

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Travaux Publics

Option : VOIES ET OUVRAGES D'ART

Elaboré par : Bouchair Adala et Khettabi Fatima Zahra

---

Thème : Modélisation numérique et optimisation des sections de poutres et de tabliers de ponts par la méthode des surfaces de réponses

---

Sous la direction de : Dr. LAFIFI Brahim

Juin 2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciements

*Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet de fin d'étude au niveau de département de génie civil et hydraulique spécialité voies et ouvrages d'art de **L'Université 8 mai 1945 Guelma**.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et nos profondes gratitudee et sincère dévouement avant tout à « **Dieu** » le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné le courage et la force pour mener à bout ce modeste travail.*

*Nous tenons tout d'abord à exprimer nos profondes gratitudee envers le **Docteur Lafifi Brahim**, notre encadrant, pour sa guidance exceptionnelle tout au long de notre parcours de recherche. Votre expertise, votre patience et votre encouragement ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire. Chaque discussion, chaque correction, chaque conseil a contribué à enrichir notre travail et à nous pousser vers l'excellence académique.*

*Nous remercions également tous les enseignants de la spécialité V.O.A qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire. A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'études.*

*Enfin, ce travail n'aurait pas été mené à terme sans les concessions et les encouragements de nos parents auxquels nous disons tout simplement merci.*

*Merci à tous et à toutes.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes chers parents*

## **Ma Mère**

*Vous m'avez donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.*

*Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte. J'avoue vraiment que vous êtes pour moi la lumière qui me guide vers le chemin de la réussite.*

*C'est a vous que je dois mon succès.*

*En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercier vos sacrifes conseils et pour l'affection dont vous m'avez toujours témoignée.*

## **Mon Père**

*L'épaule solide, l'oïl attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie.*

## **Ma Sœur Selma**

*Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.*

*Puisse « Dieu » vous garde, éclaire votre route et vous aide à réaliser votre tour vos vœux les plus chers.*

*A la mémoire de Mon très cher grand père **Challal Aissa** (رحمه الله)*

*A mon binôme **Fatima Zahra**, avec qui j'ai partagé ce travail.*

**BOUCHAIR Adala ...**



# الإهداء

## بسم الله الرحمن الرحيم

قال الله عز وجل: "يرفع الله الَّذِينَ آمَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ".  
وقال تعالى: "وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ".

وكان رسول الله صَلَّى اللهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ إذا رأى ما يُحِبُّ قَالَ: "الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ"  
"أنوار التمام لنا تجلّت... ولولا الله ما كنّا وصلنا" فالحمد لله الذي ما تم جهد ولا ختم سعي إلا بفضلِهِ،  
وما تخطى العبد من عقبات إلا بتوفيقِهِ، الحمد لله حمدا كثيرا على بلوغ حسن الختام، واللهم انفعني بما  
علمتني وزدني علما.

أهدي ثمرة جهدي المتمثلة في هذه المذكرة المتواضعة إلى من لا يضاھيها أحد في الكون، إلى من بذلا  
الكثير وقَدّمَا ما لا يمكن أن يردّ، إلى من ساندوا خطاي المتعثرة، إلى من سعيت دوماً لنيل رضاهم دونًا  
عن الناس، إليكما: أمي وأبي الأعزّ على قلبي. قد كنتما خير داعم لي طوال مسيرتي الدراسية وكنتما  
على الدوام ملهمي، أشكركما الشكر الجزيل على ما قدّمتماه لي طوال فترة دراستي، وأشكركم على ثقّتم  
دومًا بقدراتي، عسى أن أكون مصدر فخر لكما وعند حسن ظنكما.

أهدي هذه المذكرة لإخوتي أحبتي: نسيمه، ريمه، آسيا، رانيا، هند وأخي محمد الذين وقفوا إلى جانبي،  
فأمانياتهم اللطيفة لي بالنجاح ودعمهم وتشجيعهم، يغنيني عن كل شيء فلکم جزيل الشكر، وواقر الاحترام  
وأتمنى أن أسطيع رد جميلكم ولو في أطفالكم.

إلى رفيق روعي وزوجي وحببي أهدى هذه المذكرة، إلى من أخذ بيدي نحو ما أريد، وأعاد إلي حبّ  
الحياة وثقتي بقدرتي على التقدّم غمرني بحبه ولطفه فأخرج مني إنسانة طيبة طموحة ناضجة، إلى  
نجاحات أخرى نتقاسمها سويا إن شاء الله. دون أن أنسى ذكر والدته التي كانت بمثابة أم ثانية لي ولم  
تنساني في دعائها ولميس أختي وحببتي، شكرا عائلتي الثانية.

أهدي مذكرتي هذه، لمن منّوا عليّ بفرح وأنس يتمثّل بقولهم الدائم: نحبك خالتي، إلى من حلّت بركة  
وجودهم في حياتي، ومن ملأت ضحكاتهم الجميلة عمري، أهدى هذا البحث، لأولادي: آدم، جاسر،  
بتول، جواد وبيان. حفصكم الله أطفالا.

أهديه أيضا إلى الأصدقاء الذين واصلوا دعمي وتشجيعي، دون كلل أو ملل، وتحملوا غيابي الطويل  
وظهوري المنقطع، طوال فترة إنجازي للبحث، أملين أن أنجح وأتقدم، إلى أصدقاء الطرق جميعًا،  
الوعرة والسهلة، والمظلمة والمشرقة، إلى ذكري وهالة أهدى هذه المذكرة تعبيرًا عن امتناني لوجودهم  
في حياتي.

أتقدم بالشكر الجزيل لزميلتي ورفيقتي في البحث عدالة لقد كانت نهاية مسار مثالية الحمد لله لم نجد أي  
صعوبة معا بالعكس كان التفاهم والاحترام رفيقان لنا أتمنى لكي التيسير والرزق في حياتك.

خطابي فاطمة الزهراء

## Résumé

L'objectif de ce travail de fin d'études est la modélisation numérique et l'optimisation des sections de poutres et de tabliers de ponts en utilisant la méthode des surfaces de réponse et les plans d'expériences numériques. Le logiciel Robot Structural Analysis (RSA) sera utilisé pour la modélisation numérique des tabliers de ponts. Des plans d'expériences numériques seront employés pour modéliser ces tabliers en faisant varier leurs dimensions. Les objectifs de cette étude sont de déterminer les contraintes de flexion et de cisaillement ainsi que le coût de construction. Une analyse statistique basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie des surfaces de réponse (RSM) sera réalisée pour proposer des modèles mathématiques reliant les paramètres d'entrée et de sortie en vue d'optimisations ultérieures. Enfin, les modèles mathématiques développés seront combinés avec une technique d'optimisation afin d'optimiser les sections des poutres et des tabliers.

## Mots clés

Modélisation numérique - tablier de ponts- plans d'expériences - RSM - ANOVA - optimisation.

**Abstract**

The objective of this final year project is the numerical modeling and optimization of beam and bridge deck sections using the response surface methodology and numerical experimental designs. The Robot Structural Analysis (RSA) software will be used for the numerical modeling of bridge decks. Numerical experimental designs will be employed to model these decks by varying their dimensions. The goals of this study are to determine bending and shear stresses as well as the construction cost. A statistical analysis based on Analysis of Variance (ANOVA) and Response Surface Methodology (RSM) will be conducted to propose mathematical models linking input and output parameters for subsequent optimizations. Finally, the developed mathematical models will be combined with an optimization technique to optimize the sections of beams and decks.

**Keywords :** Numerical modeling - bridge deck - experimental designs - RSM - ANOVA - optimization.

**ملخص:**

يهدف هذا العمل الختامي إلى النمذجة الرقمية وتحسين مقاطع العوارض والألواح العلوية للجسور باستخدام طريقة الأسطح للنمذجة الرقمية (RSA) Robot Structural Analysis والاستجابية وتصاميم التجارب الرقمية. سيتم استخدام برنامج للألواح العلوية للجسور. سيتم استخدام تصاميم التجارب الرقمية لنمذجة هذه الألواح من خلال تغيير أبعادها. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد إجهادات الانحناء والقص بالإضافة إلى تكلفة البناء. سيتم إجراء تحليل إحصائي قائم على تحليل التباين لاقتراح نماذج رياضية تربط بين المتغيرات المدخلة والمخرجة (RSM) ومنهجية الأسطح الاستجابية (ANOVA) بهدف تحسينات لاحقة. وأخيراً، سيتم دمج النماذج الرياضية المطورة مع تقنية تحسين من أجل تحسين مقاطع العوارض والألواح العلوية

**الكلمات الرئيسية:**

التحسين - ANOVA - RSM - النمذجة الرقمية - سطح الجسر - خطط الخبرة

**Table des matières**

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Table des matières	iv
Liste des symboles	xv
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xiv
Introduction générale	xvii

**Chapitre I : Généralités sur les ponts**

I.1 Introduction	1
I.2 Définition	1
I.3 Une brève historique de pont	3
I.4 Terminologie	3
I.5 Eléments constitutifs des ponts	4
I.6 Quelques notions géométriques	6
I.7 Vocabulaire des ponts	7
I.8 Les Critères de classification des ponts	8
I.9 Données relatives à l'étude d'un pont	15
I.10 Conclusion	17

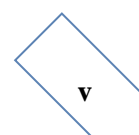
**Chapitre II : Conception et dimensionnement des ponts**

II.1 Conception des ponts	18
II.2 Choix du type d'ouvrage	18
II.2.1 Type 1 : Les Ponts à poutres en T	18
II.2.2 Type 2 : Les ponts voussoir	20
II.3 Mode de construction	22
II.3.1 Tablier construit par poussage	22

II.3.2 Tablier construit par cintre	23
II.3.3 Tablier construit par encorbellement	23
II.4 Pré dimensionnement des éléments du tablier	24
II.4.1 Pré dimensionnement de la poutre en T	24
II.4.2 Pré dimensionnement de la dalle	27
II.5 Caractéristiques du pont	28
II.6 Caractéristiques géométriques des poutres	28
II.7 Pré dimensionnement du voussoir	30
II.8 Conclusion	32

### Chapitre III : Calcul des charges et surcharges

III.1 Introduction	33
III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés	33
III.2.1 Béton	33
III.2.2 Acier	35
III.3 Caractéristiques du tablier	35
III.4 Descente de charges	36
III.5 Évaluation des actions permanentes	36
III.5.1 Les éléments porteurs	36
III.5.2 Les éléments non porteurs	37
III.6 Les surcharges d'exploitation	39
III.6.1 Surcharge A(L)	39
III.6.2 Système de charges B	40
III.6.2.1 Surcharge B <sub>c</sub>	40
III.6.2.2 Surcharge B <sub>t</sub>	42
III.6.2.3 Système B <sub>r</sub>	44
III.7 Surcharges Militaire	45
III.7.1 Convoi Mc 120	45
III.7.2 Charge exceptionnelle (D240)	46
III.8 Surcharges sur trottoirs	46
III.9 Surcharge sur garde-corps	47



III.10 Efforts de freinage	47
III.11 Poids propre d'une culée	47
III.12. Poids propre d'une pile	49
III.13 Combinaisons de charges	50
III.14 Conclusion	51
<b>Chapitre IV : Modélisation du tablier de pont</b>	
IV.1 Introduction	52
IV.2 Modélisation	52
VI.3 Type 1 : pont à poutre en T	53
IV.4 Modélisation de la dalle	54
IV.5 Modélisation du tablier	54
IV.6 Définition des différents cas de charges	55
IV.6.1 Trottoir	55
IV.6.2 Revêtement	55
IV.6.3 Garde-corps	56
IV.6.4 Glissière	56
IV.6.5 Corniche	56
IV.6.6 L'étanchéité	57
IV.6.7 Système de charge A(l)	57
IV.6.8 Surcharge sur trottoirs	58
IV.6.9 Système de charge Bc	58
IV.6.10 Système de charge MC120	59
IV.6.11 Système de charge D240	59
IV.7 Caractéristiques géométriques de la poutre	59
IV.8 Méthode de calcul des contraintes	61
IV.9 Résultats de la modélisation	62
IV.9.1 Diagrammes des contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans la poutre médiane sous la combinaison maximale	62
IV.9.2 Les diagrammes des contraintes de cisaillement maximales $\tau$ dans la poutre médiane sous la combinaison maximale	62
IV.9.3 Les contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans chaque section sous la combinaison maximale	63

IV.10 Type 2 : pont à tablier en caisson (voussoir)	64
IV.11 Résultats de la modélisation	64
IV.11.1 Les diagrammes des contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ sous la combinaison maximale	64
IV.11.2 Les contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans chaque section sous la combinaison maximale	65

## Chapitre V : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses

V.1 Introduction	67
V.2 Historique des plans d'expériences	67
V.3 But et domaine d'utilisation	68
V.4 Définition d'un plan d'expérience	68
V.5 Conditions d'application des plans d'expériences	68
V.5.1 Choix de la méthode d'expérimentation	69
V.5.2 Vocabulaire de base des plans d'expériences	69
V.5.3 Facteur	69
V.5.3.1 Facteur quantitatif	69
V.5.3.2 Facteur qualitatif	70
V.5.4 Réponses	71
V.5.5 Choix des Réponses	72
V.6 Différents types des plans d'expériences	72
V.6.1 Plans de mélange	72
V.6.2 Plans de criblage	72
V.6.2.1 Plans factoriels complets à deux niveaux	72
V.6.2.2 Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux	72
V.6.2.3 Les plans de Plackett-Burman	73
V.6.4 La méthode des surfaces de réponses	73
V.6.4.1 Les plans composites centrés	74
V.6.4.2 Les plans de Box-Behnken	75
V.7 Principaux avantages des plans d'expériences	75
V.8 Choix d'une stratégie expérimentale	76
V.8.1 Démarche expérimentale	76



V.8.2 Les étapes de l'expérimentation	77
V.8.3 La méthodologie des surfaces de réponse	78
V.8.3.1 Les principes généraux	78
V.8.3.2 Étapes de la méthodologie des surfaces de réponse	78
V.9 Conclusion	80

## Chapitre VI : Optimisation des facteurs géométriques des sections de poutres du pont

VI.1 Introduction	81
VI.2 Choix d'un plan d'expériences	82
VI.3 Résultats	84
VI.4 Analyse statistique des résultats	87
VI.4.1 Analyse de la variance ANOVA	87
VI.4.2 Analyse de régression	91
VI.4.3 Validation graphique des modèles	95
VI.5 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité	98
VI.5.1 Désirabilité d'une réponse à maximiser	98
VI.5.2 Désirabilité d'une réponse à minimiser	99
VI.5.3 Désirabilité d'une réponse à cibler	100
VI.6 Optimisation des facteurs ( $b, e, b_0, L_t, e_t, g_1, g_2$ )	100
VI.6.1 En zone courante	101
VI.6.2 En zone d'about (au niveau des appuis)	102
VI.7 Conclusion	103

## Chapitre VII : Optimisation de la section en caisson de tablier de pont

VII.1 Introduction	104
VII.2 Choix d'un plan d'expériences	104
VII.3 Résultats	106
VII.4 Analyse statistique des résultats	107
VII.4.1 Analyse de variance	107
VII.4.2 Analyse de régression	109

## TABLE DES MATIERES

VII.4.3 Validation graphique des modèles	111
VII.5 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité	114
Conclusion générale et perspectives	116
Références bibliographiques	118

## Liste des symboles

$\beta$ :	Vecteur de régression.
$\varepsilon$ :	Terme d'erreur.
$x_i$ :	Variation.
$y$ :	Grandeur d'intérêt.
$nf$ :	Essais du plan factoriel.
$S$ :	Réponse.
$f_{\beta}$ :	La fonction de réponse.
$X_i$ :	Variation de prédiction codées appelées facteurs.
$\beta$ :	Coefficient de régression.
$R_i$ :	Variable courante.
$X$ :	La matrice de terme de modèle évalué aux points de conception.
$R^2$ :	Coefficient de détermination statistique.
$R^2_{adj}$ :	Coefficient de détermination ajusté.
$SS_E$ :	La somme des carrés de l'erreur.
$Sst$ :	L'erreur totale.
$G$ :	Module de cisaillement.
$\nu$ :	Coefficient de Poisson.
$K$ :	Comme second paramètre.
$E$ :	Module d'Young.
$C$ :	Cohésion.
$\Phi$ :	L'angle de frottement.
$\Psi$ :	L'angle de dilatance.
$\sigma_n$ :	Contrainte normale.
$\tau$ :	Contrainte de cisaillement.
$Deq$ :	L'épaisseur équivalente.
$J$ :	Module de rigidité.
$N$ :	La tension interne.
$U$ :	Déformation du sol renforcé.
$F_s$ :	Coefficient de sécurité.

<b>Sv :</b>	L'espace vertical.
<b>B :</b>	Largeur de remblai.
<b>L :</b>	Longueur de renforcement.
<b>Alpha <math>\alpha</math> :</b>	L'angle d'inclinaison du remblai de renforcement.
<b>SC :</b>	La somme des carrés.
<b>N :</b>	Nombre total d'expériences.
<b><math>N_{nf}</math> :</b>	Niveau de chaque facteur.
<b>MC :</b>	La moyenne des carrés.
<b>df :</b>	degré de liberté.
<b><math>MC_e</math> :</b>	Les carrés moyens des erreurs.
<b>Ux :</b>	Déplacement horizontal.
<b>Y :</b>	Fonction de réponse.
<b><math>b_0</math> :</b>	Le terme constant de l'équation de régression.
<b><math>X_i</math> :</b>	Paramètres d'entrée.
<b><math>y_i</math> :</b>	Valeur de la réponse calculée à la <i>i</i> ème expérience.
<b><math>\bar{y}_i</math> :</b>	Valeur mesurée à la <i>i</i> ème expérience.
<b><math>\bar{y}</math> :</b>	Valeur moyenne des réponses mesurées.
<b><math>Y_{i,min}</math> :</b>	Valeur en dessous de laquelle la réponse $Y_i$ ne convient pas ( $d_i = 0$ ).
<b><math>Y_{i,max}</math> :</b>	Valeur cible au-dessus de laquelle la réponse $Y_i$ est très satisfaisante ( $d_i = 1$ ).

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur les ponts

<b>Figure I.1:</b> Ouvrage en Dalot D'eau.	2
<b>Figure I.2 :</b> Viaduc de Millau.	2
<b>Figure I.3:</b> Viaducs d'accès au pont à haubans de Normandie.	2
<b>Figure I.4:</b> La passerelle entre Nogent-sur-Marne et Champigny-sur-Marne a ouvert.	2
<b>Figure I.5:</b> Eléments de pont.	3
<b>Figure I.6:</b> Culée enterrée.	4
<b>Figure I.7:</b> Culée remblayée	5
<b>Figure I.8:</b> Les différentes formes de pile.	6
<b>Figure I.9 :</b> Vue longitudinale d'un pont type.	6
<b>Figure I.10:</b> Schéma présente les différentes notions géométriques d'un pont.	7
<b>Figure I.11 :</b> Schéma présente les différents vocabulaires d'un pont.	7
<b>Figure I.12 :</b> Schéma d'un pont a poutres multiples.	9
<b>Figure I.13 :</b> Schéma d'un pont a poutres latérales.	10
<b>Figure I.14 :</b> Schéma d'un pont a poutres en caisson.	10
<b>Figure I.15 :</b> Schéma d'un pont à poutres plissées.	11
<b>Figure I.16 :</b> Schéma d'un pont dalles.	11
<b>Figure I.17 :</b> Pont droit. (Tracé en plan).	12
<b>Figure I.18 :</b> Pont courbe (tracé en plan).	12
<b>Figure I.19 :</b> Pont biais (Tracé en plan).	12
<b>Figure I.20 :</b> Passage Supérieur (PS).	13
<b>Figure I.21 :</b> Passage Inférieur (PI).	13
<b>Figure I.22 :</b> Pont levant de Martrou sur la Charente en France.	14

<b>Figure I.23</b> : Pont tournant.	14
-------------------------------------	----

## Chapitre II : Conception et dimensionnement des ponts

<b>Figure II.1</b> : Pont à poutre en T.	19
<b>Figure II.2</b> : Schéma d'une coupe transversale des poutres simples et à talon.	20
<b>Figure II.3</b> : Pont a poutre en caisson(voussoir).	21
<b>Figure II.4</b> : Schéma présente une coupe transversale d'un caisson.	21
<b>Figure II.5</b> : Tablier d'un pont par la méthode de poussage.	22
<b>Figure II.6</b> : Tablier d'un pont construit par cintre.	23
<b>Figure II.7</b> : Tablier d'un pont construit par encorbellement.	24
<b>Figure II.8</b> : Coupe transversale d'une poutre.	24
<b>Figure II.9</b> : Les angles de gousset.	27
<b>Figure II.10</b> : Schéma des caractéristiques de la poutre.	30
<b>Figure II.11</b> : Coupe transversale du voussoir.	30

## Chapitre III : Calcul des charges et surcharges

<b>Figure III.1</b> : Schéma présente un garde-corps.	38
<b>Figure III.2</b> : Glissière de sécurité.	38
<b>Figure III.3</b> : Le système Bc.	41
<b>Figure III.4</b> : Système Bt.	43
<b>Figure III.5</b> : Système Br.	44
<b>Figure III.6</b> : Convoi Mc 120.	45
<b>Figure III.7</b> : Convoi type D240.	46
<b>Figure III.8</b> : Charges sur les gardes corps.	47

## Chapitre IV : Modélisation du tablier de pont

<b>Figure IV.1:</b> Définition de la section de la poutre.	53
<b>Figure IV.2:</b> Modélisation de la poutre.	53
<b>Figure IV.3:</b> Modélisation de la dalle.	54
<b>Figure IV.4:</b> Modélisation du tablier.	54
<b>Figure IV.5:</b> Représentation de la charge de trottoir.	55
<b>Figure IV.6:</b> Représentation de la charge de revêtement.	55
<b>Figure IV.7 :</b> Représentation de la charge de garde-corps.	56
<b>Figure IV.8 :</b> Représentation de la charge de Glissière.	56
<b>Figure IV.9 :</b> Représentation de la charge de La corniche.	57
<b>Figure IV.10 :</b> Représentation de la charge de l'étanchéité.	57
<b>Figure IV.11 :</b> Représentation du système de charge A(l).	58
<b>Figure IV.12 :</b> Représentation de la surcharge sur trottoirs.	58
<b>Figure IV.13 :</b> Représentation du système Bc.	58
<b>Figure IV.14 :</b> Système MC 120.	59
<b>Figure IV.15 :</b> Système D240.	59
<b>Figure IV.16 :</b> Schéma des caractéristiques de la poutre.	61
<b>Figure IV.17:</b> Représentation du diagramme de $\sigma_f$ dans une section à l'ELU.	62
<b>Figure IV.18:</b> Représentation du diagramme de $\sigma_f$ dans une section à l'ELS.	62
<b>Figures IV.19 :</b> Représentation du diagramme de $\tau$ dans une section à l'ELU.	63
<b>Figures IV.20 :</b> Représentation du diagramme de $\tau$ dans une section à l'ELS.	63
<b>Figure IV.21 :</b> Définition de la section du voussoir.	64
<b>Figure IV.22 :</b> Modélisation du tablier.	64
<b>Figure IV.23:</b> Représentation du diagramme de $\sigma_f$ dans une section à l'ELU.	65

**Figure IV.24:** Représentation du diagramme de  $\sigma_f$  dans une section à l'ELS. 65

## Chapitre V : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses

**Figure V.1 :** Schématisation d'un processus expérimental. 69

**Figure V.2 :** Les différents types de facteur. 70

**Figure V.3:** Le domaine et les niveaux d'un facteur. 70

**Figure V.4 :** La disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude. 71

**Figure V.5 :** La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude. 71

**Figure V.6 :** Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs ; Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre. 73

**Figure V.7 :** Surface de réponse. 74

**Figure V.8 :** Plan composite centré. 75

**Figure V.9:** Plan de Box-Behnken pour trois facteurs. 75

**Figure V.10 :** Démarche générale de la méthodologie expérimentale. 76

**Figure V.11 :** Etapes de la méthodologie de surface de réponse. 78

## Chapitre VI : Optimisation des facteurs géométriques des sections de poutres du pont

**Figure VI.1 :** Schéma présente la section d'une poutre en T. 81

**Figure VI.2 :** Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U. 92

**Figure VI.3 :** Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.S. 93

**Figure VI.4 :** Valeurs numériques et valeurs prédites du Cout. 94



<b>Figure VI.5</b> : Valeurs numériques prédites de la contrainte de cisaillement (Taux) à E.L.U.	94
<b>Figure VI.6</b> : Surfaces de réponses pour la contrainte à la flexion (Sigma) à ELU.	95
<b>Figure VI.7</b> : Surfaces de réponses pour la contrainte de flexion (sigma) à ELS.	96
<b>Figure VI.8</b> : Surfaces de réponses pour le cout.	97
<b>Figure VI.9</b> : Surfaces de réponses pour la contrainte de cisaillement (taux) à ELU.	97
<b>Figure VI.10</b> : Désirabilité individuelle $d_i$ d'une réponse $Y_i$ .	98
<b>Figure VI.11</b> : Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.	99
<b>Figure VI.12</b> : Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.	100
<b>Figure VI.13</b> : Représentation graphique de la procédure d'optimisation pour la section de poutres en zone courante.	102
<b>Figure VI.14</b> : Représentation graphique de la procédure d'optimisation pour la section de poutres en zone d'about.	103

## Chapitre VII : Optimisation de la section en caisson de tablier de pont

<b>Figure VII.1</b> : Schéma présente la section d'un tablier en caisson.	104
<b>Figure VII.2</b> : Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U.	110
<b>Figure VII.3</b> : Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.S.	110
<b>Figure VII.4</b> : Valeurs numériques et prédites du Cout.	111
<b>Figure VII.5</b> : Surfaces de réponses pour $\sigma_{ultime}$ .	112
<b>Figure VII.6</b> : Surfaces de réponses pour $\sigma_{service}$ .	113
<b>Figure VII.7</b> : Surfaces de réponses pour le cout.	113
<b>Figure VII.8</b> : Représentation graphique de la procédure d'optimisation.	115

## Liste des tableaux

### Chapitre III : Calcul des charges et surcharges

<b>Tableau III.1:</b> Valeur de coefficient $a_1$ .	39
<b>Tableau III.2:</b> Valeur du coefficient $b_c$ .	41
<b>Tableau III.3:</b> Valeurs de $b_t$ .	43
<b>Tableau III.4:</b> Coefficients de majoration dans les Combinaisons de charges	50
<b>Tableau III.5:</b> Combinaisons d'actions à ELU et ELS.	51

### Chapitre IV : Modélisation du tablier de pont

<b>Tableau IV.1:</b> Les contraintes maximales dans la poutre médiane sous la combinaison maximale.	63
<b>Tableau IV.2:</b> Les contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans chaque section sous la combinaison maximale.	66

### Chapitre V : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses

<b>Tableau V.1:</b> Étapes de l'expérimentation	77
---	----

### Chapitre VI : Optimisation des facteurs géométriques des sections de poutres du pont

<b>Tableau VI.1:</b> Intervalle de variation des facteurs à optimiser.	82
<b>Tableau VI.2:</b> Plan d'expérience type Box-Behnken L47 (6 facteurs, 3 niveaux).	82
<b>Tableau VI.3:</b> Résultats en termes de contraintes de flexion et du cout.	84
<b>Tableau VI.4:</b> Résultats en termes de contraintes de cisaillement et du cout.	85
<b>Tableau VI.5:</b> Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion (SIGMA) à E.L.U.	88

<b>Tableau VI.6:</b> Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion à E.L.S.	89
<b>Tableau VI.7:</b> Analyse de la variance ANOVA pour le cout.	90
<b>Tableau VI.8:</b> Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de cisaillement à l'ELU.	91
<b>Tableau VI.9:</b> Réglages appliqués sur les facteurs à optimiser.	102
<b>Tableau VI.10:</b> Résultats de l'optimisation.	102
<b>Tableau VI.11:</b> Réglages appliqués sur les facteurs à optimiser.	102
<b>Tableau VI.12:</b> Résultats de l'optimisation.	103

## Chapitre VII : Optimisation de la section en caisson de tablier de pont

<b>Tableau VII.1:</b> Intervalle de variation des facteurs à optimiser.	104
<b>Tableau VII.2:</b> Plan d'expériences type Box-Behnken L41 (5 facteurs, 3 niveaux).	105
<b>Tableau VII.3:</b> Résultats en termes de contraintes de flexion et du cout.	106
<b>Tableau VII.4 :</b> Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion (SIGMA) à E.L.U.	107
<b>Tableau VII.5:</b> Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion à E.L.S.	108
<b>Tableau VII.6:</b> Analyse de la variance ANOVA pour le cout.	109
<b>Tableau VII.7:</b> Réglages appliqués sur les facteurs à optimiser.	114
<b>Tableau VII.8:</b> Résultat de l'optimisation.	114



Introduction  
générale

## Introduction générale

Les ouvrages d'art sont des constructions très importantes utilisées de nos jours. Ils permettent de franchir des obstacles naturels ou artificiels et facilitent les communications routières et ferroviaires. En général, un pont est un ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou artificiel. Selon le cas, on distingue de nombreux types de ponts en fonction de leur utilisation et de leur époque de construction : pont-route, pont-rail, pont-canal. Le défi pour l'ingénieur réside dans la construction de ces ponts, en assurant parfaitement leur service avec un coût optimal. Le dimensionnement d'un pont constitue un travail de synthèse et de discipline, intégrant la statique, la dynamique, la résistance des matériaux et le calcul des fondations. La spécificité du calcul des ponts réside dans l'interdépendance des éléments de structure soumis simultanément à des sollicitations combinées. Comme les ouvrages d'art reflètent l'esprit constructif des pays, et dans le cadre du développement économique et de l'investissement dans les réseaux routiers, l'Algérie a lancé un programme national consistant à réaliser une nouvelle autoroute comprenant plusieurs ouvrages d'art utilisant de nouvelles techniques et méthodes de réalisation. Un de ces ouvrages nous ont été proposés comme sujet de fin d'études pour nous permettre de compléter notre formation.

Ce travail de fin d'études s'intéresse à la conception des tabliers de ces ouvrages, avec leurs principales étapes. Il est composé de sept chapitres, englobant la modélisation numérique, l'optimisation et le calcul. L'objectif principal est la conception de deux types de tablier de pont : le premier constitué par des poutres de section en T et le second avec un tablier de section vousoir, en se basant sur l'optimisation des sections de tablier par l'utilisation des plans d'expériences et de la méthode des surfaces de réponse.

Le premier chapitre est une revue bibliographique sur les ponts. Il présente une définition des ponts (historique, vocabulaire, notions géométriques, etc.), les différents critères pour classer les ponts et les données relatives à l'étude d'un pont. Ce chapitre permet de fournir un cadre théorique complet et une compréhension approfondie des différents aspects liés aux ponts.

Le deuxième chapitre, intitulé "Conception et dimensionnement des ponts", s'intéresse au prédimensionnement des éléments des tabliers étudiés. Il traite des principes de base pour concevoir les différents éléments d'un pont, en tenant compte des critères de performance et des contraintes techniques. Ce chapitre aborde également les normes et règlements à respecter lors de la conception.

Le troisième chapitre est consacré à la détermination des différentes charges et surcharges qui peuvent être appliquées sur un pont. Il explore les diverses forces et pressions que les ponts doivent supporter, telles que les charges permanentes, les charges d'exploitation, et les charges exceptionnelles. Une analyse précise de ces charges est essentielle pour garantir la sécurité et la durabilité de l'ouvrage.

Dans le quatrième chapitre, le but est de modéliser des tabliers de pont à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis (RSA) pour connaître les contraintes maximales dans chaque section sous la combinaison maximale. La modélisation numérique permet de simuler les comportements mécaniques des structures sous différentes conditions de charge et de vérifier leur résistance.

Le cinquième chapitre présente les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse, notamment le plan type Box-Behnken utilisé dans notre mémoire. Cette technique est un ensemble homogène d'outils et de méthodes visant à établir et analyser les relations existantes entre les grandeurs étudiées (réponses) et leurs sources de variation supposées (facteurs). L'application de cette méthode permet d'optimiser les paramètres de conception en fonction des performances attendues.

Le sixième chapitre traite de l'optimisation des paramètres géométriques des sections de poutres et de tablier en T d'un pont. Il décrit les techniques et approches utilisées pour améliorer les performances structurelles tout en minimisant les matériaux et les coûts. L'optimisation vise à trouver les configurations les plus efficaces pour les sections de pont en termes de résistance, de rigidité et de stabilité.

Le septième et dernier chapitre vise à l'optimisation de la section en caisson de tablier de pont. Ce type de section est souvent utilisé pour sa grande efficacité structurale et sa capacité à supporter des charges importantes. Ce chapitre explore les méthodes pour optimiser la conception de la section en caisson, en tenant compte des aspects techniques et économiques.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale qui résume tout notre travail dans ce projet et complètent le contenu principal du mémoire.

# CHAPITRE

I

## Chapitre I : Généralités sur les ponts

### I.1 Introduction

La conception des ponts est en constante évolution grâce à l'emploi de matériaux de plus en plus performants, aux moyens de calculs permettant d'établir des modèles de comportement très sophistiqués, et à la création de formes originales apportant de nouvelles solutions aux problèmes posés par le franchissement d'obstacles de plus en plus impressionnants.

Ce chapitre a pour but :

- De donner une petite définition des ponts avec une brève historique.
- De décrire les différents éléments constituant un pont et leur terminologie.
- De voir quelques notions géométriques.
- D'énumérer les différents vocabulaires liés à la conception d'un pont.
- De caractériser la classification des ponts selon différents critères.
- De citer les données relatives à une étude d'un pont.

### I.2 Définition

D'une façon générale, 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 routier), piétonne (passerelle), ferroviaire (pont ferroviaire) ou, plus rarement, une voie d'eau (pont-canal comme par exemple le pont-canal de Briare).

On distingue les différents types d'ouvrages suivants :

- **Ponceau** ou **dalot** : pont de petites dimensions (quelques mètres) (figure I.1).
- **Viaduc** : ouvrage de franchissement à grande hauteur (figure I.2), généralement constitué de nombreuses travées comme la plupart des ouvrages d'accès aux grands ponts (figure I.3). Le terme de viaduc est généralement réservé aux franchissements situés en site terrestre.
- **Passerelle** : ouvrage destiné aux piétons (figure I.4), exceptionnellement aux canalisations ou au gibier.

Certaines tranchées couvertes répondent à la définition d'un pont. Cependant, elles ne sont pas traitées ici car ce sont des structures dont la conception, le calcul et les procédés d'exécution les rattachent à une famille différente de constructions.[1]





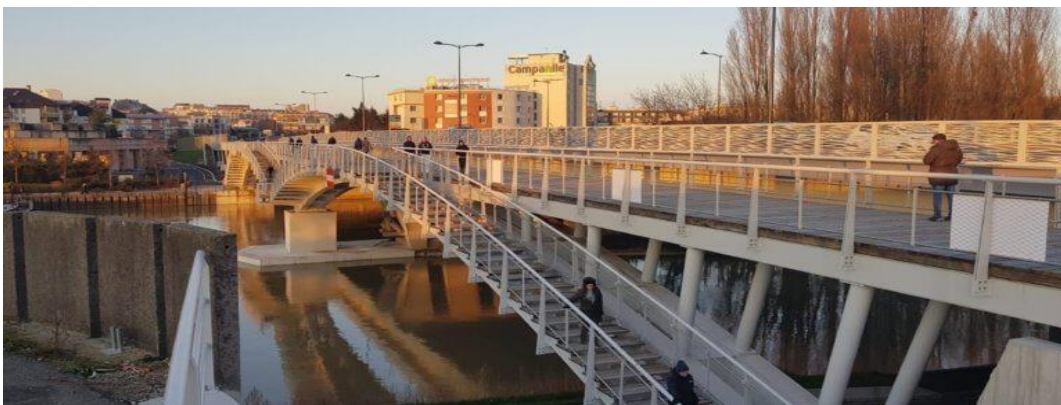
**Figure I.1 :** Ouvrage en dalot d'eau.



**Figure I.2 :** Viaduc de Millau.



**Figure I.3 :** Viaducs d'accès au pont à haubans de Normandie.



**Figure I.4:** La passerelle entre Nogent-sur-Marne et Champigny-sur-Marne a ouvert.

### I.3 Une brève historique de pont

La construction des ponts est une activité très ancienne comme en témoignent les nombreuses passerelles découvertes dans des régions restées complètement ou presque complètement isolées du reste du monde. C'étaient principalement des passerelles suspendues (lianes, bambous tressés) et des poutres (bois, pierres...). Les ponts furent d'abord en bois et, grâce à ses caractéristiques mécaniques, ce matériau autorisait des portées plus grandes que la pierre.

Les Romains construisirent les premiers ponts en pierre et certains très vieux subsistent encore (le pont Saint-Ange, 3 voûtes de 18-33 m, construit en 138 ; le pont de Sevrans, 120 m de longueur, construit en 193). Les premiers ponts métalliques ont été construits en fonte à partir du siècle dernier. Ensuite, à partir de 1850, la production industrielle de fer a permis à ce dernier de remplacer progressivement la fonte. Puis, à la fin du XIXe siècle, l'acier devint compétitif vis-à-vis du fer pour la construction des ponts. Suite à cela, face aux soucis économiques et de grande portée, on a vu l'apparition des ponts en béton armé et surtout en béton précontraint. La technique de ce dernier fut mise au point par Eugène Freyssinet dès 1928, qui jeta les bases de ce nouveau matériau et en défini les principes essentiels encore valables de nos jours. Quelques ouvrages modestes furent réalisés avant la Seconde Guerre mondiale, mais le premier grand pont en béton précontraint fut le pont de Luzancy (Seine-et-Marne) en France, conçu juste avant la dernière guerre mondiale et achevé en 1946. Le béton précontraint est associé à diverses formes et divers modes de construction. Pour les petites portées, les formes courantes sont la dalle et la dalle nervurée associée à une construction sur cintre. Dans la gamme des moyennes portées (30-50 mètres), les ponts à poutres préfabriquées précontraintes et les ponts poussés constituent des solutions intéressantes dans la gamme des grandes portées. [2]

### I.4 Terminologie

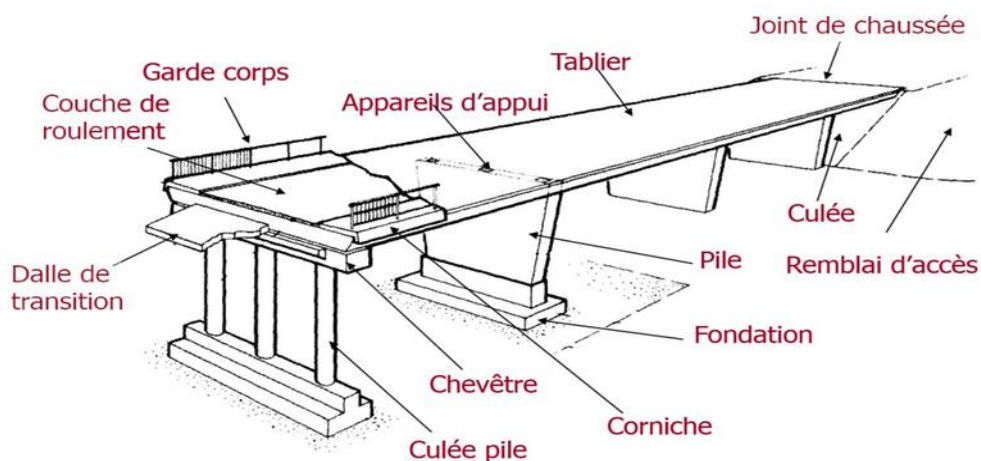


Figure I.5 : Eléments de pont.

## I.5 Eléments constitutifs des ponts

D'une manière générale, l'appellation de pont signifie tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une voie de circulation. Cet ouvrage est constitué de trois éléments principaux :

- **Le tablier** : C'est la partie horizontale du pont qui supporte directement les charges roulantes. Les tabliers de ponts reposent en général sur les appuis par l'intermédiaire d'appareils d'appui conçus pour transmettre aux appuis des efforts verticaux et/ou horizontaux.
- **Les appuis** : Ce sont les éléments verticaux portant le tablier. Leur rôle est de transmettre au sol par l'intermédiaire des fondations les différentes charges venant du tablier. Les appuis intermédiaires sont appelés piles et les appuis extrêmes sont les culées.

### a) Les culées

Les culées sont des appuis d'extrémité d'un ouvrage ; leur rôle est d'assurer la liaison entre le tablier du pont et le milieu environnant. Une culée assure donc à la fois les fonctions d'appui de tablier et de mur de soutènement. En tant qu'appui de tablier, une culée est soumise aux mêmes efforts que les piles. En tant que mur de soutènement, elle subit la poussée des terres et des surcharges de remblais. On distingue différents types de culées :

#### - Les culées enterrées (les plus courantes)

Elles sont noyées dans le remblai d'accès à l'ouvrage et assurent essentiellement une fonction porteuse car elles sont peu sollicitées par des efforts horizontaux de poussée des terres.

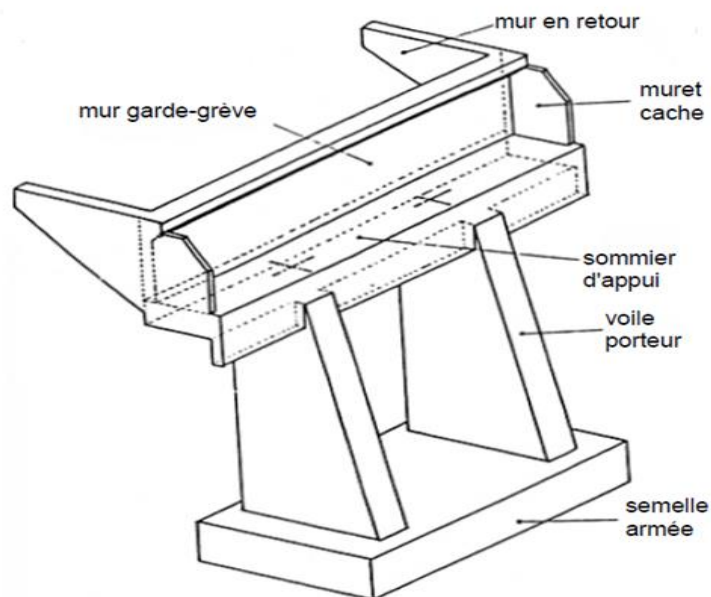


Figure I.6 : Culée enterrée.



- **Les culées remblayées**

Elles sont constituées par un ensemble de murs ou de voiles de béton armé (mur de front et murs latéraux) et assurent une fonction porteuse et une fonction de soutènement du remblai.

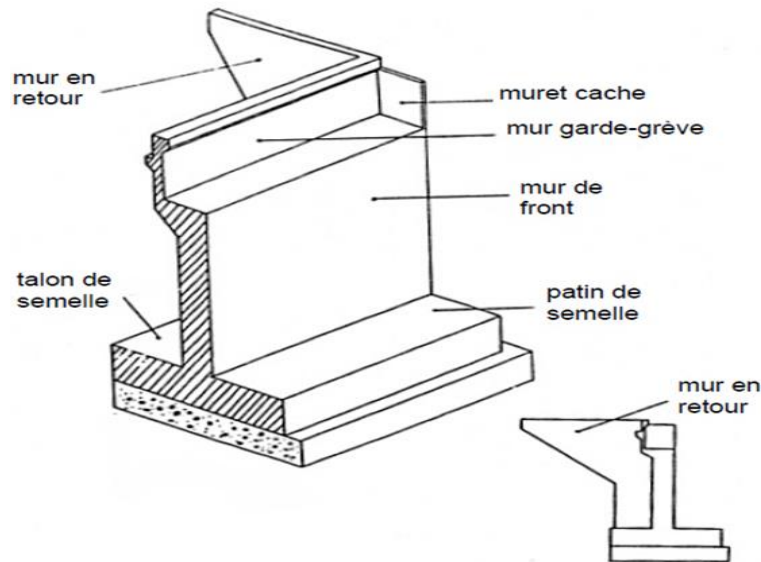


Figure I.7 : Culée remblayée

- **Les culées creuses**

Culée dans laquelle le remblai contigu est stabilisé par un talus et n'exerce donc aucune poussée sur le mur de front. Elles comportent un mur de front, des murs en retour et un platelage supérieur (dalle de couverture). Ce dernier permet de limiter les poussées sur le mur. Les culées creuses remplacent les culées remblayées pour les grandes hauteurs de terres. Elles sont très rarement utilisées. [3]

**b) Les piles**

Les piles servent d'appuis intermédiaires au tablier : elles reprennent les efforts exercés par le tablier. Celui-ci peut être simplement appuyé sur elles, partiellement ou totalement encastré. Les piles reçoivent donc des efforts verticaux dans le premier cas, verticaux et horizontaux dans les cas suivants. Nous avons plusieurs types de piles :

- Pile en forme de Y,
- Pile en forme de V,
- Pile voile,
- Pile marteau,
- Pile en forme de portique,
- Pile rivière...etc. [3]

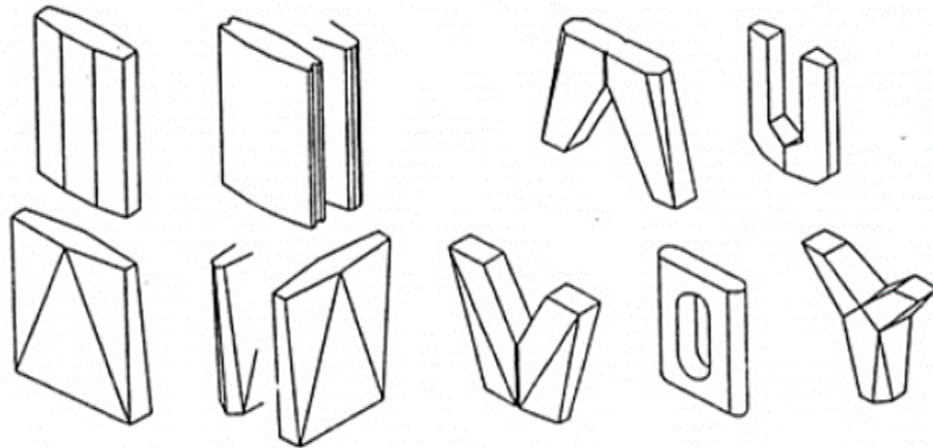


Figure I.8 : Les différentes formes de pile.

- **Les fondations** : Elles permettent la transmission des efforts de l'ouvrage au terrain (elles assurent la liaison entre les appuis et le sol). [4]

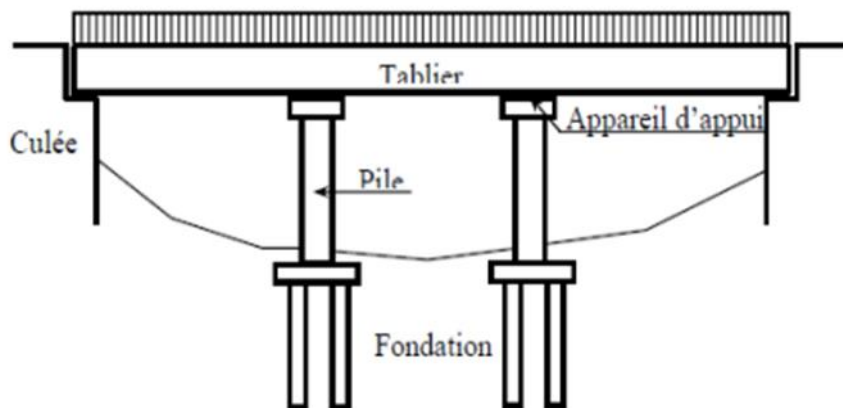


Figure I.9 : Vue longitudinale d'un pont type.

## I.6 Quelques notions géométriques

La partie du pont comprise entre deux appuis s'appelle une « travée » et la distance entre deux appuis consécutifs, la « portée de la travée » correspondante. Le pont est constitué de 2 travées. Il ne faut pas la confondre avec l'ouverture qui est la distance libre entre les parements des appuis, ni avec la longueur du pont.

Les caractéristiques géométriques d'une travée sont :

**La portée** : C'est la distance entraxe de 2 appuis consécutifs.

**L'ouverture** : C'est la distance entre nus de 2 appuis consécutifs.

**L'ouverture totale** : est la distance entre murs droits (piédroits) des culées.

**La longueur** : La travée déborde toujours par rapport à ses 2 appuis, donc sa longueur dépasse sa portée.

**La hauteur libre :** Appelée aussi le tirant d'air, c'est la hauteur du vide entre la face inférieure du tablier et l'obstacle franchi.

**Le gabarit de navigation :** est l'espace libre nécessaire au passage sous ou sur l'ouvrage.[5]

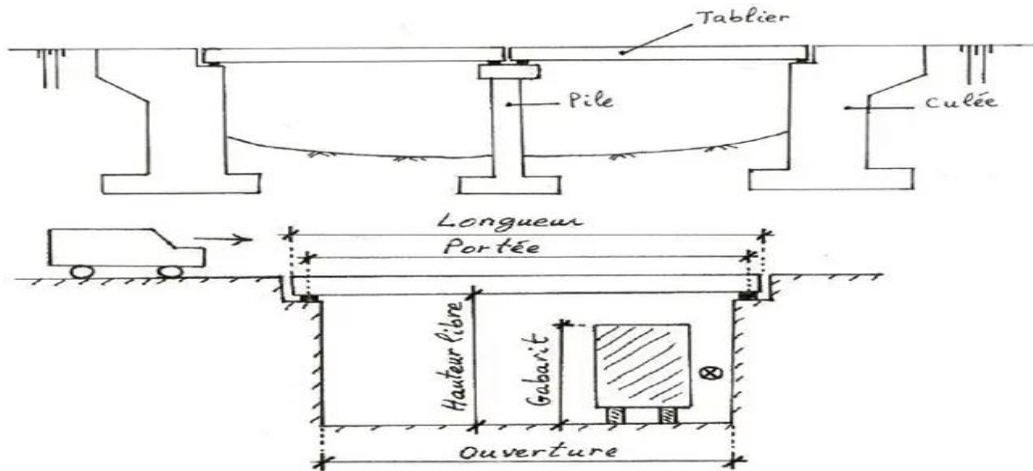


Figure I.10 : Schéma présente les différentes notions géométriques d'un pont.

## I.7 Vocabulaire des ponts

- **Le câble porteur :** ou câble de retenue, sur un pont suspendu, est étendu sur tout le long du pont, et passe par les sommets de deux piliers. Il maintient le pont et en particulier les multiples suspentes.
- **La chaussée :** est la partie du pont affectée à la circulation des véhicules.
- **La culée :** la culée d'un pont est la partie située sur la rive destinée à supporter le poids du tablier. La distance entre culées est appelée ouverture totale du pont.
- **Un garde-corps (ou garde-fou ou rambarde) :** est un ensemble d'éléments formant une barrière de protection placée sur les côtés d'un pont.

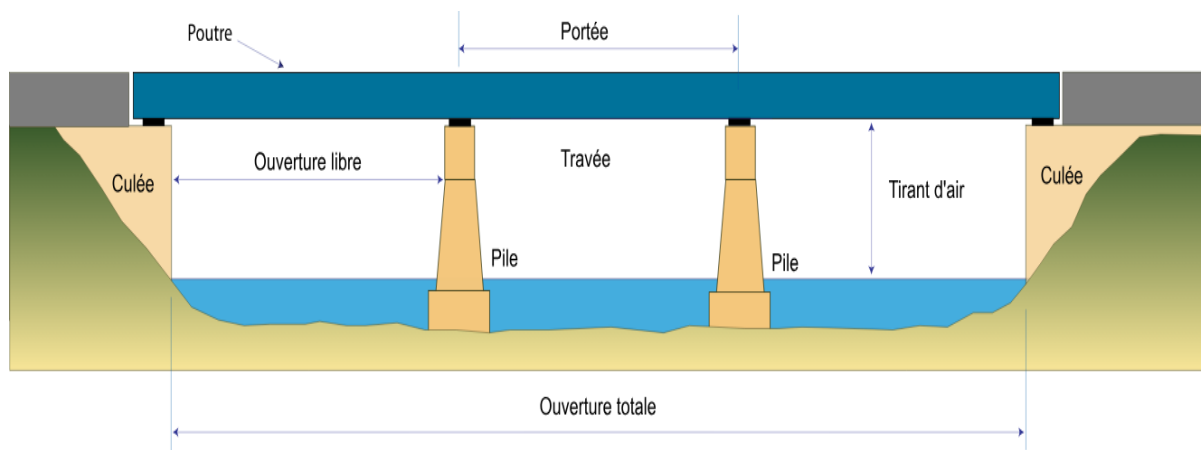


Figure I.11 : Schéma présente les différents vocabulaires d'un pont.

- **Un massif de fondation :** est un ouvrage compact de stabilité faisant partie de la structure d'un pont. C'est sur eux que les piles reposent. Ils sont principalement composés de béton.

- **Un joint de chaussée, ou joint de dilatation** : est un dispositif permettant d'assurer la continuité de la circulation au droit d'une coupure du tablier d'un pont. Il permet, notamment, à la structure de se dilater en fonction de la température (ou de l'hygrométrie pour les structures en bois).
- **La maçonnerie** : est l'art de bâtir une construction par l'assemblage de matériaux élémentaires (briques ou pierres), liés par un mortier.
- **Un parapet** : est un petit mur construit au bord d'un pont.
- **La portée** : est la distance séparant deux points d'appui (piles) consécutifs d'une construction.
- **Les poutres principales** : sont les éléments porteurs horizontaux qui font partie de l'ossature du tablier du pont.
- **Le pylône** : soutient le câble porteur.
- **Le revêtement de chaussée** : est la plupart du temps bitumé. Pour les ponts en maçonnerie il peut être pavé.
- **Le tablier** : d'un pont est une structure porteuse qui supporte les charges de circulation et les transmet aux appuis ou aux éléments de suspension (suspentes ou arcs).
- **La travée** : d'un pont est la partie comprise entre deux piles ou entre une pile et une culée. Cette notion ne concerne que les ponts à poutres, suspendus ou à haubans. Pour les ponts en arc ou ponts voûtés en maçonnerie, on parlera plutôt d'arches.
- **La travée centrale** : pour la partie de pont centrale quand il y a un nombre pair de piles
- **La travée de rive** : pour la partie de pont comprise entre une pile et une culée ;
- **La travée intermédiaire** : pour une travée située entre les travées de rives.
- **La travée principale** : pour la travée de plus grande longueur (ou portée), qui n'est pas obligatoirement la travée centrale.
- **Le tympan** : ou mur de tête d'un pont en maçonnerie désigne le mur servant à maintenir les terres de remblai des voûtes. Il peut rester à l'état de surface nue, comme être architecturé avec un traitement de surface ou l'ajout d'éléments décoratifs.[5]

## I.8 Les Critères de classification des ponts

Il existe de nombreux critères permettant de distinguer les ponts. Ces critères répondent aux besoins pour la construction d'un pont car les modèles de charges, les situations de risques, les hypothèses de dimensionnement ou encore les modèles de calcul sont fonction du type d'ouvrage. La classification a donc plus qu'un intérêt didactique ; c'est un véritable outil de travail et de communication. Les critères de classification sont principalement :

1. Selon leur destination (**nature de leur voie portée**) qui permet de distinguer principalement les ponts suivants :
  - **Ponts routes** : sur lesquels passent les routes et autoroutes.
  - **Ponts rails** : sur lesquels passent les chemins de fer.
  - **Pont pour canaux** : sur lesquels passent des voies de navigation intérieure.
  - **Ponts-aqueducs** : sur lesquels passent les canalisations d'eau.

- **Ponts pour piétons et cyclistes**
- **Ponts pour avions** : dans les aéroports.

2. Selon le **matériau** utilisé pour la construction du tablier. Si l'on exclut les ponts en bois, les ponts en fonte, pont en lianes et les ponts en maçonnerie réalisés autrefois, on distingue principalement **les ponts en béton armé, les ponts en béton précontraint et les ponts métalliques.**

Encore une fois, cette classification n'est pas très adaptée puisqu'il existe des tabliers mixtes acier-béton comportant des poutres métalliques et une dalle de couverture en béton qui peut être précontrainte transversalement. Par ailleurs la conception d'un pont ne se limite pas à celle du tablier mais également aux fondations et aux appuis qui sont rarement métalliques.

3. Selon **La structure du tablier** : la construction diffère d'un pont à l'autre. Il existe **5 catégories** :

a) **Pont à poutres multiples** : Les éléments porteurs principaux sont les poutres, elles transmettent les charges du tablier vers les appareils d'appuis.

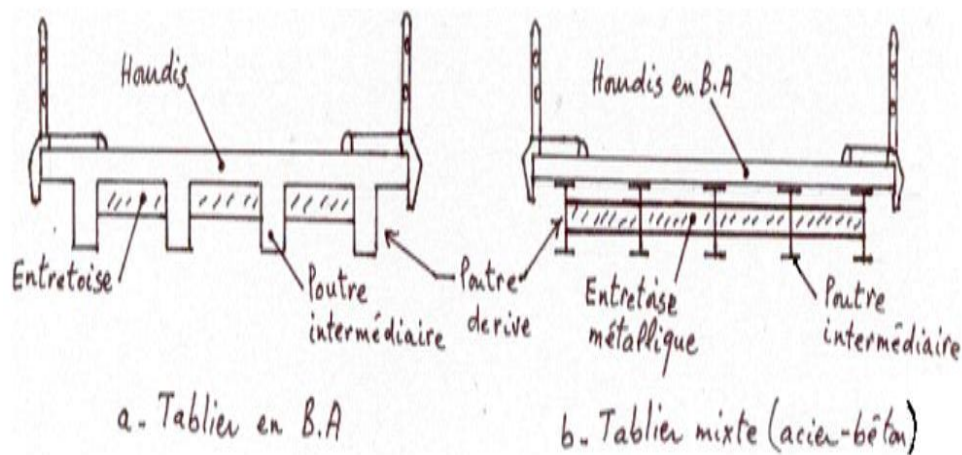


Figure I.12 : Schéma d'un pont à poutres multiples.

b) **Pont à poutres latérales** : Les charges sont transmises acheminées vers les appareils d'appuis selon l'ordre : hourdis vers longerons, vers les traverses s'il s'agit d'un pont en béton armé ou vers les pièces de pont si l'ouvrage est métallique, vers les poutres latérales, et enfin vers les appareils d'appuis.



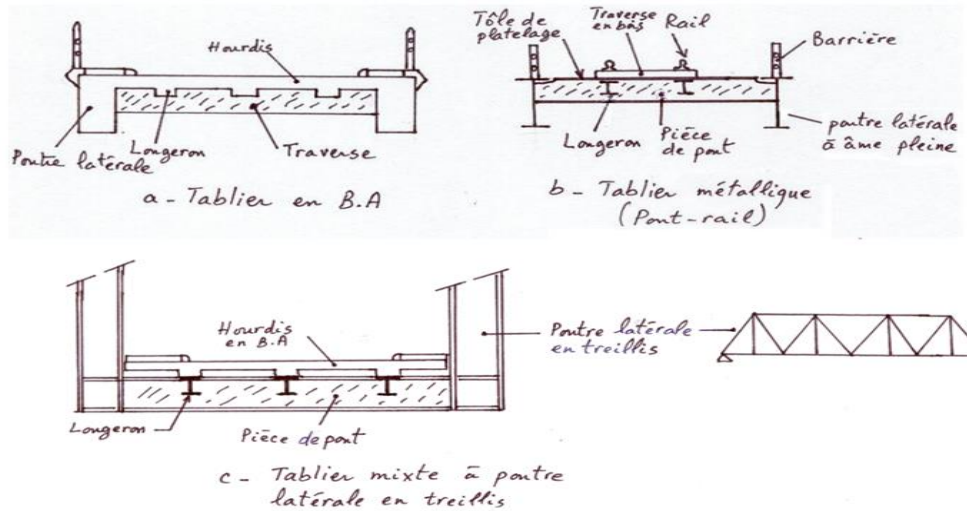


Figure I.13 : schéma d'un pont a poutres latérales.

- c) **Pont à poutres en caisson** : Le tablier est assimilé à une ou plusieurs poutres construites en béton précontraint ou en béton armé, évidées à l'intérieur et possédant des dimensions importantes. De ce fait, leurs rigidités vis-à-vis la flexion et la torsion sont considérables.

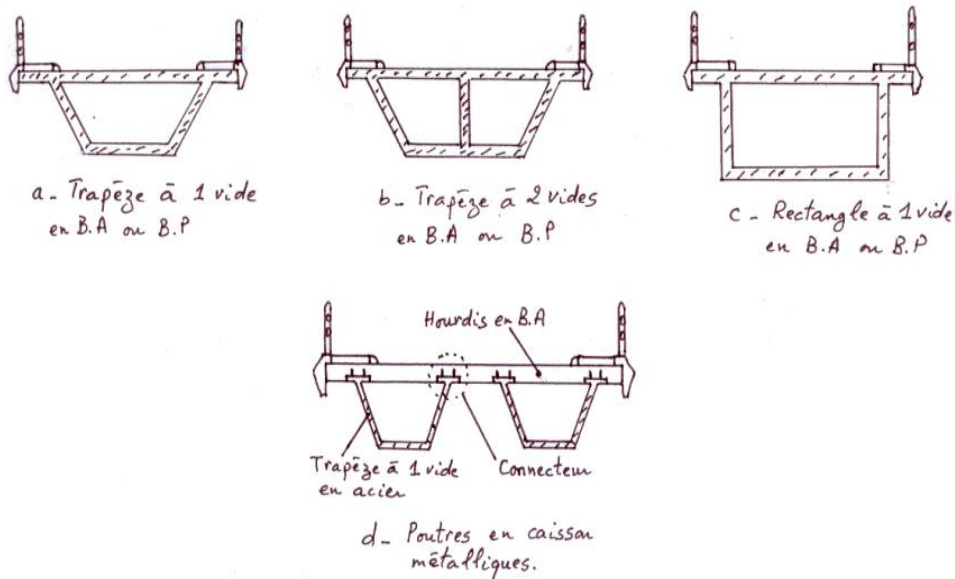


Figure I.14 : Schéma d'un pont a poutres en caisson.

- d) **Pont à poutres plissées** : Similairement aux en caissons, les poutres plissées sont d'une grande rigidité. Elles ont la forme d'un triangle dont le côté supérieur est l'hourdis, les deux autres côtés sont munis de plaques métalliques ondulées et très rigides qui se rencontrent au sommet inférieur du triangle qui est in tube métallique de liaisons des deux ailes.

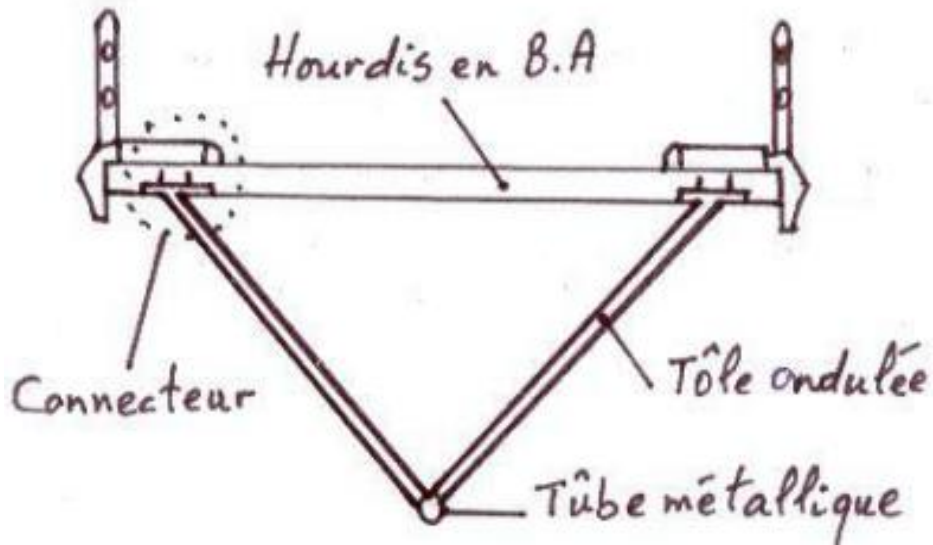


Figure I.15 : Schéma d'un pont à poutres plissées.

e) **Pont dalles** : Les charges sont transmises directement de la dalle vers les appareils d'appuis. Cette fois ci l'hourdis possède une épaisseur importante, il est appelé dalle.

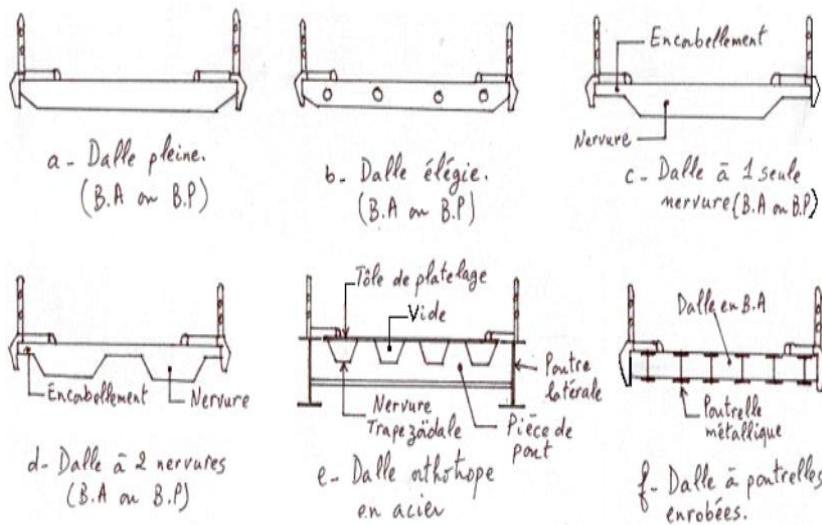


Figure I.16 : Schéma d'un pont dalles.

4. Selon la géométrie c'est-à-dire le tracé en plan du pont et l'alignement des appuis on aura :

a) Les ponts droits

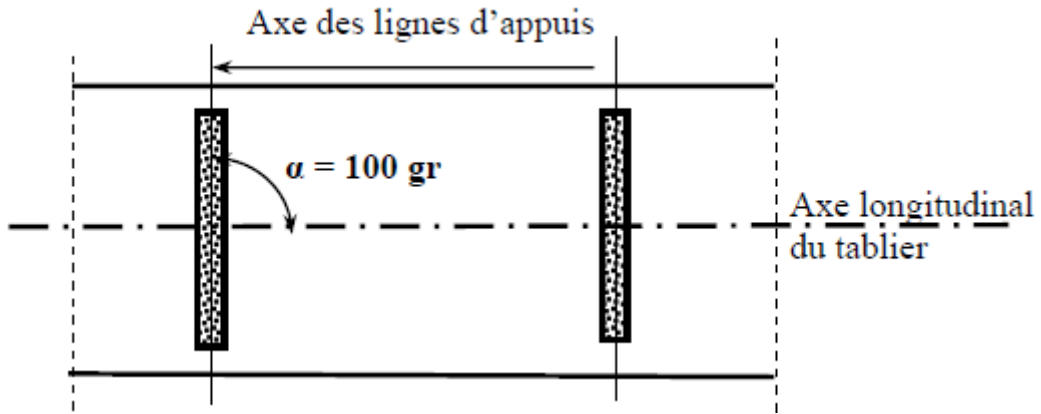


Figure I.17 : Pont droit. (Tracé en plan).

b) Les ponts courbes

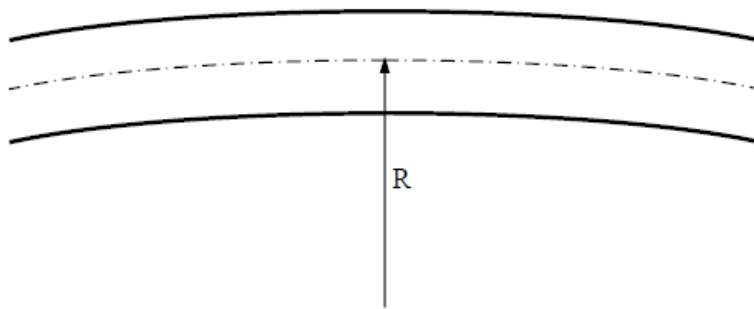


Figure I.18 : Pont courbe (tracé en plan).

c) Les ponts biais

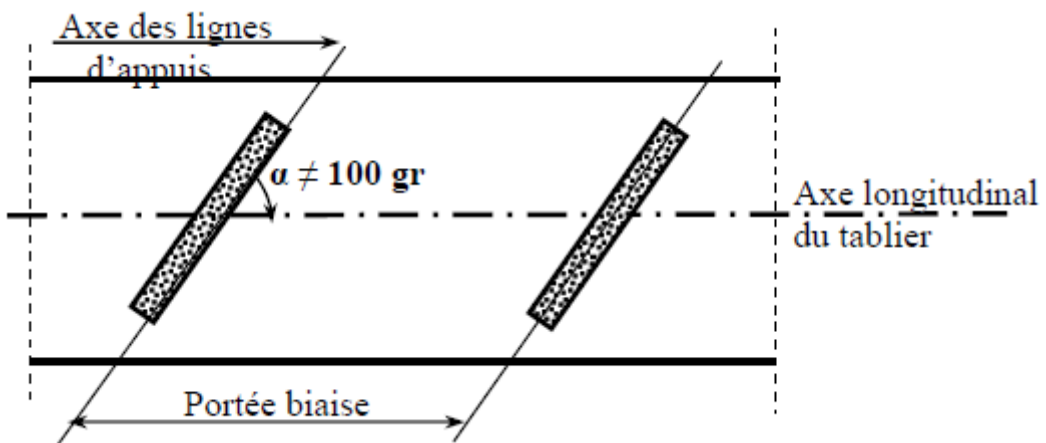


Figure I.19 : Pont biais (Tracé en plan).

5. Selon leur niveau de passage

- a) **Pont de passage supérieur** : Le pont est placé en dessus de la voie principale prise comme référence tel qu'une autoroute ou la voie à construire.

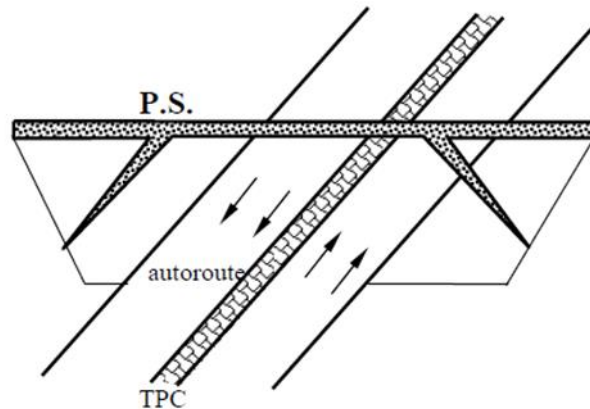


Figure I.20 : Passage Supérieur (PS).

- b) **Pont de passage inférieur** : Le pont est placé en dessous de la voie de référence.

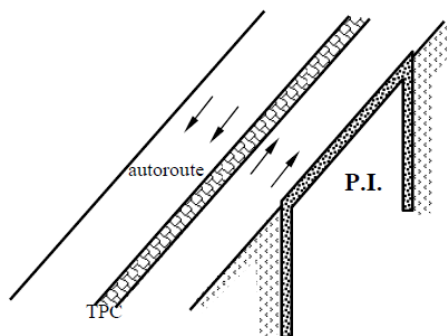


Figure I.21 : Passage Inférieur (PI).

6. Selon la mobilité de leur tablier

- **Pont fixe** : il n'exerce aucun mouvement comme c'est le cas de la majorité des ponts.
- **Pont mobile** : Une partie de pont peut se mouvoir pour assurer une surface d'encombrement suffisante pour permettre la circulation des engins hors gabarit.

Un pont mobile est nécessaire si l'obstacle franchi présente des eaux navigables. On distingue 4 types de ponts mobiles suivant la direction du mouvement de la partie mobile.

a) Pont levant



Figure I.22 : Pont levant de Martrou sur la Charente en France.

b) Pont tournant

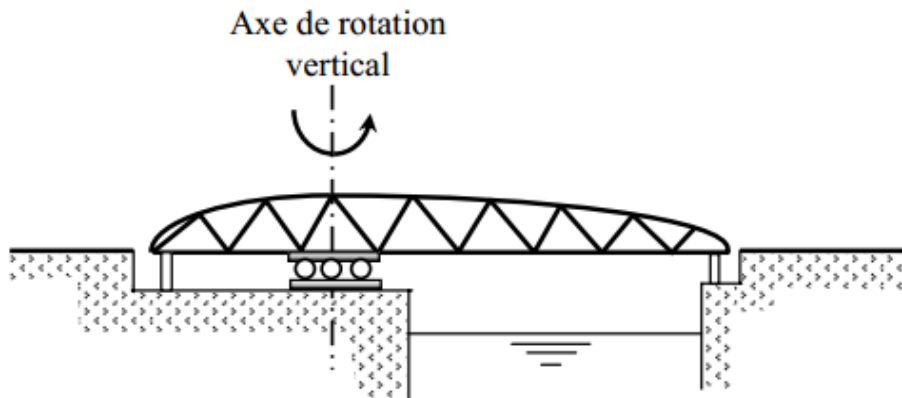


Figure I.23 : Pont tournant.

c) Pont basculant



Figure I.24 : Pont Basculant de Bizerte, Tunisie, construit en 1980.

7. Selon le **système porteur** qui est la classification fréquemment utilisée, on distingue :

- Les ponts à poutres,
- Les ponts arcs,
- Les ponts à béquilles,
- Les ponts à câbles porteurs,
- Les ponts mobiles.[6] [7] [8]

## I.9 Données relatives à l'étude d'un pont

La conception d'un pont doit satisfaire à bon nombre d'exigences. En effet, en plus de pouvoir être utilisé comme service à ses usagers, un pont doit aussi satisfaire des exigences vis-à-vis de son environnement.

L'implantation d'un pont relève surtout d'une opération de vaste envergure. En effet, ces ouvrages ne sont que d'infimes tronçons de voie de circulation. Leur tracé, leurs dimensions et leur importance sont dictés par une multitude d'informations. [4]

Plusieurs données sont donc nécessaires à l'élaboration d'un pont, toutes n'ont pas la même importance dans chaque projet. Avant d'analyser leur impact sur un projet, il convient de les rassembler de la manière la plus exhaustive possible. Il est possible de distinguer les six catégories suivantes :

- Les **données administratives**, destinées à définir le cadre administratif dans lequel se situe le projet,
- Les **données d'environnement** rassemblent les spécificités du site,
- Les **données naturelles** qui rassemblent les éléments techniques de l'environnement influant directement sur le projet,
- Les **données fonctionnelles** qui constituent l'ensemble des caractéristiques permettant au pont d'assurer ses fonctions de franchissement,
- Les **données architecturales**,
- Les **données de gestion et de maintenance**. [7]

### 1. Les données administratives

Elles sont destinées à définir le cadre administratif et réglementaire dans lequel se situent le projet, en particulier les délais et les contraintes de financement de l'opération.

### 2. Les données d'environnement

Ces données rassemblent toutes les spécificités (essentiellement qualitatives) du site, existantes ou en projet, qui crée l'environnement du projet, afin de mesurer l'impact du projet sur l'environnement pour mieux le protéger.

Cette étude d'environnement permet d'évaluer les conséquences du projet sur **l'eau, le bruit, la flore et la faune**.



### 3. Les données fonctionnelles

Elles constituent l'ensemble des caractéristiques permettant au pont d'assurer sa fonction d'ouvrage de franchissement à sa mise en service. Pour cela, il est nécessaire de définir les données relatives à **la voie portée et la voie ou l'obstacle franchi**.

### 4. Les données naturelles

Les données naturelles rassemblent l'ensemble des éléments techniques du terrain influant directement sur l'ouvrage.

- **Topographie du terrain naturel** : l'analyse de la topographie du site permet d'implanter correctement l'ouvrage en tenant compte des courbes de niveau, des accès possibles pour les différentes parties de l'ouvrage, des mouvements de terre nécessaire, des possibilités d'implantation des installations de chantier ou d'aires de préfabrication...
- **Données géologiques, géotechniques et hydrogéologiques** : Elles sont fondamentales dans l'étude d'un ouvrage. Elles conditionnent le type de fondation et même le choix de la solution du franchissement projeté. Ces études renseignent sur la nature du terrain, le niveau de la nappe, la capacité portante du sol et le niveau d'ancrage des fondations.
- **Données hydrauliques** : Lorsqu'un ouvrage franchit un cours d'eau ou un canal, il est nécessaire de rassembler toutes les informations hydrauliques qui lui sont liées. En particulier il convient de recenser les informations sur la topographie du lit, sur le régime du cours d'eau et d'évaluer les risques potentiels d'affouillements.
- **Données climatiques** : La température, le vent, la neige, le gel-dégel...sont des paramètres qui ont des répercussions sur la conception et le dimensionnement des ponts.
- **Données sismiques** : Les ponts situés en zone sismique doivent être justifié selon la réglementation technique en vigueur (RPOA 2008).

### 5. Les données architecturales

La conception architecturale est la partie la plus visible d'un pont. Sa qualité est donc importante pour une perception réussie de l'ensemble.

La configuration de la brèche à franchir est le point de départ qui, associé aux autres contraintes déterminera la conception architecturale d'un pont et en particulier de celui du nombre de travées.

Cette qualité architecturale peut également résulter d'une volonté du Maître d'ouvrage ou du maître d'œuvre en vue d'aboutir à une image déterminée de l'ouvrage.

### 6. Les données de gestion et de maintenance

S'il est un domaine qui caractérise notre époque, c'est bien celui de la Gestion et de la Maintenance.

La gestion des ponts, compte tenu de leur nombre, de leur coût, est une affaire techniquement difficile, administrativement et économiquement lourde. C'est néanmoins une activité nécessaire au plan de la sécurité et cela suffit à la justifier.

Elle est aussi nécessaire au plan économique, car l'absence ou même l'insuffisance d'entretien des ouvrages, conduisent à des mises hors service prématurées qui sont gênante et onéreuse pour la collectivité. [7]

## **I.10 Conclusion**

La conception d'un pont résulte le plus souvent d'une démarche itérative dont l'objectif est l'optimisation technique et économique de l'ouvrage. Dans ce chapitre, nous avons permis de voir la terminologie, les différents éléments constitutifs, les notations géométriques et le vocabulaire ainsi que les différents critères de classification des ponts que l'on utilise couramment pour définir en première analyse un ouvrage et rechercher comment le réaliser dans les meilleures conditions techniques et économiques.



# CHAPITRE

II

## Chapitre II : Conception et dimensionnement des ponts

### II.1 Conception des ponts

L'étude d'un projet est conduite par un ingénieur expérimenté et imaginatif, possédant une bonne connaissance des divers types d'ouvrages, de leur prédimensionnement et de leurs sujétions d'exécution, et capable d'une hardiesse réfléchie dans la recherche de solutions à la fois économiques et originales lorsque se posent des problèmes de complexité inhabituelle.

### II.2 Choix du type d'ouvrage

L'objectif est de déterminer le type d'ouvrage le plus économique capable de satisfaire le plus possible à toutes les conditions imposées. Pour cela, il est nécessaire de connaître à la fois l'ensemble des contraintes à respecter et l'ensemble des types d'ouvrages envisageables. La recherche de la solution doit viser le meilleur profit technico-économique tout en respectant les contraintes naturelles et fonctionnelles imposées. Le concepteur doit avoir une connaissance approfondie des solutions possibles, de leurs sujétions, de leurs limites et de leurs coûts. Comme dans le domaine des ouvrages d'art, la solution à un problème de franchissement d'un obstacle n'est pas unique.

Deux Types sont envisagées :

- **Type n° 1** : Pont à poutre en T.
- **Type n° 2** : Pont à poutre-caisson (voussoir).

La prochaine partie de notre travail comporte une analyse des deux types de ponts, en mettant en avant leurs avantages, leurs inconvénients et leurs modes de construction, qui nécessitent un matériel spécifique.

#### II.2.1 Type 1 : Les Ponts à poutre en T

##### 1.Description

Un pont à poutres est un pont dont le tablier est porté par une ou plusieurs poutres en béton précontraint. Les ponts à poutres n'exercent qu'une réaction verticale sur leurs appuis intermédiaires ou d'extrémité, et les efforts engendrés dans la structure sont principalement des efforts de flexion.

Les ouvrages sont généralement construits à leur emplacement définitif. Cependant, certaines contraintes spécifiques du site (difficultés d'accès, zones urbanisées, voies routières, ferroviaires ou rivières à franchir, etc.) peuvent empêcher la réalisation de l'ouvrage dans sa position finale. Plusieurs techniques ont donc été développées pour mettre le tablier à son emplacement définitif après son bétonnage en le déplaçant par poussage, translation, rotation, ripage, etc., des techniques innovantes s'adaptant aux franchissements les plus divers. [2]

La conception d'un ouvrage dépend donc beaucoup de son procédé de construction. Ce procédé aura une incidence sur les dispositions constructives à respecter sur le chantier, tels que les phasages de mise en précontrainte et les reprises de bétonnage.

En général, les ponts courants en béton sont construits à leur emplacement définitif, soit sur étaieement, soit sur cintres selon qu'il faille ou non maintenir une circulation pendant les travaux. Dans certains cas, afin de réduire au minimum les aléas et servitudes dus au maintien de la circulation, des techniques permettent de réaliser l'ouvrage à proximité de son emplacement définitif, sans coupure ou gêne pour la circulation. Ensuite, profitant d'une coupure programmée pendant une période favorable (week-end prolongé, saison non touristique, etc.), on déplace le pont à son emplacement définitif.



**Figure II.1** : Pont à poutre en T.

## 2. Forme de la section transversale

Les poutres en béton précontraint sont parallèles sous la chaussée, presque toujours à âme pleine, et solidarisiées transversalement par des voiles en béton armé formant entretoises. La couverture (le hourdis) est une dalle en béton armé qui joue le rôle de membrure supérieure de liaison des poutres. Selon les dimensions respectives et les modes de liaison de ces deux éléments, le tablier de ces ouvrages est constitué de poutres en béton armé, solidarisiées par un hourdis supérieur et par des entretoises sur appuis et, éventuellement, en travée.

Ce type de tablier permet des franchissements de petites et moyennes portées, de 15 m à 25 m, et est très souvent utilisé pour le franchissement de petits cours d'eau et comme passage supérieur. Le tablier comporte des poutres en béton armé sous chaussée, espacées de 2,5 m à 4 m, solidarisiées transversalement par le hourdis et des entretoises aux abouts.

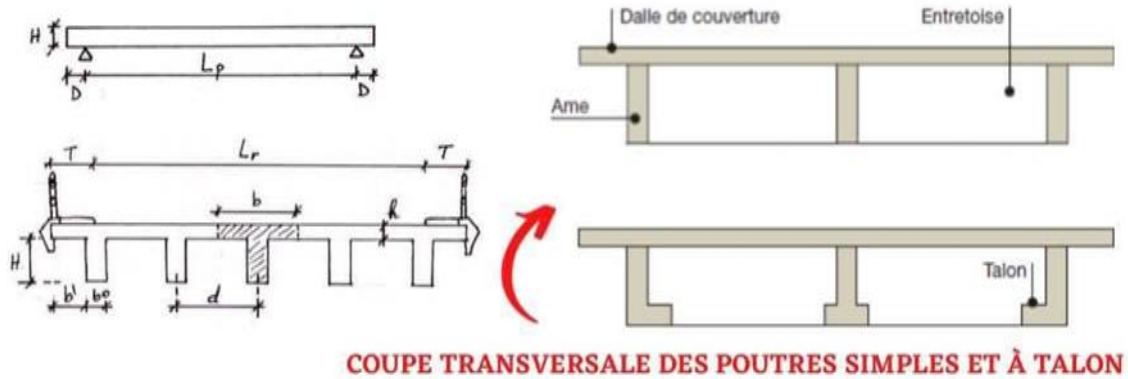


Figure II.2 : Schéma d'une coupe transversale des poutres simples et a talon.

### 3. Avantages

- Formes très variées à cause de la maniabilité du béton.
- Moins chers que les ponts métalliques.
- Moins sensibles aux effets atmosphériques, leur entretien est moins coûteux.
- Ils possèdent des formes esthétiques.

### 4. Inconvénients

- Plus lourds que les ponts métalliques —> portée limitée, fondation coûteuse, efforts sismiques importants.
- Le béton ne résiste pas à la traction —> ferrailage passif : barres en acier, ferrailage actif : câbles précontraints.
- Les qualités mécaniques du béton ne sont acquises qu'à 28 jours —> utilisation des éléments préfabriqués.
- La réparation des parties endommagées du béton est difficile.

## II.2.2 Type 2 : Les ponts voussoir

### 1. Description

Dans ce type d'ouvrage, réalisé surtout pour les grandes portées, l'organe porteur est constitué par un ou plusieurs caissons formant un profil fermé comprenant un hourdis supérieur, qui sert de dalle de couverture, et des âmes reliées entre elles à leur partie basse par un hourdis inférieur. Le hourdis supérieur déborde des âmes de rive par un élément de dalle en encorbellement. La liaison entre les âmes et les hourdis est complétée par des goussets.

Dans les ponts à poutres-caisson, on supprime généralement les entretoises intermédiaires pour ne conserver que les entretoises sur appuis.

En plus de leur rôle de dalle de couverture, le hourdis supérieur et le hourdis inférieur fonctionnent en tant que membrures comprimées ou tendues suivant le signe du moment sollicitant la section considérée. [9]

Si l'épaisseur du hourdis supérieur est constante, celle du hourdis inférieur est généralement variable, atteignant une valeur maximale aux points du moment négatif maximum.

L'épaisseur des âmes dépend des mêmes facteurs que pour les poutres de travées indépendantes, c'est-à-dire résistance à l'effort tranchant et mise en œuvre convenable du béton. Les âmes peuvent être de hauteur constante ou de hauteur variable.



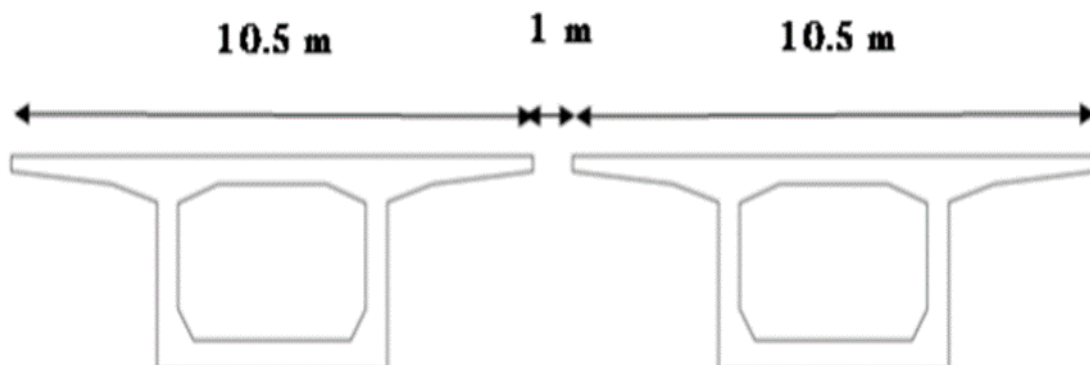
**FigureII.3** : Pont a poutre en caisson(voussoir).

## 2. Forme de la section transversale

La forme et le nombre de caissons en section transversale des ponts suivent le profil en travers de la chaussée qu'ils relient. Pour donner au hourdis inférieur une épaisseur suffisante sans augmenter la section strictement nécessaire, il est parfois nécessaire d'incliner les âmes, afin de réduire la largeur de la membrure inférieure. Les critères de choix du nombre de caissons sont :  $L \leq 13\text{m}$  Poutre caisson unique.

- $13 < L < 18$  Poutre caisson a trois âmes (double cellule).
- $L \geq 13\text{m}$  deux caissons séparés.

Pour la largeur du tablier elle est égale à 22m, la disposition admise sera décrite ci-dessous :



**FigureII.4** : Schéma présente une coupe transversale d'un caisson.

### 3. Les avantages

- L'esthétique de ce type d'ouvrage.
- Dans les ouvrages de ce type, la portée peut atteindre jusqu'à 200m.
- La rapidité d'exécution.
- Ce type de profil fermé présente une grande rigidité à la torsion.
- L'augmentation du rendement de la main d'œuvre, dû à la mécanisation des tâches à l'intérieur d'un cycle répétitif.

### 4. Les inconvénients

- Les effets du fluage du béton et de la relaxation des aciers conduisent alors à de délicats problèmes.
- L'influence du gradient thermique.

## II.3 Mode de construction

### II.3.1 Tablier construit par poussage

Le principe général de la méthode de construction par poussage est très simple. Il consiste à préfabriquer le tablier à côté de la brèche à franchir, sur une plateforme située dans le prolongement de son axe longitudinal, en arrière de la culée, puis à le pousser, par un déplacement de translation suivant son axe, en le faisant glisser sur sa culée et sur ses piles définitives (éventuellement sur des appuis provisoires complémentaires), jusqu'à ce qu'il atteigne sa position définitive, au-dessus de la brèche qu'il doit enjambrer.

Le tablier peut être poussé soit en une seule fois, s'il a été préalablement préfabriqué entièrement, soit en plusieurs fois, lorsqu'il est préfabriqué par tronçons successifs, chaque poussage s'effectuant alors après la préfabrication du tronçon correspondant.



Figure II.5 : Tablier d'un pont par la méthode de poussage.



### II.3.2 Tablier construit par cintre

Dans les cas les plus courants, le tablier est coulé sur un cintre fixe, établi au-dessus de la brèche à franchir et s'étendant d'un bout à l'autre de l'ouvrage. Lorsque le tablier comporte plusieurs nervures, il est souvent intéressant de construire le tablier nervure par nervure, dans le sens transversal. Une fois une nervure coulée et mise en précontrainte, le cintre est ripé transversalement pour permettre la construction de la nervure voisine. Les nervures sont ensuite réunies entre elles par précontrainte transversale.

Pour les ouvrages de grande longueur, comportant un nombre important de travées, il est économique de chercher à réutiliser le même cintre plusieurs fois de suite. La technique consiste à construire, dans un premier temps, une travée de rive prolongée par une fraction de la deuxième travée, à établir la précontrainte de ce tronçon de tablier, puis à déplacer le cintre pour construire le reste de la deuxième travée et le début de la troisième. Ce tronçon est précontraint soit par des câbles filants ancrés dans le premier tronçon, soit par une combinaison des deux systèmes.



**Figure II.6 :** Tablier d'un pont construit par cintre.

### II.3.3 Tablier construit par encorbellement

La construction par encorbellement consiste à construire le tablier en console au-dessus du vide sans l'aide d'aucun échafaudage. La construction se fait soit symétriquement à partir des piles, soit exceptionnellement à partir d'une culée d'encastrement. Le tablier est "découpé en tranches" dans le sens transversal, chaque tranche appelée « voussoir » est plaquée contre les voussoirs précédents par des câbles enfilés dans des gaines laissées vides dans les voussoirs déjà construits. Lorsque les fléaux ont atteint une longueur égale à une demi-travée, on recommence l'opération à partir de la pile suivante. Les deux extrémités des fléaux sont réunies par un voussoir de clavage. On enfile et met en tension des câbles de continuité qui assurent la résistance de la poutre aux moments positifs. [10]



Figure II.7 : Tablier d'un pont construit par encorbellement.

## II.4 Pré dimensionnement des éléments du tablier

Le prédimensionnement d'une section transversale d'un pont doit suivre le profil en travers de la chaussée, car c'est une donnée fonctionnelle de l'ouvrage. Le trottoir, proportionnel au sens de la circulation, est destiné à recevoir des charges piétonnes. La phase de prédimensionnement nous donnera une idée des dimensions des différents éléments constitutifs du pont, tels que le tablier et les poutres. Les dimensions de l'ouvrage dans ce cas sont données ci-dessous :

### II.4.1 Pré dimensionnement de la poutre en T

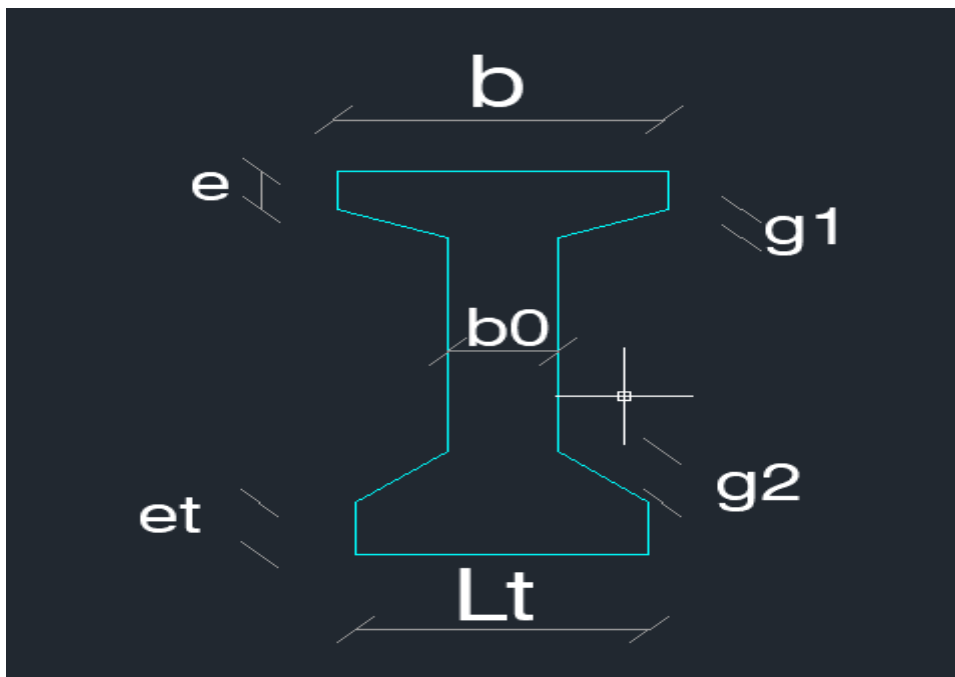


Figure II.8 : Coupe transversale d'une poutre.



**a) Entre axe des poutres ( $\lambda$ )**

L'espacement entre axes des poutres est situé entre 0.9 m et 1,5m selon le document SETRA.

$$0.9\text{m} \leq \lambda \leq 1,5\text{m} \quad (2.1)$$

**b) Le nombre des poutres (N)**

Le nombre des poutres est déterminé par la formule suivante :

$$N = \frac{L_a}{\lambda} + 1 \quad (2.2)$$

$L_a$  : entraxe entre deux poutres de l'extrémité.

**c) La hauteur de la poutre**

Pour les ponts à poutre la longueur est supérieure à 20m, la hauteur totale du tablier doit vérifier l'inégalité suivante :

$$\left(\frac{L}{20}\right) - 0.2 \leq Ht \leq \left(\frac{L}{20} + 0.5\right) \quad (2.3)$$

Pour notre ouvrage on a :  $L$  est la longueur de la poutre.

**d) Table de compression**

*1- La largeur de la table de compression (membrure supérieur)*

Le dimensionnement de la membrure supérieure résulte d'une optimisation faisant intervenir le nombre de poutres, tenant compte des problèmes de stabilité vis-à-vis du déversement latéral et de la conception de la dalle sous chaussée : hourdis généraux ou hourdis intermédiaire.

La largeur de la membrure supérieure doit être  $\geq 0.6$  la hauteur des poutres :

$$b \geq 0.6Ht ; \quad (2.4)$$

Avec :  $Ht$  est la hauteur totale de la poutre en mètre.

Aussi il faut que :  $b \geq 0.9\text{m}$

*2- Epaisseur de la table de compression*

Nous allons utiliser des poutres en I et l'espacement entre leurs axes est de 1m ; l'épaisseur de la table de compression est généralement comprise entre :

$$10 \text{ cm} \leq e \leq 20 \text{ cm} \quad (2.5)$$

### 3- Epaisseur de l'âme

On doit être vérifiée les conditions suivantes :

$$b_0 \geq \frac{H_t}{36} + 0,1 = [\text{m}] \quad (2.6)$$

On a 3 cas comme suit :

#### - Epaisseur de l'âme aux abouts d'appuis

L'épaisseur de l'âme à l'about de la poutre doit être grande à cause de l'augmentation des efforts tranchants et aussi pour bien permettre l'emplacement des ancrages des câbles de précontrainte.

On fixe  $b_0$ .

#### - Epaisseur de l'âme à la fin d'abouts

On prend :  $b_0$  en cm

#### - Epaisseur de l'âme à l'intermédiaire

L'épaisseur de l'âme à l'intermédiaire de la poutre doit être moins importante que l'épaisseur de l'âme à l'about parce que les efforts tranchants sont moins importants.

$$b_0 \geq 9 + \frac{h_t}{40} = [\text{cm}] \quad (2.7)$$

#### e) Le talon

Il constitue la fibre inférieure de la poutre, il doit permettre de loger les câbles de précontrainte dans de bonnes conditions d'enrobage et d'espacement.

#### - Largeur du talon ( $L_t$ )

Le talon, dont les dimensions sont commandées à la fois par la résistance à la flexion, et par les conditions d'encombrement des câbles de précontraints.

La largeur du talon varie entre :  $(50 \text{ cm} \leq L_t \leq 80 \text{ cm})$  (2.8)

#### - Epaisseur du talon ( $e_t$ )

Sa hauteur est comprise habituellement entre **10 et 20cm**. (2.9)

#### f) Goussets

C'est l'angle disposé pour permettre d'améliorer la section et de placer les armatures d'acier et les câbles précontraints. On prendra :

$\alpha_1$  gousset de la table de compression =  $6^\circ$

$\alpha_2$  gousset du talon =  $45^\circ$

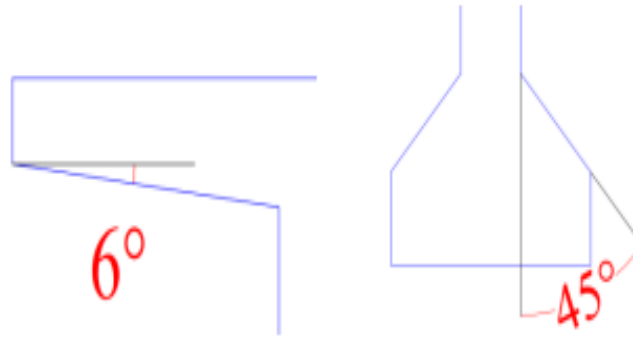


Figure II.9 : Les angles de gousset.

#### II.4.2 Pré dimensionnement de la dalle

On définit pour la dalle deux types de dimensions ; qui sont les dimensions droites et les dimensions biaises. Elles concernent la longueur et la largeur :

##### a) La longueur biaise

La longueur biaise de la dalle est celle parallèle à l'axe du pont. Elle est égale à la longueur des poutres.

$L_{bi}$  en [m]

##### b) La longueur droite

Elle est perpendiculaire à la ligne de l'appui :  $L_{dr} = L_{bi} \times \sin gr$  (2.10)

##### c) La largeur droite

C'est la largeur perpendiculaire à l'axe du pont :

Pour notre pont la dalle est variable donc on fait la valeur moyenne entre la pile et la culée donc :  $l_{dr}$  en [m].

##### d) La largeur biaise

C'est la largeur parallèle à la ligne de l'appui elle est de valeur suivante :

$$l_{bi} = \frac{l_{dr}}{\sin(gr)} \quad (2.11)$$

##### e) Epaisseur de la dalle $e_d$

$$(18\text{cm} \leq e_d \leq 25\text{cm}) \quad (2.12) \quad [11]$$

## II.5 Caractéristiques du pont

- Portée d'une travée :	25,00 m
- Longueur totale de la poutre :	25,00 m
- Hauteur de la poutre I :	01,30 m
- Nombre de poutres :	09,00 m
- Largeur totale du tablier L :	10,00 m
- Largeur du trottoir $L_t$ :	01,40 m
- Nombre de voies :	02,00 m
- Largeur roulable $L_r$ :	07,20 m
- Largeur chargeable $L_c$ :	07,20 m
- Largeur d'une voie $l_v$ :	03,60 m

## II.6 Caractéristiques géométriques des poutres

### - La section brute

Correspond au béton seul. D'après les dimensions de coffrage figurant sur les plans sans tenir compte de la section des armatures. Elle est utilisée pour le calcul de :

- ✓ Poids propre de l'élément.
- ✓ Rigidités relatives des différents éléments de la structure.
- ✓ Déformations pour les parties d'ouvrages.

### - La section nette

Obtenu par la soustraction de la section brute, des vides longitudinaux et transversaux comme les trous et les conduites.

#### *Notations*

$(\Delta)$  : l'axe pris au niveau de la fibre inférieure extrême.

$I_G$  : Moment d'inertie par rapport au centre de gravité.

$I_\Delta$  : Moment d'inertie par rapport à l'axe  $(\Delta)$ .

$S_\Delta$  : Moment statique par rapport à l'axe  $(\Delta)$ .

$I_0 = \frac{b \cdot h^3}{12}$  : Pour une section rectangulaire

$I_0 = \frac{b \cdot h^3}{36}$  : Pour une section triangulaire.

$B$  : La section transversale.

$v$  : Distance du centre de gravité à la fibre supérieure.

$v'$  : Distance du centre de gravité à la fibre inférieure.

$\rho$ : Rendement géométrique de la poutre.

$r$  : Rayon de giration de la section.

$Z_i$  : position du C.D.G de la section (i) par rapport à l'axe.

$$S_{\Delta} = \sum B_i \cdot Z_i$$

$$V' = \frac{S_{\Delta}}{B}$$

$$V = H_t - V'$$

$$I_{\Delta} = \sum I_0 + B_i \cdot Z_i^2$$

$$I_G = I_{\Delta} - S_{\Delta} \cdot V'$$

$$\rho = \frac{I_G}{B \cdot V_i \cdot V_S}$$

$$r = \sqrt{\frac{I_G}{B}}$$

$$B_{(nette)} = B_{(brute)} - 5\% B_{(brute)}$$

$$S_{/\Delta} (nette) = S_{/\Delta} (brute) - 8\% S_{/\Delta} (brute)$$

$$I_{/\Delta} (nette) = I_{/\Delta} (brute) - 10\% I_{/\Delta} (brute) [5]$$

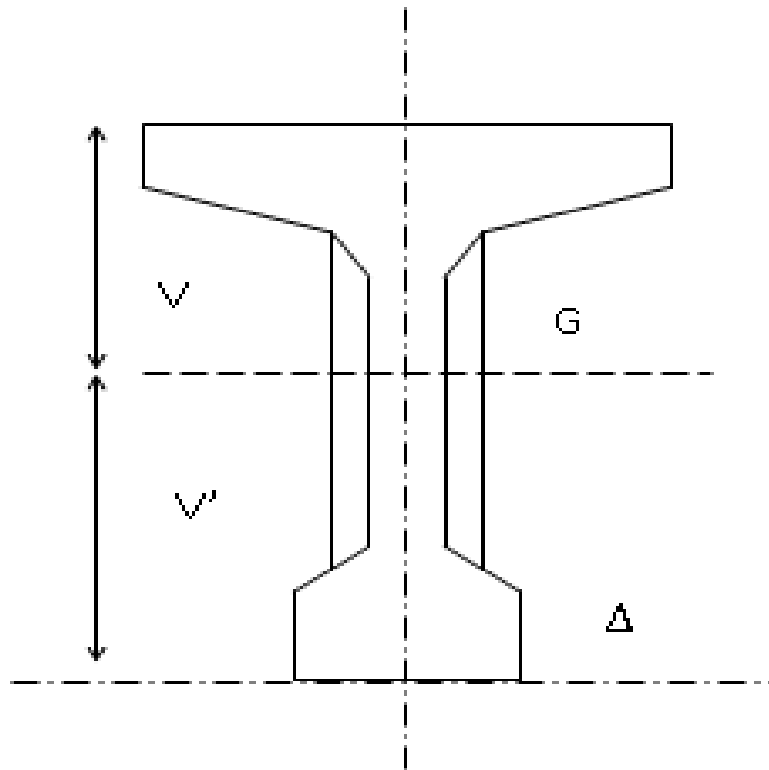


Figure II.10 : Schéma des caractéristiques de la poutre.

## II.7 Pré dimensionnement du voussoir

Ce type d'ouvrage est réalisé pour les grandes portées. L'organe porteur est constitué par un ou plusieurs caissons qui forment un profil fermé comprenant un hourdis supérieur, qui sert de dalle de couverture, et des âmes reliées entre elles à leurs parties basses par un hourdis inférieur. Le hourdis supérieur déborde des âmes de rive par un élément de dalle en encorbellement. La liaison entre les âmes et les hourdis est renforcée par des goussets.

Dans les ponts à poutres-caisson, on supprime généralement les entretoises intermédiaires pour ne conserver que les entretoises sur appuis. En plus de leur rôle de dalle de couverture, le hourdis supérieur et le hourdis inférieur fonctionnent en tant que membrures comprimées ou tendues, selon le signe du moment sollicitant la section considérée.

Le prédimensionnement des voussoirs consiste à choisir une section résistante et esthétique.

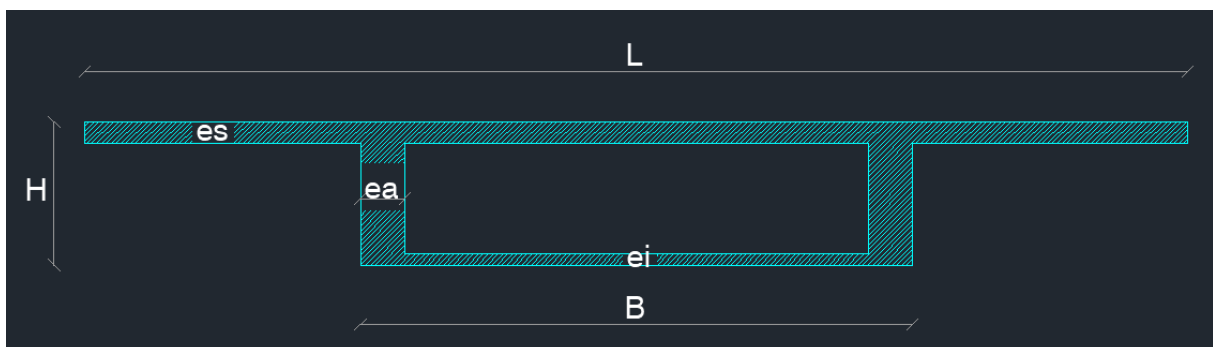


Figure II.11: Coupe transversale du voussoir.

**a) Hauteur du voussoir**

La hauteur H est généralement

$$H = H_p = H_c = \frac{1}{22} a \frac{1}{20} \quad (2.13)$$

Tel que L désigne la portée déterminante du tablier.

**b) Épaisseur des âmes**

L'âme doit assurer une bonne résistance à l'effort tranchant ainsi qu'une bonne facilité de bétonnage et doit permettre l'ancrage des câbles de fléau.

Pour une portée déterminante de l'ouvrage L.

$$e_a(\text{cm}) = 26 + L(\text{m})/5(\text{Cm}) \quad (2.14)$$

- On prend l'épaisseur de l'âme constante sur toute la portée.

**c) Epaisseur de hourdis inférieur**

$$e_i \geq \text{Max} \{18\text{cm}, e_a/3\} \quad (2.15)$$

$$e_i \geq \text{Max} \{18\text{cm}, 13.33\} \quad (2.16)$$

On prend  $e_i$  en [cm] (en travée).

Au voisinage des piles, l'épaisseur de l'hourdis inférieur est déterminée par le niveau d'intensité des contraintes normales dues à la flexion générale. Pour un dégrossissage rapide, et avec les élancements définis au paragraphe précédent, elle peut être prise égale à trois fois l'épaisseur minimale que nous avons défini pour un tablier de hauteur constant.

Donc :  $e_i = [\text{cm}]$  ; On prend  $e_i = [\text{cm}]$  (sur pile).

**d) Epaisseur de l'hourdis supérieur  $e_s$**

L'hourdis supérieur est essentiellement dimensionné par sa résistance à la flexion transversale sous l'effet des charges roulantes.

La formule de  $e_0$  de l'hourdis supérieur est :

$$e_s = \frac{1}{36} + 10 = [\text{cm}] \quad (2.17)$$

On prend l'épaisseur de l'hourdis supérieur constante sur toute la portée.

**e) La hauteur creuse h1**

$$h1 = H - e_s - e_i \quad (2.18)$$

**f) La largeur du voussoir L**

La longueur des voussoirs est de **10mètres**. [11]

**II.8 Conclusion**

Les ponts à poutres et les ponts à caissons constituent deux types d'ouvrages couramment utilisés dans la construction de ponts, chacun adapté à des conditions et des besoins spécifiques.

Les ponts à poutres sont particulièrement adaptés pour les petites et moyennes portées, allant de 15 à 25 mètres. Leur construction est souvent réalisée sur place, bien que certaines contraintes spécifiques puissent nécessiter des techniques de déplacement comme le poussage.

En revanche, les ponts à caissons sont plus appropriés pour les grandes portées. Leur structure, constituée de caissons formant un profil fermé, offre une résistance et une flexibilité accrues. La méthode de construction par encorbellement, qui évite l'utilisation d'échafaudages, permet de travailler au-dessus du vide en construisant le tablier en segments successifs. Cette approche est particulièrement avantageuse pour les sites difficiles d'accès ou nécessitant un maintien de la circulation.

Le prédimensionnement de ces ouvrages est une étape cruciale qui prend en compte le profil transversal de la chaussée et les charges piétonnes sur les trottoirs. Cette phase permet de déterminer les dimensions appropriées pour les différents éléments constitutifs, tels que le tablier et les poutres.



# CHAPITRE

III

## Chapitre III : Calcul des charges et surcharges

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons calculer les charges et les surcharges que le pont doit supporter, étant donné sa fonction porteuse. Les actions appliquées à un ouvrage peuvent être permanentes ou variables.

#### a) Les actions permanentes comprennent

- **Le poids des éléments porteurs** : (poutres et dalle)
- **Les poids des éléments non porteurs** : dont l'existence est imposée par la fonction de l'ouvrage (trottoirs, corniche, garde-corps, glissières revêtement).

#### b) Les actions variables, de leur côté, comprennent

- **Les charges d'exploitation** : Elles sont souvent définies par un règlement, comme dans le cas d'un pont routier (fascicule 61, titre II). Ces charges peuvent également être déterminées par la fonction de l'ouvrage et doivent alors inclure une marge de sécurité. Cela permet d'anticiper d'éventuelles modifications des conditions d'exploitation. En effet, l'expérience montre que lorsque l'ouvrage est conçu pour répondre strictement aux conditions prévues, tout changement de ces conditions impose des renforcements très coûteux des structures porteuses.
- **Les charges climatiques** : essentiellement le vent et températures.
- **Les actions accidentelles** : des exemples incluent le choc d'un bateau ou d'un véhicule contre une pile de pont, ainsi que l'effet d'un séisme. La prise en compte de l'action des séismes est définie par le règlement parasismique algérien (RPA99).

L'achèvement de ce travail nous amènera à réaliser le calcul à la rupture en tenant compte de l'ensemble des actions et de leurs différentes combinaisons, afin de vérifier la stabilité des ouvrages.

### III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Le choix des matériaux de construction détermine en grande partie la conception et le calcul du pont. Ici, nous présentons les caractéristiques du béton ainsi que des aciers actifs et passifs utilisés en construction, en relation directe avec les calculs nécessaires.

#### III.2.1 Béton

Le béton utilisé pour le tablier est dosé à 400 kg/m<sup>3</sup> de ciment CPJ45, tandis que celui destiné aux appuis et aux fondations est dosé à 350 kg/m<sup>3</sup> de ciment CPJ45, avec un contrôle strict de la qualité.

- **Résistance caractéristique à la compression et à la traction**

$$\left. \begin{array}{l} f_{c28}=35\text{MPa en compression} \\ f_{t28}=2,7\text{MPa en traction} \end{array} \right\} \text{ Pour le Tablier}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_{c28}=27\text{MPa en compression} \\ f_{t28}=2,22\text{MPa en traction} \end{array} \right\} \text{ Pour les appuis et fondations}$$

Avec :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad (3.1)$$

**a) Contrainte de calcul pour l'E.L. U**

$$f_{bu} = \frac{0,85 \times f_{28}}{\theta \times \gamma_b} \quad (3.2)$$

Avec :  $\gamma_b$  : coefficient de sécurité qui prend les valeurs suivantes :

$$\gamma_b = \begin{cases} 1,5 & \text{en situations durables ou transitoires.} \\ 1,15 & \text{en situations accidentelles.} \end{cases}$$

Le coefficient  $\theta$  est fixé à **1** lorsque la durée probable d'application de la combinaison d'action considérée est supérieure à 24h, à **0.9** lorsque cette durée est comprise entre 1h et 24h, et à **0.85** lorsqu'elle est inférieure à 1h.

D'où :

$$f_{bu} = \begin{cases} 19.83 \text{ MPa} & \text{Pour le tablier} \\ 25.86 \text{ MPa} & \end{cases}$$

$$f_{bu} = \begin{cases} 15.3 \text{ MPa} & \text{Pour les appuis et fondations} \\ 19.95 \text{ MPa} & \end{cases}$$

**b) Contrainte limite de service**

$$\sigma_{bc} = \begin{cases} 0,6 f_{c28} & \text{en construction.} \\ 0,5 f_{c28} & \text{en service.} \end{cases}$$

### III.2.2 Acier

#### a) Les aciers passifs

Les aciers passifs utilisés sont des barres à haute adhérence de classe FeE400 et Fe500

- Pour les justifications à l'ELU, la contrainte de l'acier vaut :

$$\bar{\sigma}_s = f_e / \gamma_s \quad (3.3)$$

Avec :  $\gamma_s$  : coefficient de pondération pris égale à :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,15 : \text{combinaison fondamentale.} \\ 1,00 : \text{combinaison accidentelle.} \end{array} \right.$$

D'où :

$$\bar{\sigma}_s = 400 / 1,15 = 347,826 \text{ MPa} \quad \text{Combinaison fondamentale.}$$

$$\bar{\sigma}_s = 400 / 1,00 = 400,000 \text{ MPa} \quad \text{Combinaison accidentelle.}$$

$$\bar{\sigma}_s = 500 / 1,15 = 434,78 \text{ MPa} \quad \text{Combinaison fondamentale.}$$

$$\bar{\sigma}_s = 500 / 1 = 500 \text{ MPa} \quad \text{Combinaison accidentelle.}$$

- Pour les justifications à l'ELS, la contrainte de traction admissible de l'acier vaut :

$$\bar{\sigma}_s = \max\{0,5 f_e \mid 110 \sqrt{n f_{ij}}\} \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 1,6 \text{ pour les aciers haute adhérence} \\ n = 1,0 \text{ pour les aciers lisse} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{\sigma}_s = 207,314 \text{ MPa} & \text{pour l'infrastructure} \\ \bar{\sigma}_s = 228,631 \text{ MPa} & \text{pour la superstructure} \end{array} \right.$$

#### b) Les aciers de précontrainte « actifs »

Concernant notre ouvrage, la pré-tension a été utilisée. Les armatures de précontrainte par fil adhérent sont tendues avant le bétonnage dans des bancs de précontrainte à l'aide de vérins, entre deux massifs d'ancrage. Le béton frais est ensuite mis au contact des armatures. Lorsqu'il a acquis une résistance suffisante (la montée en résistance peut être accélérée par étuvage), on libère la tension des fils, qui se transmet au béton par adhérence, engendrant ainsi sa mise en compression. Les fils détendus cherchent à reprendre leur longueur initiale, mais leur adhérence au béton empêche ce raccourcissement, transmettant ainsi l'effort de tension au béton. Cette technique est uniquement appliquée à la préfabrication.

### III.3 Caractéristiques du tablier

- Portée d'une travée : 25,00 m
- Longueur totale de la poutre : 25,00 m
- Hauteur de la poutre I : 01.30 m

- Nombre de poutres :	05.00 m
- Largeur totale du tablier L :	10,00 m
- Largeur du trottoir $L_t$ :	01,40 m
- Nombre de voies :	02,00 m
- Largeur roulable $L_r$ :	07,20 m
- Largeur chargeable $L_c$ :	07,20 m
- Largeur d'une voie $l_v$ :	03,60 m

### III.4 Descente de charges

La descente de charges a pour but d'évaluer les charges et les surcharges agissant sur le pont. Les charges sur le tablier, considérées d'après le RCPR (Règles définissant les Charges à appliquer pour le calcul et les épreuves des ponts routes), incluent : les charges permanentes du pont et les surcharges envisagées, telles que :

- Les surcharges civiles de type **A** et **B**,
- Convoi militaire **Mc120**,
- Convoi **D240t**
- Surcharges sur trottoirs,
- Surcharges sur les garde-corps.

### III.5 Évaluation des actions permanentes

Les charges permanentes comprennent le poids propre de la structure porteuse, les éléments non porteurs et des installations fixes.

- **Les éléments porteurs** : Ces charges sont appelées **CP** qui concernent le tablier seul (charges permanent).
- **Les éléments non porteurs** : Ces charges sont appelées **CCP** (compléments des Charges permanentes). Elle représente le poids de la superstructure tel qui est composé d'éléments suivants :
  - Le revêtement.
  - La corniche.
  - Les trottoirs.
  - Le garde-corps.
  - La glissière de sécurité.
  - L'étanchéité.

#### III.5.1 Les éléments porteurs

##### a) Poids propre de la dalle

Le poids propre est donné selon la formule :

$$G_d = e_a * \gamma_b \quad (3.5)$$

Avec :  $e_d$  : Epaisseur de la dalle = 0.20 m.

$\gamma_b$  : Le poids volumique du béton armée = 2.5 t/m<sup>3</sup>

Donc : «  $G_d = 0.5 \text{ t/ m}^2$  ».

#### b) Poids propre d'une poutre

$$G_p = [(S_{\text{totale}}) * \gamma_b] \quad (3.6)$$

Avec :  $\gamma_b$  : Le poids volumique du béton armée = 2.5t/m<sup>3</sup>

$S_{\text{totale}}$  : la section totale de la poutre = 0.3270 m<sup>2</sup>

Donc : «  $G_p = 0.8175 \text{ t/ m}$  ».

### III.5.2 Les éléments non porteurs

#### a) Le trottoir

Leur charge est donnée selon la formule :

$$G_t = e * \gamma_b \quad (3.7)$$

Avec :  $e$  : épaisseur du trottoir

$\gamma_b$  : Le poids volumique du béton armé = 2.5 t/m<sup>3</sup>

Donc : «  $G_t = 0.486 \text{ t/m}^2$  ».

#### b) Le revêtement

Leur charge est donnée selon la formule :

$$G_{\text{rev}} = e * \gamma_{\text{BB}} \quad (3.8)$$

On a une couche de revêtement en béton bitumineux (BB) de 7cm d'épaisseur et  $\gamma_{\text{BB}} = 2.4 \text{ t/m}^3$ .

Donc : «  $G_{\text{rev}} = 0.07 * 2.4 = 0.168 \text{ t/m}^2$  ».

#### c) Garde-corps

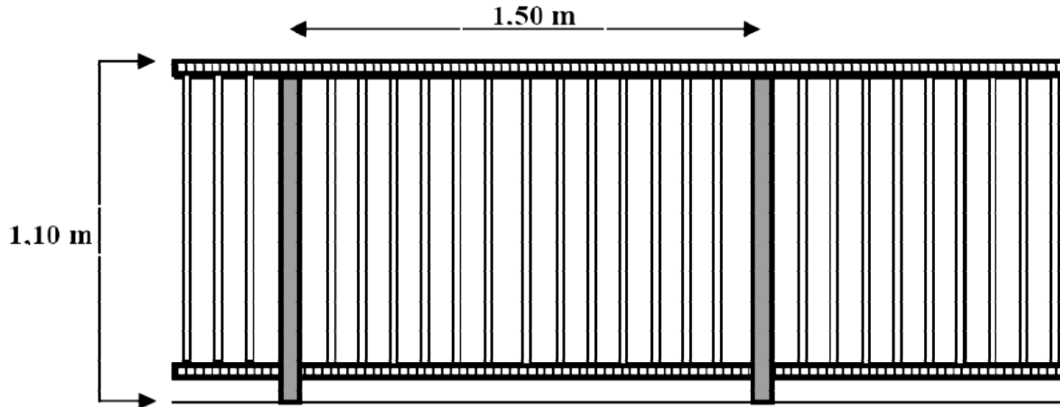


Figure III.1 : Schéma présente un garde corp.

Pour la sécurité des usagers.

Le poids d'un garde-corps «  $G_{gc} = 0.3 \text{ t/ml}$  ».

**d) Glissière**

La glissière de sécurité est en acier.

Le poids d'une glissière est «  $G_{gl} = 0.06 \text{ t/ml}$  ».

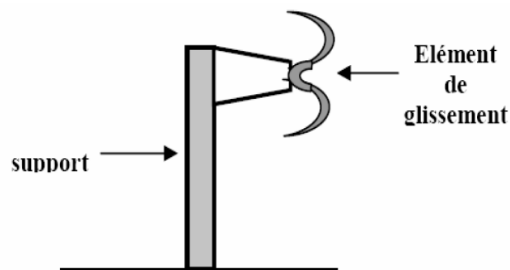


Figure III.2 : Glissière de sécurité.

**e) La corniche**

Leur charge est donnée selon la formule :

$$G_c = S * \gamma_b \quad (3.9)$$

Avec :  $S$  : La surface de la corniche.

$\gamma_b$  : Le poids volumique du béton armée =  $2.5 \text{ t/m}^3$

Donc : «  $G_c = 0.4 \text{ t/ml}$  ».

**f) L'étanchéité**

Leur poids propre est donné selon la formule :

$$G_e = e \cdot \gamma \quad (3.10)$$

Avec :  $e$  : Epaisseur = 0.01m.

$\gamma$  : Le poids volumique d'asphalte coulé à froid = 2.4 t / m<sup>3</sup>

Donc : «  $G_e = 0.024 \text{ t/m}^2$  ».

Finalement la charge permanente reprise par le tablier est  $G = \Sigma G_i = 16.62 \text{ t/ ml}$

**III.6 Les surcharges d'exploitation**

**III.6.1 Surcharge A(L)**

- **Caractéristiques de l'ouvrage**

- La largeur roulable :  $L_r = 7,20 \text{ m}$
- La largeur chargeable :  $L_c = 7,20 \text{ m}$
- Portée de la travée :  $L = 25,00 \text{ m}$
- Nombre de voies  $n$  :  $n = [L_c/3] = 2 \text{ voies}$
- Largeur d'une voie :  $l_v = 3,60 \text{ m}$

$$A(L) = 2,30 + \frac{360}{(L+12)} \text{ KN/m}^2. \quad (3.11)$$

Pour une travée intermédiaire ou de rive :  $L = 25\text{m} \Rightarrow A(L) = 1.203 \text{ t/m}^2$ .

$$A(L) = a_1 \cdot A_2 \cdot A(L) \cdot L_c \quad (3.12)$$

$a_1$  : est déterminé en fonction de la classe du pont, et du nombre de voies chargées. Il est donné par le tableau suivant :

**Tableau III.1** : Valeur de coefficient  $a_1$ .

Nombre de voies chargées		1	2	3	4	$\geq 5$
Classe de pont	1ere	1	1	0.9	0.75	0.7
	2eme	1	0.9	—	—	—
	3eme	0.9	0.8	—	—	—



- Classe du pont : 1<sup>ère</sup> classe
- Nombre de voies n : 2 voies.

**Donc :  $a_1 = 1,00$**

$$a_2 = \frac{V_0}{V} \quad (3.12)$$

avec:  $V_0 = \begin{cases} 3.50\text{m pour pont de 1 classe} \\ 3.00\text{m pour pont de 2 classe} \\ 2.75\text{m pour pont de 3 classe} \end{cases}$

$$V = Lc/n \quad (3.13)$$

$$V = 7.2 / 2 = 3.6\text{m}$$

Donc :  $A(L) = a_1 \cdot a_2 \cdot A(L) \cdot Lc = 1 \cdot (3.5/3.6) \cdot 1.203 \cdot 7.20 = 8.42 \text{ t/ml}$

$$A(L) = 1.170 \text{ t/m}^2$$

### III.6.2 Système de charges B

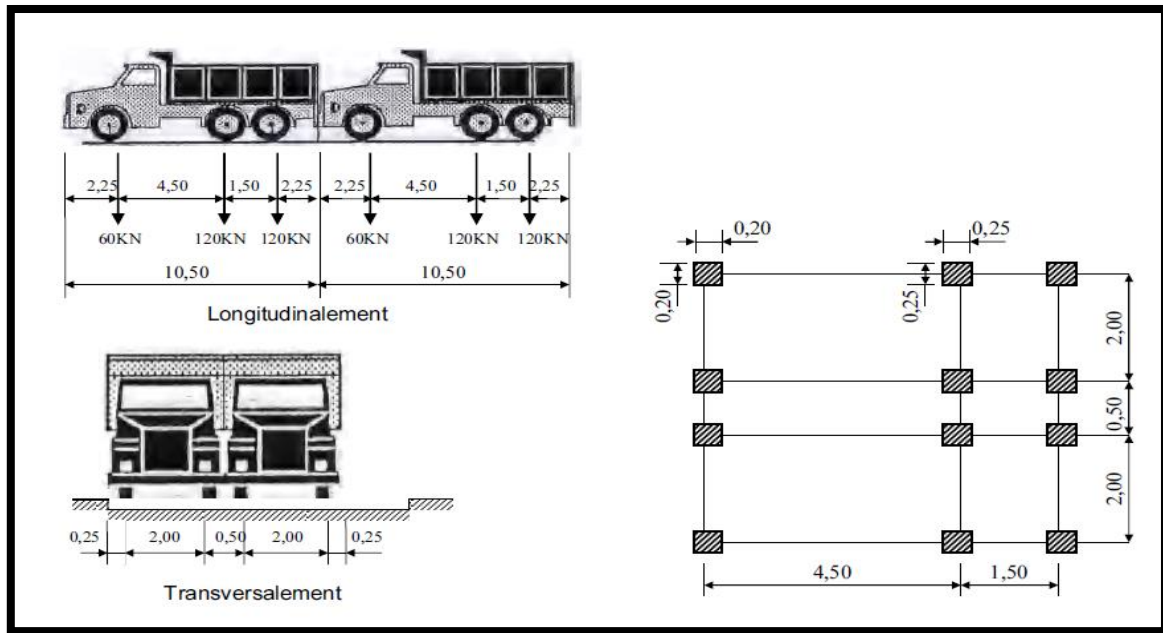
Le système de charges B comprend trois systèmes distincts dont il y a lieu d'examiner indépendamment les effets pour chaque élément des ponts :

- Le système Bc se compose de deux camions types de 300 KN chacun.
- Le système Br se compose d'une roue isolée.
- Le système Bt se compose de groupes de deux essieux dénommés essieux tandems.

#### III.6.2.1 Surcharge Bc

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

Masse totale des essieux .....	30t
Masse portée par chacun des essieux arrière .....	12 t
Masse portée par l'essieu avant.....	06 t
Longueur d'encombrement .....	10,5 m
Largeur d'encombrement .....	02,5 m
Distance de l'essieu avant au premier essieu arrière .....	04,5m
Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu .....	01.5m



**Figure III.3:** Le système Bc.

Sur la chaussée, on dispose autant de files ou convois de camions que de voies de circulation. On place toujours ces files dans la configuration la plus défavorable pour l'élément considéré.

- **Disposition dans le sens transversal**

Le nombre maximal de files que l'on peut disposer est égal au nombre de voies de circulation. Il ne faut pas en mettre davantage, même si cela est géométriquement possible. Les files peuvent être accolées ou espacées.

- **Disposition dans le sens longitudinal**

Le nombre de camions est limité à deux par file, et la distance entre ces deux camions est déterminée de manière à produire l'effet le plus défavorable. Le sens de circulation peut être dans l'un ou l'autre sens, à condition que les deux camions circulent dans la même direction.

En fonction de la classe du pont et du nombre de files considérées, la valeur des charges du système Bc prise en compte est multipliée par le coefficient  $b_c$ , comme indiqué dans le tableau suivant :

**Tableau III.2 :** Valeur du coefficient  $b_c$ .

Nombre de voies chargées		3	2	3	4	$\geq 5$
Classe de pont	1er	1.2	1.1	0.95	0.8	0.7
	2em	1	1	—	—	—
	3em	1	0.8	—	—	—

**1. Calcul du coefficient dynamique  $\delta_{bc}$**

$$\delta_{bc} = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2L} + \frac{0.6}{1 + G/S} \quad (3.14)$$

**L** : longueur de la travée.

**G** : la charge permanente de l'ouvrage.

**S** : c'est la charge  $B_c$  maximale : ( $B_c * bc$ ) (3.15)

On a :

- Pont de 1<sup>ère</sup> classe
- Nombres de voies : 2  $\rightarrow$  donc le nombre maximal de file que l'on peut disposer est 2 et  $bc = \begin{cases} 1.2 \text{ pour 1 file.} \\ 1.1 \text{ pour 2 files.} \end{cases}$

**2. Pour une travée intermédiaire ou de rive ( $L = 25m$ )**

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2L} + \frac{0.6}{1 + G/S} \quad (3.16)$$

$$G = 16.62 * L = 16.62 * 25 = 415.5 \text{ t}$$

$$S = n * B_c * bc \quad (3.17)$$

Avec : **n** : nombre de file.

**B<sub>c</sub>** (charge totale d'une file) = 60 t

**3. Pour une file placée transversalement :**

( $n = 1$  ;  $bc = 1,20$ )

$$S = 1 * 60 * 1.20 = 72 \text{ t}$$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2L} + \frac{0.6}{1+G/S} = 1.155 \rightarrow \delta_{bc} = 1.155$$

**4. Pour deux files placées transversalement :**

( $n = 2$  ;  $bc = 1,1$ )

$$S = 2 * 60 * 1.1 = 132 \text{ t}$$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2L} + \frac{0.6}{1+G/S} = 1.211 \rightarrow \delta_{bc} = 1.211$$

**III.6.2.2 Surcharge  $B_t$**

Un tandem du système  $B_t$  comporte deux essieux tous deux à roues simples munies de pneumatiques et répondant aux caractéristiques suivantes :

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

Distance des deux essieux. ....01,35 m.

Distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu.....02 m.

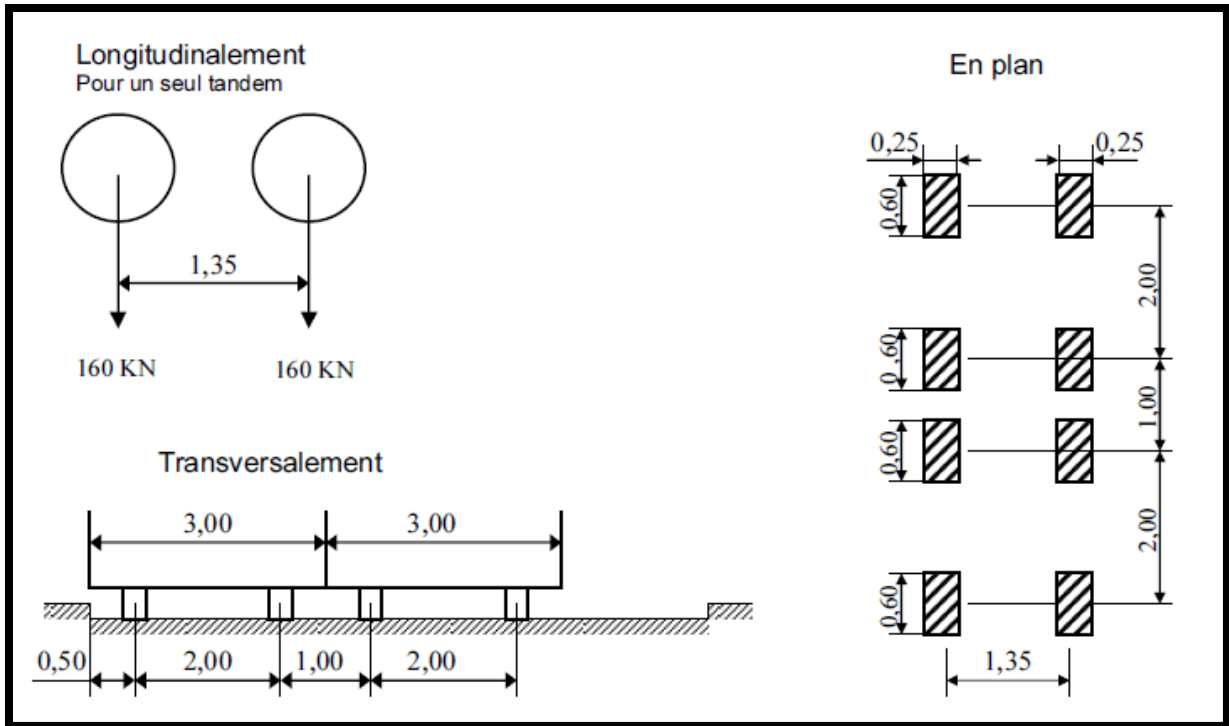


Figure III.4 : Système Bt.

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

Pour les ponts supportant au moins deux voies, aux plus deux tandems peuvent être disposés côte à côte sur la chaussée. Les deux bandes longitudinales qu'ils occupent peuvent être contiguës ou espacées, de manière à obtenir la situation la plus défavorable pour l'élément considéré.

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

Tableau III.3 : Valeurs de bt.

Classe de pont	bt
Première classe	1.2
Deuxième classe	1

1. Calcul du coefficient dynamique  $\delta_{bt}$

$$\delta_{bt} = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2L} + \frac{0.6}{1 + G/S} \quad (3.18)$$

**L** : longueur de la travée.

**G** : la charge permanente de l'ouvrage.

**S** : c'est la charge Bt maximale multiplié par le coefficient bt : **(Bt\*bt)**

**2. Pour une travée intermédiaire ou de rive (L = 25m)**

- Pont de 1<sup>ère</sup> classe → **bt = 1.2**
- L = 25 m et G = 415.5 t.

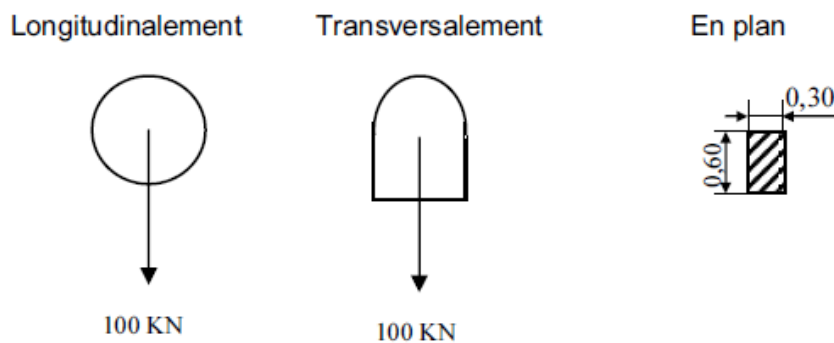
On a deux voies, on place deux tandems soit **Bt = 64t**

Donc :  $S = 1.2 * 64 = 76.8 \text{ t}$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2L} + \frac{0.6}{1+G/S} = 1.160 \quad \longrightarrow \quad \delta_{bt} = 1.160$$

**III.6.2.3 Système Br**

C'est un système qui se compose d'une roue isolée transmettant un effort de 100kN à travers une surface d'impact rectangulaire dont le côté transversal mesure 0,60 m et le côté longitudinal 0,30 m, voir la figure ci-dessous.



**Figure III.5:** Système Br.

**Note**

Finalement tous les sous-systèmes B seront multipliés par ce coefficient de majoration dynamique (**δ**) final qui vaut :

$$\delta = \max (\delta_{bc} ; \delta_{bt}) = \max (1.211 ; 1.160) \quad \longrightarrow \quad \boxed{\delta = 1.211}$$

### III.7 Surcharges Militaire

#### III.7.1 Convoi Mc 120

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

Charge totale .....1100 KN.

Longueur d'une chenille .....06,10 m.

Largeur d'une chenille. ....01,00 m.

Distance d'axe en axe des deux chenilles. ....03,30 m.

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

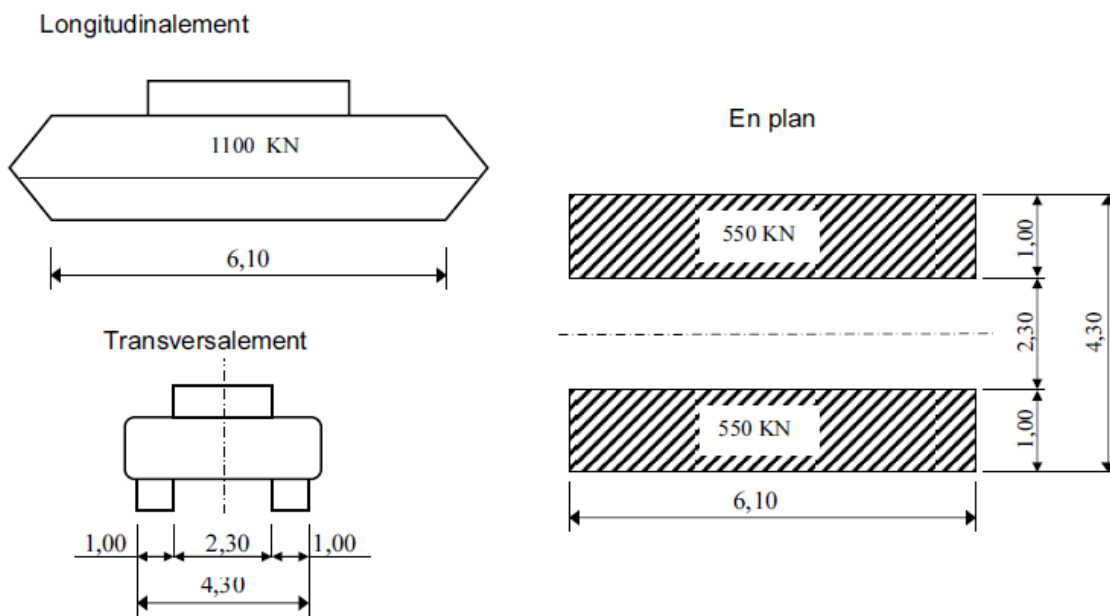


Figure III.6: Convoi Mc 120.

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

Les majorations dynamiques sont applicables aux charges militaires Mc120, le coefficient de majoration étant calculé selon la même formule que pour le système B. Les charges militaires sont supposées ne développer aucune réaction de freinage ni force centrifuge.

### 1. Calcul du coefficient dynamique

Pour une travée intermédiaire ou de rive ( $L = 25\text{m}$ ) :

$$G = 16.74 * L = 16.74 * 25 = 415.5 \text{ t}$$

$$S = n \times 110 = 1 \times 110 = 110 \text{ t}$$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2L} + \frac{0.6}{1+G/S} = 1.192$$

#### Note

Les surcharge du système Mc120 sont multipliées par le coefficient  $\delta = 1,192$ .

### III.7.2 Charge exceptionnelle (D240)

Le convoi type D240 comporte une remorque composée de trois éléments, chacun ayant quatre lignes à deux essieux, pour un poids total de 240 tonnes. Ce poids est supposé réparti uniformément sur un rectangle de 3,20 m de large et de 18,60 m de long au niveau de la chaussée, avec un poids par mètre linéaire égal à 12,9 t/m.

Ce type de convoi doit être considéré seul. Cette surcharge n'est pas majorée par un coefficient dynamique.

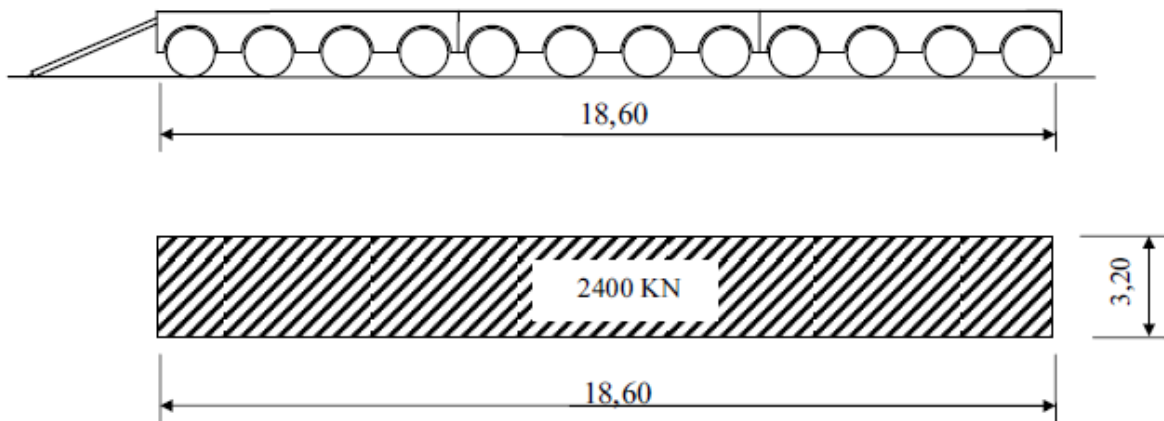


Figure III.7: Convoi type D240.

### III.8 Surcharges sur trottoirs

Nous appliquons sur les trottoirs une charge uniforme de 1.5KN/m<sup>2</sup> de façon à produire l'effet maximal envisagé.

Les deux trottoirs peuvent ne pas être chargés simultanément.

- **Un Trottoir chargé** :  $Q_1 = 0.15 \times 1,4 = 0.21 \text{ t/ml}$  ;  **$Q_1 = 0.15 \text{ t/m}^2$** .
- **Deux Trottoirs chargés** :  $Q_2 = 0.21 \times 2 = 0.42 \text{ t/ml}$  ;

### III.9 Surcharge sur garde-corps

Il convient de supposer qu'une poussée normale horizontale et uniforme ( $q$ ) peut s'exercer sur la main courante d'un garde-corps pour piétons. Cette poussée est donnée en fonction de la largeur du trottoir ( $b$ ), exprimée en mètres, par la formule suivante :

- $q = 0,50 (1 + b)$  kilo Newtons par mètre linéaire, avec maximum de 2.5 kN/m.

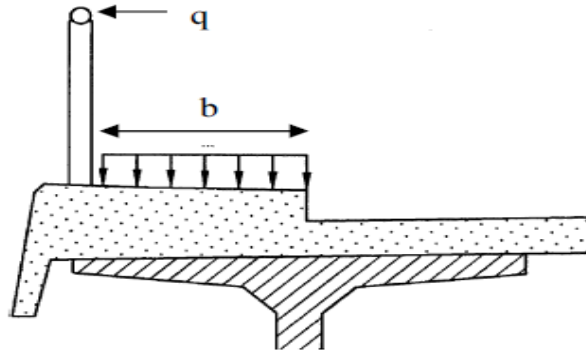


Figure III.8: Charges sur les gardes corps.

$$Q = 0.50 * (1 + b) = 1.2 \text{ KN/m} < 2.5 \text{ KN/m}$$

Avec :  $b \rightarrow$  la largeur du trottoir = 1.4m.

$$Q = 0.12 \text{ t/m}$$

### III.10 Efforts de freinage

Dans l'étude du tablier, les efforts de freinage ne sont pas à prendre en compte. Ces efforts concernent uniquement la résistance des appareils d'appui et la stabilité des appuis. Les charges de chaussée des systèmes A et Bc sont susceptibles de générer des réactions de freinage, lesquelles s'exercent à la surface de la chaussée, dans l'un ou l'autre sens de circulation. Dans les cas courants, la résultante de ces efforts peut être supposée centrée sur l'axe longitudinal de la chaussée.

Concernant la charge Bc, un seul camion est supposé freiner. L'effort de freinage le plus défavorable est  $F_{Bc} = 30 \text{ t tonnes}$ . Cette valeur n'est multipliée ni par le coefficient  $b_c$ , ni par le coefficient de majoration dynamique  $\delta_b$ . [12]

### III.11 Poids propre d'une culée

#### a) Tablier

Voir les résultats de la modélisation

#### b) Mur garde grève



- Hauteur :  $h = 1.7$  m.
- Épaisseur :  $e = 30$  cm
- Longueur : et celle du tablier = 10 m.

$$G_{g-g} = S * L * \delta_{\text{béton}} = (0.3 * 1.7) * 10 * 2.5 = 12.75 \text{ t}$$

**c) Mur de front**

- Hauteur :  $H = 5$  m
- Épaisseur :  $e = 1,50$  m.
- Longueur : et celle du tablier = 10m

$$G_f = S * L * \delta_{\text{béton}} = (1.5 * 5) * 10 * 2.5 = 187.5 \text{ t}$$

**d) Murs en retour**

- Hauteur :  $H = 6.7$ m
- Epaisseur :  $e = 0.50$ m
- Longueur :  $L = 2.5$ m

$$G_r = S * L * \delta_{\text{béton}} = [(2.5 * 6.7)] * 0.5 * 2 * 2.5 = 41.875 \text{ t}$$

**e) Corbeau arrière**

- Hauteur :  $H_1 = 0,90$  m.
- Hauteur :  $H_2 = 0,40$  m.
- Epaisseur :  $E_f = 0,30$  m.
- Longueur :  $L = 9$ m

$$G_c = S * L * \delta_{\text{béton}} = [(0.9 * 0.3) + (0.4 * 0.3) / 2] * 9 * 2.5 = 7.425 \text{ t}$$

**f) Murets cache**

- Hauteur :  $H = 1.3$  m.
- Épaisseur :  $e = 20$  cm
- Longueur :  $L = 1.20$  m.

$$G_{mc} = S * L * \delta_{\text{béton}} = (0.2 * 1.2) * 1.3 * 2 * 2.5 = 1.56 \text{ t}$$

**g) Dés d'appuis**

- Epaisseur :  $e = 19\text{cm}$
- Longueur :  $L = 60\text{ cm}$
- Largeur :  $l = 60\text{cm}$
- Nombre = 9

$$\mathbf{Gdp = S * L * \delta_{\text{béton}} = (0.6*0.6) * 0.19*9*2.5 = 1.539 \text{ t}}$$

**h) Dalle de transition**

- Longueur :  $L = 9\text{m}$
- Largeur :  $l = 5\text{m}$
- Epaisseur :  $e = 0.30\text{m}$

$$\mathbf{Gdt = S * L * \delta_{\text{béton}} = (5*0.30) * 9*2.5 = 33.75 \text{ t}}$$

**i) Buté transversale**

- Epaisseur :  $e = 36\text{cm}$
- Longueur :  $L = 60\text{ cm}$
- Largeur :  $l = 60\text{cm}$
- Nombre = 2

$$\mathbf{Gb = (0.6 * 0.6 * 0.36)*2*2.5 = 0.648 \text{ t}}$$

**III.12 Poids propre d'une pile**

**a) Chevêtre**

C'est l'élément sur lequel repose les poutres, il a une forme variable et assure la transmission des charges aux fûts.

- Longueur totale :  $L = 10\text{m}$
- Largeur totale :  $l = 2.10\text{m}$
- Hauteur totale :  $H = 2.5$

$$\mathbf{Gch = [2* (1*0.2*2.1) + (1.5*2.1*10) + (1*2.25*2.1) + (5.5*2.1*1)]* 2.5 = 121.54 \text{ t}}$$

**b) Fut**

La forme du fut est un rectangle de Hauteur  $H = 5.5\text{m}$  et de largeur  $l = 4.3\text{m}$  avec deux demi-cercles de diamètre  $1.20\text{m}$  à chaque extrémité.

$$G_{fu} = [(5.5-1.2) * 5.5 * 1.2] + (3.14 * 0.6^2 * 5.5) * 2.5 = \mathbf{86.5 \text{ t}}$$

**c) Dés d'appuis**

- Epaisseurs variable
- Longueur : L = 60 cm
- Largeur : l = 60cm
- Nombre = 18

$$G_{dp} = (0.6 * 0.6) (0.05 + 0.08 + 0.11 + 0.13 + 0.16 + 0.13 + 0.11 + 0.08 + 0.05) * 2 * 2.5 = \mathbf{1.62 \text{ t}}$$

**d) Buté transversale**

- Epaisseur : e = 37cm
- Longueur : L = 60 cm
- Largeur : l = 60cm
- Nombre = 4

$$G_b = (0.6 * 0.6 * 0.37) * 4 * 2.5 = \mathbf{1.332 \text{ t}}$$

### III.13 Combinaisons de charges

Les combinaisons sont obtenues en considérant une action prépondérante accompagnée d'actions concomitantes. Un coefficient de majoration est appliqué à chaque action en fonction de sa nature, qu'elle soit prépondérante ou concomitante.

Les coefficients de majoration sont mentionnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.4 :** Coefficients de majoration dans les Combinaisons de charges

Actions	ELU	ELS
<b>Poids propre (G)</b>	1,35	1
<b>Surcharge A (L)</b>	1,6	1,2
<b>Système BC</b>	1,6	1,2
<b>M<sub>C120</sub></b>	1,5	1
<b>D<sub>240</sub></b>	1,5	1
<b>Gradient thermique (ΔT)</b>	0	0,5
<b>Vent (W)</b>	1,5	0
<b>Surcharge sur les Trottoirs (ST)</b>	1,6	1,2

**Tableau III.5 :** Combinaisons d’actions à ELU et ELS.

Action prépondérante	Combinaisons	Numéro de la combinaison
À L’ELU	$1,35G + 1,6(A(I) + ST)$	1
	$1,35G + 1,6(BC + ST)$	2
	$1,35G + 1,5M_{C120}$	3
	$1,35G + 1,5D_{240}$	4
À L’ELS	$G + 1,2(A(I) + ST)$	5
	$G + 1,2(BC + ST)$	6
	$G + MC_{120}$	7
	$G + D_{240}$	8

### III.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les charges permanentes et variables, ainsi que les différentes combinaisons d'actions. Ces analyses sont cruciales pour assurer la sécurité et la stabilité de l'ouvrage. En tenant compte de ces évaluations, nous pouvons mieux comprendre les contraintes auxquelles le pont sera soumis et optimiser sa conception pour garantir sa durabilité et sa résistance aux diverses sollicitations.

# CHAPITRE

IV  
IX

## Chapitre IV : Modélisation du tablier de pont

### IV.1 Introduction

La modélisation vise à développer un modèle qui puisse approximer le comportement de la structure sous différentes conditions. Cette approche utilise la méthode des éléments finis (MEF), qui intègre trois disciplines clés en sciences de l'ingénieur : la mécanique des milieux continus, la rhéologie des matériaux, et le calcul numérique.

ROBOT (RSA) est un logiciel dédié au calcul et à l'optimisation des structures utilisant la MEF pour examiner des structures planes et spatiales telles que :

Treillis, portiques, structures mixtes, grillages de poutres, plaques, coques, contraintes planes, déformations planes, éléments axisymétriques et éléments volumiques.

Les utilisateurs de ROBOT (RSA) dans les domaines des Ouvrages d'Art et du Génie Civil bénéficient de sa capacité à créer des modèles mixtes avec des éléments de barres et/ou coques, et ils peuvent aussi utiliser des éléments volumiques. Le logiciel permet l'étude de structures complexes avec des fonctionnalités telles que les charges roulantes, les phases de construction et le calcul des sections en acier théoriques.

ROBOT (RSA) facilite la définition de charges roulantes, représentant la charge d'un convoi à travers une combinaison de forces diverses (forces ponctuelles, charges linéaires et charges surfaciques). Le convoi consiste en un ensemble de forces ayant des directions, des valeurs et des positions spécifiques, se déplaçant d'une position à l'autre à chaque étape. Ainsi, le cas des charges roulantes est traité comme une série de cas de charges statiques, un pour chaque position du convoi.

- ROBOT (RSA) est capable de calculer des structures comportant un nombre illimité de barres et de nœuds. Les seules limites sont liées aux capacités de l'ordinateur utilisé pour les calculs (RAM et espace disque disponibles).
- Le logiciel permet de réaliser des analyses statiques et dynamiques, ainsi que des analyses linéaires ou non linéaires.
- Adapté aux constructions en acier, en bois, en béton armé ou mixtes, ROBOT (RSA) inclut des modules pour l'assemblage, le ferrailage, la vérification et le dimensionnement conformément aux diverses normes nationales. [13]

### IV.2 Modélisation

Le logiciel permet d'effectuer les étapes de modélisation, telles que la définition de la géométrie, des conditions aux limites et des chargements de la structure, de manière totalement graphique, numérique, ou combinée, grâce à une multitude d'outils disponibles. Une structure peut ainsi être composée de sous-schémas (portiques, treillis, dalles, voiles), chacun défini dans sa propre interface graphique, puis assemblés en un schéma final de calcul. La compatibilité des connexions se réalise automatiquement.

Les éléments finis, intégrés à une des interfaces graphiques de génération de schéma (treillis, portique, trame de poutre, dalle, voile, coque, etc.), sont directement paramétrables.

Étant donné que l'ouvrage isostatique comporte treize travées indépendantes, nous étudierons une seule travée, constituée d'une dalle de 25 cm d'épaisseur supportée par cinq poutres. Les poutres, traitées comme des éléments barre, reposent sur des appuis simples, tandis que la dalle est considérée comme un élément de panneau.

### VI.3 Type 1 : pont à poutre en T

Dans notre cas, la modélisation est effectuée comme suit :

La section de la poutre est modélisée par ses dimensions réelles. Elle est définie par le logiciel Auto CAD (format DXF), puis introduite dans le logiciel Robot.

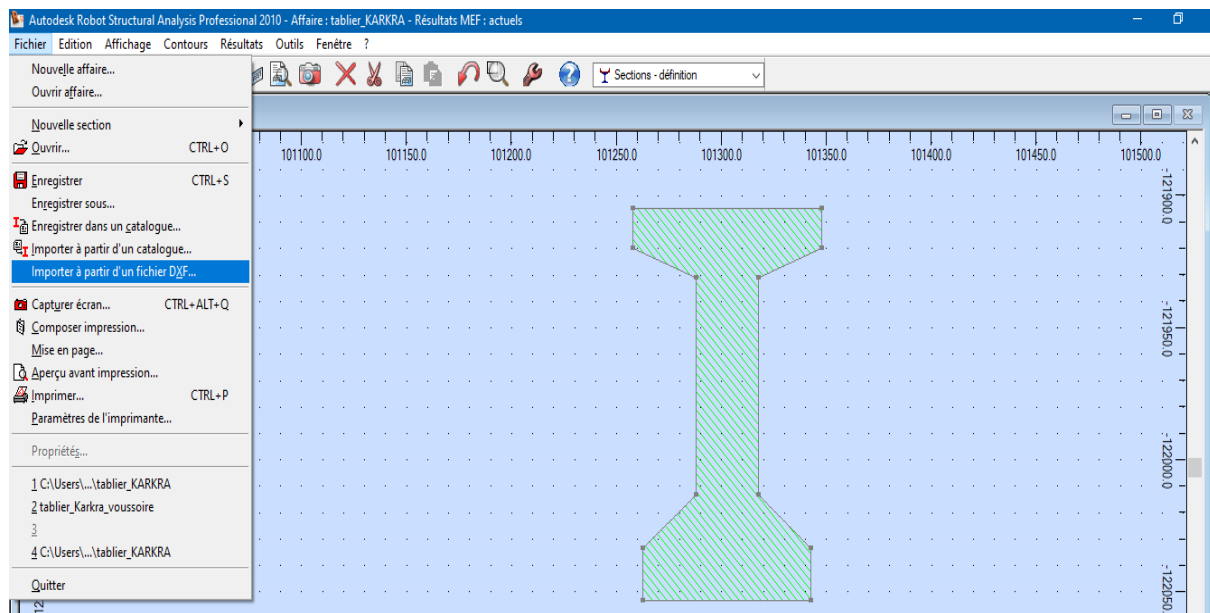


Figure IV.1 : Définition de la section de la poutre.

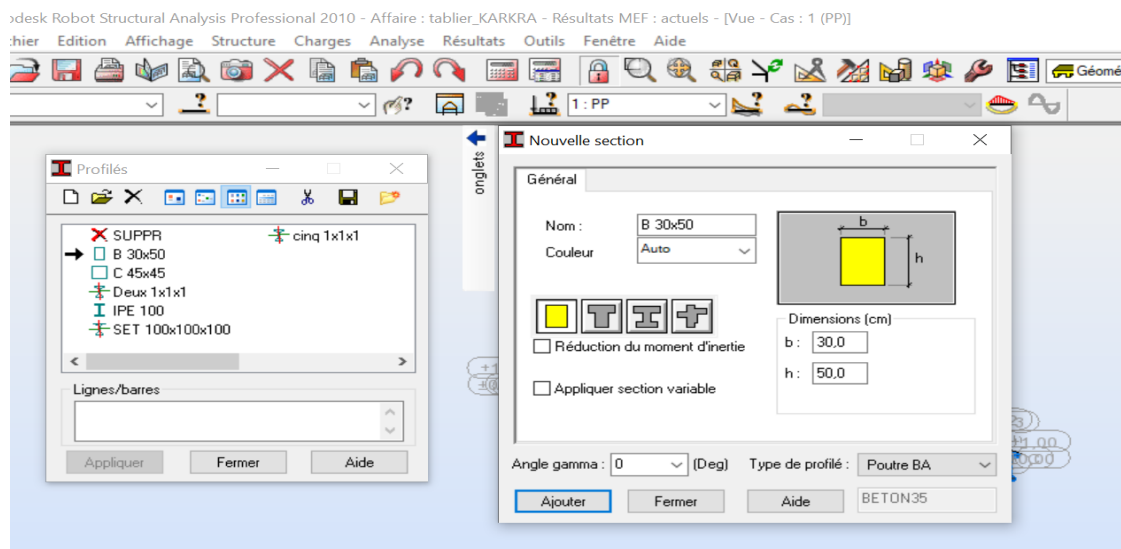


Figure IV.2 : Modélisation de la poutre.

#### IV.4 Modélisation de la dalle

La dalle est modélisée en élément panneau à 4 bords.

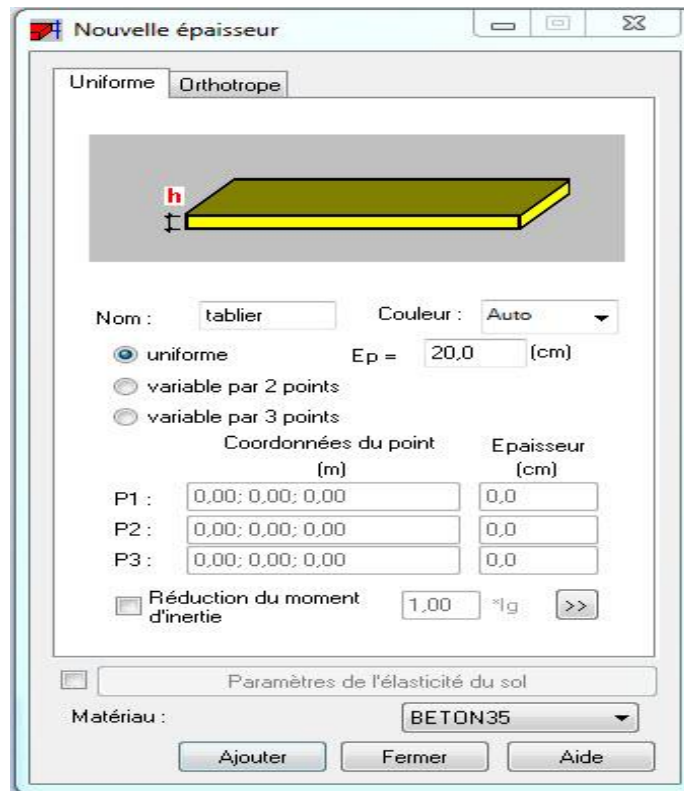


Figure IV.3 : Modélisation de la dalle.

#### IV.5 Modélisation du tablier

Le tablier est modélisé à l'aide du logiciel ROBOT par des poutres et une dalle supportée par des appuis.

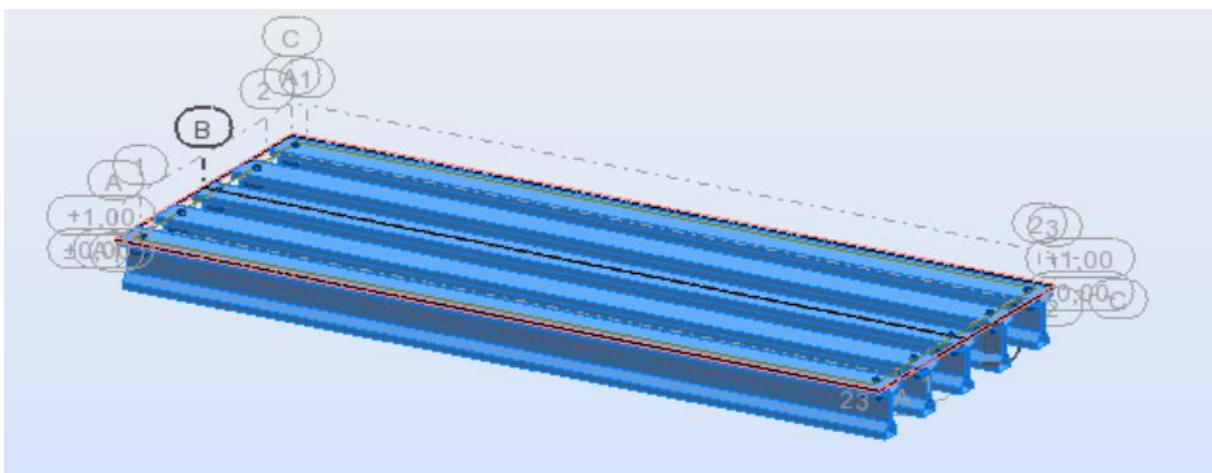


Figure IV.4 : Modélisation du tablier.



## IV.6 Définition des différents cas de charges

Les surcharges sont disposées suivant le règlement Fascicule 61 titre II, de façon à obtenir des sollicitations maximales.

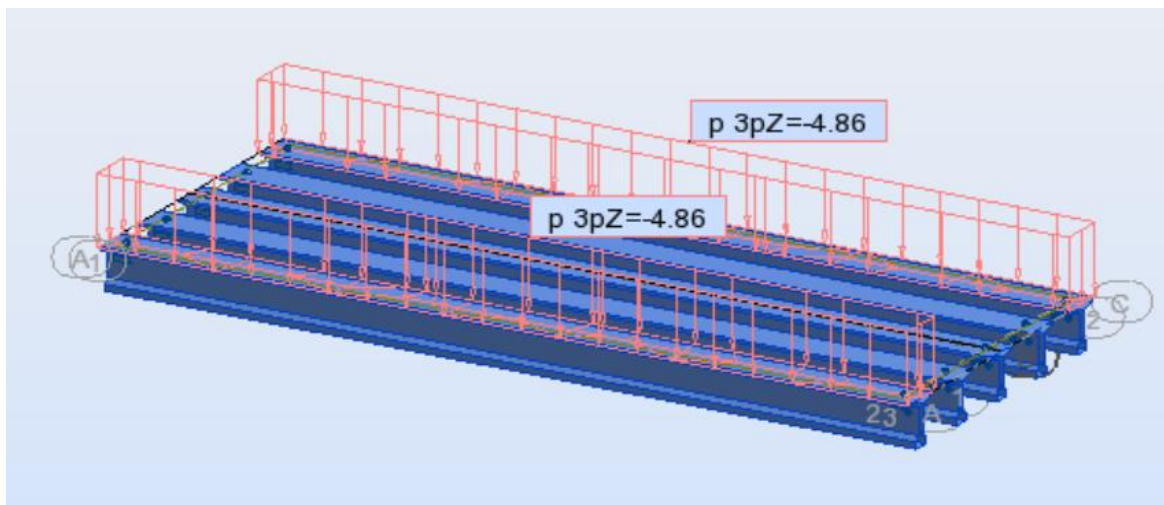
### IV.6.1 Trottoir

$$Gt = e * \gamma_b \quad (4.1)$$

Avec :  $e$  : épaisseur du trottoir.

$\gamma_b$  : Le poids volumique du béton armé =  $2.5 \text{ t/m}^3$ .

Donc «  $Gt = 0.486 \text{ t/m}^2$  ».



Figures IV.5 : Représentation de la charge de trottoir.

### IV.6.2 Revêtement

$$Grev = e * \gamma_{BB} \quad (4.2)$$

On a une couche de revêtement en béton bitumineux (BB) de 7cm d'épaisseur et  $\gamma_{BB} = 2.4 \text{ t/m}^3$ .

Donc «  $Grev = 0.07 * 2.4 = 0.168 \text{ t/m}^2$  ».

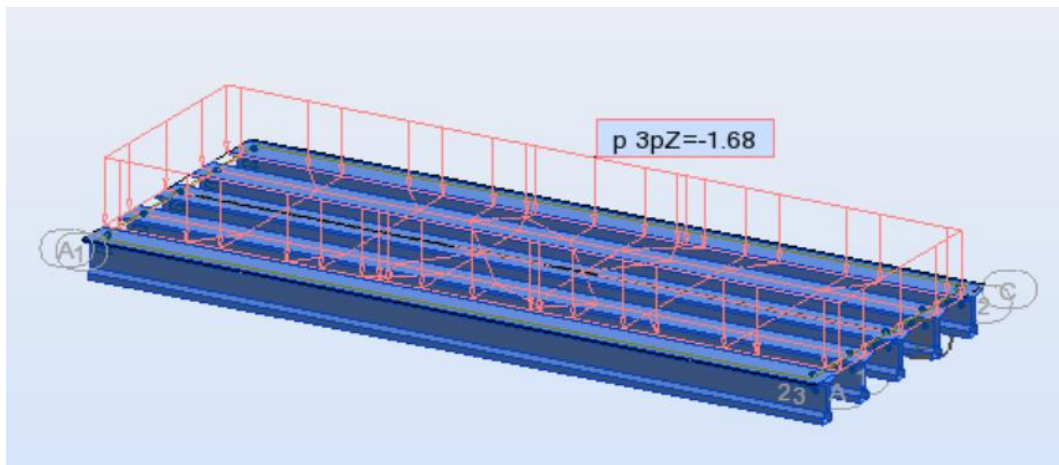


Figure IV.6 : Représentation de la charge de revêtement.

### IV.6.3 Garde-corps

Le poids d'un garde-corps «  $G_{gc} = 0.3 \text{ t/ml}$  ».

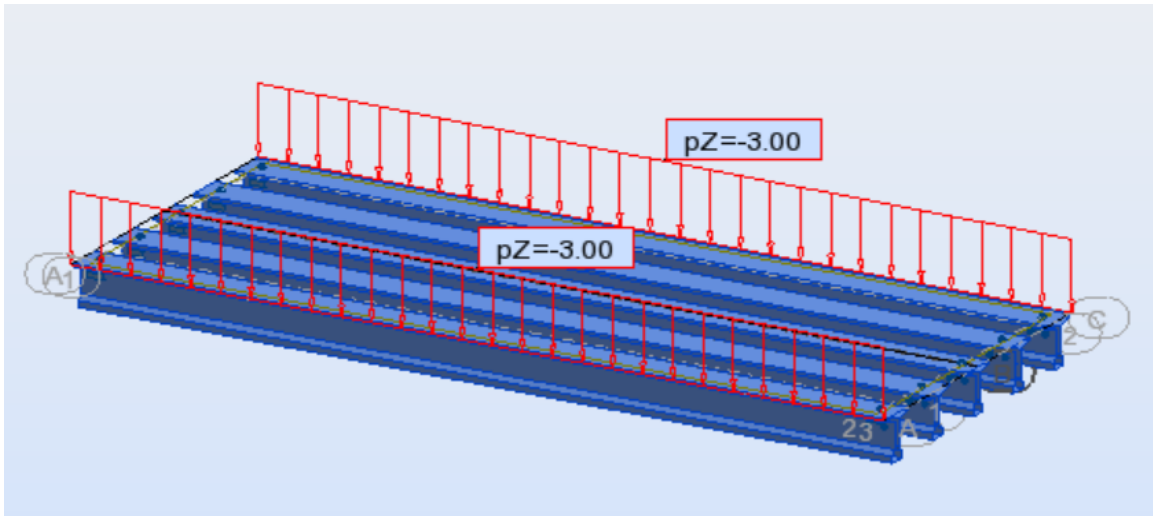


Figure IV.7 : Représentation de la charge de garde-corps.

### IV.6.4 Glissière

Le poids d'une glissière est «  $G_{gl} = 0.06 \text{ t/ml}$  ».

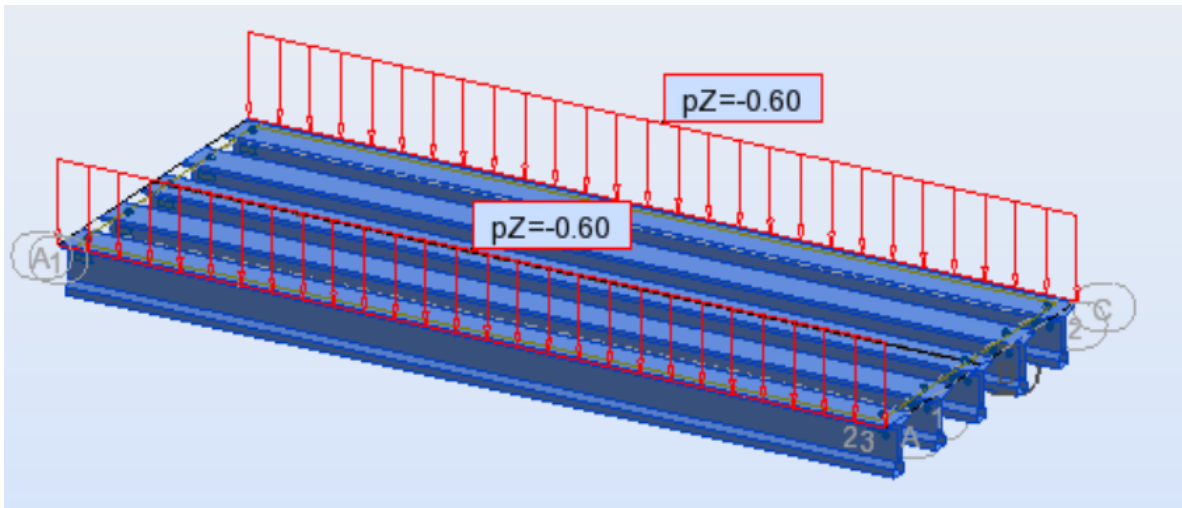


Figure IV.8 : Représentation de la charge de Glissière.

### IV.6.5 Corniche

$$G_c = S * \gamma_b \quad (4.3)$$

Avec:  $S$  : La surface de la corniche.

$\Gamma_b$ : Le poids volumique du béton armée =  $2.5 \text{ t/m}^3$ .

Donc «  $G_c = 0.4 \text{ t/ml}$  ».

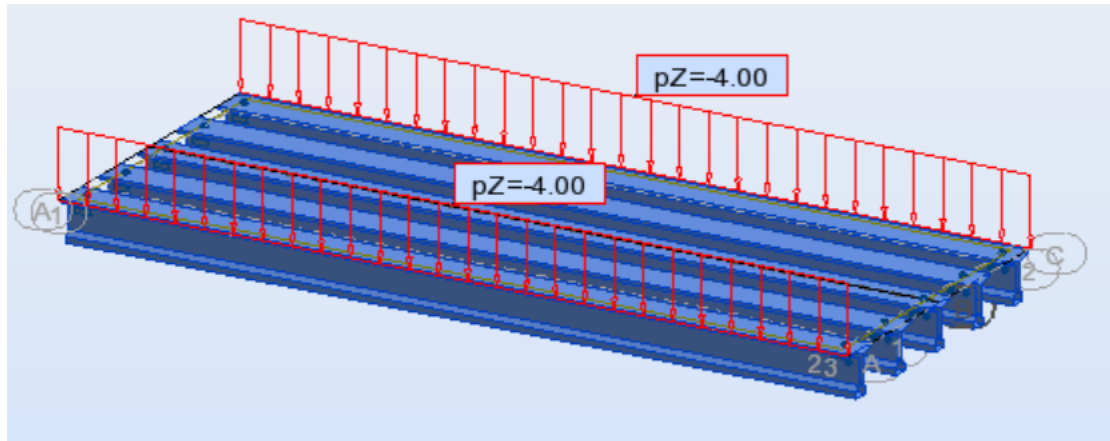


Figure IV.9 : Représentation de la charge de La corniche.

#### IV.6.6 L'étanchéité

$$Ge = e * \gamma \quad (4.4)$$

Avec : e : Epaisseur = 0.01m.

$\gamma$  : Le poids volumique d'asphalte coulé à froid =  $2.4 \text{ t} / \text{m}^3$ .

Donc «  $Ge = 0.024 \text{ t/m}^2$  ».

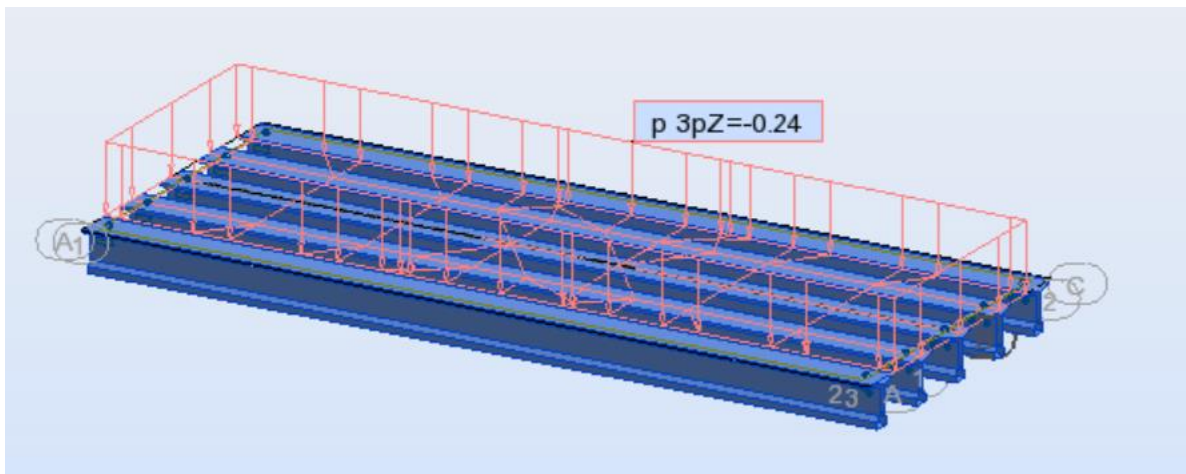


Figure IV.10 : Représentation de la charge de l'étanchéité.

#### IV.6.7 Système de charge A(l)

$$A(l) = \left[ 230 + \frac{36000}{L + 12} \right]$$

$$A(L) = 1.2 \text{ t/m}^2.$$

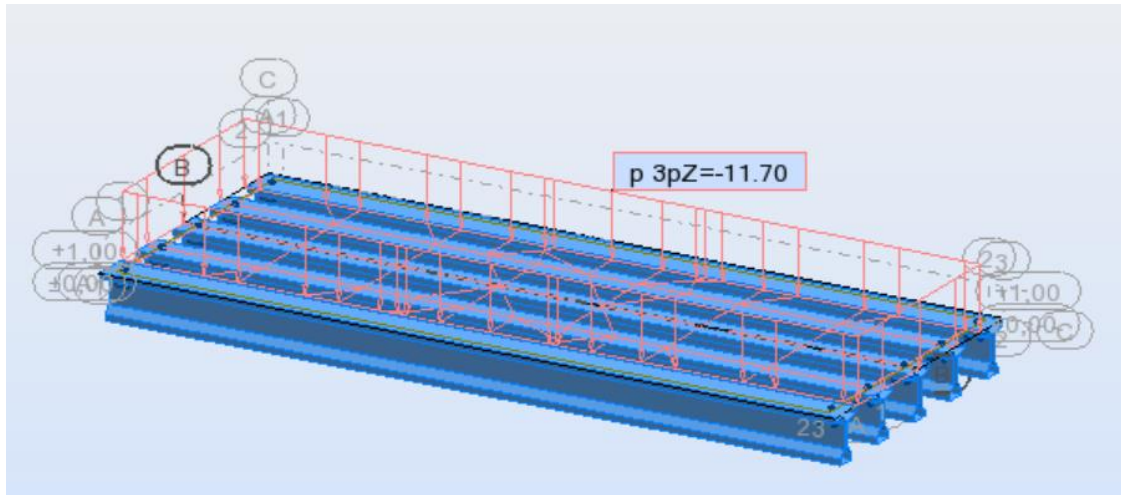


Figure IV.11 : Représentation du système de charge A(l).

#### IV.6.8 Surcharge sur trottoirs

$$Q = 0.15t/m^2.$$

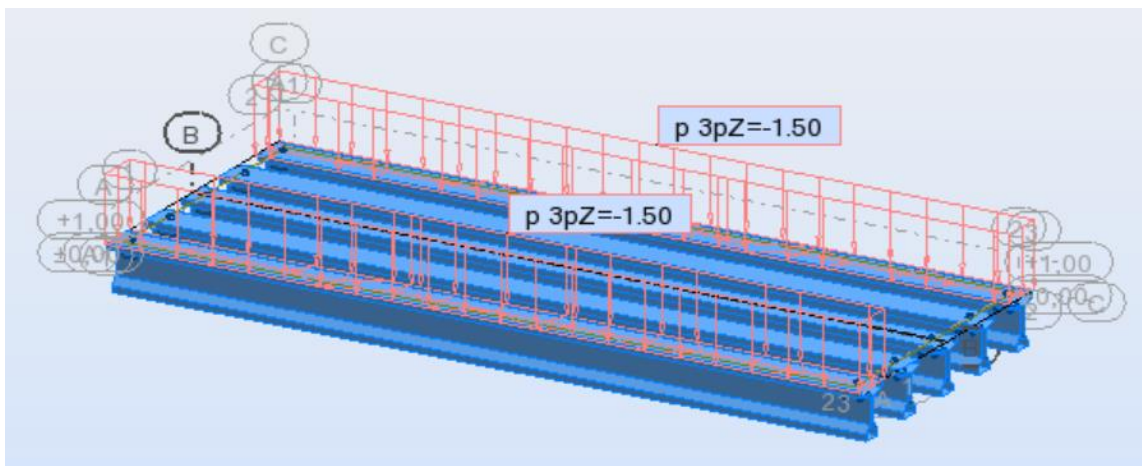


Figure IV.12 : Représentation de la surcharge sur trottoirs.

#### IV.6.9 Système de charge Bc

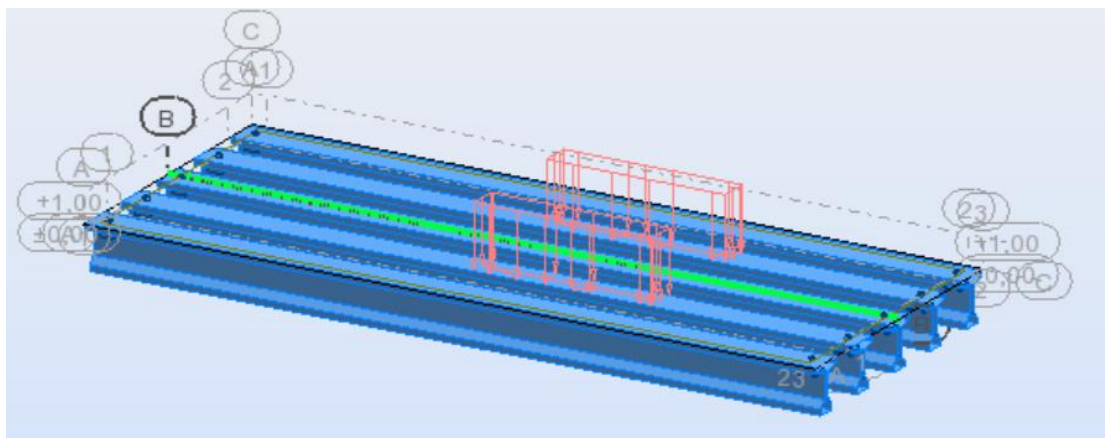


Figure IV.13 : Représentation du système Bc.



#### IV.6.10 Système de charge MC120

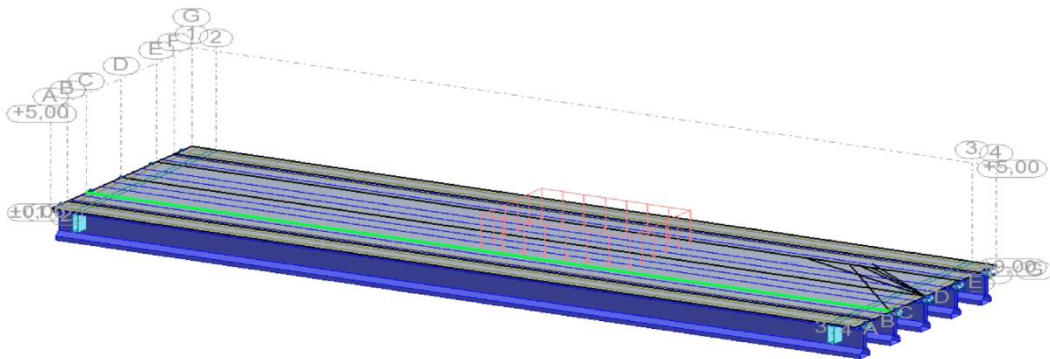


Figure IV.14 : Système MC 120.

#### IV.6.11 Système de charge D240

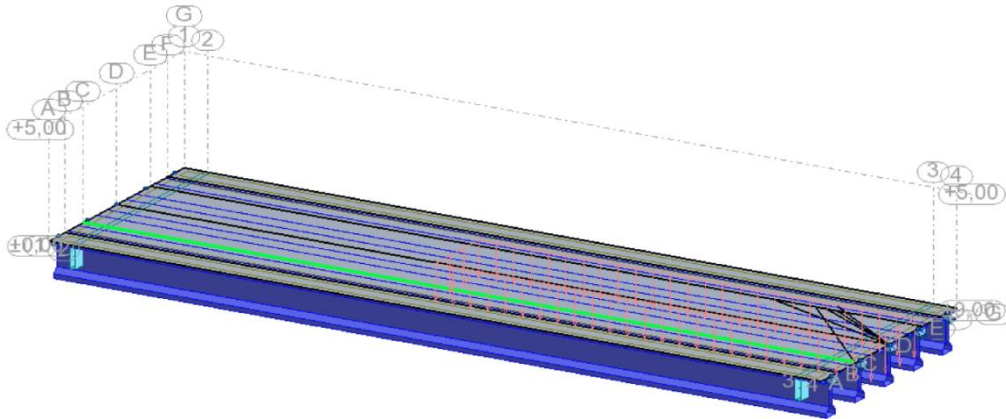


Figure IV.15 : Système D240.

### IV.7 Caractéristiques géométriques de la poutre

#### - La section brute

Correspond au béton seul. D'après les dimensions de coffrage figurant sur les plans sans tenir compte de la section des armatures. Elle est utilisée pour le calcul de :

- ✓ Poids propre de l'élément.
- ✓ Rigidités relatives des différents éléments de la structure.
- ✓ Déformations pour les parties d'ouvrages.

#### - La section nette

Obtenu par la soustraction de la section brute, des vides longitudinaux et transversaux comme les trous et les conduites.

**Notations :**

( $\Delta$ ) : l'axe pris au niveau de la fibre inférieur extrême.

$I_G$  : Moment d'inertie par apport au centre de gravité.

$I_\Delta$  : Moment d'inertie par apport à l'axe( $\Delta$ ).

$S_\Delta$  : Moment statique par apport à l'axe ( $\Delta$ ).

$I_0 = \frac{b \cdot h^3}{12}$  : Pour une section rectangulaire

$I_0 = \frac{b \cdot h^3}{36}$  : Pour une section triangulaire.

$B$  : La section transversale.

$v$  : Distance du centre de gravité a la fibre supérieure.

$v'$  : Distance du centre de gravite a la fibre inférieure.

$\rho$  : Rendement géométrique de la poutre.

$r$  : Rayon de giration de la section.

$Z_i$  : position du C.D.G de la section (i) par rapport à l'axe.

$$S_\Delta = \sum B_i \cdot Z_i$$

$$v' = \frac{S_\Delta}{B}$$

$$V = H_t - v'$$

$$I_\Delta = \sum I_0 + B_i \cdot Z_i^2$$

$$I_G = I_\Delta - S_\Delta \cdot v'$$

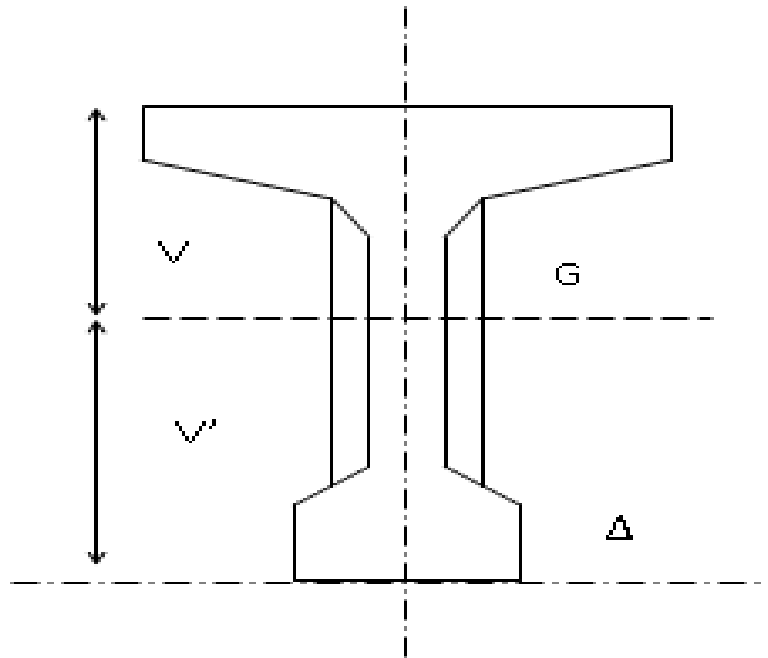
$$\rho = \frac{I_G}{B \cdot v_i \cdot v_s}$$

$$r = \sqrt{\frac{I_G}{B}}$$

$$B \text{ (nette)} = B_{\text{(brute)}} - 5\% B_{\text{(brute)}}$$

$$S/\Delta \text{ (nette)} = S/\Delta_{\text{(brute)}} - 8\% S/\Delta_{\text{(brute)}}$$

$$I/\Delta \text{ (nette)} = I/\Delta_{\text{(brute)}} - 10\% I/\Delta_{\text{(brute)}} [5]$$



FigureIV.16 : Schéma des caractéristiques de la poutre.

#### IV.8 Méthode de calcul des contraintes

$$\sigma_f = \frac{M.V}{I_G} \quad (4.5)$$

$$\tau = \frac{T}{S} \quad (4.6)$$

Avec :

**M** : le moment d'inertie.

**V** : Distance du centre de gravité à la fibre supérieure.

**I<sub>G</sub>** : Moment d'inertie par apport au centre de gravité.

**T** : l'effort tranchant.

**S** : la section.

- La contrainte de flexion admissible  $\overline{\sigma}_f$  à l'ELU = **19,83MPa.**
- La contrainte de flexion admissible  $\overline{\sigma}_f$  à l'ELS = **17,5MPa.**
- La contrainte de cisaillement admissible  $\overline{\tau}$  à l'ELU = **3,5MPa.**

#### Remarque

Pour la justification des poutres soumises à des contraintes tangentes, les règles BAEL n'envisagent que la vérification à l'état limite ultime.

## IV.9 Résultats de la modélisation

### IV.9.1 Diagrammes des contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans la poutre médiane sous la combinaison maximale



Figure IV.17: Représentation du diagramme de  $\sigma_f$  dans une section à l'ELU.

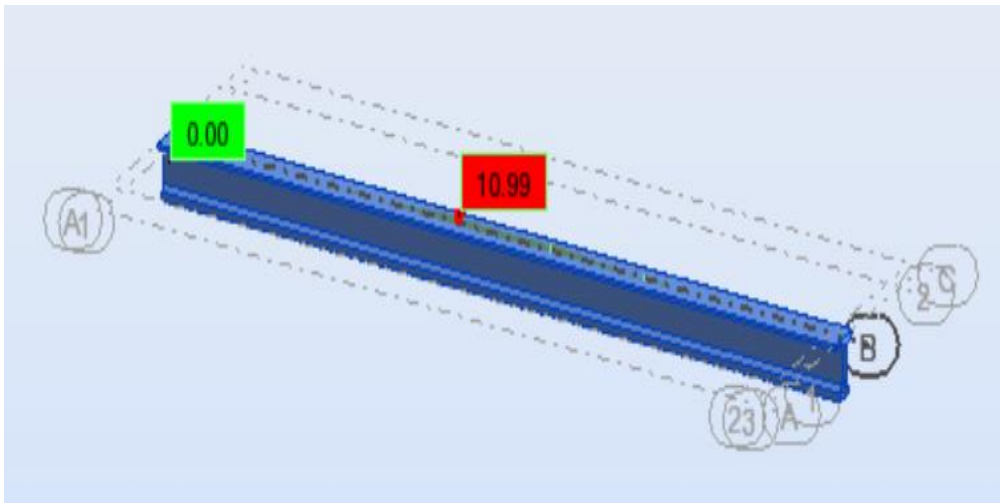
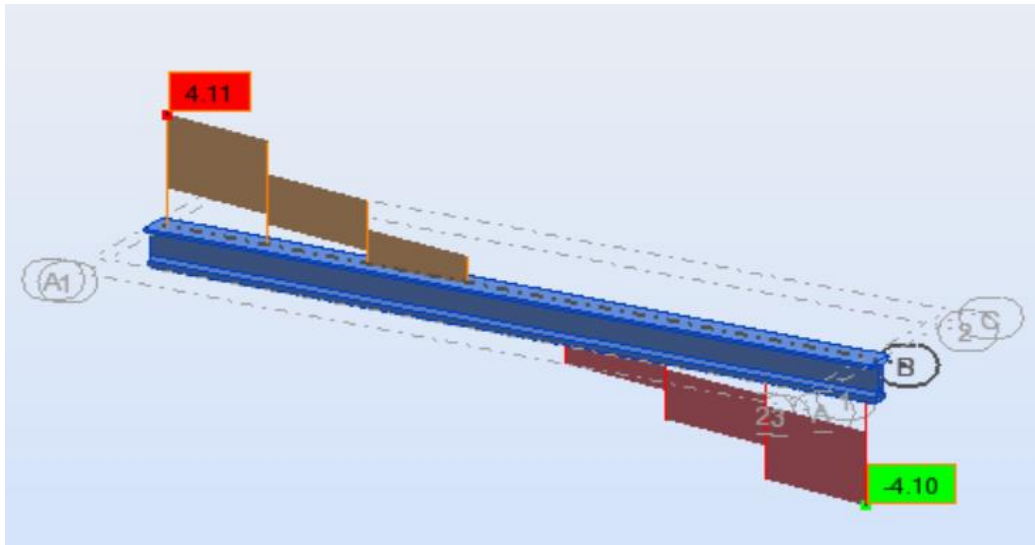


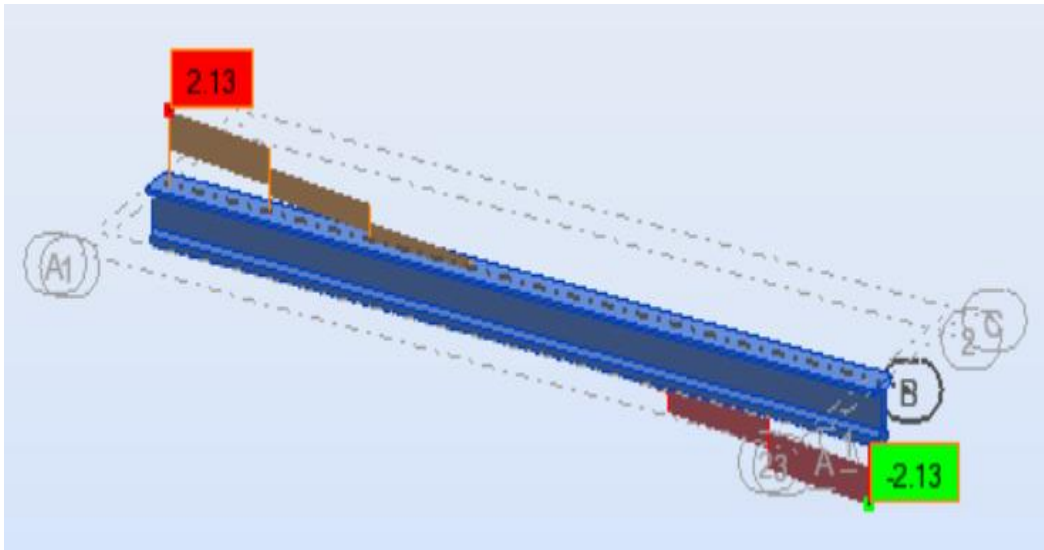
Figure IV.18: Représentation du diagramme de  $\sigma_f$  dans une section à l'ELS.

### IV.9.2 Les diagrammes des contraintes de cisaillement maximales $\tau$ dans la poutre médiane sous la combinaison maximale





Figures IV.19 : Représentation du diagramme de  $\tau$  dans une section à l'ELU.



Figures IV.20 : Représentation du diagramme de  $\tau$  dans une section à l'ELS.

### IV.9.3 Les contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans chaque section sous la combinaison maximale

Tableau IV.1 : Les contraintes maximales dans la poutre médiane sous la combinaison maximale

La Combinaison maximale	Contrainte de flexion en travée (MPa)		Contrainte de cisaillement sur appui (MPa)
	ELU	ELS	ELU
1,35G+1,6(AL+BC)			
<b>Section 34</b>	20.77	10.99	4.11

### IV.10 Type 2 : pont à tablier en caisson (voussoir)

Dans notre cas, la modélisation est effectuée comme suit :

La section de la poutre est modélisée par ses dimensions réelles. Elle est définie par le logiciel Auto CAD (format DXF), puis introduite dans le logiciel Robot.

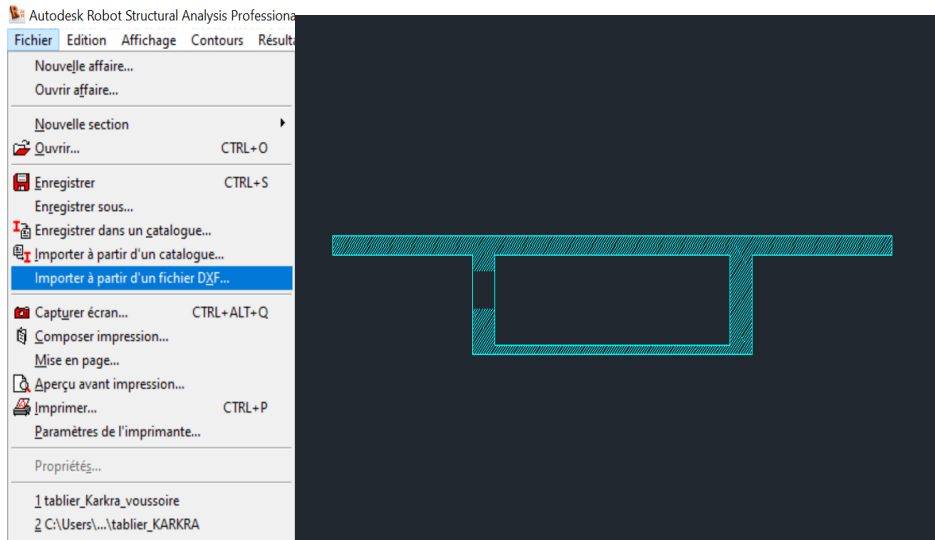


Figure IV.21 : Définition de la section du voussoir.

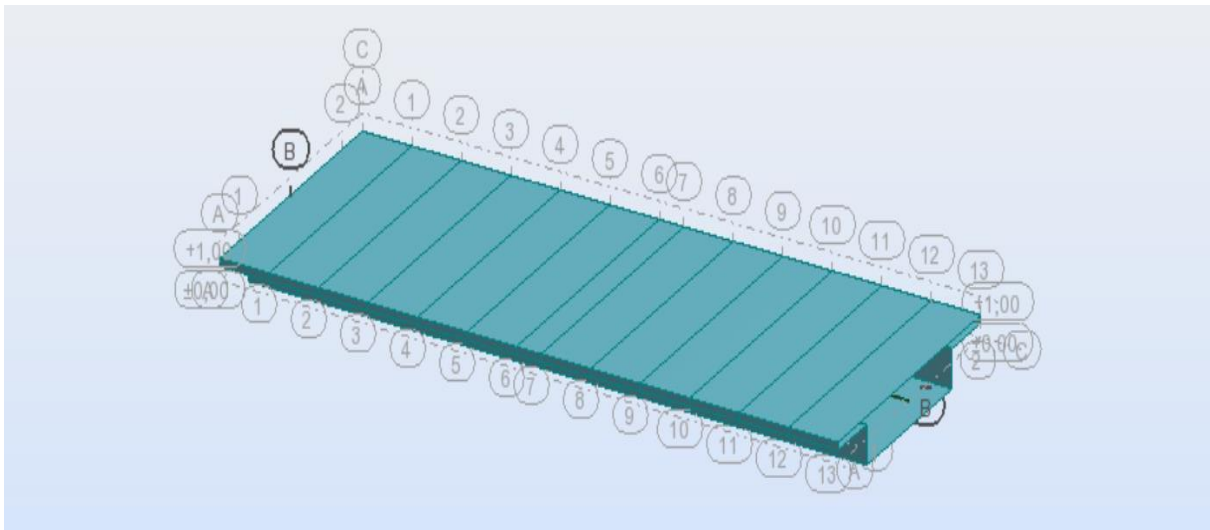


Figure IV.22 : Modélisation du tablier.

### IV.11 Résultats de la modélisation

#### IV.11.1 Les diagrammes des contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ sous la combinaison maximale

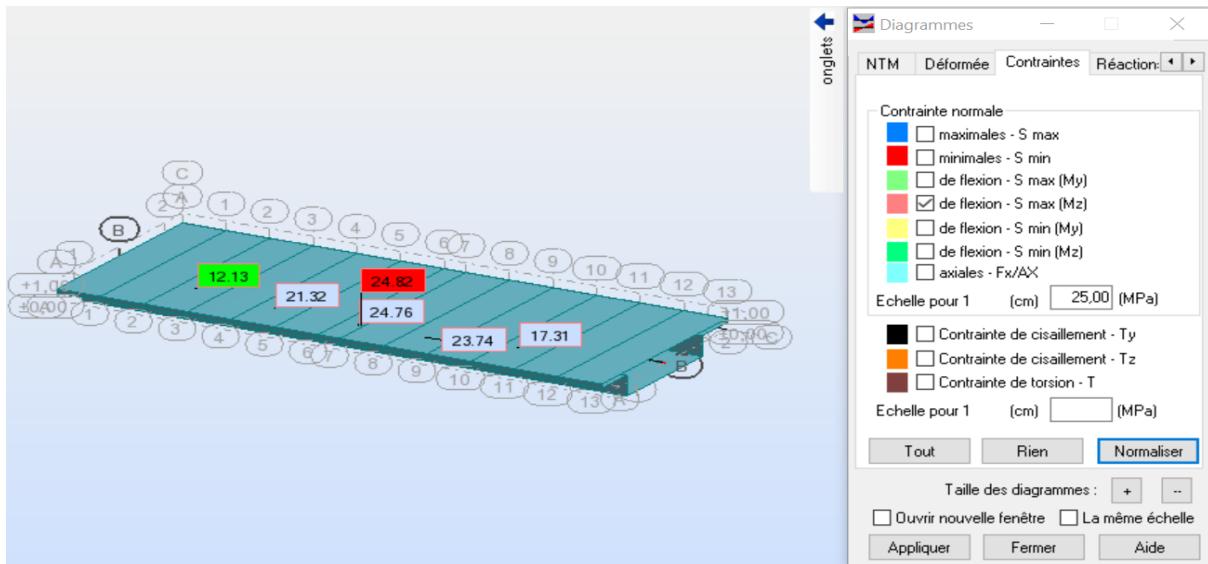


Figure IV.23: Représentation du diagramme de  $\sigma_f$  dans une section à l'ELU.

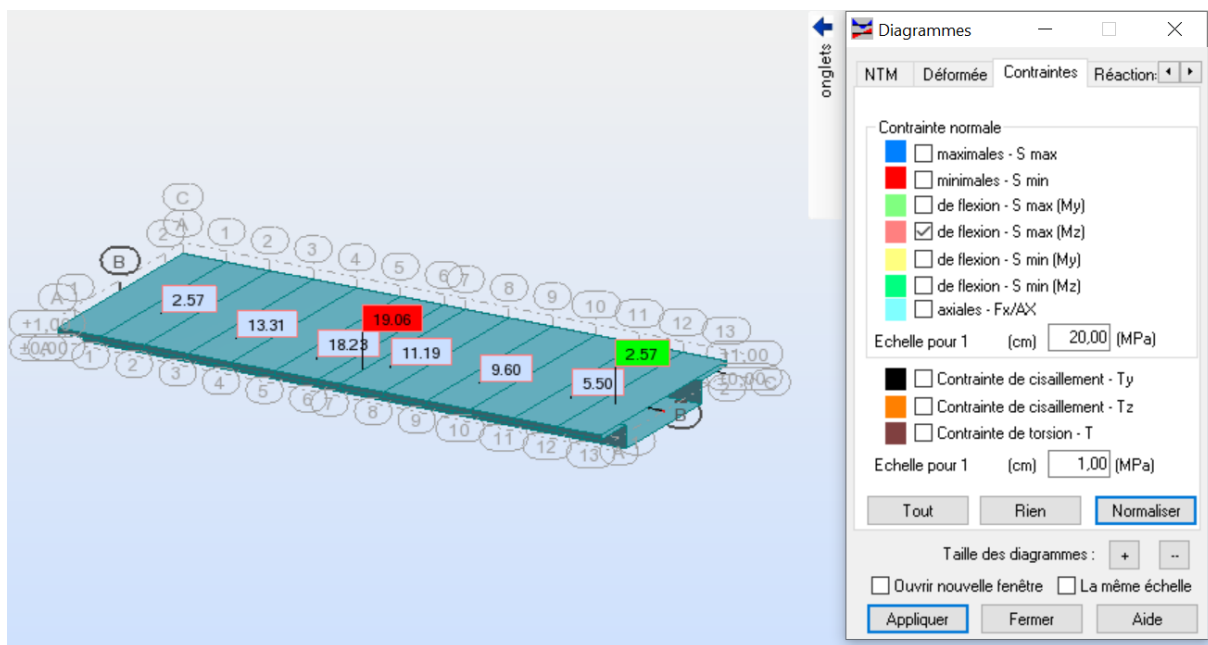


Figure IV.24: Représentation du diagramme de  $\sigma_f$  dans une section à l'ELS.

#### IV.11.2 Les contraintes de flexion maximales $\sigma_f$ dans chaque section sous la combinaison maximale

**Tableau IV.2** : Les contraintes de flexion maximales  $\sigma_f$  dans chaque section sous la combinaison maximale

La Combinaison maximale 1,35G+1,6(AL+BC)	Contrainte de flexion en travée (MPa)	
	ELU	ELS
<b>Section 23</b>	34.32	24.56

# CHAPITRE

X

## Chapitre V : Les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses

### V.1 Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$ . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$y = f(x_i)$$

Avec les plans d'expériences, on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles : celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Le succès de la démarche originale des plans d'expériences réside dans la possibilité d'aboutir aux résultats escomptés et d'interpréter ces résultats avec un effort minimal sur le plan expérimental. [14]

### V.2 Historique des plans d'expériences

- Dans le secteur Industriel, technique restée confidentielle jusqu'après la deuxième guerre mondiale ; développement au Japon entre les années 1950 et 1960 grâce notamment à TAGUCHI ; ses travaux sont diffusés aux Etats Unis et appliqués à grande échelle vers les années 1970.
- En Europe, les grandes Entreprises industrielles utilisent les plans expérimentaux à partir des années 1980. Actuellement cette méthode d'expérimentation est utilisée par l'ensemble des Industriels, petits et grands.  
La méthode est maintenant considérée comme un outil de la qualité, indispensable
- Au stade de la conception des produits pour permettre de fixer les paramètres de développement du produit de façon optimale.
- Au cours de la production, comme complément indispensable des méthodes de maîtrise des procédés.

### V.3 But et domaine d'utilisation

Les plans d'expériences sont utilisés dans les études industrielles en recherche développement. Ils interviennent dans de nombreux domaines industriels. On peut notamment citer :

- Industries chimiques, pétrochimiques et pharmaceutiques
- Industries mécaniques et automobiles
- Industries métallurgiques

Leur utilisation vise aux buts suivants :

- Détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé
- Optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un appareil de mesure
- Prédiction par modélisation du comportement d'un procédé

Les plans d'expériences s'inscrivent dans une démarche générale d'amélioration de la qualité.

### V.4 Définition d'un plan d'expérience

Un plan d'expérience est une méthode pour planifier ou organiser les expériences scientifiques et industrielles dans le but de retirer l'information correspondante à l'objectif fixé préalablement. Leur but est d'obtenir un maximum d'informations avec un minimum d'expérimentations par rapport à l'objectif que l'on s'est fixé. Les plans d'expériences sont appliqués dans différents domaines des sciences. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

D'une manière générale, un plan d'expérience consiste à évidence et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables :

- **Le facteur**
- **La réponse**

### V.5 Conditions d'application des plans d'expériences

Les plans d'expériences sont un instrument bien adapté à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps et de l'argent, tout en parvenant à un meilleur résultat. Leurs applications s'imposent chaque fois que l'on veut concilier au mieux de nombreuses exigences différentes.

Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche : la planification des essais, la qualité de l'expérience, ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple, enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

### V.5.1 Choix de la méthode d'expérimentation

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

### V.5.2 Vocabulaire de base des plans d'expériences

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs. Parmi les facteurs on distinguera :

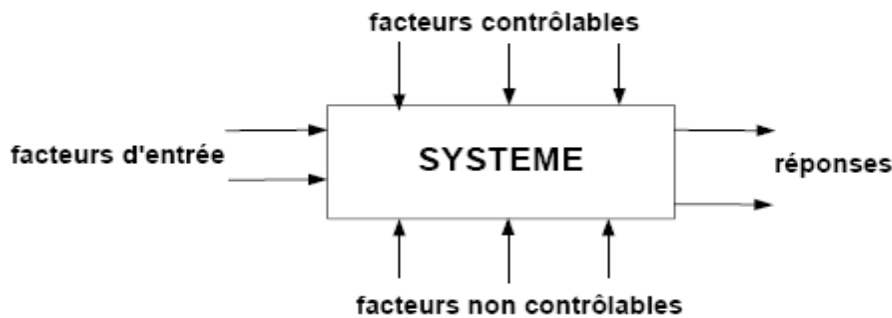


Figure V.1: Schématisation d'un processus expérimental.

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau ...)
- Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- Les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température, rendement ...)

### V.5.3 Facteur

On désigne sous le nom de facteur les paramètres susceptibles d'influencer les réponses et que l'on peut faire varier, Les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les **facteurs d'entrée** et ils existent deux types :

#### V.5.3.1 Facteur quantitatif

Un facteur quantitatif est un facteur mesurable, souvent à variation continue ou discrète.



- **Variable continue** : variable numérique qui peut prendre un nombre infini de valeurs réelles : exemple : le dosage en ciment le pourcentage de super plastifiant.
- **Variable discrète** : variable numérique qui prend uniquement un nombre limité de valeur réelle : exemple classe de ciment.

### V.5.3.2 Facteur qualitatif

Un facteur qualitatif est un facteur non mesurable, on distingue des variables qualitatives ordinales et nominales.

- **Variable ordinale** : sont des variables qui contiennent un ordre.
- **Variable nominale** : sont des variables qui correspondent à des noms, il n'y a aucun ordre précis.

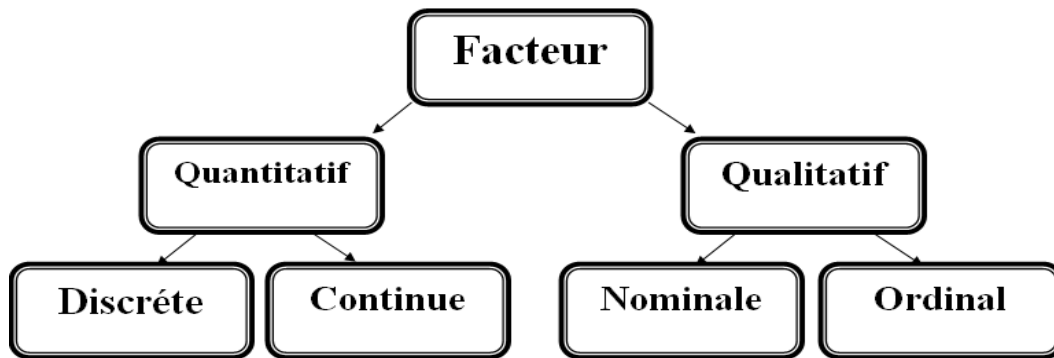


Figure V. 2 : Les différents types de facteur.

#### a) Niveau d'un facteur

Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au moins deux niveaux : un niveau supérieur (haut) et un niveau inférieur (bas) (figure V.3) pour les facteurs quantitatifs la valeur est algébrique, donc classé numériquement. Pour les facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables. [14]

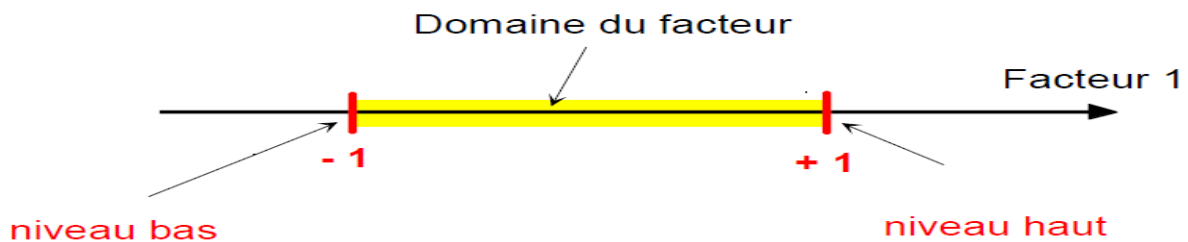
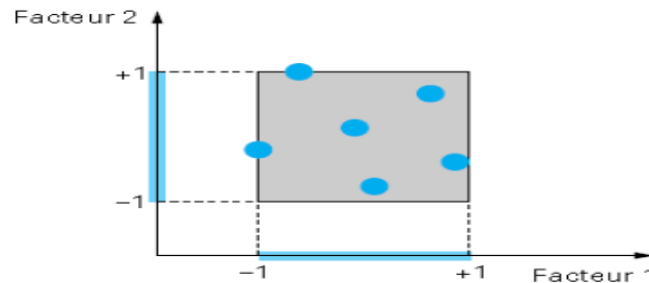


Figure V.3 : Le domaine et les niveaux d'un facteur.

La réunion des domaines de chaque facteur définit le « *domaine d'étude* ». Ce domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental retenu par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire un ensemble d'expériences bien définies, est représentée par une série de points disposés dans le domaine d'étude (figure V.4). Cette manière de représenter une expérimentation par un ensemble de points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.



**Figure V.4 :** La disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude.

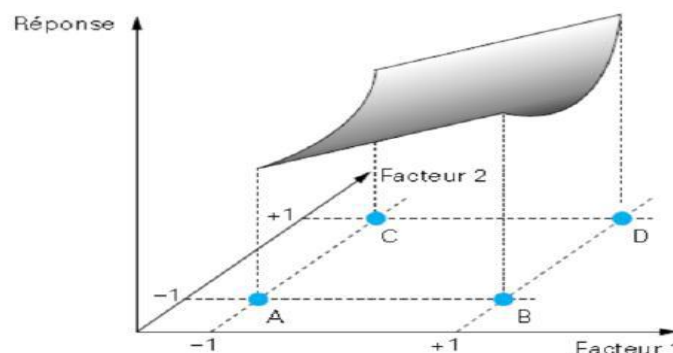
À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. L'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée « *surface de réponse* ».

#### b) Valeurs centrées réduites ou codées

L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences quelque soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (- 1) alors que le niveau haut est codé (+ 1).

### III.5.4 Réponses

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai, le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus mais elle peut également être qualitative, par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation (ségrégation, pas de ségrégation) sur un béton. [15]



**Figure V.5 :** La surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.

### V.5.5 Choix des Réponses

Le choix des réponses est une étape capitale. Toute l'analyse et toutes les conclusions dépendent de ce choix. Une réponse mal adaptée au problème rendra l'expérimentation inutilisable ou conduira à des conclusions sans intérêt. La réponse sélectionnée doit permettre de répondre sans ambiguïté à la question posée. Ce choix n'est pas aussi simple que l'on pourrait le croire et c'est parfois la principale difficulté à laquelle on se heurte.

## V.6 Différents types des plans d'expériences

Il existe trois grandes familles de plans d'expériences, plans de mélange, plans de criblage et plans de modélisation (surfaces de réponses).

### V.6.1 Plans de mélange

Les plans de mélange sont des plans particuliers adaptés à l'étude des facteurs dépendants. Ils sont principalement utilisés pour l'étude de l'influence des proportions des constituants d'un produit sur une réponse donnée. [15]

### V.6.2 Plans de criblage

L'objectif de ces plans est de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse donnée. Aucune relation ne précise entre les variations des facteurs et celle de la réponse n'est établie. Parmi les plans proposés : plans factoriels complets à deux niveaux, plans factoriels fractionnaires et plans de Plackett-Burman. [14]

#### V.6.2.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Les avantages des plans factoriels complets sont nombreux :

- Chaque facteur ne prend que deux niveaux les essais sont faciles à contrôler et les risques d'erreurs sont minimisés.
- Les plans factoriels complets sont des plans d'expériences optimaux qui étudient toutes les combinaisons possibles des niveaux des facteurs traités et qui nous garantissent les meilleurs résultats.
- La modélisation mathématique est immédiate.

Les résultats obtenus avec un premier plan peuvent être utilisés en partie ou en totalité soit, pour explorer une zone du domaine expérimental soit, pour établir un modèle mathématique de degré plus élevé.

Le seul inconvénient de ces plans est qu'ils obligent rapidement à faire beaucoup d'essais. Par exemple, pour étudier simplement sept facteurs il faut réaliser 128 expériences. Cependant, de nombreuses interactions sont nulles et certains facteurs sont sans influence. C'est pourquoi les plans factoriels fractionnaires ont été développés.

#### V.6.2.2 Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire à 2 fois moins, ou 4 fois moins ou  $2q$  fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant.

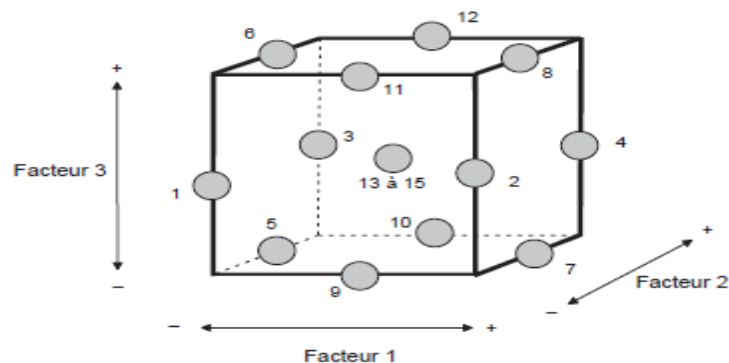
A la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de  $n$  équations à  $p$  coefficients inconnus avec  $p$  plus grand que  $n$ . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les coefficients de telle manière qu'il y ait  $n$  inconnues. On résout donc un système de  $n$  équations à  $n$  groupes de coefficients. [14]

### V.6.2.3 Les plans de Plackett-Burman

R.L. Plackett et JP. Burman ont publié leur étude en 1946 dans Biometrika. Ils expliquent comment construire des plans permettant d'étudier un grand nombre de facteurs avec peu d'essais. Ils attribuent deux niveaux à chaque facteur et supposent que toutes les interactions entre facteurs sont négligeables devant les effets principaux.[14]

Le plan de Plackett-Burman est basé sur la matrice d'Hadamard qui présente les propriétés suivantes :

- Les éléments sont +1, -1 ;
- Les matrices sont carrées et ces matrices sont orthogonales.



**Figure V. 6 :** Illustration du plan de Box-Behnken pour trois facteurs ; Il y a douze points d'expériences au milieu des arêtes du cube et trois points au centre.

### V.6.4 La méthode des surfaces de réponses

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'étude par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent parfois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant, il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques du second degré. Alors on fait appel aux plans pour surfaces de réponse. Ces plans utilisent des modèles polynomiaux du second degré. Nous étudierons les trois plus importants plans de ce type : les plans composites, les plans de Box-Behnken et les plans de Doehlert. [15]

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interactions d'ordre 2 :

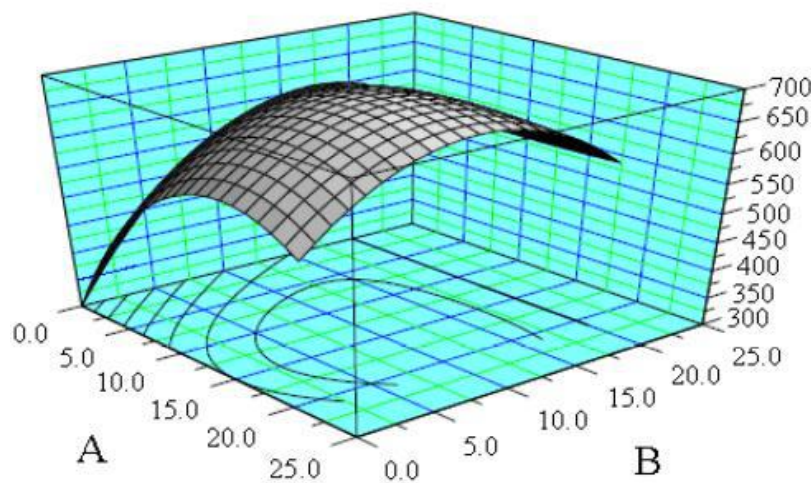
- Pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (5.1)$$

- Pour trois facteurs :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + e \quad (5.2)$$

Ce type de modèle permet l'estimation d'une surface de réponse pour étudier les effets linéaires, les effets quadratiques et les effets d'interaction.



**Figure V. 7 :** Surface de réponse.

Il existe plusieurs types de plans du second ordre et les plus employés sont :

- ✓ Les plans composites centrés
- ✓ Les plans de Box-Behnken

#### V.6.4.1 Les plans composites centrés

Les plans composites se prêtent bien au déroulement séquentiel d'une étude. La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complété par des points au centre pour vérifier la validité du modèle. Si les tests de validation sont positifs (la réponse mesurée au centre du domaine est statistiquement égale à la réponse calculée au même point), l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs, on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré.[14]

Les essais supplémentaires sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile. Les plans composites présentent donc trois parties (figure V.8) :

- **Le plan factoriel** : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine d'étude.
- **Le plan en étoile** : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont, en général, tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.
- **Les points au centre du domaine d'étude** : on prévoit toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude, et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile.

Le nombre total  $n$  d'essais à réaliser est la somme des essais du plan factoriel ( $n_f$ ), des essais du plan en étoile ( $n_\alpha$ ) et des essais au centre ( $n_0$ ). Le nombre  $n$  des essais d'un plan composite est donné par la relation :  $n = n_f + n_\alpha + n_0$

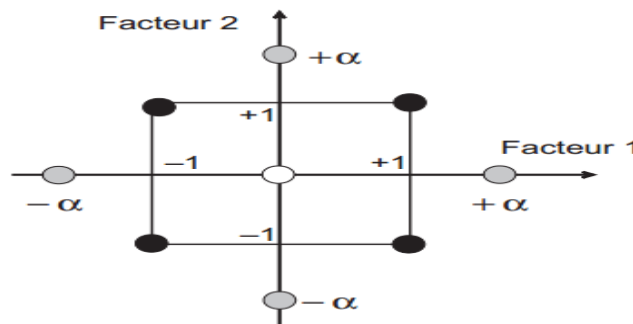


Figure V.8 : Plan composite centré.

#### V.6.4.2 Les plans de Box-Behnken

Les plans de Box-Behnken sont facile de mise en œuvre car tous les facteurs ne prennent que trois niveaux : - 1, 0 et + 1, en variables codées.

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (figure V.9).

Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point central. [16]

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier.

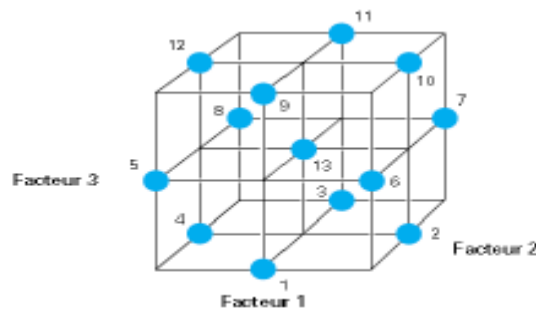


Figure V.9: Plan de Box-Behnken pour trois facteurs.

### V.7 Principaux avantages des plans d'expériences

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- ✓ Diminution du nombre d'essais
- ✓ Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs

- ✓ Détection des interactions entre facteurs
- ✓ Modélisation des réponses étudiées
- ✓ Une précision optimum des résultats

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié.

## V.8 Choix d'une stratégie expérimentale

### V.8.1 Démarche expérimentale

Si un système dont la réponse  $y$  est une variable dépendant de  $p$  facteurs  $X_1, \dots, X_p$ , le but de l'expérimentateur est en général de valider un modèle de la réponse en fonction des valeurs des facteurs influents. On utilise alors un modèle du type :

$$y = f_{\beta}(x_1, x_2, \dots, x_p) + \varepsilon \quad (5.3)$$

Où :  $\beta$  : est un ensemble de paramètres caractérisant la forme de la fonction.

$\varepsilon$  : terme d'erreur.

L'objectif est d'estimer les paramètres du modèle en minimisant l'erreur  $\varepsilon$ . La méthodologie expérimentale doit être conçue comme un processus itératif entre le modèle et le plan expérimental. Elle permet de planifier les expériences pertinentes pour ajuster un modèle aux données et le valider. La Figure (V.10) illustre cette démarche expérimentale.

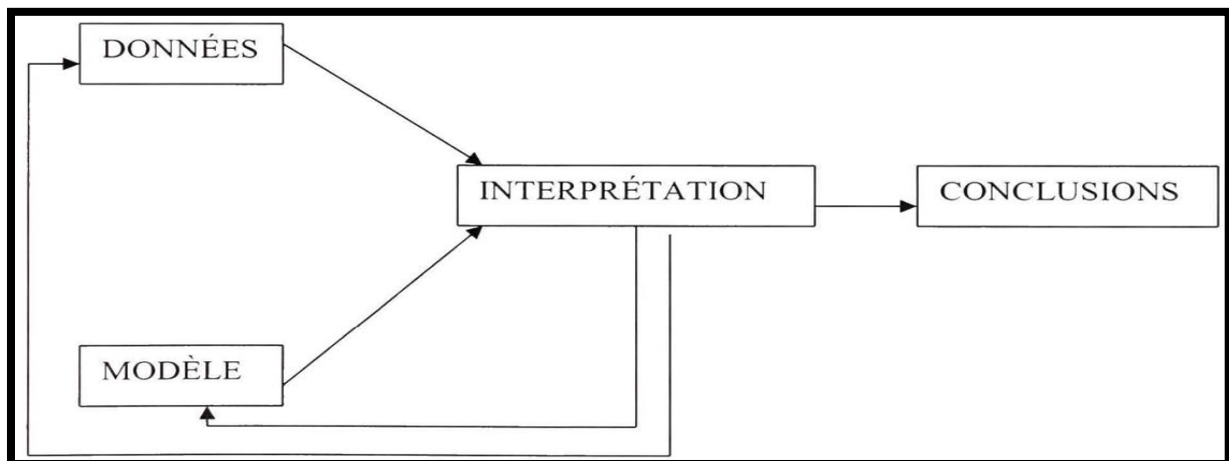


Figure V.10 : Démarche générale de la méthodologie expérimentale.

L'expérimentation consiste à réaliser séquentiellement des plans expérimentaux permettant d'estimer au mieux les paramètres du modèle recherché. À chaque étape, on procède à un test d'ajustement de ce modèle et on complète ce dernier si l'analyse montre qu'il est insuffisant pour décrire efficacement les données expérimentales. La modification du modèle envisagé doit bien entendu être accompagnée de la réalisation d'un nouveau plan d'expériences optimal pour ce modèle.

### V.8.2 Les étapes de l'expérimentation

Le Tableau (V.1) présente les différentes étapes à suivre pour mener à bien une expérimentation.

**Tableau V.1** : Étapes de l'expérimentation

Phases	Etapes
<b>Planification</b>	1. Définir PROBLEME / PROCESSUS – objectifs.
	2. Choisir les variables de REponse (S) Y à mesure.
	3. Choisir les VARIABLES facteurs X et l'espace de variation.
	4. Définir & comparer des DESIGNS EXPERIMENTAUX.
<b>Exécution</b>	5. PREPARER l'expérience.
	6. CONDUIRE l'expérience.
<b>Analyse</b>	7. ANALYSE statistique des résultats.
	8. AGIR en fonction des conclusions de l'analyse.

#### a. Phase de planification

Cette phase consiste à définir le problème à résoudre avec ses réponses et les facteurs qui influent sur ces dernières. L'élaboration d'un design expérimental approprié conduit à l'obtention d'une matrice d'expérience. Cette matrice d'expérience est un ensemble d'expériences supposées homogènes, effectuées consécutivement, dont l'exploitation ne peut être faite que lorsque la totalité des résultats expérimentaux est obtenue. Elle doit apporter des réponses aux questions ou aux hypothèses du chercheur et est définie par :

- Le nombre d'expérience à effectuer
- La nature des expériences (niveaux des variables codées)
- L'organisation des expériences dans le temps (par lots ou séquentielles)

#### b. Phase d'exécution

Cette phase consiste à mener à bien les différentes expériences indiquées par la matrice d'expérience.

#### c. Phase d'analyse

Il s'agit d'une phase d'analyse statistique des résultats consistant à modéliser les réponses et à vérifier la validité des modèles obtenus.

##### ✓ Modélisation

Toute stratégie expérimentale est élaborée pour établir une relation de cause à effet entre les facteurs et les réponses. Cette relation a généralement la forme d'un modèle mathématique. Ce modèle mathématique peut être théorique (c'est-à-dire qu'il est obtenu à partir d'une loi physique), ou empirique. Il peut être linéaire ou non linéaire par rapport aux coefficients qui sont les inconnues.



### V.8.3 La méthodologie des surfaces de réponse

#### V.8.3.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RSM) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants. L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.[17]

#### V.8.3.2 Étapes de la méthodologie des surfaces de réponse

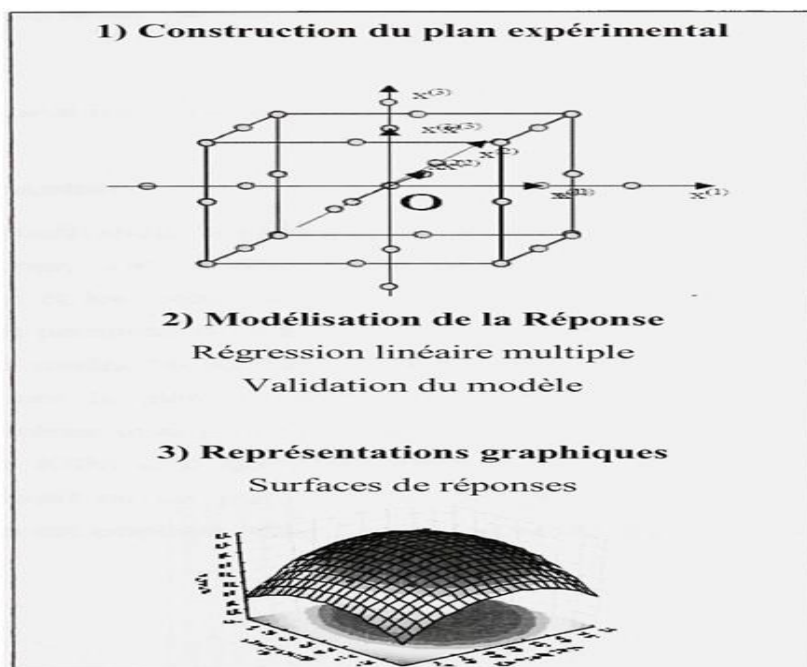


Figure V.11 : Etapes de la méthodologie de surface de réponse.

Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative.

Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présumé s'avère inadéquat.

Les étapes de la RSM sont les suivantes :

#### a. Planification expérimentale

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de

réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans le cadre d'une étude de RSM sont des plans quadratiques tels que les plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de Box-Behnken. Le plan central composite (CCD) est le plus souvent employé. Mais d'autres types de plan quadratique s'offrent à l'expérimentateur.

### b. Modélisation

Lorsque l'on utilise la RSM, on cherche à relier une réponse continue  $y$  à  $k$  facteurs continus et contrôlés  $X_1, X_2, \dots, X_k$  à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire [14] :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5.4)$$

Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme [14] :

$$y = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (5.5)$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec  $d$  variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5.6)$$

Où :  $X_i$  : variables de prédiction codées appelées facteurs

$\beta$  : coefficient de régression

$\epsilon$  : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse.

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle (équation 5.6), sont estimés par la technique des moindres carrés et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

### c. Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- le coefficient de détermination statistique :  $R^2$
- le coefficient de détermination ajusté :  $R^2_{adj}$  ;
- l'erreur RMSE.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \quad (5.7)$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (5.8)$$

Où :  $\hat{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n}$  est la moyenne de réponses.

Quant au coefficient de détermination  $R^2$  il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un  $R^2$  de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ( $\hat{y}_i = y_i$ ). Par contre, un  $R$  de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (5.9)$$

Le coefficient de détermination ajusté  $R^2_{adj}$  est une mesure améliorée de  $R^2$ .

Contrairement à  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$  n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R^2_{adj} = 1 - \left[ \frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad (5.10)$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{(n-p)}} \quad (5.11)$$

## V.9 Conclusion

En conclusion, les plans d'expériences sont des outils puissants qui permettent d'optimiser la collecte de données et l'analyse des résultats dans le cadre de recherches scientifiques et d'études industrielles. En suivant des règles mathématiques rigoureuses et en adoptant une démarche méthodique, il est possible de maximiser les informations obtenues tout en minimisant le nombre d'expériences nécessaires.

Les principes fondamentaux des plans d'expériences, tels que la notion d'espace expérimental et la modélisation mathématique des variables étudiées, sont essentiels pour comprendre et appliquer cette méthode avec succès. De nombreux types de plans d'expériences existent, chacun adapté à des situations spécifiques, offrant aux expérimentateurs une flexibilité et une précision accrues dans leurs travaux.

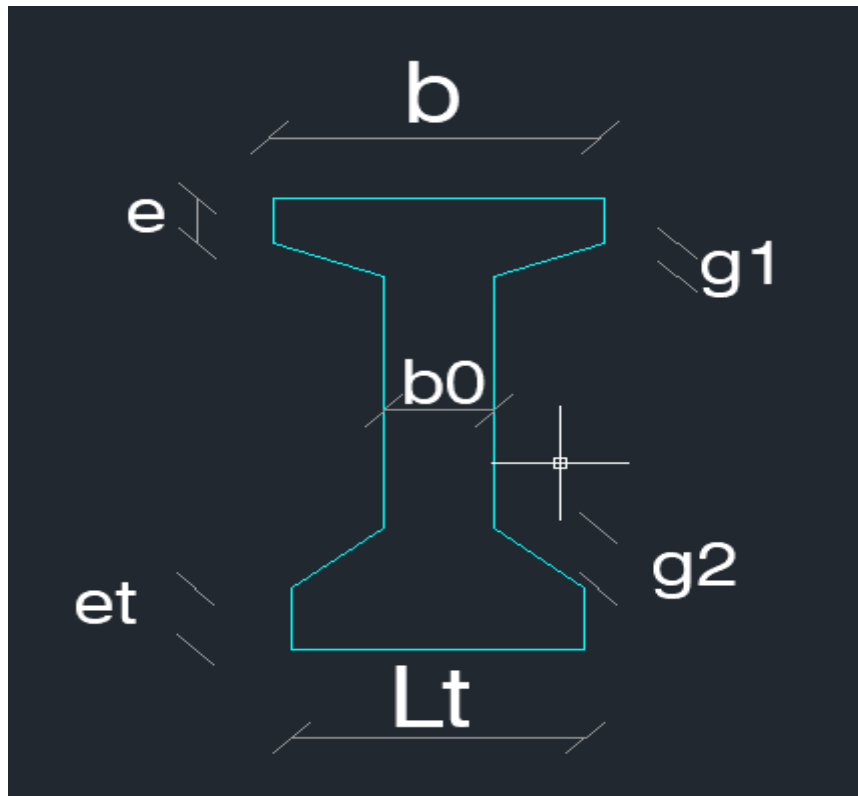
# CHAPITRE

**VI**  
XI

## Chapitre VI : Optimisation des facteurs géométriques des sections de poutres du pont

### VI.1 Introduction

Ce chapitre de validation de la méthode d'optimisation proposée a pour objectif d'optimiser les facteurs géométriques des sections de poutres d'un pont à poutre en T à savoir la largeur de la table de compression ( $b$ ), épaisseur de la table de compression ( $e$ ), épaisseur d'âme ( $b_0$ ), la largeur du talon ( $L_t$ ) et épaisseur de talon ( $e_t$ ), et la longueur des goussets ( $g_1$ ) et ( $g_2$ ).



**Figures VI.1:** Schéma présente la section d'une poutre en T.

Le processus d'optimisation repose sur l'analyse des contraintes de flexion et de cisaillement, ainsi que sur le coût de réalisation de chaque configuration étudiée. Deux sections seront optimisées :

- La section des poutres dans la zone courante, en se basant sur la contrainte de flexion et le coût de réalisation.
- La section d'about (au niveau des appuis), en utilisant la contrainte de cisaillement et le coût de réalisation.

Ce double focus permet de garantir une performance structurelle optimale tout en maîtrisant les coûts, en tenant compte des spécificités des différentes zones du pont.

Nous allons maintenant examiner l'application de la méthode de surface de réponse à des fins d'optimisation. Cette méthode implique tout d'abord de sélectionner, parmi un ensemble de tables, le plan d'expérience le mieux adapté au modèle utilisé.

Pour un pont à poutre en T, le modèle comprend 6 facteurs, et chaque facteur possède trois niveaux. L'intervalle de variation de chaque facteur est présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau VI.1** : Intervalle de variation des facteurs à optimiser.

Facteurs	Niveaux de variation		
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
$b$ (cm)	90	115	140
$e$ (cm)	10	15	20
$b_0$ (cm)	20	25	30
$L_t$ (cm)	50	65	80
$g_1$ (cm)	8.00	11	14
$g_2$ (cm)	15	20	25

## VI.2 Choix d'un plan d'expériences

Dans ce cas d'étude, nous allons adopter un plan d'expériences de type Box-Behnken L47. Ce plan fractionnel permettra d'identifier les facteurs recherchés du problème. Voici le tableau présentant le plan d'expériences :

**Tableau VI.2** : Plan d'expérience type Box-Behnken L47 (6facteurs, 3 niveaux).

N° D'essai	Facteurs					
	$b$ (cm)	$e$ (cm)	$b_0$ (cm)	$g_1$ (cm)	$g_2$ (cm)	$L_t$ (cm)
1	90	15	30	11	20	80
2	115	20	20	11	25	65
3	140	15	20	11	20	50
4	140	15	25	8	15	65
5	115	20	25	11	15	80
6	115	10	30	11	25	65
7	115	10	20	11	25	65
8	90	10	25	8	20	65
9	140	15	30	11	20	50
10	140	10	25	8	20	65
11	140	15	25	14	15	65
12	115	15	20	14	20	80

CHAPITRE VI : OPTIMISATION DES FACTEURS GEOMETRIQUES DES SECTIONS DE  
POUTRES DE PONT

13	115	15	20	14	20	50
14	140	15	25	8	25	65
15	115	10	25	11	25	50
16	115	15	20	8	20	50
17	140	20	25	14	20	65
18	115	20	20	11	15	65
19	90	15	25	8	25	65
20	115	20	25	11	25	50
21	115	15	20	8	20	80
22	115	15	30	14	20	50
23	90	15	25	8	15	65
24	115	15	30	8	20	80
25	140	15	20	11	20	80
26	115	10	25	11	15	80
27	90	15	25	14	25	65
28	115	20	30	11	25	65
29	90	10	25	14	20	65
30	115	10	30	11	15	65
31	115	15	30	8	20	50
32	90	15	30	11	20	50
33	140	20	25	8	20	65
34	115	10	25	11	15	50
35	115	15	30	14	20	80
36	90	15	20	11	20	50
37	115	20	25	11	15	50
38	115	10	20	11	15	65
39	140	15	30	11	20	80
40	115	15	25	11	20	65
41	140	10	25	14	20	65
42	115	20	30	11	15	65
43	115	10	25	11	25	80
44	90	20	25	8	20	65
45	90	20	25	14	20	65
46	115	20	25	11	25	80
47	90	15	20	11	20	80

Dans ce tableau, chaque ligne correspond à une modélisation numérique qui doit être réalisée à l'aide du logiciel ROBOT (RSA). Par conséquent, il est nécessaire de réaliser 47 modèles numériques conformément aux données figurant dans le tableau ci-dessus. Chaque modèle représente une combinaison spécifique des facteurs étudiés et permettra d'analyser les performances du pont à poutre en T dans différentes configurations.

### VI.3 Résultats

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats de la modélisation en termes de contraintes de flexion et de cisaillement, ainsi que le coût de réalisation calculé à partir des formules. Ces résultats ont été obtenus en réalisant différentes combinaisons conformément à la matrice de planification des expériences pour un plan fractionnel de type Box-Behnken L47.

Le cout de construction des poutres est estimé comme suit :

Volume d'une poutre ( $m^3$ )=Surface d'une poutre ( $m^2$ ) x Longueur de la poutre (m)

Cout d'un  $m^3$  de béton = 35000 (DZA)

Cout Totale d'une poutre (DZA) = Cout d'un  $m^3$  de béton (DZA)x Volume d'une poutre( $m^3$ ).

**Tableau VI.3 : Résultats en terme de contraintes de flexion et du cout.**

N° D'essai	Facteurs						Réponses		
	$b$ (cm)	$e$ (cm)	$b_0$ (cm)	$g_1$ (cm)	$g_2$ (cm)	$L_t$ (cm)	SIGMA à ELU MPa	SIGMA à ELS MPa	Cout DZA
1	90	15	30	11	20	80	17.47	9.32	628250
2	115	20	20	11	25	65	15.1	8.01	616000
3	140	15	20	11	20	50	16.92	8.98	553000
4	140	15	25	8	15	65	17.42	9.31	594125
5	115	20	25	11	15	80	15.88	8.5	657125
6	115	10	30	11	25	65	17.64	9.4	603750
7	115	10	20	11	25	65	18.82	9.88	487375
8	90	10	25	8	20	65	20.36	10.76	491750
9	140	15	30	11	20	50	16.65	8.94	638750
10	140	10	25	8	20	65	20.76	11.17	553000
11	140	15	25	14	15	65	16.11	8.63	637875
12	115	15	20	14	20	80	15.95	8.46	604625
13	115	15	20	14	20	50	17.49	9.24	525875
14	140	15	25	8	25	65	15.86	8.47	633500
15	115	10	25	11	25	50	18.84	9.95	517125
16	115	15	20	8	20	50	19.65	10.34	469000
17	140	20	25	14	20	65	14.23	7.66	718375
18	115	20	20	11	15	65	16.62	8.83	579250
19	90	15	25	8	25	65	18.25	9.64	550375



**CHAPITRE VI : OPTIMISATION DES FACTEURS GEOMETRIQUES DES SECTIONS DE POUTRES DE PONT**

20	115	20	25	11	25	50	15.85	8.45	617750
21	115	15	20	8	20	80	17.24	9.12	569625
22	115	15	30	14	20	50	17.13	9.16	613375
23	90	15	25	8	15	65	20.11	10.63	511000
24	115	15	30	8	20	80	16.89	9.05	653625
25	140	15	20	11	20	80	15.46	8.24	631750
26	115	10	25	11	15	80	18.93	10.04	556500
27	90	15	25	14	25	65	16.98	8.98	581000
28	115	20	30	11	25	65	14.98	8.05	704375
29	90	10	25	14	20	65	19.32	10.19	521500
30	115	10	30	11	15	65	19.41	10.34	562625
31	115	15	30	8	20	50	18.46	9.85	574875
32	90	15	30	11	20	50	19.13	10.16	549500
33	140	20	25	8	20	65	15.22	8.17	675500
34	115	10	25	11	15	50	20.77	10.99	484750
35	115	15	30	14	20	80	15.7	8.43	692125
36	90	15	20	11	20	50	19.76	10.37	463750
37	115	20	25	11	15	50	17.39	9.28	585375
38	115	10	20	11	15	65	20.04	10.55	478625
39	140	15	30	11	20	80	15.27	8.23	717500
40	115	15	25	11	20	65	17.06	9.07	590625
41	140	10	25	14	20	65	16.89	8.99	595875
42	115	20	30	11	15	65	16.41	8.82	663250
43	115	10	25	11	25	80	17.2	9.14	602875
44	90	20	25	8	20	65	17.67	9.37	570500
45	90	20	25	14	20	65	16.53	8.78	600250
46	115	20	25	11	25	80	14.5	7.77	703500
47	90	15	20	11	20	80	18.73	9.88	533750

**Tableau VI.4 : Résultats en terme de contraintes de cisaillement et du cout.**

N° D'essai	Facteurs						Réponses		
	<i>b</i> (cm)	<i>e</i> (cm)	<i>b</i> <sub>0</sub> (cm)	<i>g</i> <sub>1</sub> (cm)	<i>g</i> <sub>2</sub> (cm)	<i>L</i> <sub>t</sub> (cm)	TAUX à ELU MPa	TAUX à ELS MPa	Cout DZA
1	90	15	30	11	20	80	3.43	1.79	628250
2	115	20	20	11	25	65	4.7	2.44	616000
3	140	15	20	11	20	50	4.91	2.56	553000
4	140	15	25	8	15	65	4.2	2.2	594125

**CHAPITRE VI : OPTIMISATION DES FACTEURS GEOMETRIQUES DES SECTIONS DE  
POUTRES DE PONT**

5	115	20	25	11	15	80	4.1	2.14	657125
6	115	10	30	11	25	65	3.39	1.77	603750
7	115	10	20	11	25	65	4.72	2.43	487375
8	90	10	25	8	20	65	4.05	2.09	491750
9	140	15	30	11	20	50	3.5	1.84	638750
10	140	10	25	8	20	65	4.25	2.21	553000
11	140	15	25	14	15	65	4.13	2.17	637875
12	115	15	20	14	20	80	4.83	2.5	604625
13	115	15	20	14	20	50	4.77	2.47	525875
14	140	15	25	8	25	65	4	2.09	633500
15	115	10	25	11	25	50	3.91	2.02	517125
16	115	15	20	8	20	50	4.84	2.5	469000
17	140	20	25	14	20	65	4.04	2.13	718375
18	115	20	20	11	15	65	4.94	2.57	579250
19	90	15	25	8	25	65	3.92	2.02	550375
20	115	20	25	11	25	50	3.89	2.03	617750
21	115	15	20	8	20	80	4.93	2.55	569625
22	115	15	30	14	20	50	3.41	1.79	613375
23	90	15	25	8	15	65	4.09	2.11	511000
24	115	15	30	8	20	80	3.5	1.83	653625
25	140	15	20	11	20	80	4.95	2.58	631750
26	115	10	25	11	15	80	4.16	2.16	556500
27	90	15	25	14	25	65	3.82	1.97	581000
28	115	20	30	11	25	65	3.35	1.76	704375
29	90	10	25	14	20	65	3.96	2.04	521500
30	115	10	30	11	15	65	3.55	1.85	562625
31	115	15	30	8	20	50	3.47	1.82	574875
32	90	15	30	11	20	50	3.4	1.76	549500
33	140	20	25	8	20	65	4.1	2.16	675500
34	115	10	25	11	15	50	4.11	2.13	484750
35	115	15	30	14	20	80	3.43	1.79	692125
36	90	15	20	11	20	50	4.74	2.43	463750
37	115	20	25	11	15	50	4.09	2.14	585375
38	115	10	20	11	15	65	4.97	2.56	478625
39	140	15	30	11	20	80	3.5	1.85	717500
40	115	15	25	11	20	65	4	2.08	590625
41	140	10	25	14	20	65	4.03	2.1	595875

42	115	20	30	11	15	65	3.51	1.84	663250
43	115	10	25	11	25	80	3.99	2.06	602875
44	90	20	25	8	20	65	3.96	2.05	570500
45	90	20	25	14	20	65	3.87	2	600250
46	115	20	25	11	25	80	3.92	2.05	703500
47	90	15	20	11	20	80	4.98	2.56	533750

## VI.4 Analyse statistique des résultats

### VI.4.1 Analyse de la variance ANOVA

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour comprendre l'influence des facteurs d'entrée à partir d'une série de résultats expérimentaux, en utilisant la méthode des plans d'expériences pour le modèle proposé. Elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie. L'ANOVA partitionne essentiellement la variation totale observée lors d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et aux erreurs générées.

L'évaluation de la signification statistique des modèles quadratiques de prédiction se fait à l'aide des valeurs P et F de l'ANOVA. Ces valeurs permettent de déterminer si les facteurs d'entrée ont une influence significative sur les résultats et si le modèle de prédiction est statistiquement valide. [18]

Dans le tableau d'ANOVA, P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si  $P > 0,05$ , le paramètre est insignifiant (Non significatif) ;
- Si  $P < 0,05$ , le paramètre est significatif.

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale.

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6.1)$$

Où  $\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i$ : La moyenne des réponses,

$y_i$ : la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur  $f$  prend son  $i^{\text{ème}}$  niveau,

$N$ : nombre total d'expériences,

$N_{nf}$ : niveau de chaque facteur  $f$ .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté  $df$ .

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (6.2)$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice de Fisher F-value est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (6.3)$$

Avec :  $MC_e$  les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (Contribution en %), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont \% = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (6.4)$$

**Tableau VI.5 :** Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion (SIGMA) à E.L.U.

Source	Somme des carrés SS	Df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	133.87	17	7.87	59.30	< 0.0001		Signifiant
<b>A-b</b>	28.79	1	28.79	216.81	< 0.0001	20.2	Signifiant
<b>B-e</b>	62.08	1	62.08	467.49	< 0.0001	43.6	Signifiant
<b>C-b0</b>	1.84	1	1.84	13.83	0.0009	1.29	Signifiant
<b>D-g1</b>	12.88	1	12.88	96.97	< 0.0001	9.05	Signifiant
<b>E-g2</b>	13.94	1	13.94	105.00	< 0.0001	9.80	Signifiant
<b>F-Lt</b>	14.76	1	14.76	111.13	< 0.0001	10.4	Signifiant
<b>AB</b>	0.9248	1	0.9248	6.96	0.0132	0.65	Signifiant
<b>AC</b>	0.2556	1	0.2556	1.92	0.1759	0.18	Non Signifiant
<b>AD</b>	0.3988	1	0.3988	3.00	0.0937	0.28	Non Signifiant
<b>BC</b>	0.2738	1	0.2738	2.06	0.1617	0.192	Non Signifiant
<b>BD</b>	0.9660	1	0.9660	7.27	0.0115	0.679	Signifiant
<b>BF</b>	0.0480	1	0.0480	0.3618	0.5522	0.0337	NonSignifiant
<b>CD</b>	0.1081	1	0.1081	0.8141	0.3743	0.0760	Non signifiant
<b>DF</b>	0.1275	1	0.1275	0.9602	0.3352	0.0896	Non signifiant
<b>A<sup>2</sup></b>	0.3006	1	0.3006	2.26	0.1433	0.211	Non signifiant
<b>B<sup>2</sup></b>	0.5636	1	0.5636	4.24	0.0485	0.396	Signifiant
<b>F<sup>2</sup></b>	0.1379	1	0.1379	1.04	0.3166	0.0969	Non signifiant
<b>Résiduel</b>	3.85	29	0.1328			2.71	
<b>Cor Total</b>	137.72	46				100	

L'analyse de la variance (ANOVA) présentée dans le tableau VI.5 révèle que la largeur de la table de compression ( $e$ ) et l'épaisseur de la table de compression ( $b$ ) sont les facteurs les plus

importants en ce qui concerne les contraintes de flexion. Leurs contributions s'élèvent respectivement à 43,60% pour l'épaisseur de la table ( $e$ ) et à 20,20% pour la largeur de la table de compression ( $b$ ). La largeur du talon ( $L_t$ ) contribue à hauteur de 10,40%, tandis que la longueur des deux goussets présente une influence de 9,80% pour le gousset du talon ( $g_2$ ) et de 9,05% pour le gousset de la table de compression ( $g_1$ ). L'épaisseur d'âme ( $b_0$ ) a une faible influence de seulement 1,29%, ce qui indique un effet négligeable et non significatif sur les résultats.

**Tableau VI.6 :** Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion à E.L.S.

Source	Somme des carrés SS	Df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	34.61	17	2.04	49.77	< 0.0001		Signifiant
<b>A-b</b>	6.77	1	6.77	165.44	< 0.0001	18.3	Signifiant
<b>B-e</b>	16.19	1	16.19	395.72	< 0.0001	43.7	Signifiant
<b>C-b0</b>	0.1926	1	0.1926	4.71	0.0383	0.520	Signifiant
<b>D-g1</b>	3.65	1	3.65	89.26	< 0.0001	9.85	Signifiant
<b>E-g2</b>	4.00	1	4.00	97.88	< 0.0001	10.8	Signifiant
<b>F-Lt</b>	3.78	1	3.78	92.51	< 0.0001	10.2	Signifiant
<b>AB</b>	0.2926	1	0.2926	7.15	0.0122	0.790	Signifiant
<b>AC</b>	0.0648	1	0.0648	1.58	0.2182	0.175	Non Signifiant
<b>AD</b>	0.1314	1	0.1314	3.21	0.0835	0.355	Non Signifiant
<b>BC</b>	0.0648	1	0.0648	1.58	0.2182	0.175	Non Signifiant
<b>BD</b>	0.3403	1	0.3403	8.32	0.0073	0.918	Signifiant
<b>CD</b>	0.0253	1	0.0253	0.6188	0.4379	0.0683	Non Signifiant
<b>DF</b>	0.0325	1	0.0325	0.7948	0.3800	0.0877	Non Signifiant
<b>A<sup>2</sup></b>	0.0396	1	0.0396	0.9672	0.3335	0.107	Non Signifiant
<b>B<sup>2</sup></b>	0.2147	1	0.2147	5.25	0.0294	0.579	Signifiant
<b>E<sup>2</sup></b>	0.0571	1	0.0571	1.39	0.2472	0.154	Non signifiant
<b>F<sup>2</sup></b>	0.0159	1	0.0159	0.3884	0.5380	0.0429	Non signifiant
<b>Résiduel</b>	1.19	29	0.0409			3.21	
<b>Cor Total</b>	35.80	46				100	

Pour le Tableau VI.6 l'analyse de variance (ANOVA) montre que la largeur de la table de compression ( $b$ ) et l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ) sont les facteurs les plus importants en ce qui concerne les contraintes de flexion. Leurs influences sont respectivement de 43,70% pour l'épaisseur de la table ( $e$ ) et de 18,30% pour la largeur de la table de compression ( $b$ ). La largeur du talon ( $L_t$ ) présente une influence de 10,20%, tandis que la longueur des deux goussets contribue à hauteur de 10,80% pour le gousset du talon ( $g_2$ ) et de 9,85% pour le gousset de la table de compression ( $g_1$ ). L'épaisseur d'âme ( $b_0$ ) a une faible

influence de seulement 0,52%, ce qui indique un effet négligeable et non significatif sur les résultats.

**Tableau VI.7** : Analyse de la variance ANOVA pour le cout.

Source	Somme des carrés SS	Df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	2.089E+11	18	1.161E+10	492.50	< 0.0001		Signifiant
<b>A-b</b>	4.353E+10	1	4.353E+10	1847.07	< 0.0001	20.5	Signifiant
<b>B-e</b>	6.360E+10	1	6.360E+10	2698.76	< 0.0001	30.0	Signifiant
<b>C-b0</b>	4.945E+10	1	4.945E+10	2098.14	< 0.0001	23.3	Signifiant
<b>D-g1</b>	7.804E+09	1	7.804E+09	331.12	< 0.0001	3.68	Signifiant
<b>E-g2</b>	7.220E+09	1	7.220E+09	306.36	< 0.0001	3.40	Signifiant
<b>F-Lt</b>	3.825E+10	1	3.825E+10	1623.02	< 0.0001	18.0	Signifiant
<b>AB</b>	9.570E+08	1	9.570E+08	40.61	< 0.0001	0.451	Signifiant
<b>AC</b>	9.570E+06	1	9.570E+06	0.4061	0.5291	0.00451	Non significatif
<b>AD</b>	1.319E+08	1	1.319E+08	5.60	0.0252	0.0622	Signifiant
<b>AE</b>	4.302E+05	1	4.302E+05	0.0183	0.8935	0.000203	Non significatif
<b>AF</b>	9.570E+06	1	9.570E+06	0.4061	0.5291	0.00451	Non significatif
<b>BC</b>	9.800E+07	1	9.800E+07	4.16	0.0510	0.0462	Non significatif
<b>BE</b>	4.900E+07	1	4.900E+07	2.08	0.1604	0.0231	Non significatif
<b>CD</b>	2.766E+07	1	2.766E+07	1.17	0.2879	0.0130	Non Signifiant
<b>CE</b>	1.688E+08	1	1.688E+08	7.16	0.0123	0.0796	Signifiant
<b>CF</b>	1.077E+07	1	1.077E+07	0.4568	0.5046	0.00508	Non significatif
<b>DF</b>	5.981E+07	1	5.981E+07	2.54	0.1224	0.0282	Non significatif
<b>EF</b>	9.800E+07	1	9.800E+07	4.16	0.0510	0.0462	Non significatif
<b>Résiduel</b>	6.599E+08	28	2.357E+07			0.311	
<b>Cor Total</b>	2.096E+11	46				100	

Dans le Tableau VI.7 l'analyse de variance (ANOVA) indique que la largeur de la table de compression ( $b$ ) et l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ) sont les facteurs les plus significatifs en termes de cout. Leur impact est estimé à 30% pour l'épaisseur de la table ( $e$ ) et à 20,5% pour la largeur de la table de compression ( $b$ ). De plus, la largeur du talon ( $L_t$ ) joue également un rôle important, contribuant à hauteur de 18%. En revanche, les longueurs des deux goussets ont une influence relativement faible, avec seulement 3,40% pour le gousset du talon ( $g_2$ ) et 3,68% pour le gousset de la table de compression ( $g_1$ ).

L'analyse de variance ANOVA présentée dans le tableau VI.8 révèle que l'épaisseur de l'âme ( $b_0$ ) est le facteur le plus important dans le cisaillement. Elle présente une influence significative de 95,6%. En revanche, le gousset du talon ( $g_2$ ) a une faible influence avec un

pourcentage de 1,65%. Le terme quadratique  $C^2$  présente également une faible influence de 1,17% et n'a pas d'effets significatifs sur le résultat. Ces résultats mettent en évidence l'importance primordiale de l'épaisseur de l'âme dans la résistance au cisaillement, tandis que le gousset du talon et le terme quadratique  $C^2$  ont des influences relativement faibles et négligeables sur les performances du système.

**Tableau VI.8:** Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de cisaillement à l'ELU.

Source	Somme des carrés SS	Df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	12.41	19	0.6534	718.27	< 0.0001		Signifiant
<b>A-b</b>	0.0624	1	0.0624	68.58	< 0.0001	0.505	Signifiant
<b>B-e</b>	0.0160	1	0.0160	17.61	0.0003	0.129	Signifiant
<b>C-b0</b>	11.82	1	11.82	12989.97	< 0.0001	95.6	Signifiant
<b>D-g1</b>	0.0431	1	0.0431	47.37	< 0.0001	0.349	Signifiant
<b>E-g2</b>	0.2035	1	0.2035	223.74	< 0.0001	1.65	Signifiant
<b>F-Lt</b>	0.0193	1	0.0193	21.18	< 0.0001	0.156	Signifiant
<b>AB</b>	0.0002	1	0.0002	0.2199	0.6429	0.00162	Non Signifiant
<b>AD</b>	0.0003	1	0.0003	0.3415	0.5638	0.00243	Non Signifiant
<b>AE</b>	0.0004	1	0.0004	0.4516	0.5073	0.00323	Non Signifiant
<b>AF</b>	0.0066	1	0.0066	7.27	0.0119	0.0534	Signifiant
<b>BD</b>	0.0032	1	0.0032	3.52	0.0716	0.0259	Non Signifiant
<b>BF</b>	0.0010	1	0.0010	1.11	0.3008	0.00809	Non Signifiant
<b>CE</b>	0.0036	1	0.0036	3.97	0.0565	0.0291	Non Signifiant
<b>CF</b>	0.0077	1	0.0077	8.42	0.0073	0.0623	Signifiant
<b>A<sup>2</sup></b>	0.0038	1	0.0038	4.14	0.0519	0.0307	Non Signifiant
<b>B<sup>2</sup></b>	0.0020	1	0.0020	2.17	0.1524	0.0162	Non Signifiant
<b>C<sup>2</sup></b>	0.1449	1	0.1449	159.26	< 0.0001	1.17	Signifiant
<b>E<sup>2</sup></b>	0.0003	1	0.0003	0.3336	0.5683	0.00243	Non Signifiant
<b>F<sup>2</sup></b>	0.0028	1	0.0028	3.09	0.0902	0.0226	Non Signifiant
<b>Résiduel</b>	0.0246	27	0.0009			0.19893738	
<b>Cor Total</b>	12.44	46				100	

#### VI.4.2 Analyse de régression

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (contraintes de flexion et de cisaillement, cout) et les variables d'entrée ( $b, e, b_0, L_t, e_t, g_1, g_2$ ) a été exprimée à l'aide d'un coefficient de détermination  $R^2$ , qui mesure la précision de la régression.[18]

Les modèles quadratiques obtenus à partir de l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire les sorties en fonction des facteurs étudiés. Les modèles obtenus sont représentés par les équations suivantes :

### 1. Contrainte de flexion (Sigma) à l'E.L.U

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.972$

$$\sigma_{ultime} = +55.00472 - 0.083749 * b - 0.827541 * e - 0.416033 * b_0 - 0.718202 * g_1 - 0.161167 * g_2 - 0.172871 * L_t - 0.002720 * b * e + 0.001430 * b * b_0 - 0.002283 * b * g_1 + 0.007400 * e * b_0 + 0.023167 * e * g_1 + 0.001033 * e * L_t + 0.007750 * b_0 * g_1 + 0.002806 * g_1 * L_t + 0.000294 * b^2 + 0.010389 * e^2 + 0.000571 * L_t^2 \quad (6.5)$$

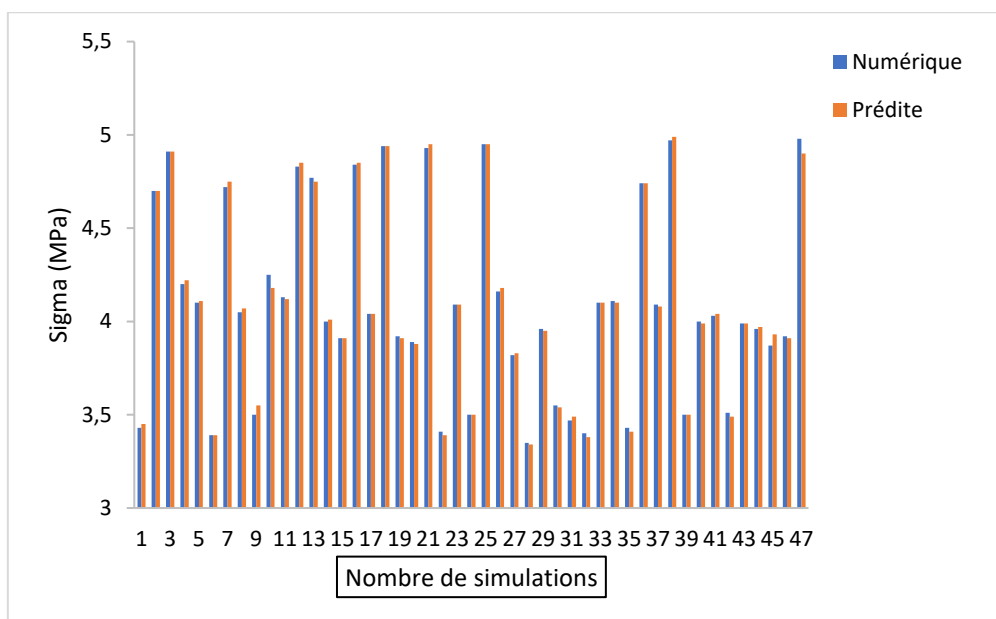


Figure VI.2: Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U.

La comparaison entre les valeurs numériques et prédites est illustrée dans la Figure VI.2. L'analyse des résultats démontre une grande proximité entre les valeurs prédites et les valeurs numériques, ce qui témoigne de la précision du modèle obtenu. Cette observation souligne la capacité du modèle à estimer de manière fiable les valeurs attendues.

### 2. Contrainte de flexion (Sigma) à l'E.L.S

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.966$

$$\sigma_{service} = +25.55296 - 0.029809 * b - 0.425289 * e - 0.195967 * b_0 - 0.379002 * g_1 + 0.048950 * g_2 - 0.068537 * L_t - 0.001530 * b * e + 0.000720 * b * b_0 - 0.001311 * b * g_1 + 0.003600 * e * b_0 + 0.013750 * e * g_1 + 0.003750 * b_0 * g_1 + 0.001417 * g_1 * L_t + 0.000116 * b^2 + 0.006525 * e^2 - 0.003383 * g_2^2 + 0.000204 * L_t^2 \quad (6.6)$$



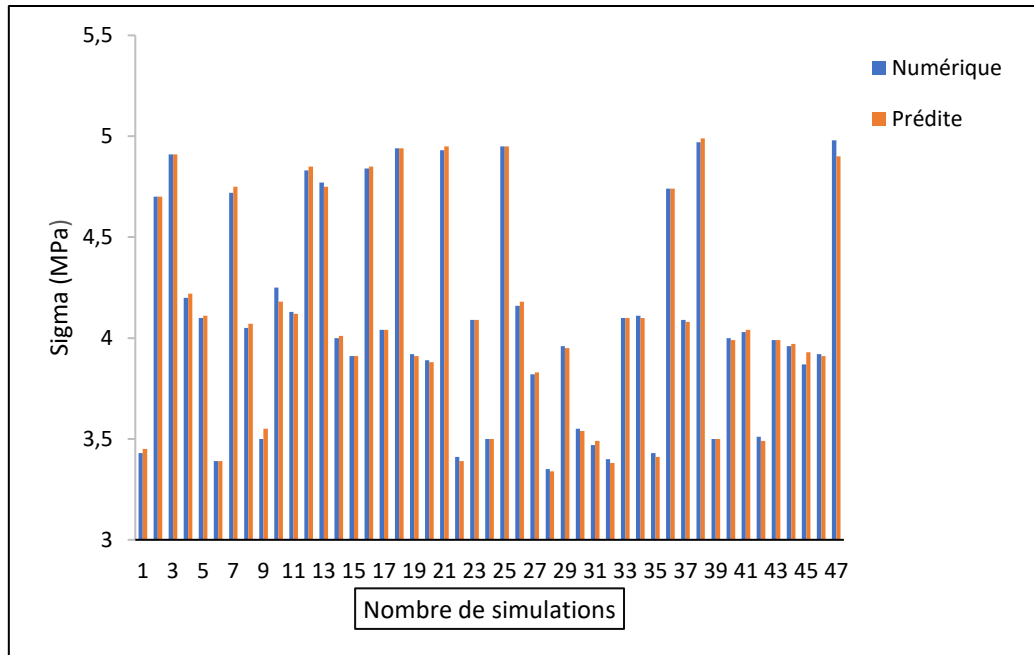


Figure VI.3: Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma)à E.L.S.

La Figure VI.3 présente la comparaison entre les valeurs numériques et les valeurs prédites. L'analyse des résultats indique une concordance étroite entre ces deux ensembles de données, témoignant ainsi de la précision du modèle développé. Cette observation souligne la capacité du modèle à fournir des estimations fiables et cohérentes avec les valeurs réelles.

### 3.Cout

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.997$

$$COUT = -95011.7 + 104.8 * b + 2333.33 * e + 10583.9 * b_0 + 8672.19 * g_1 - 4757.42 * g_2 + 2334.55 * L_t + 87.5 * b * e + -8.75 * b * b_0 + 41.5196 * b * g_1 - 2.19463 * b * g_2 + 2.91667 * b * L_t - 140 * e * b_0 + 70 * e * g_2 - 123.958 * b_0 * g_1 + 183.75 * b_0 * g_2 - 10.9375 * b_0 * L_t - 60.7639 * g_1 * L_t + 46.6667 * g_2 * L_t. (6.7)$$

La précision du modèle trouvé est mise en évidence par la comparaison entre les valeurs numériques et les valeurs prédites, tel qu'illustré dans la Figure VI.4. L'analyse des résultats démontre une très bonne concordance entre ces deux ensembles de données. Cette observation souligne la capacité du modèle à fournir des estimations précises et cohérentes avec les valeurs réelles, renforçant ainsi sa fiabilité.

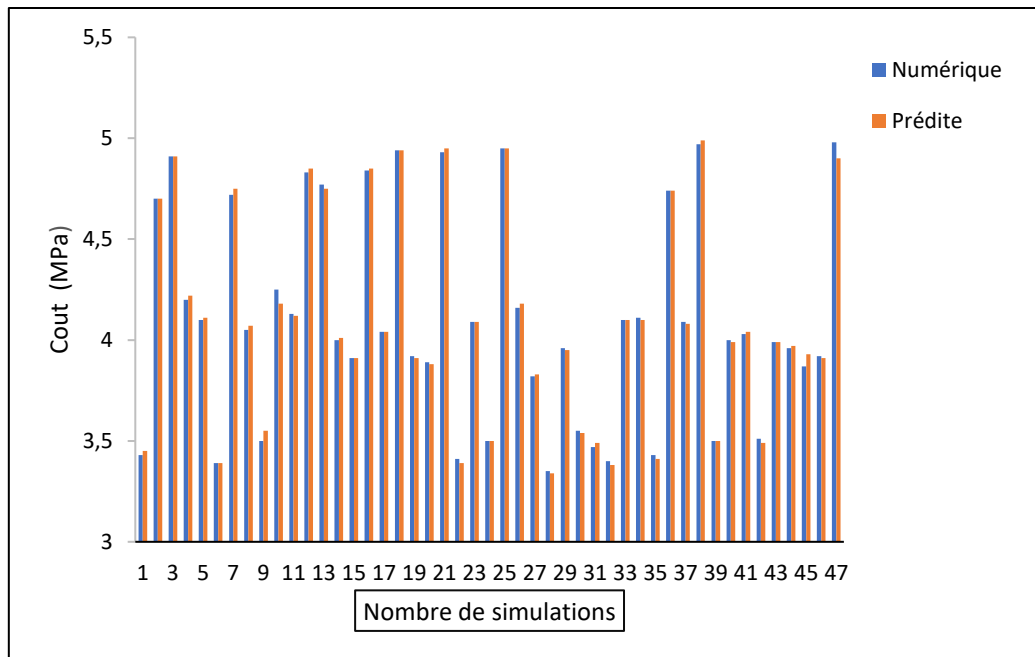


Figure VI.4 : Valeurs numériques et valeurs prédites du Cout.

#### 4. Contrainte de cisaillement (Taux) à l'ELU

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.998$

$$\tau_{ultime} = 11.4741 - 0.000600665 * b - 0.0355948 * e - 0.417207 * b_0 - 0.0281195 * g_1 - 0.0218442 * g_2 + 0.00902916 * L_t + 4e-05 * b * e - 6.37255e-05 * b * g_1 - 7.22488e-05 * b * g_2 - 7.66667e-05 * b * L_t + 0.00133333 * e * g_1 - 0.00015 * e * L_t + 0.00085 * b_0 * g_2 - 0.000291667 * b_0 * L_t + 4.03732e-05 * b^2 + 0.000697049 * e^2 + 0.00557663 * b_0^2 + 0.000264195 * g_2^2 + 8.62928e-05 * L_t^2. (6.8)$$

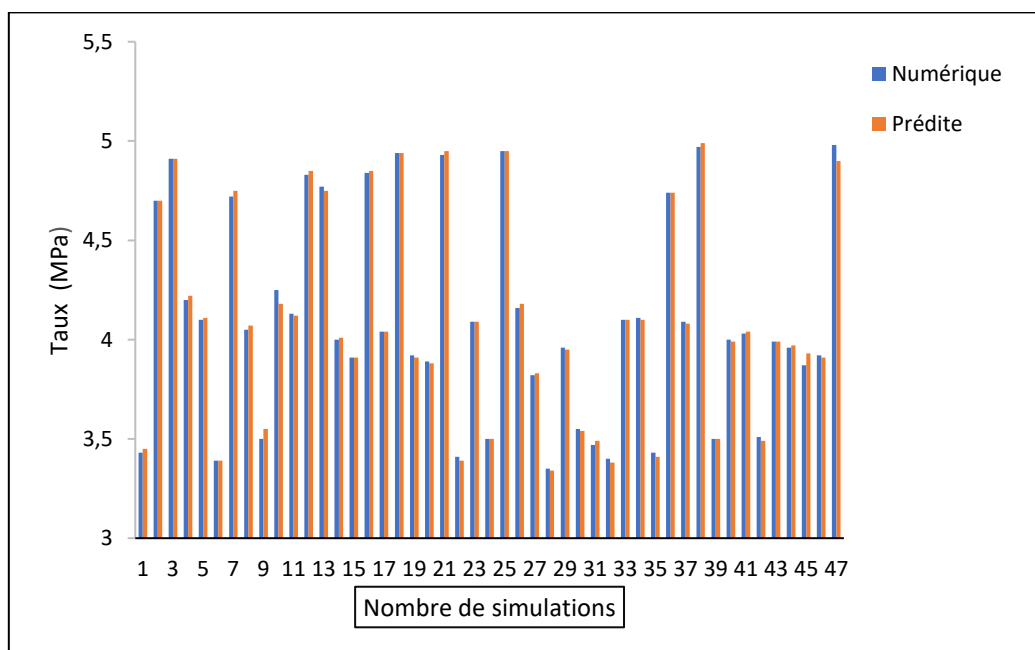


Figure VI.5 : Valeurs numériques prédites de la contrainte de cisaillement (Taux) à E.L.U.

La précision du modèle découvert est démontrée par la comparaison entre les valeurs numériques et les valeurs prédites, comme présenté dans la Figure VI.5. L'analyse des résultats révèle une proximité remarquable entre ces deux ensembles de données. Cette constatation souligne la précision du modèle en fournissant des estimations qui sont très cohérentes avec les valeurs réelles.

### VI.4.3 Validation graphique des modèles

Les graphes de surface de réponse des figures représentées ci-dessous, les résultats de la surface de réponse (3D) des contraintes de flexion et cisaillement et le cout en fonction des Facteurs cherchés ( $b, e, b_0, L_t, e_t, g_1, g_2$ ).

#### 1. Contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U

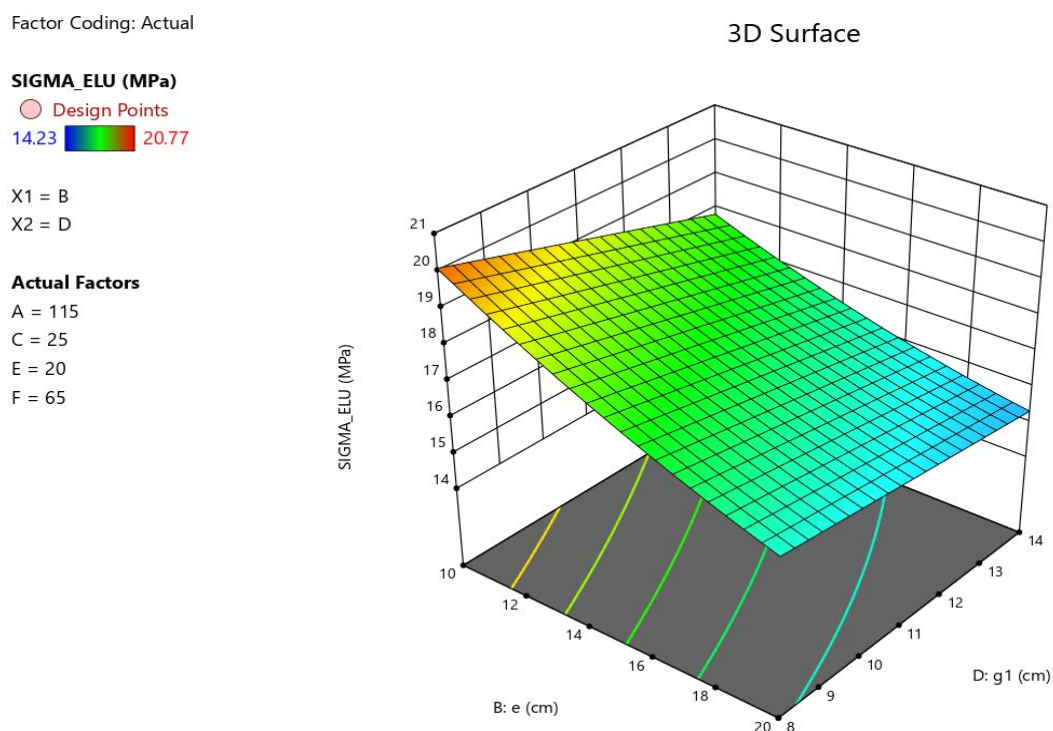
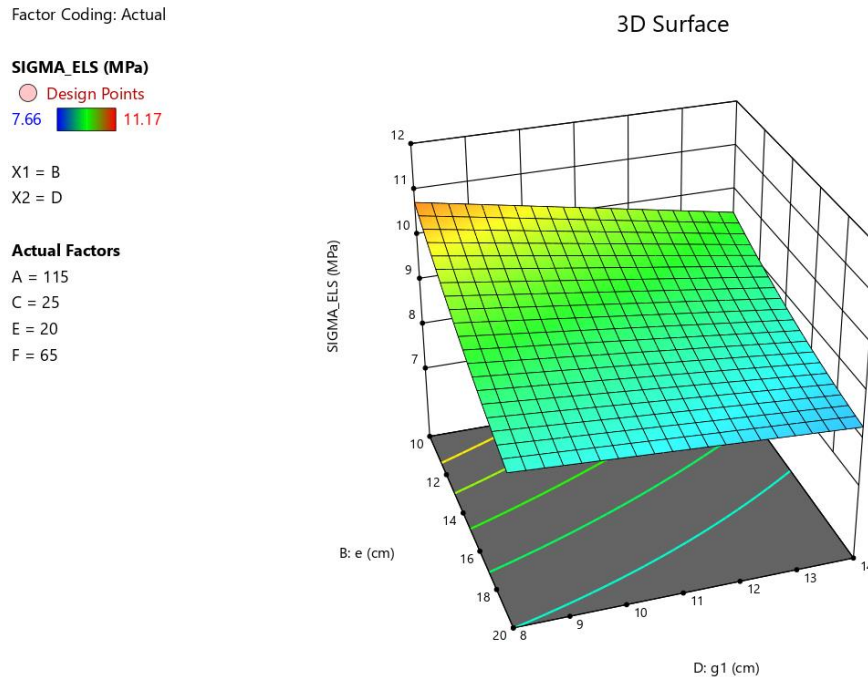


Figure VI.6 : Surfaces de réponses pour la contrainte à la flexion (Sigma) à ELU.

La figure VI.6 illustre la relation entre la contrainte à la flexion à E.L.U et les variations des paramètres d'entrée B et D, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (BD) se produit lorsque la combinaison spécifique de l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ) et de la longueur du gousset ( $g_1$ ) atteint environ 17.06 MPa ; cette valeur de réponse est obtenue avec une longueur du gousset de 11 cm et une épaisseur de la table de compression de 15 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ) et la longueur du gousset ( $g_1$ ) sont importants, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur  $\sigma_{ultime}$ .

## 2. Contrainte de flexion (Sigma)à ELS



**Figure VI.7** : Surfaces de réponses pour la contrainte de flexion (sigma)à ELS.

La figure VI.7 illustre la relation entre la contrainte à la flexion à E.L.S et les variations des paramètres d'entrée B et D, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (BD) se produit lorsque la combinaison spécifique de l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ) et de la longueur du gousset ( $g_1$ ) atteint environ 9.07 MPa ; cette valeur de réponse est obtenue avec une longueur du gousset de 11cm et un épaisseur de la table de compression de 15 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ) et la longueur du gousset ( $g_1$ ) sont important, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur  $\sigma_{service}$ .

## 3. Cout

La figure VI.6 illustre la relation entre le cout et les variations des paramètres d'entrée A et B, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (AB) se produit lorsque la combinaison spécifique de la largeur de la table de compression ( $b$ ) et l'épaisseur de la table de compression ( $e$ )atteint environ 590625 MPa ; cette valeur de réponse est obtenue avec une largeur de la table de compression de 115cm et un épaisseur de la table de compression de 15 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où la largeur de la table de compression ( $b$ ) et l'épaisseur de la table de compression ( $e$ )sont important, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur le cout.

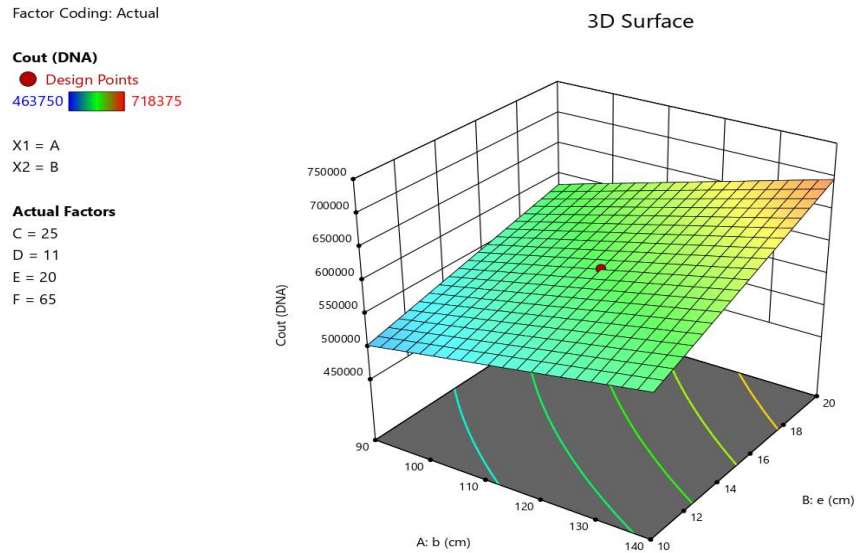


Figure VI.8: Surfaces de réponses pour le cout.

#### 4. Contrainte de cisailment (Taux) à ELU

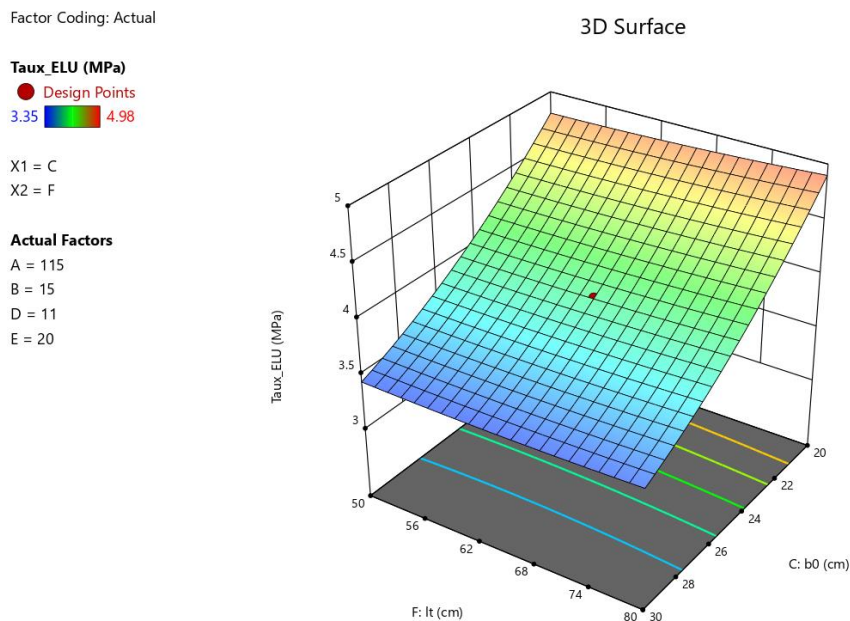


Figure VI.9 : Surfaces de réponses pour la contrainte de cisailment (taux) à ELU.

La figure VI.9 illustre la relation entre la contrainte de cisailment à E.L.U et les variations des paramètres d'entrée C et F, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (CF) se produit lorsque la combinaison spécifique de la largeur du talon ( $L_t$ ) et de l'épaisseur d'âme ( $b_0$ ) atteint environ 4 MPa ; cette valeur de réponse est obtenue avec une largeur du talon de 65cm et un épaisseur d'âme de 25 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où de la largeur du talon ( $L_t$ ) et de l'épaisseur d'âme ( $b_0$ ) sont importants, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur  $\sigma_{service}$ .

## VI.5 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses implique de déterminer, à l'intérieur du domaine expérimental, un réglage des facteurs qui permet de mieux satisfaire les exigences spécifiées en termes de réponse. Dans cette étude, nous avons cherché à optimiser les facteurs géométriques suivants : la largeur de la table de compression ( $b$ ), l'épaisseur de la table de compression ( $e$ ), l'épaisseur d'âme ( $b_0$ ), la largeur du talon ( $L_t$ ), l'épaisseur de talon ( $e_t$ ) et la longueur des goussets ( $g_1$ ) et ( $g_2$ ). Chaque paramètre de conception a été étudié à trois niveaux différents.

L'optimisation des réponses a été réalisée grâce à la méthodologie de surface de réponse (MSR), qui permet d'identifier la combinaison optimale des facteurs d'entrée pour maximiser une réponse spécifique ou un ensemble de réponses. L'objectif d'une optimisation commune est de satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

L'optimisation de plusieurs réponses est une approche qui permet de trouver un compromis entre différentes réponses en utilisant la fonction de désirabilité. Cette fonction permet de regrouper des critères avec des unités différentes en utilisant des fonctions de désirabilité élémentaires qui varient entre 0 et 1. Une valeur de désirabilité de 0 indique une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, tandis qu'une valeur de désirabilité de 1 représente le cas idéal. [18]

### VI.5.1 Désirabilité d'une réponse à maximiser

Un exemple de fonction de désirabilité individuelle ( $d_i$ ) pour une réponse à maximiser est présenté dans la Figure VI.10. Une valeur de 0 est attribuée à une désirabilité individuelle nulle lorsque les facteurs conduisent à une réponse inacceptable ou non désirée. Une valeur de 1 est attribuée lorsque la réponse atteint la performance maximale souhaitée pour les facteurs considérés, correspondant ainsi à la condition idéale.

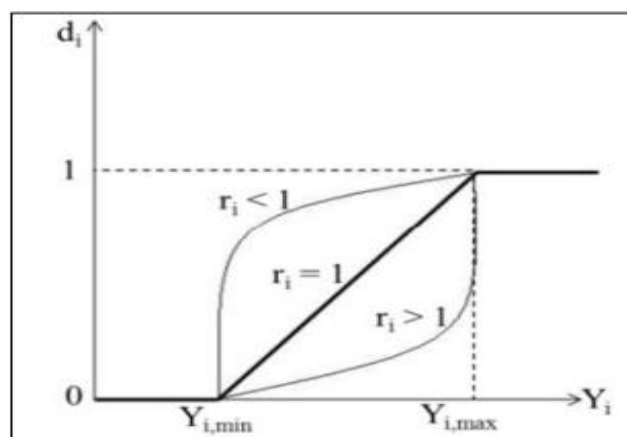


Figure VI.10 : Désirabilité individuelle  $d_i$  d'une réponse  $Y_i$ .

L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée :

$$d_i = 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min}$$

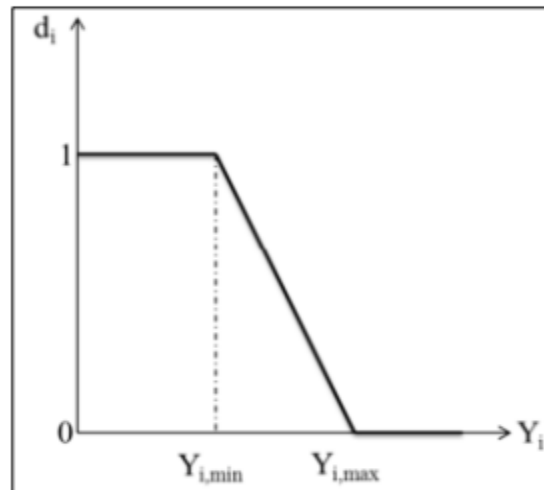
$$d_i = \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,\max} - Y_{i,\min}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (6.10)$$

$$d_i = 1, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}$$

Avec :  $Y_{i,\min}$  : valeur en dessous de laquelle la réponse  $Y_i$  ne convient pas ( $d_i = 0$ ),  
 $Y_{i,\max}$  : valeur cible au-dessus de laquelle la réponse  $Y_i$  est très satisfaisante ( $d_i = 1$ ).

### VI.5.2 Désirabilité d'une réponse à minimiser

Lorsque l'on cherche à minimiser une réponse, la fonction de désirabilité peut être tracée comme le montre la figure VI.11.



**Figure VI.11:** Fonction de désirabilité d'une fonction à minimiser.

Dans ce cas, la fonction de désirabilité est nulle quand la réponse dépasse la valeur limite ( $Y_{i,\max}$ ), elle vaut 1 lorsque la réponse est inférieure ou égale à la valeur cible ( $Y_{i,\min}$ ). L'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être ainsi présentée :

$$d_i = 1, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min}$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,\min} - Y_{i,\max}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \quad (6.11)$$

$$d_i = 0, \text{ Si } Y_i \geq Y_{i,\max}$$

Avec :  $Y_{i,\min}$  : la valeur cible en dessous de laquelle la réponse  $Y_i$  est très satisfaisante ( $d_i = 1$ ),

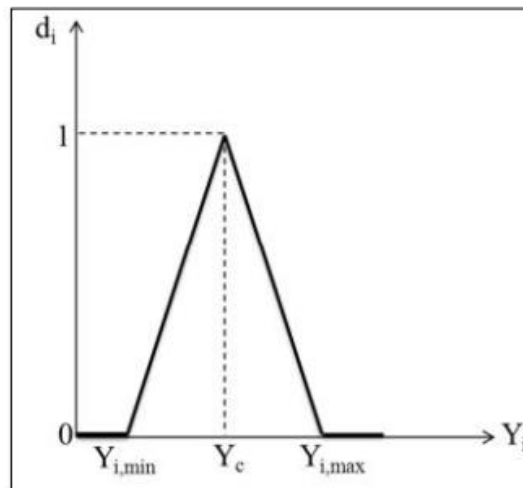
$Y_{i,\max}$  : la valeur au-dessus de laquelle la réponse  $Y_i$  ne convient pas ( $d_i = 0$ ).



### VI.5.3 Désirabilité d'une réponse à cibler

Dans le cas où l'on souhaite avoir une valeur cible d'une réponse, la fonction de désirabilité individuelle est représentée sur la figure VI.12.

Si on cherche par exemple une valeur cible  $Y_c$  de la réponse  $Y_i$ , l'équation permettant de calculer les valeurs de désirabilités individuelles peut être présentée de la façon suivante :



**Figure VI.12:** Fonction de désirabilité d'une fonction à cibler.

$$\begin{aligned}
 d_i &= 0, \text{ Si } Y_i \leq Y_{i,\min} , Y_i \geq Y_{i,\max} \\
 d_i &= \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\min}}{Y_{i,c} - Y_{i,\min}} \right] \text{ Si } Y_{i,\min} \leq Y_i \leq Y_{i,c} \\
 d_i &= \left[ \frac{Y_i - Y_{i,\max}}{Y_{i,c} - Y_{i,\max}} \right] \text{ Si } Y_{i,c} \leq Y_i \leq Y_{i,\max} \\
 d_i &= 1, \text{ Si } Y_i = Y_c
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

La fonction de désirabilité vaut 1 lorsque la réponse est égale à la valeur cible cherchée. Elle vaut zéro si la réponse est en dessous ou au-dessus des valeurs  $Y_{i,\min}$  et  $Y_{i,\max}$  précisées.

### VI.6 Optimisation de la section des poutres

Les réglages utilisés lors du processus d'optimisation sont présentés dans le Tableau VI.9. Les valeurs optimales des facteurs ont été obtenues à l'aide du logiciel "Design Expert 13".



### VI.6.1 En zone courante

**Tableau VI.9 :** Réglages appliqués sur les facteurs à optimiser.

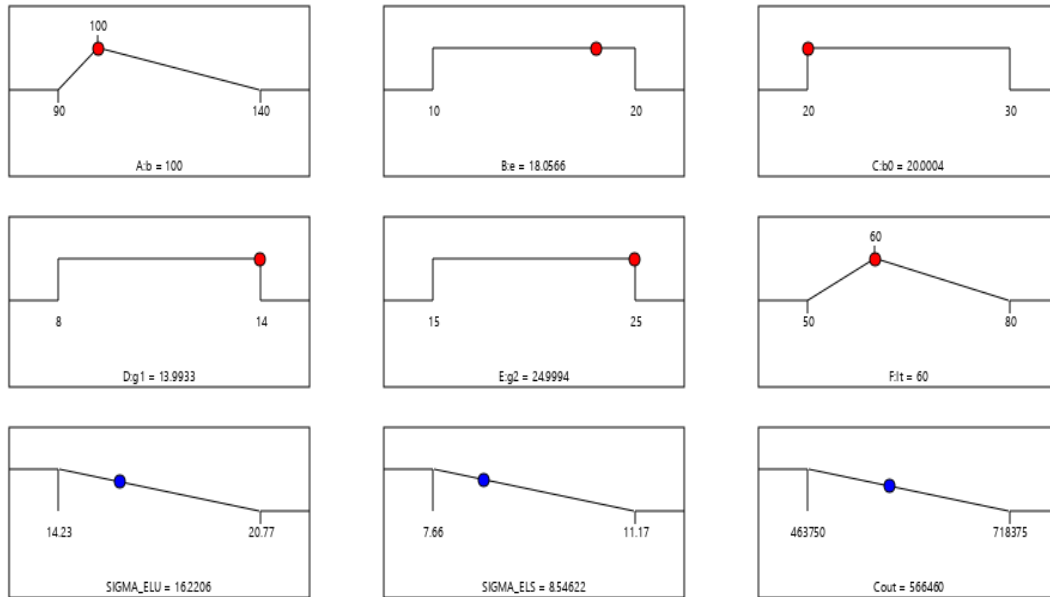
Facteurs	Objectif	Limite inférieure	Limite Supérieure	Poids inférieure	Poids Supérieure	Importance
$b$	Dans l'intervalle	90	140	1	1	3
$e$	Dans l'intervalle	10	20	1	1	3
$b_0$	Dans l'intervalle	20	30	1	1	3
$g_1$	Dans l'intervalle	8	14	1	1	3
$g_2$	Dans l'intervalle	15	25	1	1	3
$L_t$	Dans l'intervalle	50	80	1	1	3
<b>SIGMA à E.L.U</b>	Minimiser	14.23	20.77	1	1	3
<b>SIGMA à E.L.S</b>	Minimiser	7.66	11.17	1	1	3
<b>Cout</b>	Minimiser	463750	718375	1	1	3

L'objectif du problème consiste à minimiser la fonction de désirabilité (D) tout en respectant les réglages des variables. Les tableaux ci-dessous montrent les valeurs optimales des facteurs pour le problème étudié.

**Tableau VI.10 :** Résultats de l'optimisation.

N°	$b$	$e$	$b_0$	$g_1$	$g_2$	$L_t$	SIGMA à E.L.U	SIGMA à E.L.S	Cout	Désirabilité	
<b>1</b>	<b>100.000</b>	<b>18.057</b>	<b>20.000</b>	<b>13.993</b>	<b>24.999</b>	<b>60.000</b>	<b>16.221</b>	<b>8.546</b>	<b>566459.656</b>	<b>0.791</b>	<b>Selecte</b>
<b>2</b>	100.000	18.369	20.022	13.981	25.000	60.000	16.164	8.523	569714.879	0.791	
<b>3</b>	100.246	18.829	20.000	14.000	25.000	59.996	16.059	8.479	574805.126	0.791	
<b>4</b>	100.048	17.408	20.000	14.000	25.000	60.000	16.343	8.597	560100.197	0.790	
<b>5</b>	101.098	17.741	20.000	13.997	25.000	60.000	16.197	8.530	565712.899	0.789	

Le graphique de la solution optimale désirée est donné dans la figure ci-dessus. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des facteurs géométriques ( $b, e, b_0, L_t, e_t, g_1, g_2$ ) pour obtenir des réponses minimales



Desirability = 0.791  
Solution 1 out of 10

Figure VI.13: Représentation graphique de la procédure d'optimisation pour la section de poutres en zone courante.

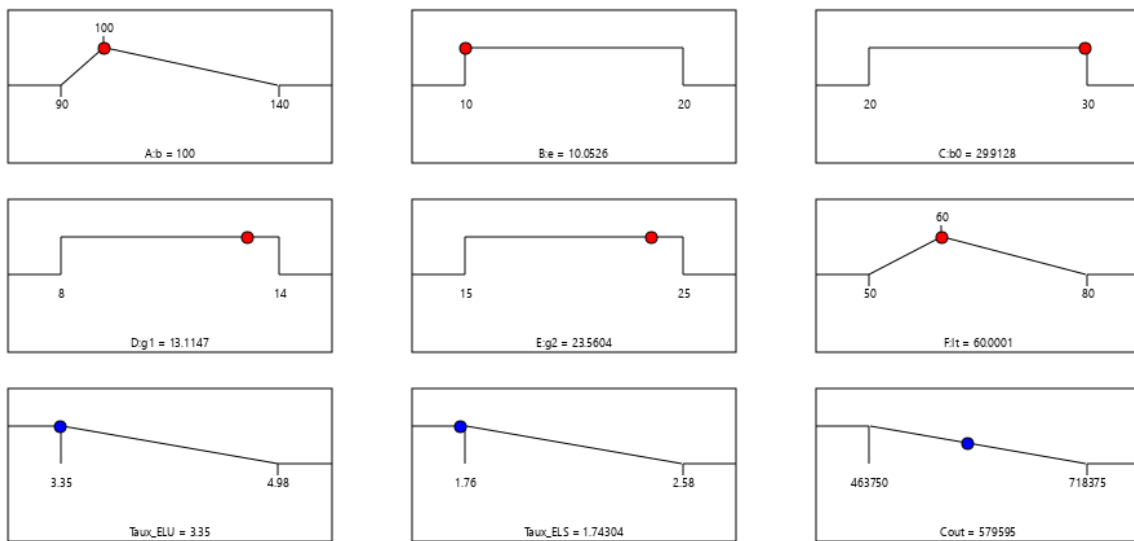
### VI.6.2 En zone d'about (au niveau des appuis)

Tableau VI.11 : Réglages appliqués sur les facteurs à optimiser.

Facteurs	Objectif	Limite inférieure	Limite Supérieure	Poids inférieure	Poids Supérieure	Importance
$b$	Dans l'intervalle	90	140	1	1	3
$e$	Dans l'intervalle	10	20	1	1	3
$b_0$	Dans l'intervalle	20	30	1	1	3
$g_1$	Dans l'intervalle	8	14	1	1	3
$g_2$	Dans l'intervalle	15	25	1	1	3
$L_t$	Dans l'intervalle	50	80	1	1	3
Taux à E.L.U	Minimiser	3.35	4.98	1	1	5
Taux à E.L.S	Minimiser	1.76	2.58	1	1	1
Cout	Minimiser	463750	718375	1	1	1

Tableau VI.12 : Résultats de l'optimisation.

N°	$b$	$e$	$b_0$	$g_1$	$g_2$	$L_t$	Taux ELU	Taux ELS	Cout	Désirabilité	
1	100.000	10.053	29.913	13.115	23.560	60.000	3.350	1.743	579595.409	0.954	Selecte
2	100.000	10.000	29.829	12.355	24.976	60.000	3.350	1.742	579726.290	0.954	
3	100.038	10.000	30.000	11.599	24.612	60.000	3.358	1.747	576019.582	0.954	
4	100.168	10.001	30.000	12.897	23.393	60.000	3.351	1.744	578423.128	0.954	
5	100.004	10.001	30.000	11.852	23.966	60.002	3.364	1.750	574784.834	0.954	



Desirability = 0.954  
Solution 1 out of 10

Figure VI.14 : Représentation graphique de la procédure d'optimisation pour la section de poutres en zone d'about.

## VI.7 Conclusion

La méthode d'optimisation proposée dans cette étude a permis d'optimiser les facteurs géométriques qui influencent le fonctionnement des poutres d'un pont. Cet exemple met en évidence que l'application de cette méthode, en l'occurrence la méthode de surface de réponse, ne présente aucune difficulté majeure. Il démontre également que, dans les cas les plus simples, il est possible d'obtenir les valeurs souhaitées sans recourir à des méthodes d'optimisation complexes. Cela souligne l'efficacité et la facilité d'utilisation de la méthode de surface de réponse pour l'optimisation des paramètres géométriques dans ce contexte spécifique.

# CHAPITRE

VII  
XII

## Chapitre VII : Optimisation de la section en caisson de tablier de pont

### VII.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'optimiser les paramètres géométriques d'un tablier de pont de section en caisson. Pour le pont étudié, les paramètres à optimiser sont la hauteur totale du voussoir ( $H$ ), épaisseur d'âme ( $e_a$ ), épaisseur du hourdis inférieur ( $e_i$ ), épaisseur du hourdis supérieur ( $e_s$ ), et la largeur du voussoir ( $B$ ).

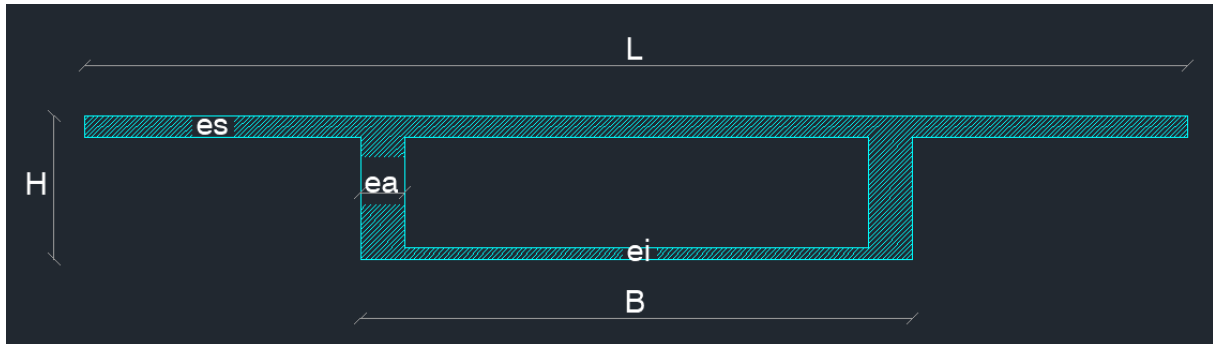


Figure VII.1 : Schéma présente la section d'un tablier en caisson.

Pour le tablier en caisson étudié, le modèle comporte 5 facteurs et chaque facteur possède trois niveaux, dont l'intervalle de variation de chaque facteur est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau VII.1 : Intervalle de variation des facteurs à optimiser.

Facteurs	Niveaux de variation		
	Valeur minimale	Valeur moyenne	Valeur maximale
$H$ (cm)	100	120	140
$e_a$ (cm)	20	30	40
$e_i$ (cm)	10	20	30
$e_s$ (cm)	10	20	30
$B$ (cm)	400	500	600

Le processus d'optimisation est basé sur les résultats des contraintes de flexion et du cout de réalisation de chaque configuration étudiée.

### VII.2 Choix d'un plan d'expériences

Il est maintenant nécessaire de sélectionner un plan d'expérience, qui consiste en une liste ordonnée d'essais visant à identifier les facteurs pertinents du problème. Dans cette étude, nous adopterons un plan fractionnaire de type Box-Behnken L41, comme présenté dans le tableau ci-dessous :

**Tableau VII.2 :** Plan d'expériences type Box-Behnken L41 (5 facteurs, 3 niveaux).

N° D'essai	Facteurs				
	$H$ (cm)	$e_a$ (cm)	$e_i$ (cm)	$e_s$ (cm)	$B$ (cm)
1	120	40	10	20	500
2	140	40	20	20	500
3	120	30	30	20	600
4	120	20	20	30	500
5	120	30	30	10	500
6	120	20	20	10	500
7	100	30	20	30	500
8	140	30	20	20	400
9	120	30	30	30	500
10	120	30	10	10	500
11	100	20	20	20	500
12	120	30	20	10	400
13	120	20	10	20	500
14	120	20	20	20	400
15	120	40	20	20	600
16	100	30	10	20	500
17	100	30	20	20	600
18	140	30	20	20	600
19	120	30	20	20	500
20	120	30	10	20	400
21	120	20	20	20	600
22	120	30	30	20	400
23	100	30	20	10	500
24	100	40	20	20	500
25	120	40	20	10	500
26	100	30	20	20	400
27	120	30	10	30	500
28	120	40	30	20	500
29	120	20	30	20	500
30	140	30	30	20	500
31	120	30	10	20	600
32	120	30	20	30	400
33	140	30	20	10	500

34	140	30	20	30	500
35	140	20	20	20	500
36	140	30	10	20	500
37	100	30	30	20	500
38	120	40	20	30	500
39	120	30	20	30	600
40	120	40	20	20	400
41	120	30	20	10	600

Dans ce tableau, chaque ligne représente un modèle numérique qui doit être réalisé à l'aide du logiciel ROBOT (RSA). Par conséquent, il est nécessaire de créer 41 modèles numériques en accord avec les données fournies dans le tableau ci-dessus.

### VII.3 Résultats

Les résultats de la modélisation, exprimés en termes de contraintes de flexion et de coût de réalisation calculé à partir des formules mentionnées dans le chapitre précédent, sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ces résultats ont été obtenus en utilisant différentes combinaisons conformément à la matrice de planification des expériences pour un plan fractionnaire de type Box-Behnken L41.

**Tableau VII.3 :** Résultats en terme de contraintes de flexion et du cout.

N° d'essai	Facteurs					Réponses		
	H (cm)	e <sub>a</sub> (cm)	e <sub>i</sub> (cm)	e <sub>s</sub> (cm)	B (cm)	SIGMA à ELU (MPa)	SIGMA à ELS (MPa)	Cout (DNA)
1	120	40	10	20	500	20.03	14.66	2.8875E+06
2	140	40	20	20	500	17.77	13.07	3.325E+06
3	120	30	30	20	600	22.32	19.06	3.6925E+06
4	120	20	20	30	500	21.59	15.86	4.1475E+06
5	120	30	30	10	500	25.77	18.68	2.6075E+06
6	120	20	20	10	500	25.78	18.68	2.065E+06
7	100	30	20	30	500	29.36	21.37	3.7625E+06
8	140	30	20	20	400	18.26	13.13	2.975E+06
9	120	30	30	30	500	21.59	15.86	4.2525E+06
10	120	30	10	10	500	25.78	18.68	1.8375E+06
11	100	20	20	20	500	30.45	21.96	2.835E+06
12	120	30	20	10	400	17.77	13.07	2.0475E+06
13	120	20	10	20	500	22.77	16.6	2.5025E+06
14	120	20	20	20	400	23.35	16.69	2.73E+06
15	120	40	20	20	600	22.32	16.56	3.36E+06

16	100	30	10	20	500	30.45	21.96	2.555E+06
17	100	30	20	20	600	29.9	21.9	3.115E+06
18	140	30	20	20	600	17.37	13.02	3.325E+06
19	120	30	20	20	500	25.83	19.65	3.045E+06
20	120	30	10	20	400	23.35	16.69	2.5725E+06
21	120	20	20	20	600	22.32	16.56	3.08E+06
22	120	30	30	20	400	23.35	16.69	3.1675E+06
23	100	30	20	10	500	34.32	24.56	2.1175E+06
24	100	40	20	20	500	30.45	21.96	3.045E+06
25	120	40	20	10	500	25.77	18.68	2.38E+06
26	100	30	20	20	400	31.19	22.11	2.765E+06
27	120	30	10	30	500	21.59	15.86	3.4825E+06
28	120	40	30	20	500	22.77	16.6	3.5525E+06
29	120	20	30	20	500	22.77	16.6	3.3075E+06
30	140	30	30	20	500	17.77	13.07	3.535E+06
31	120	30	10	20	600	22.32	16.56	2.7475E+06
32	120	30	20	30	400	21.98	15.87	3.6925E+06
33	140	30	20	10	500	20.12	14.74	2.3275E+06
34	140	30	20	30	500	16.68	12.33	3.9725E+06
35	140	20	20	20	500	17.77	13.07	2.975E+06
36	140	30	10	20	500	17.77	13.07	2.765E+06
37	100	30	30	20	500	30.45	21.96	3.325E+06
38	120	40	20	30	500	21.59	15.86	3.99E+06
39	120	30	20	30	600	21.59	15.86	4.0425E+06
40	120	40	20	20	400	23.35	16.69	3.01E+06
41	120	30	20	10	600	24.49	18.09	2.3975E+06

## VII.4 Analyse statistique des résultats

### VII.4.1 Analyse de la variance ANOVA

Tableau VII.4 Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion (SIGMA) à E.L.U.

Source	Sommes des carrées SS	Df	Moyenne des carrées MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	750.79	12	62.57	36.51	<0.0001		Signifiant
<b>A-H</b>	663.84	1	663.84	387.38	<0.0001	79.4	Signifiant
<b>B-ea</b>	0.4727	1	0.4727	0.2758	0.6036	0.0565	Non signifiant
<b>C-ei</b>	0.4658	1	0.4658	0.2718	0.6062	0.0557	Non signifiant
<b>D-es</b>	35.49	1	35.49	20.71	<0.0001	4.24	Signifiant



<b>E-B</b>	0.0001	1	0.0001	0.0000	0.9955	0.000012	Non significiant
<b>AD</b>	0.5776	1	0.5776	0.3371	0.5662	0.0691	Non significiant
<b>BC</b>	1.88	1	1.88	1.10	0.3043	0.225	Non significiant
<b>DE</b>	12.64	1	12.64	7.37	0.0112	1.51	Signifiant
<b>B<sup>2</sup></b>	17.22	1	17.22	10.05	0.0037	2.06	Signifiant
<b>C<sup>2</sup></b>	17.22	1	17.22	10.05	0.0037	2.06	Signifiant
<b>D<sup>2</sup></b>	9.45	1	9.45	5.51	0.0262	1.1301581	Signifiant
<b>E<sup>2</sup></b>	28.93	1	28.93	16.88	0.0003	3.45983849	Signifiant
<b>Résiduel</b>	47.98	28	1.71			5.73809369	
<b>Cor Total</b>	798.78	40					

L'analyse de la variance ANOVA présentée dans le tableau VII.4 montre que la hauteur du voussoir ( $H$ ) est le facteur le plus important dans le cas de la contrainte de flexion à l'ELU, leur contribution est de 79.4 %, l'épaisseur de l'hourdis supérieur ( $e_s$ ) de 4.24 %, et pour les paramètres quadratique ( $B^2, C^2, D^2$  et  $E^2$ ) leur contribution varie comme suit 2.06 % pour  $B^2$  et  $C^2$ , 1.13 % et 3.46% , pour le paramètres d'interaction (DE) leur contribution est de 1.51 %, le reste des facteurs ( $e_a; e_i; B$ ) ont une faible influence, donc ça donne un effort négligeable non significiant dans le résultat.

**Tableau VII.5 :** Analyse de la variance ANOVA pour la contrainte de flexion à E.L.S.

Source	Somme Des carrés SS	Df	Moyenne des carrés MC	F-value	p-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	372.89	12	31.07	36.08	<0.0001		Signifiant
<b>A-H</b>	326.52	1	326.52	379.14	< 0.001	78.5	Signifiant
<b>B-ea</b>	0.2352	1	0.2352	0.2731	0.6054	0.0566	Non significiant
<b>C-ei</b>	1.23	1	1.23	1.43	0.2417	0.296	Non significiant
<b>D-es</b>	16.63	1	16.63	19.30	0.0001	4.00	Signifiant
<b>E-B</b>	2.78	1	2.78	3.23	0.0832	0.669	Signifiant
<b>BC</b>	0.9409	1	0.9409	1.09	0.3049	0.226	Non significiant
<b>CE</b>	1.56	1	1.56	1.81	0.1888	0.375	Non significiant
<b>DE</b>	6.33	1	6.33	7.34	0.0114	1.52	Signifiant
<b>B<sup>2</sup></b>	10.27	1	10.27	11.92	0.0018	2.47	Signifiant
<b>C<sup>2</sup></b>	7.06	1	7.06	8.20	0.0079	1.70	Signifiant
<b>D<sup>2</sup></b>	5.48	1	5.48	6.36	0.0177	1.31827073	Signifiant
<b>E<sup>2</sup></b>	12.55	1	12.55	14.58	0.0007	3.01903241	Signifiant
<b>Résiduel</b>	24.11	28	0.8612			5.79991008	
<b>Cor Total</b>	397.00	40					

L'analyse de la variance ANOVA présentée dans le tableau VII.5 montre que la hauteur du voussoir ( $H$ ) est le facteur le plus important dans le cas de la contrainte de flexion à l'ELU, leur contribution est de 78.5%, l'épaisseur de l'hourdis supérieur ( $e_s$ ) de 4.00 %, et pour les paramètres quadratique ( $B^2, C^2, D^2$  et  $E^2$ ) leur contribution varie comme suit 2.47%, 1.70 %, 1.12 % et 3.01%, pour les paramètres d'interaction (DE) leur contribution est de 1.51 %, le reste des facteurs ( $e_a; e_i; B$ ) ont une faible influence, donc ça donne un effort négligeable non significatif dans le résultat.

**Tableau VII.6 :** Analyse de la variance ANOVA pour le cout.

Source	Somme des carrés SS	Df	Moyenne des carrés MC	F-value	P-value	% de Contribution	Remarque
<b>Model</b>	1.480E+13	9	1.645E+12	498.01	< 0.0001		Signifiant
<b>A-H</b>	1.764E+11	1	1.764E+11	53.41	< 0.0001	1.18	Signifiant
<b>B-ea</b>	2.274E+11	1	2.274E+11	68.85	< 0.0001	1.53	Signifiant
<b>C-ei</b>	2.318E+12	1	2.318E+12	701.79	< 0.0001	15.5	Signifiant
<b>D-es</b>	1.150E+13	1	1.150E+13	3480.57	< 0.0001	77.127	Signifiant
<b>E-B</b>	4.900E+11	1	4.900E+11	148.35	< 0.0001	3.286288	Signifiant
<b>AB</b>	4.900E+09	1	4.900E+09	1.48	0.2324	0.03286288	Non signifiant
<b>BC</b>	4.900E+09	1	4.900E+09	1.48	0.2324	0.0003	Non signifiant
<b>BD</b>	5.581E+10	1	5.581E+10	16.90	0.0003	0.374	Signifiant
<b>CE</b>	3.063E+10	1	3.063E+10	9.27	0.0047	0.205	Signifiant
<b>Résiduel</b>	1.024E+11	31	3.303E+09			0.687	
<b>Cor Total</b>	1.491E+13	40					

L'analyse de variance ANOVA présentée dans le tableau VII.6 révèle que l'épaisseur de l'hourdis supérieur ( $e_s$ ) et l'épaisseur de l'hourdis inférieur ( $e_i$ ) sont les facteurs les plus importants en ce qui concerne le coût, avec des contributions de 77,12 % pour l'épaisseur de l'hourdis supérieur ( $e_s$ ) et de 15,5 % pour l'épaisseur de l'hourdis inférieur ( $e_i$ ). Les autres facteurs ( $H, e_a, B$ ) ont une influence faible, avec des contributions de 1,18 %, 1,53 % et 3,28 % respectivement, ce qui indique un impact négligeable et non significatif sur les résultats.

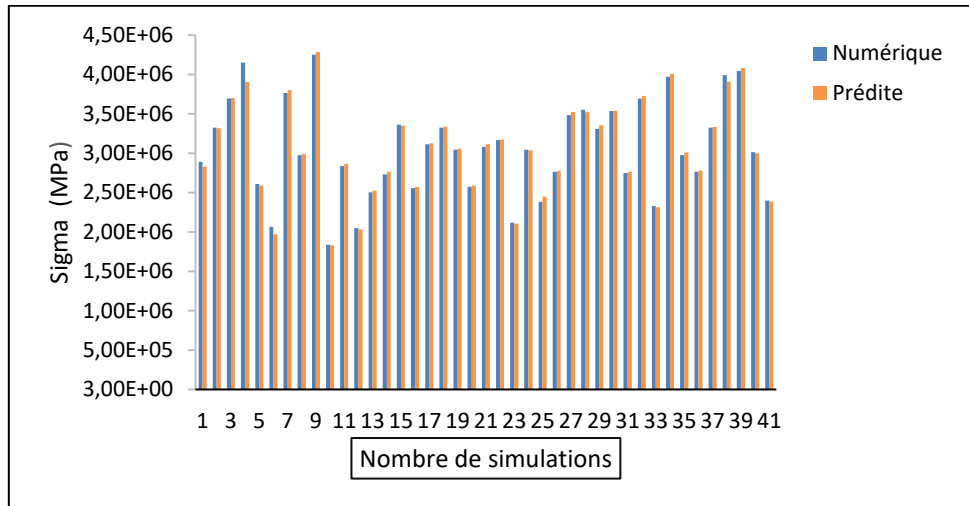
#### VII.4.2 Analyse de régression

La relation fonctionnelle entre la variable de sortie (contrainte de flexion et coût) et les variables d'entrée ( $H, e_a, e_i, e_s, B$ ) a été exprimée à l'aide d'un coefficient de détermination  $R^2$ , qui représente la précision de la régression. Les modèles quadratiques obtenus grâce à l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire les sorties en fonction des facteurs étudiés. Les équations correspondantes aux modèles obtenus sont les suivantes :

**1. Contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U**

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.9399$

$$\sigma_{ultime} = -17.82224 - 0.360062 * H + 0.794377 * e_a + 0.443939 * e_i + 0.980189 * e_s + 0.240496 * B + 0.001900 * H * e_s + 0.006850 * e_a * e_i - 0.001777 * e_s * B - 0.015809 * e_a^2 - 0.015809 * e_i^2 - 0.011709 * e_s^2 - 0.000205 * B^2. \tag{7.1}$$



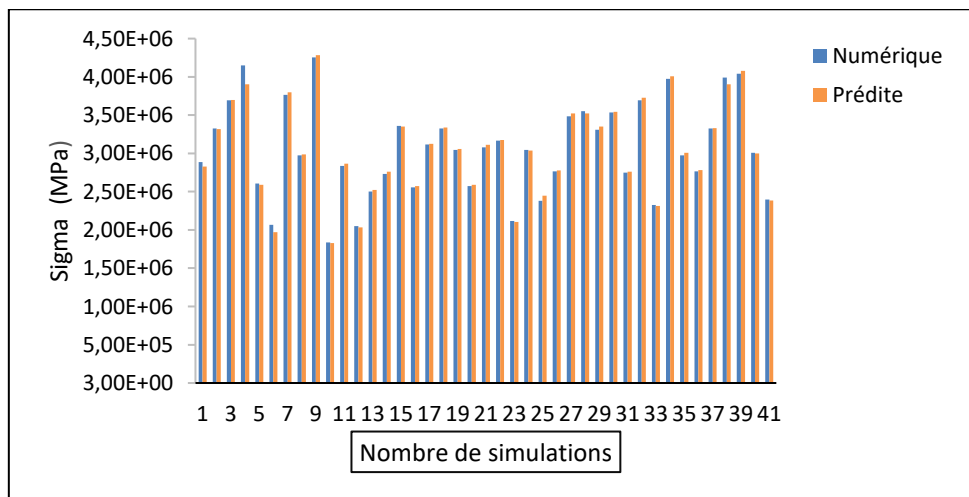
**Figure VII.2:** Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U.

La figure VII.2 présente une comparaison entre les valeurs numériques et les valeurs prédites. L'analyse des résultats démontre que les valeurs prédites sont très proches des valeurs numériques, ce qui témoigne de la précision du modèle obtenu.

**2. Contrainte de flexion (Sigma) à E.L.S**

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.9393$

$$\sigma_{service} = -9.98217 - 0.225875 * H + 0.623327 * e_a - 0.025282 * e_i + 0.883447 * e_s + 0.151811 * B + 0.004850 * e_a * e_i + 0.000625 * e_i * B - 0.001257 * e_s * B - 0.012208 * e_a^2 - 0.010124 * e_i^2 - 0.008916 * e_s^2 - 0.000135 * B^2. \tag{7.2}$$



**Figure VII.3 :** Valeurs numériques et prédites de la contrainte de flexion (Sigma) à E.L.S.

La précision du modèle obtenu peut être évaluée en comparant les valeurs numériques et prédites, comme illustré dans la figure VII.3. L'analyse des résultats démontre que les valeurs prédites sont en très bonne concordance avec les valeurs numériques, ce qui confirme la précision du modèle. Cette observation renforce notre confiance dans la capacité du modèle à fournir des prédictions fiables.

### 3.Cout

Coefficient de détermination  $R^2 = 0.993$

$$\text{Cout} = -6.76444\text{E}+05 + 1.60551\text{E}-10 * H + 21546.87500 * e_a + 4812.50000 e_i + 1.20203\text{E}+05 e_s - 4.90709\text{E}-12 * B + 175.00000 * H * e_a - 350.00000 * e_a * e_i - 1181.25000 * e_a * e_s + 87.50000 * e_i * B. (7.3)$$

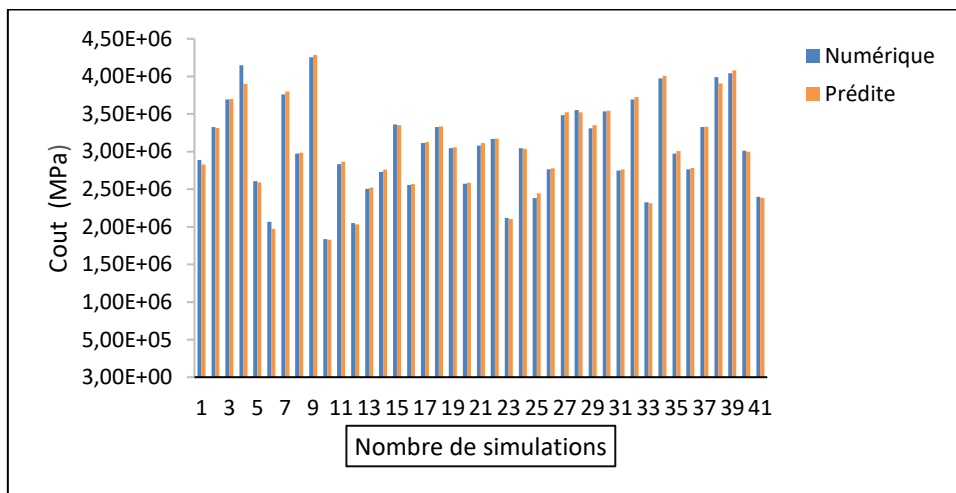


Figure VII.4: Valeurs numériques et prédites du Cout.

La figure VII.4 présente une comparaison entre les valeurs numériques et les valeurs prédites. L'analyse approfondie des résultats met en évidence une concordance remarquable entre les valeurs prédites et les valeurs numériques, démontrant ainsi la grande précision du modèle obtenu. Cette observation renforce la confiance dans la capacité du modèle à fournir des prédictions fiables et confirme sa validité dans ce contexte spécifique.

#### VII.4.3 Validation graphique des modèles

Les figures ci-dessous illustrent les surfaces de réponse en 3D montrant les variations de la contrainte de flexion à E.L.U, la contrainte de flexion à E.L.S et du cout dues aux influences combinées des facteurs d'entrée ( $H; e_s; e_a; e_i; B$ ) Ces surfaces de réponse sont construites à l'aide d'équations de régression, montrant comment les variables de réponse changent dans l'espace des paramètres conçu.

##### 1. Contrainte de flexion (Sigma) à E.L.U

Factor Coding: Actual

3D Surface

**SIGMA\_ELU (MPa)**

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

16.68  34.32

X1 = D

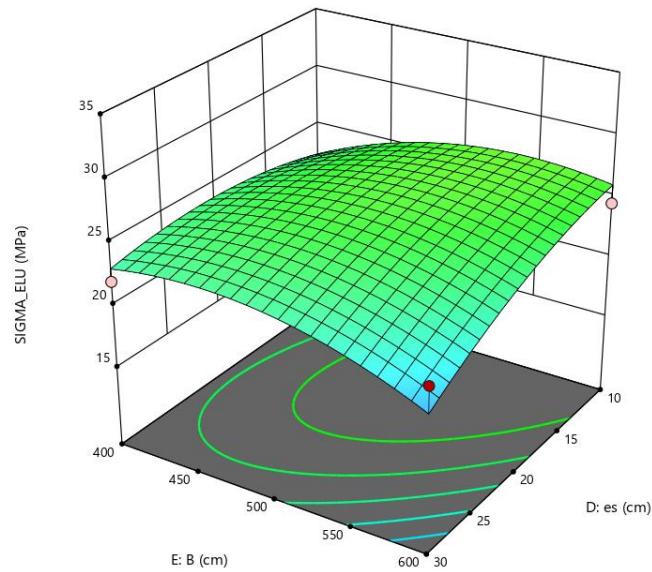
X2 = E

**Actual Factors**

A = 120

B = 30

C = 20



**Figures VII.5 :** Surfaces de réponses pour  $\sigma_{ultime}$ .

La figure VII.5 illustre la relation entre la contrainte à la flexion à E.L.U et les variations des paramètres d'entrée E et D, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (DE) se produit lorsque la combinaison spécifique de la largeur du voussoir et de l'épaisseur de la semelle supérieure atteint environ 24.49MPa ; cette valeur de réponse est obtenue avec d'une largeur de 600 cm et une l'épaisseur de la semelle supérieure de 10 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où l'épaisseur ( $e_s$ ) et la largeur du voussoir ( $B$ ) sont important, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur  $\sigma_{ultime}$ .

## 2. Contrainte de flexion (Sigma) à E.L.S

La figure dessous VII.6 illustre la relation entre la contrainte à la flexion à E.L.S et les variations des paramètres d'entrée E et D, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (DE) se produit lorsque la combinaison spécifique de la largeur du voussoir et de l'épaisseur de la semelle supérieure atteint environ 18.09MPa ; cette valeur de réponse est obtenue avec d'une largeur de 600 cm et une l'épaisseur de la semelle supérieure de 10 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où l'épaisseur ( $e_s$ ) et la largeur du voussoir ( $B$ ) sont important, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur  $\sigma_{service}$ .

Factor Coding: Actual

**SIGMA\_ELS (MPa)**

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

12.33  24.56

X1 = D

X2 = E

**Actual Factors**

A = 120

B = 30

C = 20

3D Surface

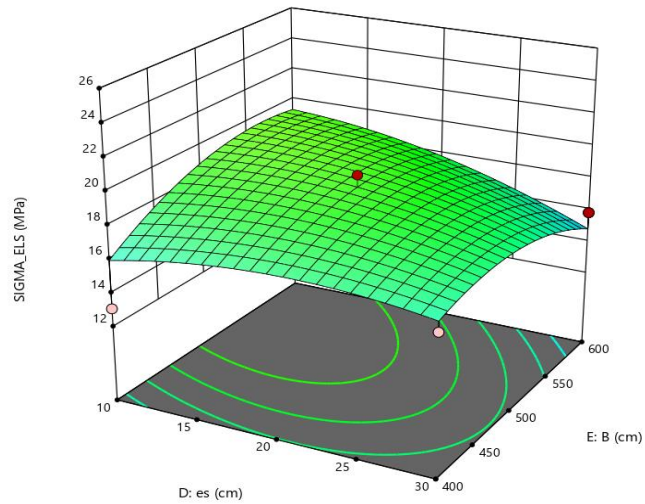


Figure VII.6 : Surfaces de réponses pour  $\sigma_{service}$  .

### 3.Cout

Factor Coding: Actual

**Cout (DNA)**

Design Points:

● Above Surface

○ Below Surface

1.8375E+06  4.2525E+06

X1 = D

X2 = E

**Actual Factors**

A = 120

B = 30

C = 20

3D Surface

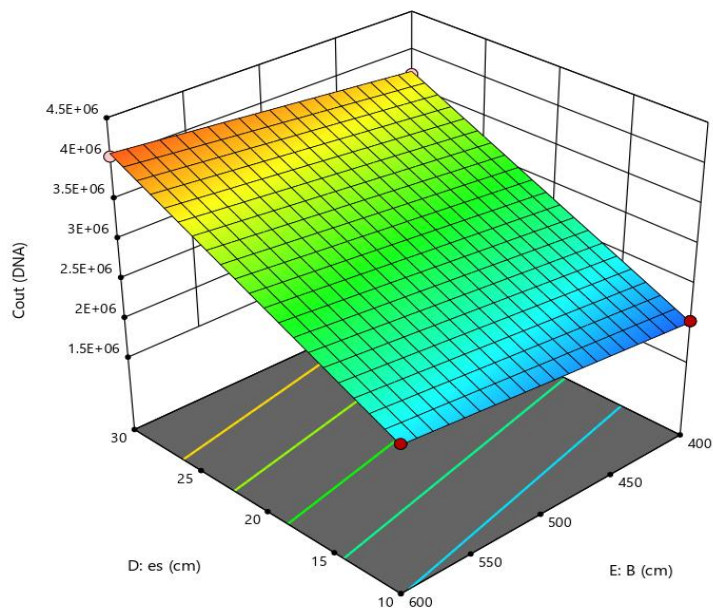


Figure VII.7 : Surfaces de réponses pour le cout.

La figure VII.7 illustre la relation entre la contrainte à le cout et les variations des paramètres d'entrée B et D, tout en maintenant les autres paramètres constants. La valeur de réponse la plus élevée pour l'interaction (BD) se produit lorsque la combinaison spécifique de l'épaisseur de l'âme et de l'épaisseur de la semelle supérieure atteint environ 4.1475 E+06 DNA ; cette valeur de réponse est obtenue avec une épaisseur de l'âme de 20 cm et l'épaisseur de la semelle supérieure de 30 cm.

L'analyse des surfaces de réponses confirme les résultats de l'ANOVA, où l'épaisseur ( $e_s$ ) et l'épaisseur de l'âme ( $e_a$ ) sont important, donc ces facteurs possèdent l'effet le plus significatif sur le cout.

### VII.5 Optimisation par la méthode de fonction de désirabilité

L'objectif de la procédure d'optimisation dans cette partie est de déterminer les valeurs optimales des facteurs d'entrée ( $H; e_s; e_a; e_i; B$ ) afin de minimiser les contraintes de flexion à E.L.U. et à E.L.S. ainsi que le coût de construction. Le tableau VII.7 résume les objectifs des paramètres du processus d'optimisation et les plages de variation.

Tableau VII.7 : Réglages appliqués sur les facteurs à optimiser.

Facteurs	Objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieure	Poids supérieure	Importance
$H$	Dans l'intervalle	100	140	1	1	3
$e_a$	Dans l'intervalle	20	40	1	1	3
$e_i$	Dans l'intervalle	10	30	1	1	3
$e_s$	Dans l'intervalle	10	30	1	1	3
$B$	Dans l'intervalle	400	600	1	1	3
<b>SIGMA à E.L.U</b>	Minimiser	16.68	34.32	1	1	2
<b>SIGMA à E.L.S</b>	Minimiser	12.33	24.56	1	1	3
<b>Cout</b>	Minimiser	1.8375E+06	4.2525E+06	1	1	5

Tableau VII.8 : Résultat de l'optimisation.

N°	$H$	$e_a$	$e_i$	$e_s$	$B$	SIGMA à E.L.U	SIGMA à E.L.S	Cout	Désirabilité	
1	139.570	24.438	10.897	10.028	424.451	15.584	11.866	1726898.423	1.000	Selecte
2	137.443	20.997	10.093	12.185	430.319	16.331	12.312	1797859.527	1.000	
3	139.265	22.632	14.937	10.450	410.670	15.639	11.692	1829863.390	1.000	
4	133.901	30.052	10.668	10.020	400.172	16.184	12.329	1836694.238	1.000	
5	138.616	20.151	16.498	10.032	400.969	14.785	10.961	1755524.653	1.000	

Le graphique de la solution optimale souhaitée est présenté dans la figure VII.8 Cette figure illustre la valeur maximale de désirabilité ainsi que les valeurs des facteurs géométriques ( $H; e_s; e_a; e_i; B$ ) nécessaires pour obtenir des réponses minimales, c'est-à-dire une contrainte de flexion minimale avec un coût de réalisation également minimal.



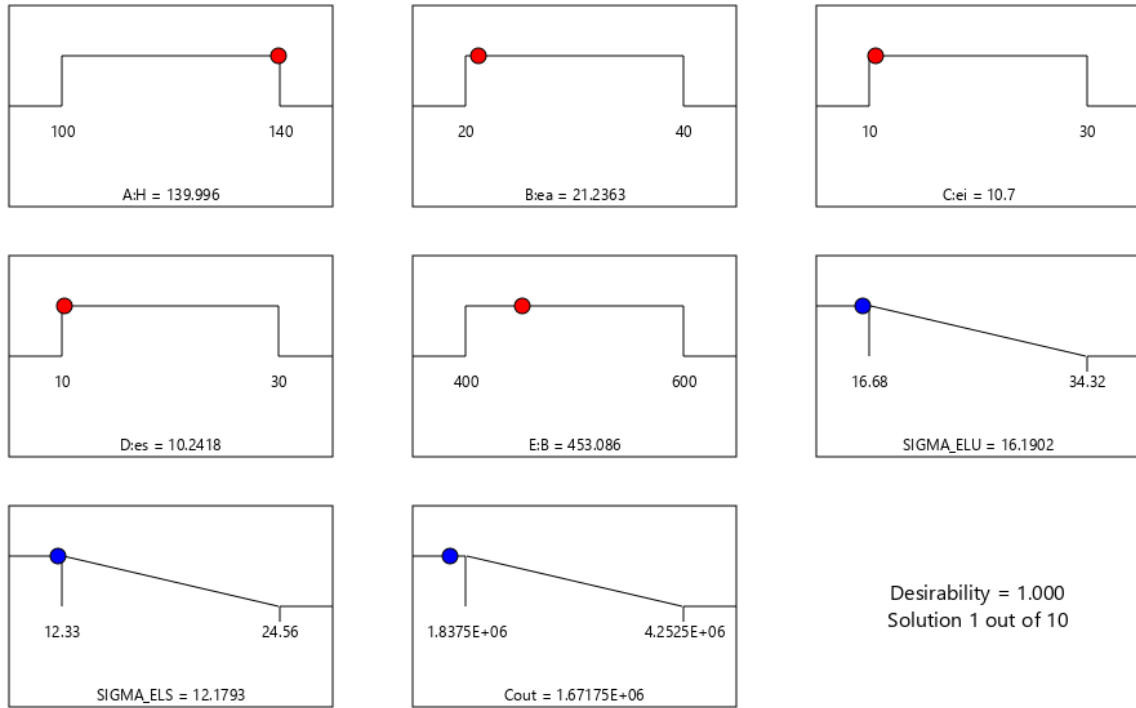



Figure VII.8: Représentation graphique de la procédure d'optimisation.





Conclusion  
générale

## Conclusion générale

L'élaboration d'un projet de fin d'études est une opportunité précieuse permettant à l'étudiant de mettre en pratique et d'approfondir les connaissances acquises durant son parcours universitaire, tout en faisant un premier pas significatif dans le domaine professionnel. Au cours de ce travail, nous avons acquis et renforcé des compétences clés telles que :

La conception et le dimensionnement des tabliers de pont, en tenant compte des différentes contraintes et exigences techniques.

Le calcul des charges et surcharges appliquées sur le pont, incluant une analyse détaillée des charges permanentes et variables.

L'utilisation d'outils informatiques avancés, notamment Robot Structural Analysis, pour effectuer des calculs précis et modéliser la structure afin d'obtenir les contraintes maximales.

Un accent particulier a été mis sur l'optimisation des sections de tabliers de pont, comme développé dans les chapitres 6 et 7. Nous avons utilisé des techniques avancées pour optimiser les paramètres géométriques des tabliers, en appliquant des méthodes comme les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse, en particulier le plan type Box-Behnken. Cette approche nous a permis de :

Déterminer les configurations géométriques optimales pour les sections de poutres en T et les sections en caisson, en maximisant leur efficacité structurelle tout en minimisant les matériaux et les coûts.

Appliquer des modèles d'optimisation robustes pour améliorer la performance globale des tabliers, en assurant une résistance et une durabilité accrues.

Utiliser le logiciel Design Expert et d'autres outils informatiques pour analyser les données et affiner nos conceptions, garantissant ainsi des solutions optimales répondant aux exigences techniques et économiques.

En utilisant les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponse, nous avons pu :

Identifier les variables les plus influentes affectant la performance des tabliers;

Établir des relations quantitatives entre les paramètres de conception et les réponses structurelles;

Explorer l'espace de conception de manière systématique et efficace, permettant une optimisation plus rapide et plus précise des sections de tabliers.

Cette méthodologie nous a permis de gérer de manière efficace la complexité des interactions entre différentes variables et d'obtenir des résultats optimaux pour nos conceptions.

En outre, nous avons appris à utiliser les documents techniques et les règlements de construction en vigueur, tels que le BAEL, le RPOA et SETRA, pour garantir la conformité et la sécurité des conceptions.

À la fin de ce travail, nous avons pu acquérir une solide formation dans le domaine des ouvrages d'art, et plus précisément des tabliers ponts. Cependant, il est important de noter que cette formation reste imparfaite et devra être complétée par des expériences et des apprentissages continus dans la vie professionnelle.

Ce projet nous a permis de nous préparer efficacement aux défis techniques et professionnels que nous rencontrerons dans notre carrière d'ingénieur, tout en développant une compréhension approfondie des techniques d'optimisation des structures de ponts. L'utilisation des plans d'expériences et de la méthode des surfaces de réponse a été particulièrement enrichissante, nous permettant de concevoir des solutions innovantes et durables dans le domaine de l'ingénierie des ponts.

Référence

Bibliographique  
Βιβλιογραφική

## Référence bibliographie

- [1] Anne BERNARD-GÉLY, Jean-Armand CALGARO, « Conception *des ponts* », 27 pages.
- [2] MOUMOU Merzouk PFE « Etude *du tablier d'un pont à poutres multiples en béton précontraint* », 204 pages.
- [3] Gaudier Brzeska - Saint Jean de Braye, **LES PONTS**, [LES\_PONTS-APMBTP08.pdf], Lycée du B.T.P. – Orléans, 30 pages, Pages 2, 13, 14.
- [4], Coffi Blaise Kognonsa, « *Méthodologie de dimensionnement des fondations d'ouvrages d'art en béton armé : Application aux ponts routes sur micros-pieux* », [books\_2860\_0.pdf], Juillet 2004, consulté le vendredi 23 décembre 2016. Pages 4-6.
- [5] Cours de pont, Master I.
- [6] Jean-Paul Lebet et Manfred A. Hirt, « *PONTS EN ACIER* », conception et dimensionnement des ponts métalliques et mixtes acier-béton, Presses Polytechniques et universitaires Romandes, Traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Volume 12, 581 pages. Pages 13, 14, 15.
- [7], Pierre PAILLUSSEAU, Gilles LACOSTE, Jean Louis MICHOTEY, « *COURS DE PONTS* », [Poly\_OA\_2016.pdf], Août 2016. Consulté le **lundi 20 février 2017**, 261 pages. Pages 12-18 et 49-52.
- [8] Mongi BEN OUÉZDOU, « *cours d'ouvrages d'art Tome 1 : Conception* », consulté le 22/03/2017.
- [9] DERRADJI Rabie, AMIAR Riad « *Conception et étude d'un pont sur la deuxième rocade autoroutière d'Alger Sur OUED BARIK* », 143 pages.
- [10] « *Construction des tabliers de ponts* » cours pont.
- [11] « *Conception des tabliers de pont* » document SETRA.
- [12] Règles définissant les Charges à appliquer pour le Calcul et les épreuves des Ponts Routes (RCPR), Algérie (version 2008).
- [13] DJELLALA Radwane, HAMZAOUI Oussama, HADOUES Walid, PFE « *CONCEPTION ET CALCUL D'UN PONT A POUTRES PREFABRIQUEES PAR POST TENSION* », 140 pages.
- [14] GOUPY, Jacques, « *Les plans d'expériences* », Revues Modulad, n°34, (2006).
- [15] GOUPY Jacques, « *Introduction aux Plans d'expériences* », Dunod, Paris, 303 p, (2001).
- [16] SEMACHE Samir, Université d'Oum El Bouaghi, 2019. « *Analyse numérique des déformations des culées de pont en sol renforcé* ».
- [17] Jacques Goupy. Lee Creighton, « *Introduction aux plans d'expériences* ».

[18] DJEBABLAH Wafa,(2020/2021), «*étude du comportement des murs de soutènement en sol stabilisé mécaniquement*», Thèse de doctorat , Université de Guelma (Algérie) , Département de génie civil et hydrolyque.

### **Logiciels**

- Microsoft Word2010, pour ce qui est traitement de texte.
- Microsoft Excel2010, pour tout ce qui est calcul.
- Robot millénium 2010, pour l'analyse et calcul.
- AutoCAD2014, pour les dessins.
- Disign\_Expert 13 pour l'optimisation.