118	1,5548	1,1934	0,7809

ANNEXES

K_1	0,4808	0,5905	0,7407	0,9437	1,1737	1,3307	1,2824	1,1589	1,0461
K_a	0,1785	0,4173	0,6851	0,9881	1,2889	1,4679	1,3805	1,1713	0,9506

Tableau: Récapitulatif des valeurs de $K=K(e)$ pour $\theta = 0,68$ pour la poutre intermédiaire

$\theta = 0,68$									
e	$-b$	$-3b/4$	$-b/2$	$-b/4$	0	$b/4$	$b/2$	$3b/4$	b
K	0,2032	0,4358	0,6948	0,9849	1,2703	1,4413	1,3673	1,1797	0,9800

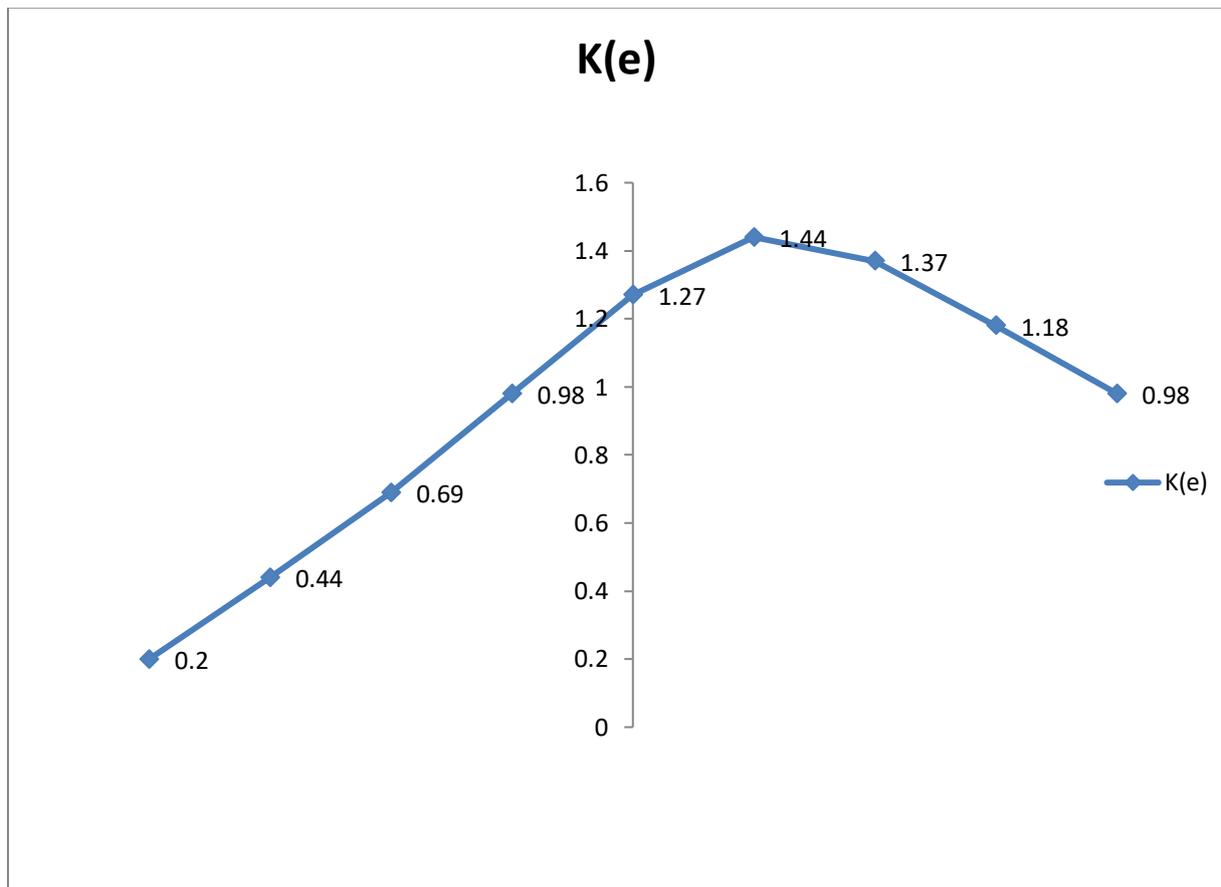


Figure: Ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (2ème cas)

-Charge AL

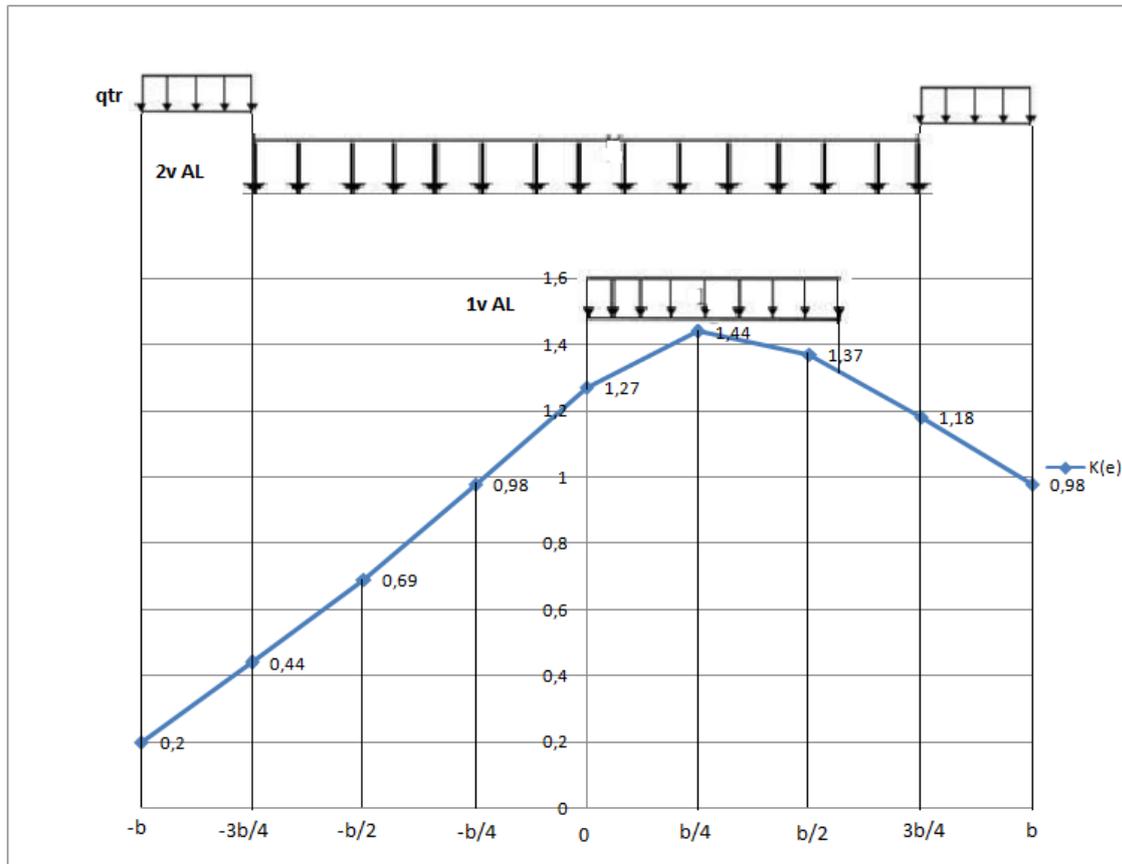


Figure: Application de la charge A(L) et celle du trottoir qtr sur la Li de K pour la poutre intermédiaire (2ème cas)

-1^{er} cas : une voie chargée

$$K_{AL} = \frac{\omega_{AL}}{L_{AL}}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K \left(e = \frac{b}{4} - \frac{L_V}{2} \right) + K(e = 0) + K \left(e = \frac{b}{4} \right) + K \left(e = \frac{b}{2} \right) + \frac{1}{2} K \left(e = \frac{b}{4} + \frac{L_V}{2} \right) \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times \left[\frac{1}{2} \times 1,13 + 1,27 + 1,44 + 1,37 + \frac{1}{2} \times 1,28 \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{3,75} \times 5,285 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = 1,76$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{1,76}{4} = 0,44$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,44 \times 3,75 = 1,65$$

-2^{ème} cas : deux voies chargées

$$K_{AL} = \frac{1}{L_{AL}} \left[\frac{1}{2} K(e = b - L_{tr} - 2LV) + K\left(e = -\frac{b}{2}\right) + K\left(e = -\frac{b}{4}\right) + K(e = 0) + \frac{b}{4} \right]$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times \left[\left(\frac{1}{2} \times 0,44\right) + 0,69 + 0,98 + 1,27 + 1,44 + 1,37 + \left(\frac{1}{2} \times 1,18\right) \right] \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = \frac{1}{7,5} \times 6,56 \times \frac{5}{4}$$

$$K_{AL} = 1,09$$

Le CRT η_{AL} est donc :

$$\eta_{AL} = \frac{K_{AL}}{n} = \frac{1,09}{4} = 0,27$$

On a alors :

$$a_1 \times \eta_{AL} \times L_{AL} = 1,0 \times 0,27 \times 7,5 = 2$$

Nous concluons donc que le deuxième cas est le plus défavorable et nous avons donc pour le CRT :

$$\eta_{AL} = 0,27 \text{ avec } a_1 = 1,0 \text{ et } L_{AL} = 7,5\text{m}$$

-Charge de trottoir q_{tr}

$$K_{tr} = \frac{\omega_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})] \frac{L_{tr}}{L_{tr}}$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [K(e = b) + K(e = b - L_{tr}) + K(e = -b) + K(e = -b + L_{tr})]$$

$$K_{tr} = \frac{1}{2} [0,98 + 1,18 + 0,20 + 0,44]$$

$$K_{tr} = 1,4$$

Le CRT η_{tr} est donc :

$$\eta_{tr} = \frac{K_{tr}}{n} = \frac{1,4}{4} = 0,35$$

On retient donc que :

$$\eta_{tr} = 0,35 \text{ avec } L_{tr} = 1,25\text{m}$$

-Charge Bc

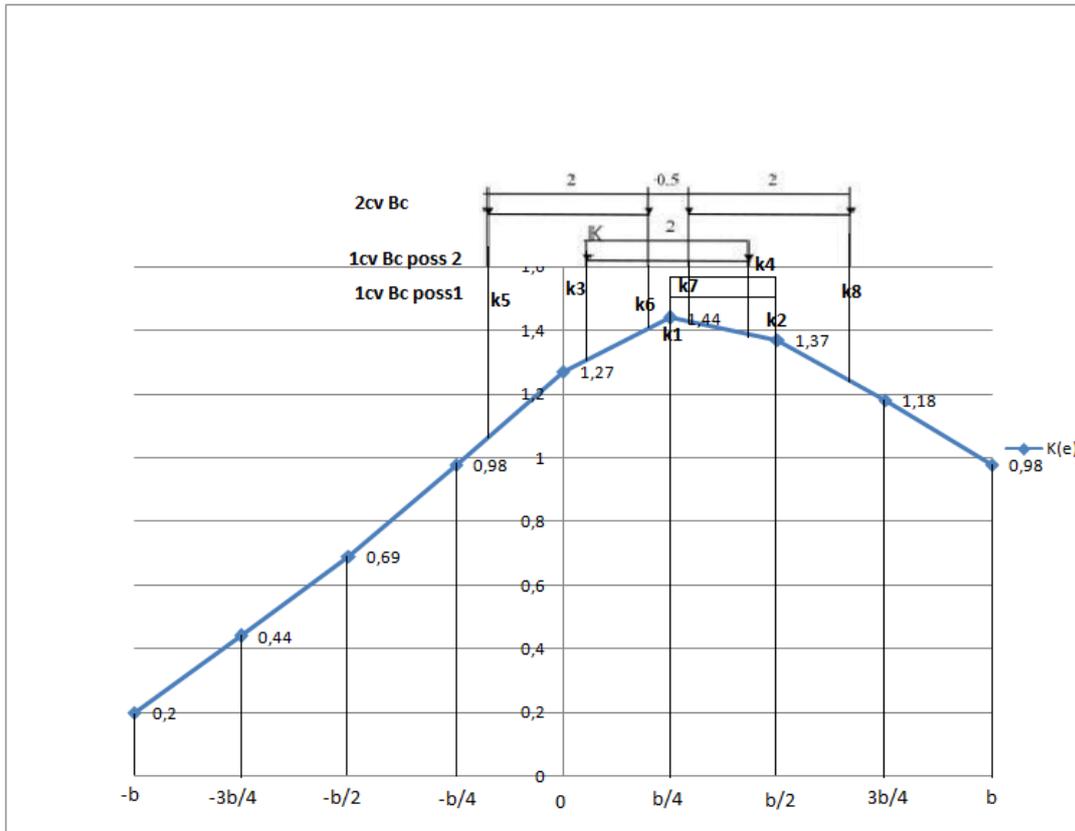


Figure: Disposition de Bc sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (2ème cas)

-1^{er} cas : 01 file de Bc avec $b_c = 1,2$

-1^{ère} disposition : 01 file de roue placée sur l'axe de la poutre

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_1 + K_2) = \frac{1}{2} (1,44 + 1,26) = 1,35$$

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{1,35}{4} = 0,34$$

$$b_c \cdot \eta_{Bc} = 1,2 \times 0,34 = 0,41$$

-2^{ème} disposition : 02 files placées symétriquement par rapport à l'axe centrale de la poutre

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_3 + K_4) = \frac{1}{2} (1,30 + 1,38) = 1,34$$

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{1,34}{4} = 0,34$$

$$b_c \cdot \eta_{Bc} = 1,2 \times 0,34 = 0,41$$

-2^{ème} cas : 02 files de B_c avec b_c = 1,1

Les 2 convois de B_c placés symétriquement par rapport à l'axe central.

$$K_{Bc} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 K_i = \frac{1}{2} (K_5 + K_6 + K_7 + K_8) = \frac{1}{2} (1,04 + 1,40 + 1,43 + 1,24) = 2,56$$

Le CRT η_{Bc} est :

$$\eta_{Bc} = \frac{K_{Bc}}{n} = \frac{2,56}{4} = 0,64$$

Ce qui implique :

$$b_c \cdot \eta_{Bc} = 1,1 \times 0,64 = 0,70$$

On remarque que des deux cas, le cas le plus défavorable est celui où nous avons 02 files de B_c.

On retient donc que :

$$\eta_{Bc} = 0,64 \text{ avec } b_c = 1,1$$

-Charge B_t

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_9 + K_{10} + K_{11} + K_{12})$$

Les valeurs de K sont directement lues sur le graphique, chaque coefficient étant la projection de l'essieu sur la ligne d'influence Li de K tracée.

$$K_{Bt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K_i = \frac{1}{2} (K_9 + K_{10} + K_{11} + K_{12}) = \frac{1}{2} (0,87 + 1,30 + 1,44 + 1,26)$$

$$K_{Bt} = 2,44$$

Le CRT η_{Bt} est :

$$\eta_{Bt} = \frac{K_{Bt}}{n} = \frac{2,44}{4} = 0,61$$

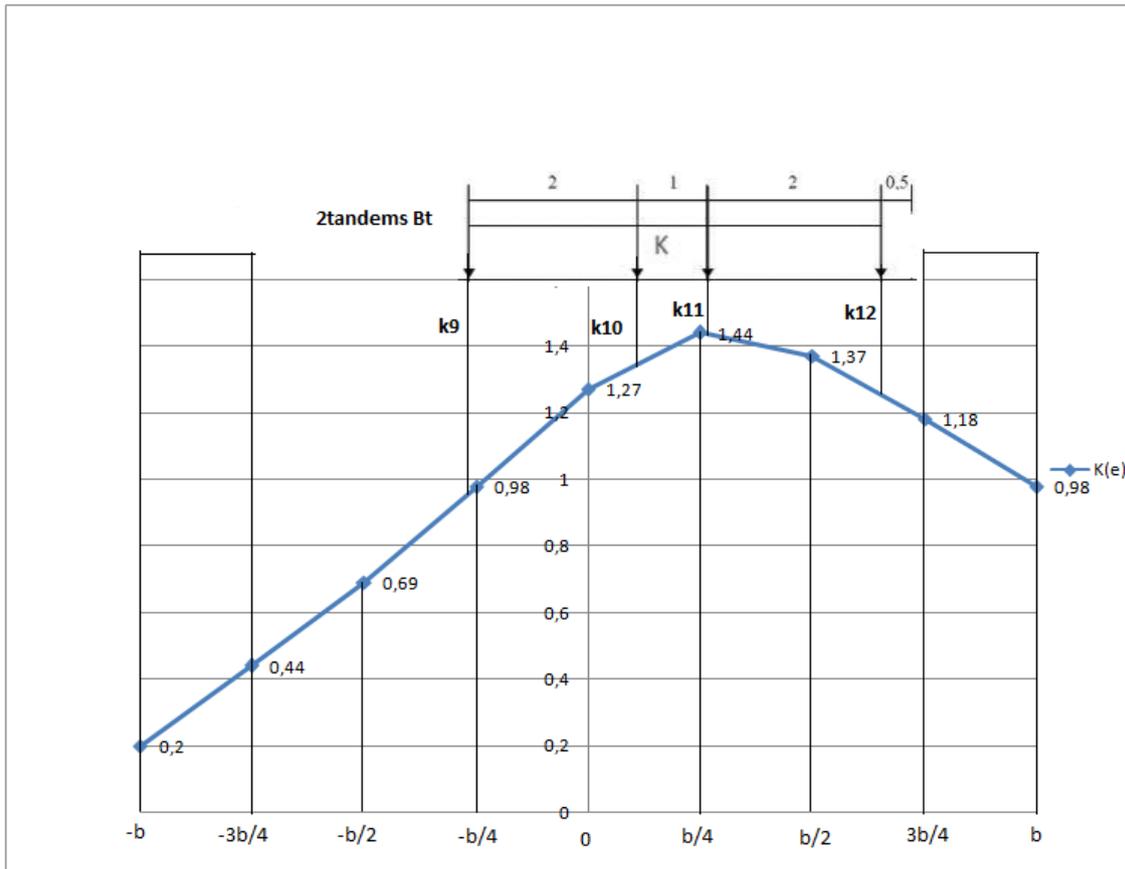


Figure: Disposition de Bt sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (2ème cas)

-Charge B_r

Le coefficient est déterminé graphiquement comme dans le cas de B_c de manière à se placer le plus proche possible de la poutre d'intermédiaire. Nous avons K_{Br}=1,44 et donc :

$$\eta_{Br} = \frac{K_{Br}}{n} = \frac{1,44}{4} = 0,36$$

-Charge Mc₁₂₀

Le cas le plus défavorable est celui où nous avons deux chenilles placées symétriquement par rapport à l'axe central. On a :

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{4}(K_{13} + K_{14} + K_{15} + K_{16})$$

$$K_{Mc_{120}} = \frac{1}{4}(1,06 + 1,28 + 1,37 + 1,23)$$

$$K_{Mc_{120}} = 1,24$$

Le CRT $\eta_{Mc_{120}}$ est :

$$\eta_{Mc_{120}} = \frac{K_{Mc_{120}}}{n} = \frac{1,24}{4} = 0,31$$

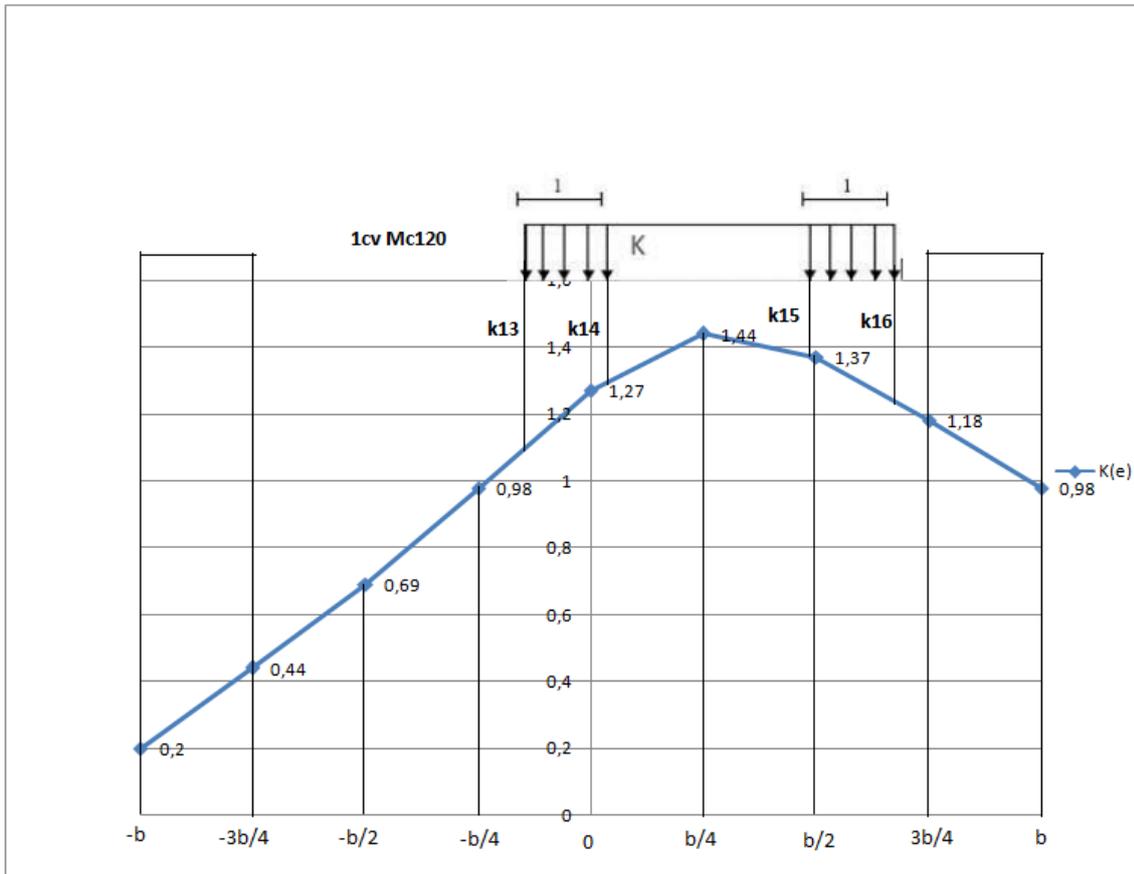


Figure: Disposition de Mc120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (2ème cas)

-Charge Me120

Une chenille placée symétriquement par rapport à l'axe central.

$$K_{Me_{120}} = \frac{\omega_{Me_{120}}}{L_{Me_{120}}}$$

$$K_{Me_{120}} = 2 \times \frac{1}{L_{Me_{120}}} \left[\frac{1}{2} K_{17} + K_{18} + \frac{1}{2} K_{19} \right] \frac{b}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \times 1,10 + 1,27 + \frac{1}{2} \times 1,44 \right] \frac{5}{4}$$

$$K_{Me_{120}} = 1,59$$

Le CRT $\eta_{Me_{120}}$ est :

$$\eta_{Me_{120}} = \frac{K_{Me_{120}}}{n} = \frac{1,59}{4} = 0,40$$

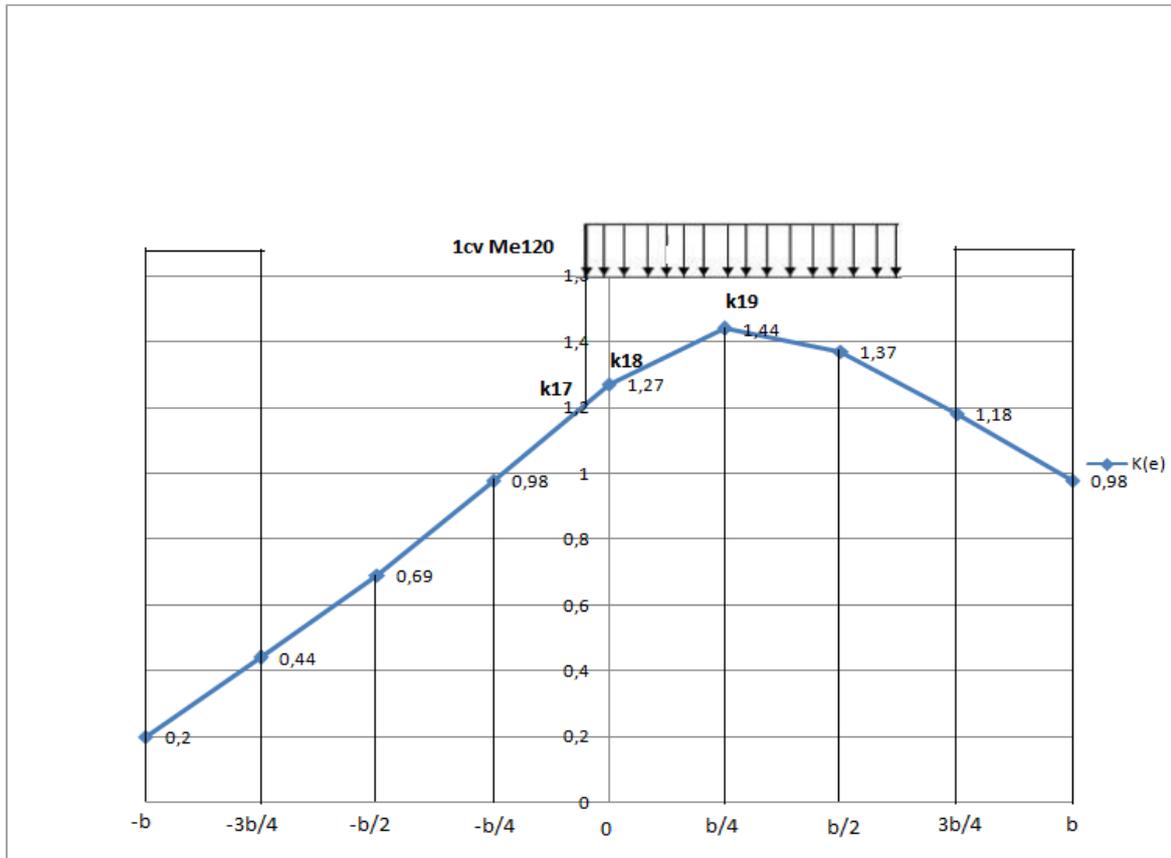


Figure: Disposition de Me120 sur la ligne d'influence de K pour la poutre intermédiaire (2ème cas)