



UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



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

Spécialité : Génie Civil

Option : ouvrage d'art et infrastructures

**Etude d'un dalot de cinq (05) ouvertures
implanté à Sidi Amar W.Saida**

Présenté par :

BECHEIKH BENATTIA

AZEB RABAH

Soutenu publiquement le / 06 /2017 devant le jury composé de :

Mr : B. DJEBLI

Président

Mr : A. BENYAMINA .

Encadreur

Mr : G. ABADA.

Examineur

Mr : M. MIMOUNI

Examineur

Mr : D.I. KLOUCHE

Examineur

Promotion : 2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

لَا إِلَهَ إِلَّا اللَّهُ مُحَمَّدٌ رَسُولُ اللَّهِ

صَلَّى عَلَيْكَ وَسَلَّمَ

أعوذ بالله من الشيطان الرجيم

أَقْمَنْ أَسَسَ بُنْيَانَهُ عَلَى تَقْوَىٰ مِنْ اللَّهِ وَرِضْوَانٍ خَيْرٍ أَمْ مَنْ أَسَسَ بُنْيَانَهُ عَلَىٰ
شَفَا جُرْفٍ هَارٍ فَأَنْهَارُ بِهِ فِي نَارِ جَهَنَّمَ ۗ وَاللَّهُ لَا يَهْدِي الْقَوْمَ الظَّالِمِينَ ۗ لَا يَزَالُ
بُنْيَانُهُمُ الَّذِي بَنَوْا رِيبَةً فِي قُلُوبِهِمْ إِلَّا أَنْ تَقَطَّعَ
قُلُوبُهُمْ وَاللَّهُ عَلِيمٌ حَكِيمٌ ۗ

التوبة/108-109

Je demande la protection d'Allah contre le chaythân –le diable– banni

(108) Lequel est plus méritant? Est-ce celui qui a fondé son édifice sur la piété et l'agrément d'Allah, ou bien celui qui a placé les assises de sa construction sur le bord d'une falaise croulante et qui croula avec lui dans le feu de l'Enfer ? Et Allah ne guide pas les gens injustes.

(109) La construction qu'ils ont édifiée sera toujours une source de doute dans leurs cœurs, jusqu'à ce que leurs cœurs se déchirent. Et Allah est Omniscient et Sage.

Le Désaveu (Le Repentir) versets/108-109



Remerciement

« وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب »

*Toute notre parfaite gratitude et remerciement à **Allah** le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que je remercie mon encadreur **Mr Benyamina Abdelrahmane** pour son soutiens, son conseils judicieux et sa grandes bienveillance durant l'élaboration de ce projet.*

Nos remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce projet de fin d'étude.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments

les plus pénibles de ce long chemin, ma Mère qui a été toujours à mes côtés et ma

soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute

sa vie afin de me voir devenir ce que je suis.

A mes chers frères et ma chère sœur, et à toute ma famille.

A mes amis chacun avec son nom.

A mon ami et binôme « Rabah ».

BECHEIKH BENATTIA



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- *Mes chers parents, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation.*
- *Mes chers frères.*
- *Les membres du bureau de wilaya de Tiaret de l'Association des ulemas musulmans algériens.*
- *Cheikh « ELHACHEMI ABD ELMALEK ».*
- *Mes amis.*
- *Mon ami et binôme « Djamel »*

AZEB RABAH

SOMMAIRE :

LISTE DES NOTATION :.....	I
LISTE DES TABLEAUX :.....	III
LISTE DES FIGURES :.....	V
ملخص :.....	VII
Résumé:.....	VIII
ABSTRAT :.....	IX
INTRODUCTION GENERALE :.....	X
I -INTRODUCTION ET PRESENTATION GENERALE DU PROJET.....	1
I.1 OBJECTIFS DE L'ETUDE :	2
<i>I.1.1 Objectif général</i> :.....	2
I.1.1.1 Objectifs spécifiques :.....	3
I.2 PRESENTATION GENERALE DU PROJET :.....	3
<i>I.2.1-Présentation de la région de SAIDA</i> :.....	3
I.3 SITUATION GEOGRAPHIQUE DU PROJET :	4
I.4 DONNEES SUR LA ZONE DU PROJET :.....	4
<i>I.4.1 Les données physiques</i> :.....	4
I.4.1.1 Climat :	4
I.4.1.2 Pluviométrie :.....	4
I.4.1.3 Géologie :.....	4
<i>I.4.2 Les données naturelles</i> :	7
I.4.2.1 Terrains :.....	7
I.4.2.2 Charge hydraulique :.....	7
I.4.2.3 Données topographiques.....	8
II ETUDE DES AXES DE RACCORDEMENT A L'OUVRAGE ET LE CHOIX DE LA VARIANTE	10
II.1 INTRODUCTION :	11
II.2 ETUDE CINEMATIQUE :.....	11
II.2.1 PARAMETRES CINEMATIQUES :	11
II.2.1.1 La vitesse de référence :	11
II.2.1.2- Choix de la vitesse de référence (Vr) :.....	11
II.2.1.3 Distance minimale de freinage :	12
II.2.1.4 Temps de réaction et de perception :.....	13
II.2.1.5 Distance d'arrêt :	13
II.2.1.6 Distance de perception :	15
II.2.1.7 Distance de sécurité entre deux véhicules :.....	16
II.2.1.8 Manœuvre de dépassement:	17
II.2.1.8.1 Distance de visibilité de dépassement « dvd » :.....	17
II.2.1.8.2 Distance de manœuvre de dépassement « dmd » :	17
II.3. ETUDE GEOMETRIQUE DE LAROUTE	18
<i>II.3.1 Caractéristiques géométriques des variantes:</i>	19

II.3.1.1 Tracé en plan:	19
II.3.1.2 Profil en long:	19
II.3.1.3 Profil en travers:	19
II.4 CHOIX DE TYPE D'OUVRAGE ENTRE DE DEUX VARIANTES :.....	20
II.4.1 Variante I : Dalot cadre en béton armé :	21
II.4.2 Variante II: Pont à poutres en béton armé.....	21
II.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA VARIANTE RETENUE :.....	21
II.5.1 Variante 1:DALOT (PONT CADRE)	22
CONCLUSION :	23
III ETUDE DE LA VARIANTE RETENUE AVEC LA DEFINITION DES	
CHARGES ET SURCHARGES	24
III.1 DESCRIPTION GEOMETRIQUE :	25
III.2 HYPOTHESES RELATIVES AUX MATERIAUX:.....	27
III.2.1 Les caractéristiques des matériaux :	27
III.2.1.1 Béton :	27
III.2.1.1.1 Préparation d'un mètre cube en béton:.....	28
III.3 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX:.....	29
III.3.1 Caractéristiques Physique Et Mécaniques De Béton:	29
III.3.2 Acier:.....	30
III.4 CALCUL DES CHARGES STATIQUE ET DYNAMIQUE:	33
Introduction:	33
III.4.1 Types de charges et surcharges	33
III.4.1.1 Actions permanentes:	34
III.4.1.2 Actions variables:.....	34
III.4.2 Principe de calcul des sollicitations	34
III.4.2.1 Définitions et Pré-dimensionnement:.....	35
III.5 CALCUL DES CHARGES, SURCHARGES SUR LE DALOT:	37
III.5.1 Charges permanentes :	37
III.5.2 Sous l'action de la poussée des terres:	38
III.5.3 Charge hydraulique:	38
III.5.4 Calcul des surcharges routières :	38
III.5.4.1 Système de charge A (L) :.....	38
III.5.4.2 Système de charge B :.....	40
III.5.4.2.1 Système Bc :.....	40
III.5.4.2.2 Sous système Bt :	42
III.5.4.2.3 Sous système Br :	43
IV CALCUL DES SOLLICITATIONS ET LES FERRAILLAGES	45
IV.1 HYPOTHESE DU CALCUL :	46
IV.1.1 Matériaux :	46
IV.2.1 SCHEMA STATIQUE DU DALOT :	47
IV.2 CALCUL DES SOLLICITATIONS	47
IV.2.1 Charges permanentes :	48
IV.2.1.1 Les moments d'encastrement pour 1 m:	49

IV.2.1.2 Les moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits sont :	50
IV.2.1.3 Les moments maximum en travées et sur appuis:	50
IV.2.2.1 Les réactions à chaque appui :	53
IV.3 CHARGES ROUTIERES:	55
IV.3.1 <i>Sous système Bc</i> :	55
IV.3.1.1 Les moments d'encastrement pour 1 m :	55
IV.3.1.2 Les moments isostatiques :	57
IV.3.1.3 Les moments maximum en travées et sur appuis :	57
IV.3.1.4 Les réactions à chaque appui:	59
IV.3.2 <i>Sous système Bt</i> :	61
IV.3.2.1 Les moments d'encastrement :	61
IV.3.2.2 Les moments isostatiques au milieu des travées :	63
IV.3.2.3 Les moments maximum :	63
IV.3.2.4 Les réactions à chaque appui:	66
IV.4 RECAPITULATIF DES SOLlicitATIONS :	67
IV.4.1 <i>CALCUL DES SECTIONSD'ARMATURES</i> :	70
IV.4.1.1 Calcul des armatures du tablier :	70
IV.4.1.2 Calcul des armatures du radier :	73
IV.4.1.3 Calcul des armatures des piédroits centraux :	76
IV.4.1.4 Calcul des armatures du piédroit extrême :	77
IV.5 DIMENSIONNEMENT DU MUR EN AILE :	80
IV.5.1 <i>Pré-dimensionnement</i> :	80
IV.5.2 <i>Inventaire des actions agissant sur le mur en aile</i> :	82
IV.5.2.1 Détermination des charges du mur en aile :	82
IV.5.2.2 Détermination des moments du aux différentes charges :	83
IV.5.3 <i>Vérification du redimensionnement</i> :	85
IV.5.4 <i>Calculs du béton armé</i> :	85
V MODELISATION DE L'OUVRAGE AVEC LE LOGICIEL PICF CYPE...	90
V.1 INTRODUCTION:	91
V.2 DEFINITION DE LA SOCIETE CYPE:	91
V.3 PRESENTATION DU LOGICIEL PICF-CYPE 2014:	91
V.4 RESULTAS:	92
V.5 EXTENSIONS:	92
V.6 LES PRINCIPES DE CALCUL DU LOGICIEL :	93
V.7 METHODE DE CALCUL :	93
V.8 LES ACTIONS :	93
V.8.1 <i>Légende pour les efforts internes</i> :	93
V.9 LE FERRAILLAGE PROPOSE PAR LE LOGICIEL :	95
V.10 PRESENTATION EN 3D:	95
V.11 INTRODUCTION DES DONNEES:	96
V.12 ETAPES A SUIVRE DANS PICFCYPE 2014:	96
V.13 MURS EN AILES :	98

V.14 LA CHAUSSEE SUPERIEURE :	99
V.15 LE TYPE DE TERRAINS :	100
V.16 LE CHARGEMENT :	100
V.17 LA MODIFICATION DE L'OUVRAGE :	102
<i>V.17.1 L'analyse de l'ouvrage:</i>	103
<i>V.17.2 Introduction des charges et des surcharges:</i>	104
V.18 DIMENSIONNEMENT DE L'OUVRAGE:	105
<i>V.18.1 Vérification et dimensionnement final:</i>	105
<i>V.18.3 La présentation de déformation:</i>	106
<i>V.18.4 Le ferrailage proposé par le logiciel:</i>	106
<i>V.18.5 Résumée de ferrailage des modules:</i>	108
<i>V.18.6 Résumée de ferrailage de murs en ailes:</i>	108
<i>V.18.7 Coffrage et ferrailage de Guide Roue :</i>	109
V.19 LES AVANTAGES DU LOGICIEL PICF-CYPE:	109
V.20 LES INCONVENIENTS DU LOGICIEL:	110
CONCLUSION :	110
CONCLUSION GENERALE	111
CONCLUSION GENERALE :	112
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	113
ANNEXE	114

LISTE DES NOTATIONS

- PICF : Pont Intérieur à Cadre Fermé.
- CPC : Cahier des Prescriptions Communes.
- MPa : Méga Pascal.
- kN : Kilo Newton.
- dvd : Distance de visibilité de dépassement.
- dmd : Distance de manœuvre de dépassement.
- PU : Prix unitaire.
- μ : Coefficient de sécurité dépend de l'adhérence.
- E_s : Module d'élasticité de l'acier des armatures.
- K_p : Le coefficient de poussé.
- f_{cj} : Résistance caractéristique à la compression.
- f_{tj} : Résistance caractéristique à la traction.
- E_{ij} : Module de déformation longitudinale du béton.
- ν : Coefficient de poisson.
- CCP : Compléments des Charges permanentes.
- BAEL : Béton Armé aux Etats limites.
- I : Moment d'inertie.
- M_{ij} : Moment statique appliqué au nœud i par la barre ij.
- $m_{i,j}$: Moment d'encastrement appliqué au nœud i par la barre j.
- α_i : Rotation du nœud i.
- k_1 : Caractéristique de la rigidité des barres horizontales.
- k_2 : Caractéristique de la rigidité des barres verticales.
- b_i : Constante du nœud i.
- L: Longueur ou portée.
- d: Distance séparant entre la fibre la plus comprimée et les armatures inférieures.
- B_r : Section réduit.
- σ_{bc} : Contrainte de compression du béton.
- σ_s : Contrainte de traction de l'acier.
- $\overline{\sigma}_{bc}$: Contrainte de compression admissible du béton.
- $\overline{\sigma}_s$: Contrainte de traction admissible de l'acier.
- G : charges permanentes.

- μ : Moment réduit.
- μ_{uA} : Moment réduit agissant.
- μ_{lu} : Moment réduit limite.
- $\bar{\alpha}_{ser}$: Paramètre de déformation.
- γ_{ser} : Fibre neutre.
- z_{ser} : Bras de levier.
- M_{rserb} : Moment résistant.
- M_u : Moment ultime.
- M_{ser} : Moment à l'état de service.
- A_u : Section théorique d'acier à l'état limite.
- A_{ser} : Section théorique d'acier à l'état de service.
- A_{min} : Section minimale.
- A_r : Section des armatures de répartition.
- A_{sc} : Section d'acier comprimé.
- A_{st} : section d'acier tendu.
- L_f : Longueur de flambement.
- λ : Elancement.
- α : Coefficient des charges.
- N_u : Effort normale pondéré à l'état limite ultime.
- N_{ser} : Effort normale pondéré à l'état limite de service.
- M_{uGo} : Moment corrigé pour le calcul en flexion composée.
- e_A : Centre de gravité des aciers tendus.
- M_{serA} : Moment de service au centre de gravité des aciers tendus.
- μ_{lu} : Moment réduit limite

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1: Paramètre de Vitesse de référence (V_r).....	11
Tableau II. 2: Coefficient de frottement longitudinal f_{rl} en fonction de la vitesse (B40).12	
Tableau II. 3: Valeurs de d_{vd} , d_{nd} et d_{md} en fonction de la vitesse.	18
Tableau II. 4: Donne les critères entre les deux variantes prévues.	21
Tableau III. 1: Des compositions d'un mètre cube de béton.....	28
Tableau III. 2: Longueurs de scellement droit.	32
Tableau III. 3: Tableau de classe de pont.....	36
Tableau III. 4: Coefficients de dégressivité transversale de la charge.	39
Tableau III. 5: Valeurs de v_0	39
Tableau III. 6: les valeurs de b_c	41
Tableau III. 7: Résumé des règles d'application du système B.	44
Tableau IV. 1: Les moments maximum des charges permanentes du tablier en travées et sur appuis.....	51
Tableau IV. 2: Les moments maximum des charges permanentes du radier en travées et sur appuis.....	52
Tableau IV. 3: Les moments maximum des charges permanentes du piédroit en travées et sur appuis.....	53
Tableau IV. 4: Les réactions des charges permanentes sur appuis du tablier.	54
Tableau IV. 5: Les réactions des charges permanentes sur appuis du radier.	54
Tableau IV. 6 : Les moments maximum des charges routières du tablier en travées et sur appuis (Bc)	57
Tableau IV. 7: Les moments max des charges Bc	58
Tableau IV. 8: Les moments maximum des charges routières du piédroit en travées et sur appuis (Bc)	59

Tableau IV. 9:Les réactions des charges routières sur appuis.....	60
Tableau IV. 10:Les réactions des charges routières sur appuis du radier (Bc).	60
Tableau IV. 11:Les moments maximum des charges routières du tablier en travées et sur appuis (Bt)	63
Tableau IV. 12: Les moments maximum des charges routières du radier en travées et sur appuis (Bt)	64
Tableau IV. 13: Les moments maximum des charges routières du piédroit en travées et sur appuis (Bt)	65
Tableau IV. 14: Les réactions des charges routières sur appuis du tablier (Bc)	66
Tableau IV. 15: Les réactions des charges routières sur appuis du tablier (Bc)	67
Tableau IV. 16:Récapitulatif des sollicitations.	68
Tableau IV. 17: Les sollicitations à retenir sont les plus grandes de chacun des combinaisons.....	69
Tableau IV. 18:Récapitulatif des sections d'armatures.....	79
Tableau IV. 19: récapitulatif du pré-dimensionnement du mur en aile.	81
Tableau IV. 20: Récapitulatif des résultats du calcul des efforts du mur en aile.	84
Tableau IV. 21: Récapitulatif des sections d'armature du mur en ail.	89
Tableau V. 1:Légende pour les efforts internes.	93
Tableau V. 2: Tableau des épaisseurs de tablier et de radier.	97
Tableau V. 3: Choix de gabarit et épaisseur piédroit.	98
Tableau V. 4: Résultats des ferrailages pour le module.....	108
Tableau V. 5: Résumée de ferrailage de murs en ailes.	108

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 Territoire de la région de wilaya de Saida (après découpage de 1984).	5
Figure I-2 Réseau routier de la wilaya de Saida	6
Figure I-3 Vue du site d'implantation de l'ouvrage (Source : Google Earth 2017)	6
Figure I-4 Vue panoramique du terrain d'assiette de l'ouvrage (Photos fin 2013).	8
Figure I-5 Levé topographique de la zone du projet.	9
Figure II-1 Distance de freinage.	12
Figure II-2 Distance d'arrêt du véhicule.	14
Figure II-3 Distance de perception.....	15
Figure II-4 Espacement supplémentaire de la sécurité entre deux véhicules.....	16
Figure II-5 Distance de visibilité de dépassement «dvd»	17
Figure II-6 Distance de manœuvre de dépassement «dmd»	17
Figure III-1 : Schéma du dalot	25
Figure III-2 : Schéma de calcul équivalent	34
Figure III-3 Largeur roulable (Lr) , Largeur chargeable(Lch)	35
Figure III-4 Positions au centre et Charges roulantes Dues au Système Bc.	41
Figure III-5 Positions au centre et Charges roulantes Dues au Système Bt.....	42
Figure I-1: schéma statique du dalot	47
Figure I-2 Dimensions de mur en aile.....	80
Figure II-1Présentation en 3D du dalot.....	95
Figure II-2 Fenêtre de démarrage des applications Cype 2014.....	96
Figure II-3 Nom d'un fichier.	96
Figure II-4 Choix de type de la géométrie de l'ouvrage.	96
Figure II-5 Définition de géométrie de notre ouvrage d'art	98
Figure II-6 Définition des murs en ails et leur orientation.....	99
Figure II-7 Définition de la position de la chaussée par rapport l'ouvrage	99

Figure II-8 Type des terrains.....	100
Figure II-9 Angle de talus	100
Figure II-10 Les charges sur le radier et la chaussée	101
Figure II-11 Fiche des données.....	101
Figure II-12 L'affichage de projet	102
Figure II-13 Modification de l'ouvrage	102
Figure II-14 Définition du matériau.....	103
Figure II-15 Données générales.....	103
Figure II-16 Convois de charge (Bc, Bt, Br).....	104
Figure II-17 Charges en bande.....	104
Figure II-18 Dimensionnement de l'ouvrage.....	105
Figure II-19 Dimensionnement final.....	106
Figure II-20 Présentation de déformation.....	106
Figure II-21: Plans de ferrailage	107
Figure II-22 Coffrage et ferrailage de Guide Roue.....	109

ملخص:

تهدف هذه الدراسة لإنجاز التحليل الإنشائي لجسر إطاري لعبور وادي ويسمح بممر طريق علوي، هذا المنشأ هو عبارة عن جسر إطاري منجز على طريق في بلدية سيدي اعمر ولاية سعيدة.

الجسر الإطاري مكونة من بطارية من 05 فتحات ذي أبعاد $5.00 \times 5.00 \times 5$ متر. بمعنى أن الجسر مكون من عقد جاسئة فيما بينها ينتهي بجدران مجنحة على جوانبه الأربع. في مرحلة أولى يتم الحساب اليدوي على قطاع عرضه 1 متر باعتماد طريقة الانتقالات الدورانية لتحديد القوى والعزوم المطبقة، ثم التأثيرات الناتجة تستخدم لحساب قضبان التسليح لعناصر الجسر الإطاري. الجدران المجنحة في الجهات الأربع يتم حسابها على أنها جدران استناد بالطريقة التقليدية حيث تم مراعاة كل شروط التحليل الإنشائي.

بغرض إجراء مقارنة النتائج، تم اعتماد برنامج الحاسوب CYPE حيث وبعد إدراج كل الأبعاد يجدر القول بأن البرنامج الحاسوبي وفي فترة قصيرة يمنح كل النتائج مع احتمال أخطاء ضئيلة.

مرحلتي الحساب السابقتين سمحت بالإجابة على كلما تعلق باختيار الأبعاد الإنشائية واختيارات مقاطع الفولاذ مستخدمة لتسليح العناصر.

كلمات مفتاحية :

هيدروليكي، جسر إطاري، جدار مجنح، حساب إنشائي، برنامج CYPE.

Résumé :

Cette étude a été menée en vue de dimensionner un ouvrage hydraulique de franchissement d'un oued et permet le passage supérieur routier. Cet ouvrage est un dalot projeté sur le tronçon de Sidi Amar de la Wilaya de Saida.

Le dalot est constitué d'une batterie de cinq (05) ouverture de dimensions 5x5.00x5.00 m. Le dalot est de type cadre, c.-à-d. l'ensemble des composantes sont liées avec des nœuds rigides entre eux avec des murs en ailes. En première étape, le calcul manuel du dalot a été effectué sur une colonne de un mètre linéaire en utilisant la méthode de rotation afin de déterminer les efforts et moments appliqués, ensuite les sollicitations ont été utilisées pour déterminer le ferrailage des éléments du cadre. Le mur en aile dans les quatre coté a été calculé comme un mur de soutènement avec la méthode classique d'où toutes les vérifications ont été faite.

Pour un souci de comparaison des résultats manuels, le calcul assisté par ordinateur a nécessité l'utilisation du logiciel CYPE. A l'issue de ces dimensionnements, il ressort que avec le logiciel, pour un temps très court, on obtient tous les résultats et les risques d'erreurs sont réduits.

Ces deux étape de calcul ont permis d'apporter une réponse quant aux choix de dimensionnement structural, et aux choix des sections d'acier.

Le logiciel CYPE fournit des plans de dimensions et des armatures des éléments rapidement, alors il très utile comme un logiciel de prototypage avec les outils dans lequel il est fournis.

Mots clés :

Hydraulique - Dalot - Mur en aile - Dimensionnement - Logiciel CYPE

Abstract:

This study was undertaken in order to dimension a "Culvert", a hydraulic structure of crossing of a river and allows the road overpass. This structure is a culvert projected on the section of Sidi Amar of Wilaya of Saida.

The culvert consists of a battery of five (05) opening of dimensions 5x5.00x5.00 m. The culvert is of a frame type, the whole of the components are related with rigid nodes between them with two lateral wing walls. In first stage, the manual calculation of the culvert was carried out on a linear stream of one meter by using the rotations method in order to determine the efforts and moments applied, then the stresses were used to determine the reinforcement of the elements of the frame structure. The wing wall in two sides was calculated as a retaining wall with the traditional method from where all the checks were done.

For the sake of comparison of the manual results, the computation requires the use of CYPE software. With resulting from these dimensioning, it arises that with the software, for a very short time, one obtains all the results and the risks of errors are reduced.

These two stages of calculation made it possible to bring an answer as for the choices of structural dimensioning, and with the choices of the steel sections.

Software CYPE provides plans of detailing and reinforcements of the elements quickly, then it very useful as a software of prototyping with the tools in which it is provided.

Key words:

Hydraulics - Culvert - Wing wall - Detailing – CYPE software.

INTRODUCTION GENERALE

La construction d'ouvrages d'art connaît une activité significative à la faveur des programmes initiés pour répondre à des exigences socio-économique du pays. Ces réalisations témoignent du génie national qui se consacre d'avantage dans l'art de concevoir et de construire. Ce capital va certainement servir de source de référence au lancement des futurs grands projets.

Cependant, leur réalisation requière un grand nombre de ressources, aussi bien sur le plan financier, technique que humain. Des normes de réalisations doivent être respectées en fonction de la zone d'étude, afin de garantir une sécurité aux usagers, la pérennité des ouvrages et tout cela à des coûts d'investissement raisonnables.

C'est pour cette raison que les études menant à la réalisation de ces infrastructures sont souvent longues et nécessitent une très grande attention.

Pour le présent projet qui consiste à désenclaver une région du Saida à travers la construction d'un ouvrage de franchissement (dalot), plusieurs étapes d'étude ont été menées suivant les démarches suivantes :

1^{er} chapitre: Introduction et présentation générale du projet.

2^{ème} chapitre: Etude des axes de raccordement à l'ouvrage avec le choix de la variante.

3^{ème} chapitre: Etude de la variante retenue (pont cadre) et la définition des charges et surcharges.

4^{ème} chapitre: Calcul des sollicitations et les ferrailages.

5^{ème} chapitre: Modélisation de l'ouvrage (dalot) par le logiciel PICF-CYPE.

Enfin une conclusion générale concernant la portée de notre cas d'étude.

I -Introduction et présentation générale du projet

Introduction:

D'une façon générale, on appelle pont tout ouvrage permettant à une voie de circulation de franchir un obstacle naturel ou une autre voie de circulation. Selon le cas, on distingue: pont-route, pont-rail, pont-canal. Cette définition est imprécise dans la mesure où elle ne fait apparaître aucune notion de dimension de forme ou de nature d'ouvrage. Par convention, nous appellerons pont tout ouvrage quel que soit sa dimension, construit in situ.

Le souci de l'ingénieur est comment le construire, en assurant parfaitement son service avec un coût optimal. Le dimensionnement d'un pont constitue un travail de synthèse de discipline, telles que la statique, la dynamique, la résistance des matériaux, et le calcul des fondations.

Le caractère spécifique du calcul des ponts réside dans l'interdépendance des éléments de structure soumis simultanément à des sollicitations combinées.

A la base de tous ces paramètres, l'ingénieur doit faire recours à une conception visant l'optimisation entre plusieurs paramètres déterminants (l'économie, la sécurité de l'ouvrage et les délais de réalisation) en tenant toujours compte des contraintes naturelles et fonctionnelles susmentionnées. Après la proposition des variantes issues de la réflexion de l'ingénieur, celles-ci doivent être définies d'une façon sommaire, pour déterminer la variante optimisée et la plus performante, donc la plus satisfaisante de nos besoins en fonction des moyens disponibles.

I.1 Objectifs de l'étude :

I.1.1 Objectif général :

Dans le cadre de changement de l'ancienne passerelle en béton armé traversant oued Sidi Amar (**Fig. I.3**) et menant vers cette zone urbaine, la construction d'un pont cadre de type Dalot est projeté (PI-CF: Passage Inférieur Cadre Fermé de 1^{ière} Classe).

L'ouvrage en question va permettre de donner une bonne fluidité de circulation de véhicule en franchissant et le passage inférieur va assurer un bon écoulement pour l'oued. Ce dernier constitue le tronçon de Oued Saida qui passe de près de Sidi Amar.

I.1.1.1 Objectifs spécifiques :

Pour atteindre l'objectif général, nous avons fait :

- **Une présentation du projet**
- **Une étude de sécurité routière**
- **Un dimensionnement de l'ouvrage en béton armé**
- **Un devis estimatif du projet.**

I.2 Présentation générale du projet :

Les importantes ressources en eau souterraine des environs de Saida qui sont du plus grand intérêt pour l'économie de la région (agriculture, industrie, thermalisme) font actuellement l'objet d'une attention particulière de la direction régional de l'ANRH (**AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRAULIQUES**) de Saida dont le programme comprend l'étude hydrogéologique et géologique complète sur les Hauts Bassins de Oued Saida, Extrait du rapport Hydrologique de l'ANRH 2008 [4].

Ce projet est un pont cadre inscrit dans le but de la mise en œuvre de la stratégie de développement d'infrastructures Hydraulique et routière, et facilite l'écoulement des eaux à travers les remblais.

I.3 Situation géographique :

I.2.1-Présentation de la région de SAIDA :

La wilaya de Saida issue du découpage de 1984, administrait un vaste territoire de 107 000 Km², représentant 20% de l'Algérie du Nord ce découpage a réparti cet espace en trois wilayas (Saida, Bayadh, Naama)

La wilaya de Saida reste géographiquement privilégiée dans sa région, Elle se situe dans un carrefour EST-OUEST, Nord, Sud (Bechar, Oran, Tiaret, Sidi Bel Abbés) le territoire de la wilaya de Saida est délimité par les wilayas suivantes (**Fig. I.1**) :

- Au Nord : wilaya de Mascara
- Au Sud : wilaya d'El Bayadh
- A l'Est : wilaya de Tiaret
- A l'Ouest : wilaya de Sidi Bel Abbés

I.3 Situation géographique du projet :

La zone de projet se situe dans la wilaya de Saida (région du nord-est) plus précisément dans la commune de Sidi Amar. La route à étudier est une route adjacente de moins de 300 m de la route nationale (RN6) reliant Mascara et Saida (**Fig. I.2 et I.3**).

I.4 Données sur la zone du projet :

Cette phase consiste de la reconnaissance qui doit fournir des informations sur les facteurs suivants :

I.4.1 Les données physiques :

I.4.1.1 Climat :

La période humide est entre le mois d'Octobre et le mois Mars.

La période sèche est entre le mois d'Avril et Septembre.

I.4.1.2 Pluviométrie :

La wilaya de Saida reçoit en moyenne une pluviométrie annuelle de l'ordre de 348 mm, les zones élevées en altitude reçoivent les plus grandes quantités d'eau, en plus cette tranche pluviométrique diminue du Nord vers Sud (l'ANRH 2008 [4]).

I.4.1.3 Géologie :

La zone d'étude est caractérisée par une géologie complexe et diversifiée, représentée par des terrains allant du primaire au Plio-Quaternaire.

La structure géologique de cette partie du domaine pré atlasique est caractérisée par :

- **Des plissements à différents rayons de courbure**
- **Des failles importantes souvent d'une orientation NE-SW**
- **Une très dense fracturation affectant les roches compétentes.**

La nature et l'âge des terrains affleurant au niveau de l'émergence sont :

- **Les poudingues et les calcaires du Pliocène**
- **les calcaires, les dolomies, les marnes et les grès du jurassique**
- **Des roches ignées ; rhyolites, diorites, gabbros, dolérites d'âge Primaire**

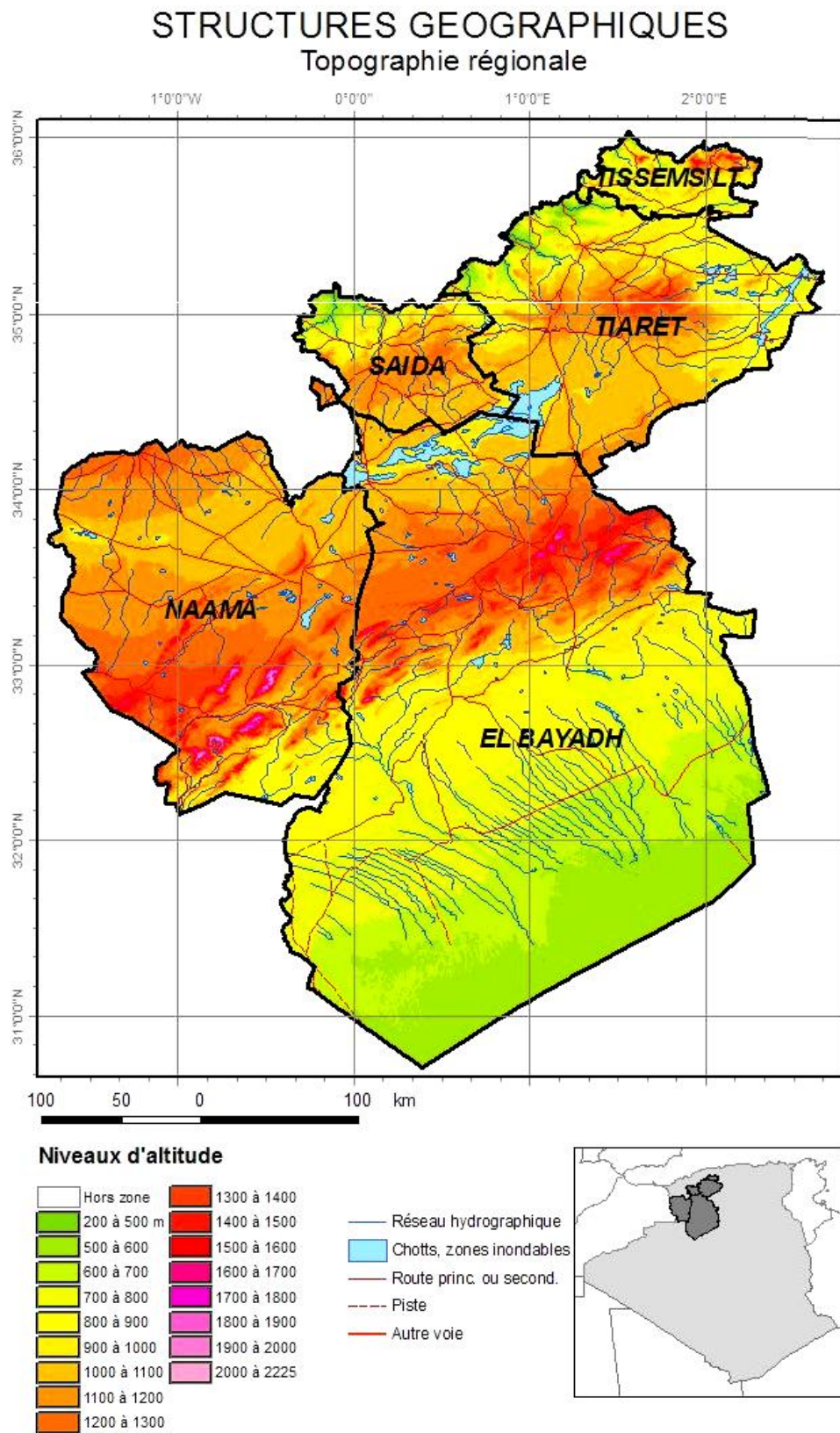


Figure I-1 Territoire de la région de wilaya de Saida (après découpage de 1984).

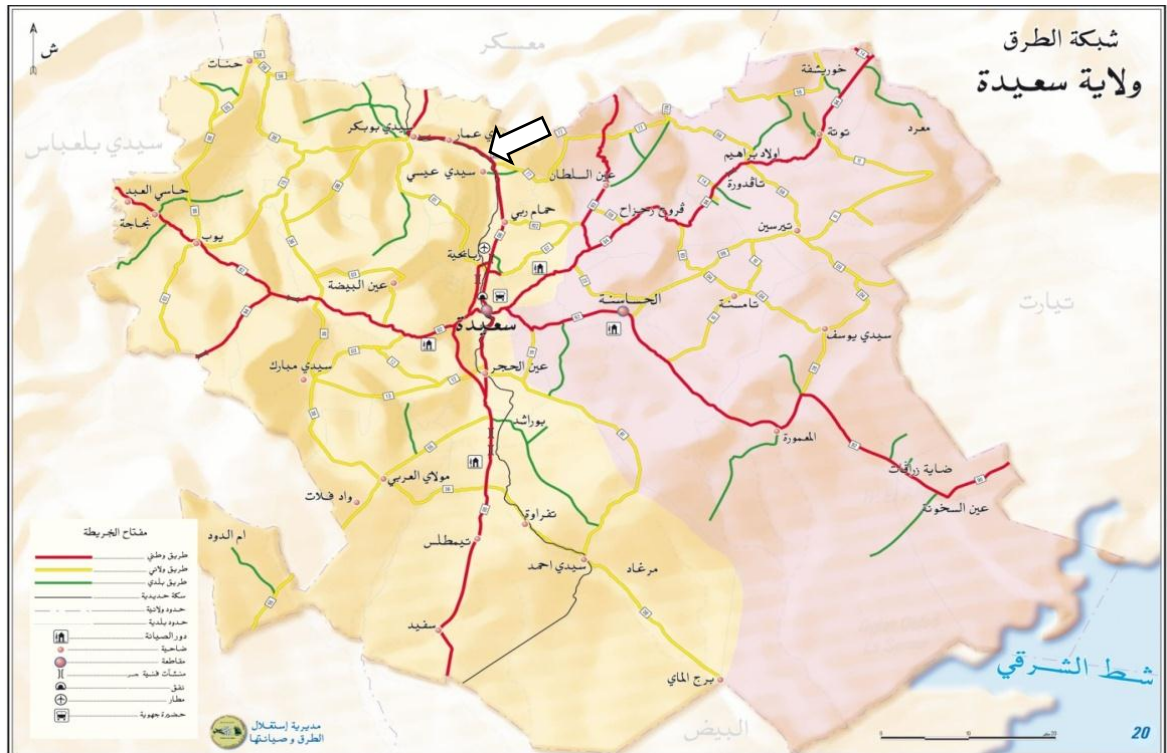


Figure I-2 Réseau routier de la wilaya de Saida



Figure I-3 Vue du site d'implantation de l'ouvrage (Source : Google Earth 2017)

La zone du projet est constituée principalement de formations du Jurassique (dolomies, argile, gréseuses, marnes, calcaire...) avec quelques roches éruptives et des formations d'âge primaire ; les dépressions sont constituées par des alluvions du Quaternaire.

La nature du sol est constituée d'ensemble des zones à sol humifère stabilisé par couverture forestière spontanée et développée sur le versant Nord-Ouest de la commune de Saida.

L'espace naturel de la commune de Saida appartient à l'aval du grand *bassin versant* de la vallée de l'Oued Saida, orientée Nord-Sud et qui forme la limite entre les monts de Saida et les monts de Daïa.

I.4.2 Les données naturelles :

La connaissance de la nature du sol est souvent décisive pour le choix entre plusieurs types d'ouvrages. Elle est nécessaire pour l'établissement de la conception et l'étude.

Donc chaque projet doit être précédé par une visite (**Fig. I.4**), qui sera faite sur site pour avoir toutes les données relatives aux caractéristiques du site à savoir :

Les positions des appuis dans une cours d'eau doivent être bien étudiées.

En cas de franchissement d'une cours d'eau il faut connaître le profil en travers du lit et des berges et de leur évolution dans le temps, le niveau des eaux, le débit...etc. (**Fig. I.4**)

Il faut aussi prendre en considération le risque des affouillements (local et général).

I.4.2.1 Terrains :

Le terrain du projet est identifié par les caractéristiques suivantes :

Module de réaction : 9000 t/m^3 .

Poids volumique ; 1.9 kg/dm^3 .

Contrainte admissible du sol d'assise : 15 t/m^2 .

Angle de frottement interne : 35° .

Cohésion : 0.00 t/m .

Angle de transmission des charges : 45° .

I.4.2.2 Charge hydraulique :

Le plan de la surface libre de l'eau : par tirant d'eau ($h=3.6 \text{ m}$).



Figure I-4 Vue panoramique du terrain d’assiette de l’ouvrage (Photos fin 2013).

I.4.2.3 Données topographiques

Un fond topographique avec le plan d’ensemble de l’aménagement à effectuer sont fournis. Ces données ont permis de tracer le profil en travers au droit du franchissement du canal afin d’apprécier la cote des plus hautes eaux (PHE) et la section hydraulique du canal donnant le débit de plein bord, (voir **Fig. I.5**)

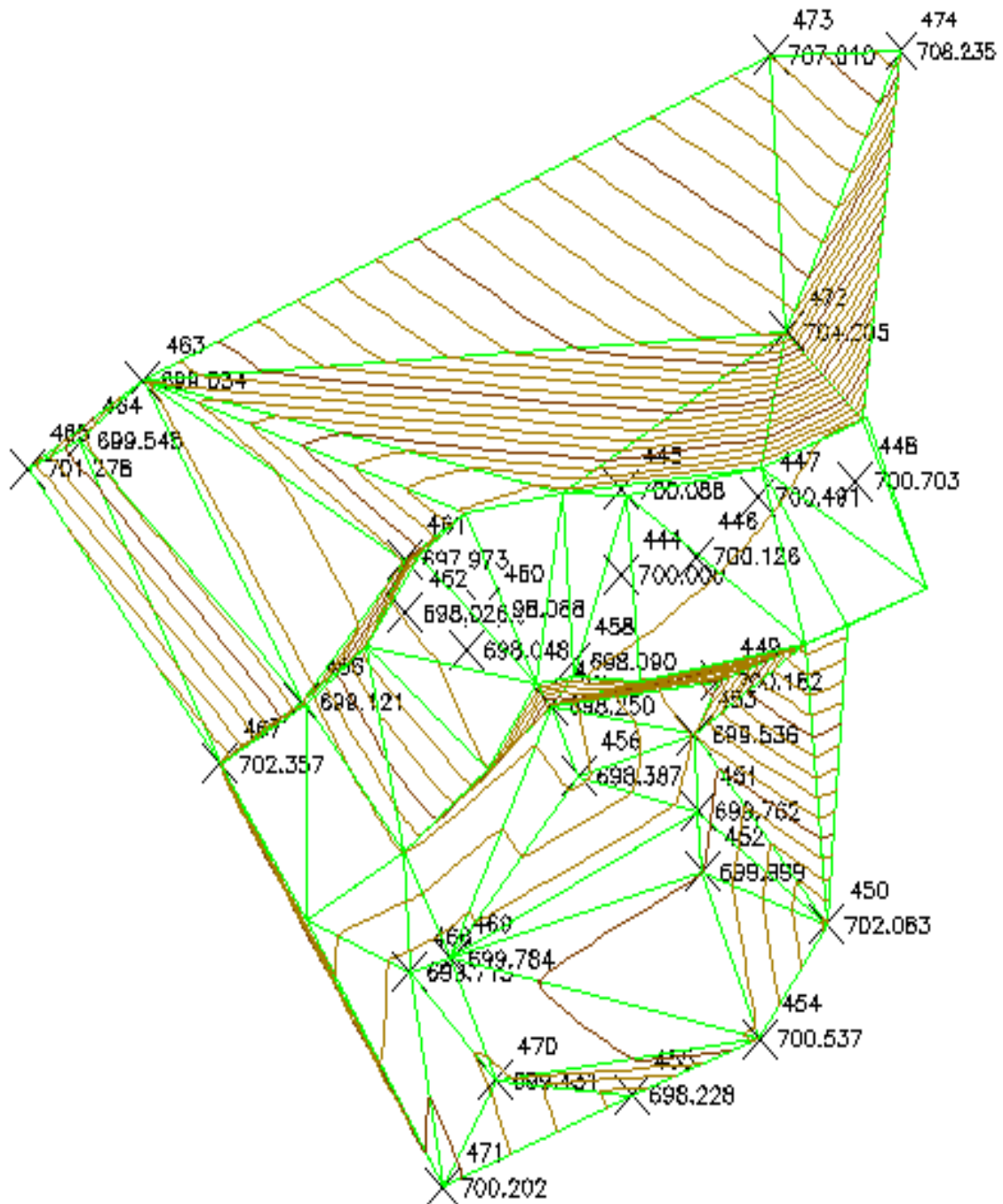


Figure I-5 Levé topographique de la zone du projet.

II Etude des axes de raccordement à l'ouvrage et le choix de la variante

II.1 Introduction :

Ce chapitre on a deux parties, l'une est une étude des axes de raccordements et l'autre est le choix entre deux variantes.

L'objectif est de déterminer du point de vue technique et économique le type d'ouvrage capable de satisfaire le mieux possible à toutes les conditions imposées et les contraintes existantes. Pour cela, il faut connaître cet ensemble de contraintes et conditions pour pouvoir envisager des solutions qui apparaissent à première vue comme les meilleures et qui feront l'objet d'une étude plus approfondie pour aboutir à la meilleure solution techniquement et économiquement.

II.2 Etude cinématique :

II.2.1 Paramètres cinématiques :

Ce sont des paramètres relatifs à la considération du mouvement des véhicules sur la route, ces paramètres déterminent les distances nécessaires au tracé du projet.

II.2.1.1 La vitesse de référence :

La vitesse de référence (V_r) est une vitesse prise pour établir un projet de route, elle est le critère principal pour la détermination des valeurs extrêmes des caractéristiques géométriques et autres intervenants dans l'élaboration du tracé d'une route. Elle dépend de la catégorie, de l'environnement et de la politique économique du pays.

II.2.1.2- Choix de la vitesse de référence (V_r) :

La connaissance de la vitesse de référence constitue une condition fondamentale de la conception routière dans notre projet (Tab. II.1).

Tableau II. 1: Paramètre de Vitesse de référence (V_r).

E CAT	E1	E2	E3
1	120/100/80	100/80/60	80/60/40
2	120/100/80	100/80/60	80/60/40
3	120/100/80	100/80/60	80/60/40
4	120/100/80	80/60/40	60/40
5	80/60/40	60/40	40

Nous sommes dans un environnement **E3** et catégorie **4**, la vitesse de référence choisie dans notre projet est: $V_r = 60 \text{ km/h}$

II.2.1.3 Distance minimale de freinage :

La distance de freinage d_0 est la distance parcourue pendant l'action de freinage, elle varie en fonction de la pente longitudinale de la chaussée.(voir **Fig. II.1**)

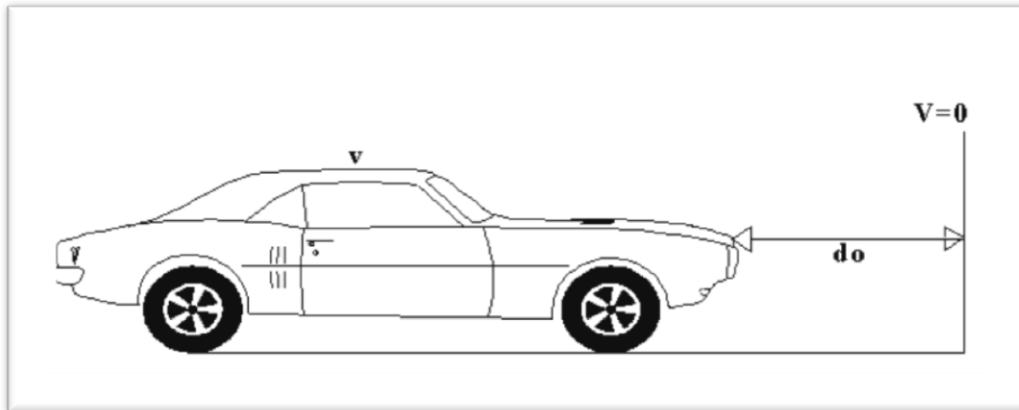


Figure II-1 Distance de freinage.

Cette distance a la formule suivante :

$$d_0 = \left(\frac{4}{1000} \right) \cdot \left(\frac{V_r^2}{f_{rl} \pm e} \right)$$

V_r : la vitesse de référence en km/m

e : la déclivité

f_l : coefficient de frottement longitudinal qui dépend la vitesse V_r et ils sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau II. 2: Coefficient de frottement longitudinal f_{rl} en fonction de la vitesse (B40).

Vitesse (km/h)	40	60	80	100	120
Catégorie 1.2	0.45	0.42	0.39	0.36	0.33
Catégorie 3.4.5	0.49	0.46	0.43	0.40	0.36

Dans notre cas on prend $f_{rl} = 0.46$ et $e = 0\%$ (En palier $e = 0$)

Donc :

$$d_0 = \left(\frac{4}{1000} \right) \cdot \left(\frac{Vr^2}{f_{rl} \pm e} \right) = \left(\frac{4}{1000} \right) \cdot \left(\frac{60^2}{0.46 \pm 0} \right) = 31.30 \text{ m}$$

II.2.1.4 Temps de réaction et de perception :

Souvent que l'obstacle est prévisible ou imprévisible de l'état du conducteur, ce dernier a besoin d'un certain temps pour réaliser la nature de l'obstacle et du danger qu'il représente.

Le temps de réaction diffère d'une personne à une autre et varie en fonction de l'état physique et psychique du conducteur. Sa durée est conditionnée par la réaction du conducteur et face au trois cas possibles :

Le freinage.

Le dépassement.

Plusieurs études sur le comportement des conducteurs ont montré que le temps de perception et de réaction est en moyenne dans une attention concentrée de :

$t = 1.2 \text{ s}$ dans le cas d'un obstacle imprévisible

$t = 0.6 \text{ s}$ dans le cas d'un obstacle prévisible

La moyenne de réaction est de 0.9 s mais en pratique on prend toujours :

$t = 2 \text{ s}$ cas des vitesses $V \leq 60 \text{ km/h}$ (conducteur peu concentré)

$t = 1.8 \text{ s}$ cas des vitesses $V > 60 \text{ km/h}$ (conducteur concentré)

Le mouvement étant considéré comme un mouvement uniforme où (v) est la vitesse en m/s et (t) le temps de perception et de réaction moyen.

Donc la distance parcourue pendant le temps de perception et de réaction est :

$$d_1 = v \times t$$

II.2.1.5 Distance d'arrêt :

C'est la distance parcourue par les véhicules à partir du moment où le conducteur aperçoit l'obstacle jusqu'à l'arrêt complet du véhicule (**Fig. II.2**)

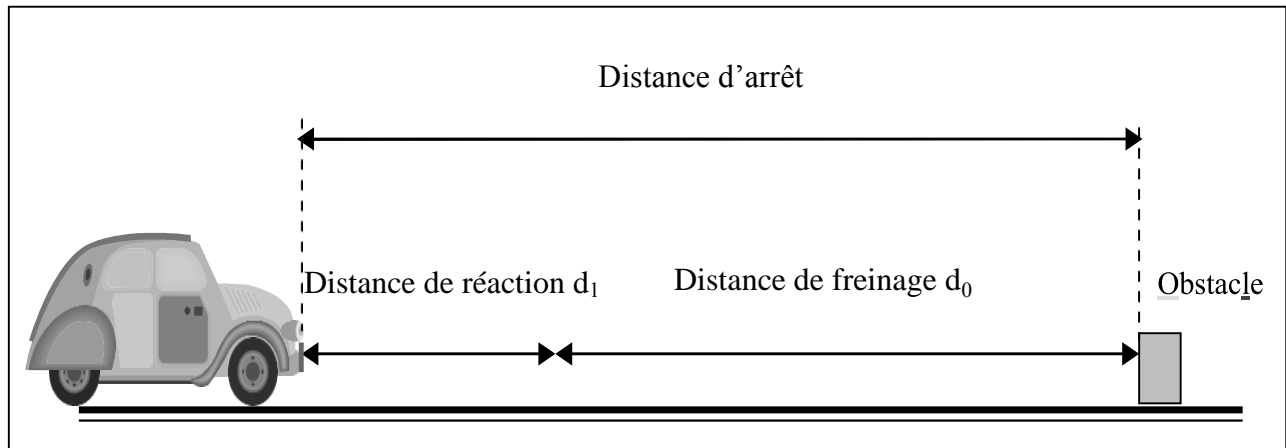


Figure II-2 Distance d'arrêt du véhicule.

$$d_a = d_1 + d_0$$

En alignement droit :

Pour $V_r \leq 60$ km/h et quand $t = 2$ s et $d_a = d_0 + 0.55 \times V_r$

Pour $V_r > 60$ km/h et quand $t = 1.8$ s et $d_a = d_0 + 0.5 \times V_r$

Donc :

$$V_r = 60 \text{ km/h} \quad t = 2 \text{ s}$$

$$d_a = d_0 + 0.55 \times V_r = 31.30 + 0.55 \times 60 = 64.30 \text{ m}$$

En courbe :

Dans les raccordements courbes, le freinage est moins énergique afin de ne pas perdre le contrôle de véhicule, la distance de freinage est majorée de 25 %.

Pour $V > 60$ km/h et $t = 1.8$ s et $d_a = 1.25 d_0 + 0.5 \times V_r$

Pour $V \leq 60$ km/h et $t = 2$ s

$$d_a = 1.25 d_0 + 0.55 \times V_r$$

$$V_r = 60 \text{ km/h}$$

Donc :

$$t = 2 \text{ s} \text{ et } d_a = 1.25 \times d_0 + 0.55 \times V_r$$

$$d_a = 1.25 \times 31.30 + 0.55 \times 60 = \mathbf{72.13 \text{ m}}$$

II.2.1.6 Distance de perception :

La distance maximale à laquelle certains points particuliers de la route doivent être perçus pour laisser suffisamment le temps au conducteur afin qu'il prenne un choix d'effectuer telle ou telle manœuvre. Cette distance est appelée la distance de perception et notée d_p . Cette distance équivaut à la somme de la distance d'arrêt (d_a) et de la distance parcourue pendant 3 fois le temps de réaction (soit 6 secondes) (**Fig. II.3**).

$$d_p = d_a + (6/3.6) V_r$$

V_r : est exprimée en km/h

En alignement droit :

$$d_p = 64.30 + (6/3.6) 60 = \mathbf{164.30 \text{ m}}$$

En courbe :

$$d_p = 72.13 + (6/3.6) 60 = \mathbf{172.13 \text{ m}}$$

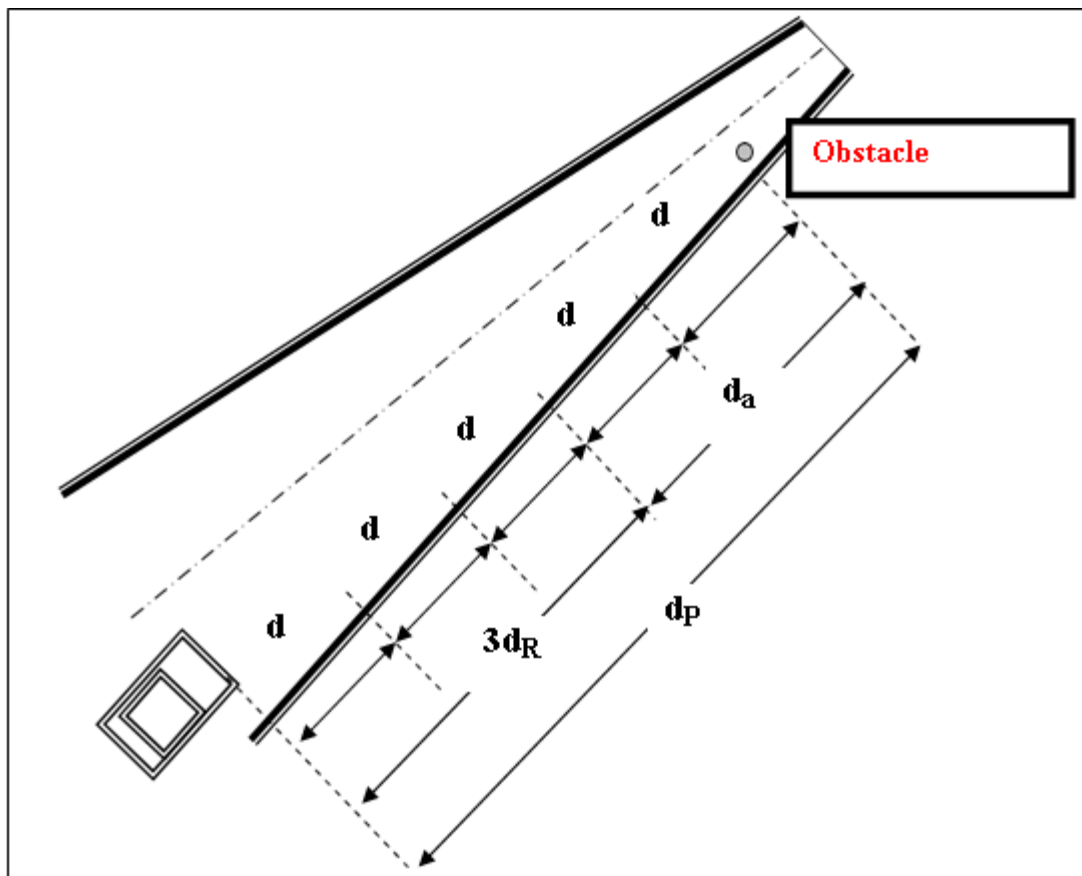


Figure II-3 Distance de perception

II.2.1.7 Distance de sécurité entre deux véhicules :

C'est la distance de sécurité minimum entre deux véhicules, dans le cas deux véhicules qui circulent sur la même voie, dans le même sens et avec des vitesses très proches. L'espacement de sécurité nécessaire pour que si la première voiture freine brusquement le conducteur du second véhicule a le temps de réagir et freiner à son tour sans risque de rentrer en collision avec le premier véhicule.

La distance de freinage d_1 ne change pas mais par contre la distance parcourue pendant le temps de perception et de réaction du second véhicule augmente d'une durée $(t+t')$;

t' étant le temps de réaction du second véhicule à la vue des feux de stop arrière de premier véhicule allumé. L'espacement de sécurité sera donc théoriquement :

d_2 étant la distance parcourue pendant le temps de perception et de réaction de première véhicule,

l la longueur moyenne du véhicule, (**Fig. II.4**).

$$d'_2 = d_2 + v \times t' + l$$

En générale, on prend $t' = 0.75$ second et en pratique on prend $t' = 3$ second.

Donc la distance de sécurité est :

$$d'_2 = (t + t') v + l$$

t et t' étant exprimé en seconds et v en m/s.

Soit E_s l'espacement supplémentaire de sécurité :

$E_s = v \times t' + l$; avec l : la longueur moyenne de la véhicule

$$E_s = (60/3.6) 3 + 3 = 50 \text{ m.}$$

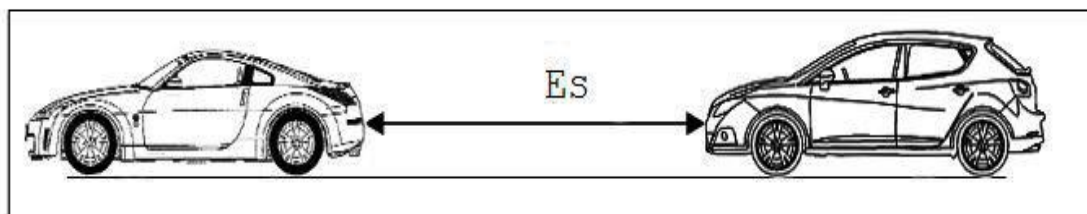


Figure II-4 Espacement supplémentaire de la sécurité entre deux véhicules.

II.2.1.8 Manœuvre de dépassement:

II.2.1.8.1 Distance de visibilité de dépassement « dvd » :

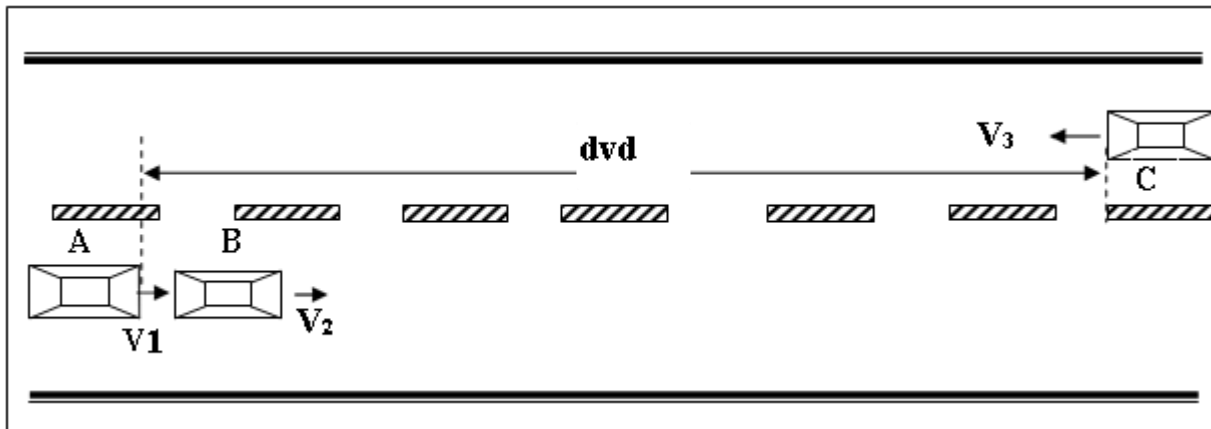


Figure II-5 Distance de visibilité de dépassement «dvd»

II.2.1.8.2 Distance de manœuvre de dépassement « dmd » :

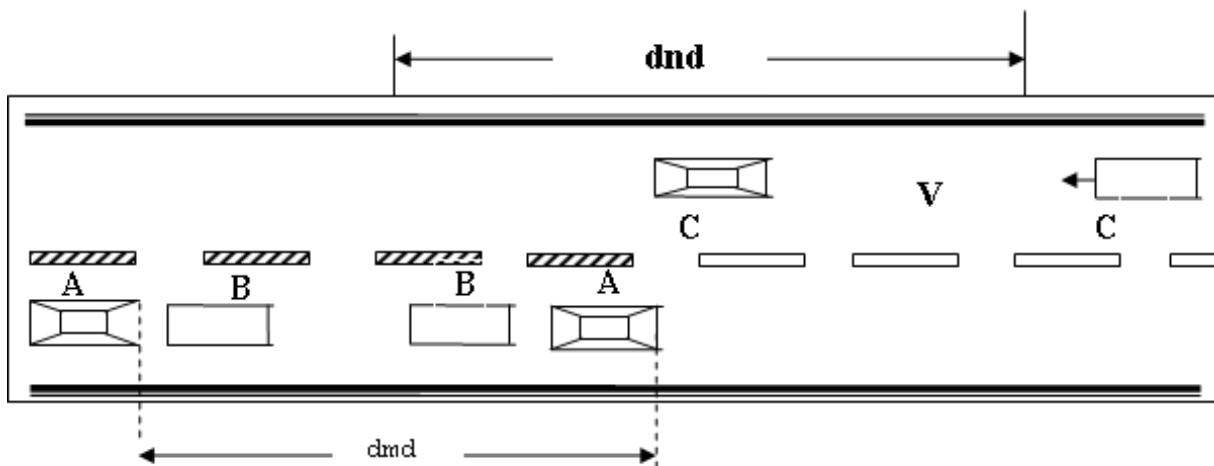


Figure II-6 Distance de manœuvre de dépassement «dmd»

D'après le tableau suite après, (**Tableau II.3**) des normes (B40), on tire les valeurs de dnd , dvd et dmd en fonction de la vitesse de référence.

$$V_r = 60 \text{ Km/h;}$$

$$dvd = 360 \text{ m}$$

$$dmd = 180 \text{ m}$$

dnd : Distance normal de dépassement, $dnd = 240 \text{ m}$

Tableau II. 3: Valeurs de dvd, dnd et dmd en fonction de la vitesse.

Vr (Km/h) Distance	40	60	80	100	120	140
	dmd	3V	3V	3V	3V	3V
120		180	240	300	360	420
dnd	4V	4V	4V	4V	4V	4V
	160	240	320	400	480	560
dvd	6V	6V	6V	6V	6V	6V
	240	360	480	600	720	840

II.3. ETUDE GEOMETRIQUE DE LAROUTE

Le projet soumis à notre étude consiste à concevoir une route en terre. La route a une plate forme de largeur 8,00 m composée uniquement d'une chaussée à deux voies de 8,00 m (2x4) sans accotement.

- **L'étude topographique permet d'obtenir :**
- **Le tracé en plan de la route,**
- **Le profil en long,**
- **Un profil en travers type,**
- **Des profils en travers**

Remarque :

Pour faire une étude de route il faut choisir au minimum deux variantes pour voir comparer les résultats technique (le volume de remblais et déblais, la pente, les rayons...) obtenus dans notre étude par utilisation logiciels (Covadis 10.1 ou AutoCAD C3D 2015) et en respectant les normes technique d'aménagement de route (B40).

II.3.1 Caractéristiques géométriques des variantes:

II.3.1.1 Tracé en plan:

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

Il n'est pas forcément l'axe de symétrie de la structure ou de la chaussée.

II.3.1.2 Profil en long:

Le profil en long de l'axe de roulement définissant en élévation le tracé en plan, c'est en fonction des paramètres liés aux contraintes fonctionnelles de l'obstacle à franchir ou aux contraintes naturelles que l'on définit le profil en long.

II.3.1.3 Profil en travers:

Le profil en travers est l'ensemble des éléments qui définissent la géométrie et les équipements de la voie dans le sens transversal.

Dans notre projet le profil en travers de la plate-forme est de 8.00 m de largeur comprenant une chaussée de 8.00 m et deux trottoirs de 1m chacun. La chaussée présentera une pente transversale en toit égale à 2,0% permettant l'assainissement de l'ouvrage, (Fig. II.7).

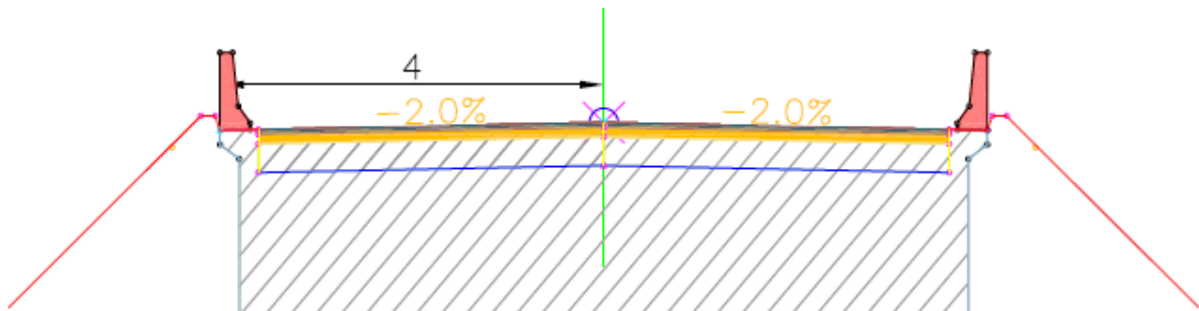


Figure II.7 Profil en travers type de la route avec l'ouvrage.

Données:

Largeur Chargeable (l_{ch}) 8.00 m

La pente 2.0 %

Nombre de voies 2

II.4 Choix de type d'ouvrage entre de deux variantes :

Dans les années 60, le SETRA (SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES) dans les dossiers-pilotes PIGF 67 [7] et PIPO 74 [8] remplacés par le Guide de conception (dec 1992) [6], a défini dans un catalogue des ponts types classées en 12 familles :

- Les PI-CF : Passage Inférieur en Cadre Fermé ;
- Les PI-PO : Passage Inférieur en Portique Ouvert ;
- Les POD : Portique Ouvert Double ;
- Les PSI-DA : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Armée ;
- Les PSI-DP : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Précontrainte.
- PSI-DN : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Nervurée ;
- PSI-BA : Passage Supérieur ou Inférieur à Poutres en Béton Armé ;
- PR-AD : Poutres Précontraintes par Adhérence ;
- VI-PP : Viaducs à travées Indépendantes à Poutres Précontraintes ;
- PSI-OM : Passage Supérieur ou Inférieur à Ossature Mixte ;
- PS-BQ : Passage Supérieur à Béquilles ;
- PSI-DE : Passage Supérieur ou Inférieur en Dalle Elégie.
- PPE : Pont à Poutrelles Enrobée

Les PIPO, PIGF, POD, seront plus adaptés à notre cas d'étude car étant plus pratique pour des portées ne dépassant pas les 12 m (par travée: les premier documents de SETRA sont consacrés uniquement au PI-CF d'une ou double travées). Les cadres et portiques constituent la très grande majorité des passages inférieurs dans la gamme de portées de 2 à 25 m et sont également très employés pour la réalisation de passages souterrains (dénivellation de carrefours en site urbain). Leur simplicité de forme et leur grande robustesse les rendent en effet dès bien adaptés et très compétitifs dans cette gamme de portées.

II.4.1 Variante I : Dalot cadre en béton armé :

L'ouvrage initialement prévu était un PI-CF à 5 travées de longueurs 5x4.5 m de long, composées d'un tablier d'épaisseur 50 cm. Le tablier s'appuie sur deux piédroits en voiles de 50 cm d'épaisseur pour 8 m de largeur, les toutes repose sur une plate forme en radier de même épaisseur.

II.4.2 Variante II: Pont à poutres en béton armé

Une analyse multicritère est résumée dans le tableau suivant.

Tableau II. 4: Donne les critères entre les deux variantes prévues.

Critères	Dalot cadre en béton armé (variante 1)		Pont à poutres en béton armé (variante 2)	
Tech. de réalisation	Mise en œuvre plus facile	(+)	Mise en œuvre plus complexe	(-)
Entretien	Ne nécessitant pas d'appareils d'appui, cela lui confère une grande facilité d'entretien	(+)	Difficile car nécessite beaucoup de moyen pour le changement des appareils d'appuis	(-)
Délai de réalisation	Le délai de réalisation est plus long car le coulage est fait sur place.	(-)	Le délai de réalisation est réduits car les éléments sont préfabriqués en atelier et sont juste montés sur le chantier	(+)
Main d'œuvre	La construction de l'ouvrage nécessite une main d'œuvre moins nombreuse et qualifiée	(+)	La construction de l'ouvrage nécessite une main d'œuvre nombreuse et qualifiée	(-)

II.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA VARIANTE RETENUE :

Après avoir effectué une analyse multicritère des deux variantes, notre choix est porté sur la variante 1 (le dalot : pont cadre).

Les ponts-cadres et les portiques sont des structures monolithiques, en ce sens que les traverses et les piédroits forment un tout, d'où leur rusticité et leur robustesse tout-à-fait avantageuses. En particulier, l'encastrement du tablier sur les piédroits assure la stabilité de ces derniers vis-à-vis des efforts horizontaux (poussée des terres,...) et permet de mieux répartir les moments dans le tablier que dans le cas d'une travée isostatique. Il en résulte une minceur remarquable, particulièrement intéressante dans le cas des franchissements de faible tirant d'air. De plus, dans leur grande majorité, ces ouvrages ne nécessitent ni joints de

chaussée ni appareils d'appui, ce qui leur confère une grande facilité d'entretien. La possibilité de disposer un remblai de faible hauteur sur les cadres et les portiques confère à ces derniers une plus grande souplesse d'utilisation.

En revanche, ces ouvrages, du fait de leur grande hyperstaticité, sont sensibles aux déformations imposées (tassements du sol notamment) et nécessitent certaines précautions au niveau de la conception, du calcul et de l'exécution.

En résumé, les ponts- cadres et les portiques constituent une solution souvent bien adaptée aux brèches d'importance modérée, tant sur le plan technique et économique que sur celui de l'esthétique. Il est vrai que, parmi les ouvrages réalisés, certains présentent un aspect peu satisfaisant dans leurs formes ou leurs proportions, ou engendrent un effet d'écran préjudiciable à la visibilité et à l'esthétique pour les usagers de la voie franchie. Cependant, ces défauts relèvent en général d'une mauvaise conception et ne sont donc pas de nature à mettre en cause l'avantage de ces types d'ouvrages.

II.5.1 Variante 1: DALOT (PONT CADRE)

Le dalot est un ouvrage de franchissement de caractère hydraulique, placé sous la chaussée. Il est généralement en béton armé et présente une section rectangulaire ou carrée. Il est adopté pour des débits dépassant 10 m³/s.

Le dalot est constitué :

- **Un radier**
- **Des piédroits**
- **Un tablier**
- **quatre murs en aile en amont et en aval**
- **le remblai d'accès**

Les types des dalots :

On a trois types des dalots :

Les dalots ordinaires constitués de piédroits verticaux fondés sur semelles ou radier général et sur lesquels repose une dalle en béton armé.

Les dalots cadres dans lesquels la dalle, les piédroits et le radier constituent une structure rigide en béton armé.

Les dalots portiques analogues aux ponts cadres mais sans radier (piédroits verticaux fondés sur semelles).

Conclusion :

Le choix de l'ouvrage est conditionné par les contraintes techniques, économiques et esthétiques.

Les contraintes techniques se présentent en termes de physiques du site où il est implanté, de la route portée, et enfin la disponibilité du matériel, de matériaux, de la main d'œuvre qualifiée et de mise en œuvre.

Les contraintes économiques résident dans le fait de choisir une variante qui présente un coût raisonnable.

Quant au côté esthétique, il faut juste signaler que la variante choisie doit être compatible avec le paysage du site tout en respectant bien évidemment sa faisabilité économique et technique.

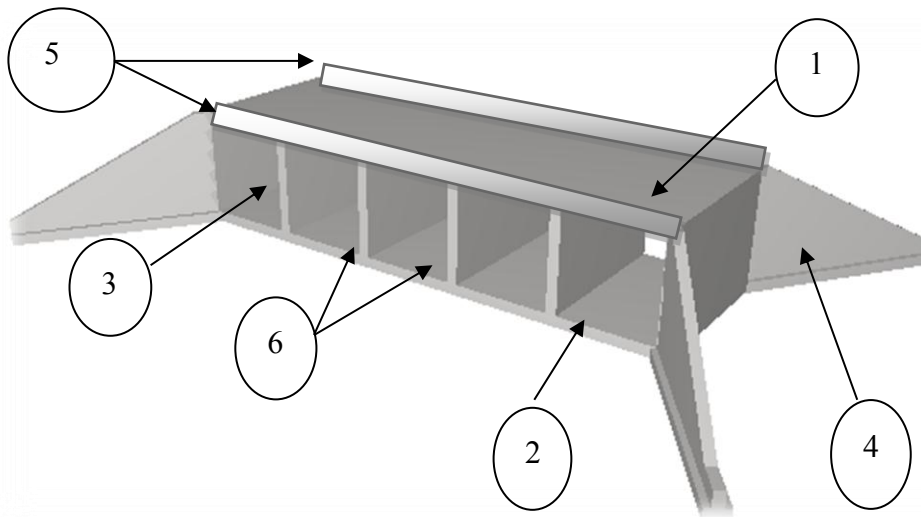
Tenant compte de ces contraintes, le choix de l'étude porte sur un dalot cadre (variante 1) car il est moins coûteuse, procure un entretien facile.

III Etude de la variante retenue avec la définition des charges et surcharges

III.1 Description géométrique :

Les dalots multicellulaires conviennent particulièrement lorsque les portées restent modestes (jusqu'à environ 25 m) et présentent l'avantage de pouvoir être fondés sur tous les sols acceptant une fondation superficielle peu chargée (la traverse inférieure faisant office de radier général, exerce des pressions sur le sol de l'ordre de 0,1MPa, ce qui n'exclut pratiquement que les vases, les tourbes ou certains limons, et autorise même souvent la fondation sur remblai compacté).

Le dalot c'est un ouvrage qui joue deux rôles essentiels d'une part, permet à la route de franchir un obstacle naturel (cours d'eau) ou artificiel (voie de communication) et d'autre part, il est aussi responsable de l'écoulement des eaux sous la chaussée (**Fig. III-1**).



- | | |
|----------------|-----------------|
| 1 Tablier | 4 Murs en ailes |
| 2 Radier | 5 Murs en tête |
| 3 Pieds droits | 6 Les goussets |

Figure III-1 : Schéma du dalot

Le dalot est composé de :

Tablier : est une dalle encastrée sur les pieds droits $(25.5 \times 8 \times 0.50) \text{m}^3$

Radier: c'est une fondation superficielle reposant sur béton de propreté $(25.5 \times 8 \times 0.50) \text{m}^3$

Pieds droits : Voiles encastrées sur le radier et la dalle.

Murs en ailes : Il s'agit de murs en T renversé, composés d'un voile vertical de hauteur variable encastré sur une semelle.

Murs en tête : La fonction des murs en tête et les murs en ailes est d'assurer le soutènement des remblais.

Les goussets : Les goussets sont des renforcements triangulaires de l'angle de deux pièces perpendiculaires. Ils sont destinés à améliorer l'encastrement des traverses sur les piédroits, à résorber les concentrations de contraintes et à atténuer les effets des pics de moments. Ils améliorent de plus l'esthétique des ouvrages en rendant plus perceptible leur fonctionnement, sur tout pour les portées importantes.

Le choix des goussets : le choix du gousset dépend du porté de dalot (Fig. III-2 et 3) angle supérieur (coupe droite)

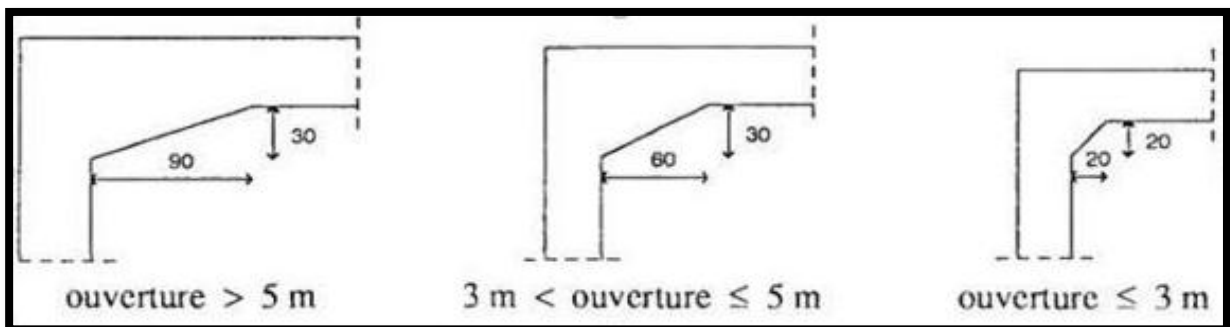


Figure III-2 : Le choix des goussets angle supérieur

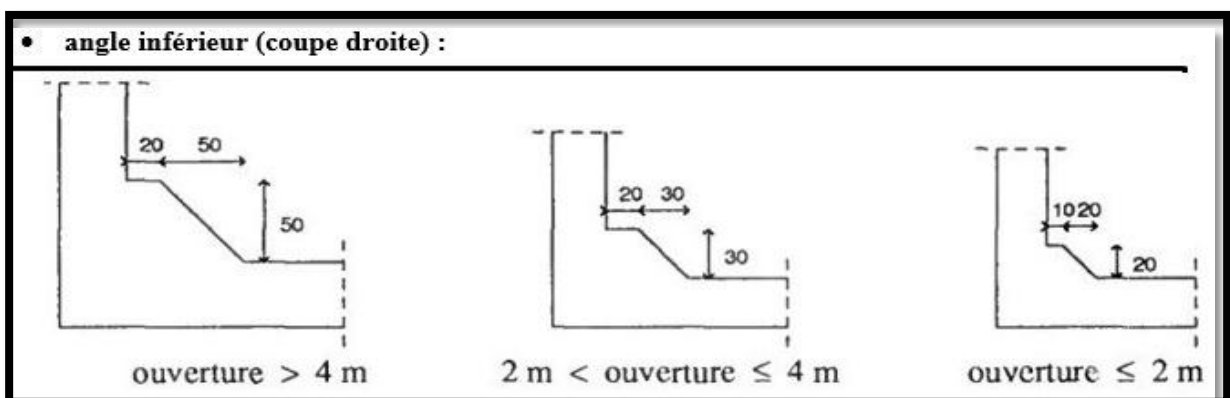


Figure III-3 : Le choix des goussets angle inférieur.

III.2 Hypothèses relatives aux matériaux:

III.2.1 Les caractéristiques des matériaux :

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction seront conformes aux règles techniques de conception et de calcul des structures en béton armé CBA 93, le règlement du béton armé aux états limites à savoir le BAEL 91, ainsi que le règlement parasismique Algérien RPA 99/2003.

III.2.1.1 Béton :

Le rôle fondamental du béton dans une structure est de reprendre les efforts de compression.

Composition

Le béton s'obtient après un mélange judicieux de ciment, des granulats et de l'eau.

Le ciment:

Le ciment joue le rôle entre produits employés dans la construction, la qualité du ciment et ces particularités dépendent des proportions de calcaire et d'argile ou de bauxite et la température de cuisson du mélange.

Les granulats:

Les granulats comprennent les sables et les pierrailles.

Les sables:

Les sables sont constitués par des grains provenant de la désagrégation des roches, la grosseur de ces grains est généralement inférieure à 5mm. Un bon sable contient des grains de tout calibre mais doit avoir d'avantage de gros grains que de petits.

pierraille:

Elles sont constituées par des grains rocheux dont la grosseur est généralement comprise entre 3 et 25 mm.

Elles doivent être dures, propres et non gélives. Elles peuvent être extraites du lit de rivière (matériaux rousés) ou obtenues par concassage de roches dure (matériaux concassés).

Dosage:

On appelle dosage le poids du liant employé pour réaliser un mètre cube de béton. Dans notre ouvrage le béton arme est réalisé avec des mélanges contenant 350 Kg de CPA par mètre cube mis en œuvre. Ce dosage est destiné à offrir les garanties de résistance escomptées et à présenter une protection efficace de l'armature.

III.2.1.1.1 Préparation d'un mètre cube en béton:

Pour chaque classe de gravier pour le sable et le ciment et l'eau, il faut déterminer les proportions adéquats dans un mètre cube de béton.

A titre indicatif voici le tableau des compositions d'un mètre cube de béton

Tableau III. 1: Des compositions d'un mètre cube de béton.

Les composantes	Graviers 3/25	Sable 0/3	Ciment	Eau
Volume (l)	800	400	-	180
Poids (Kg)	1200	600	350	180

Remarques importantes :

L'eau entrant dans la composition du béton devra être pure, pour assurer l'intégrité des mélanges, les sels en dissolution dans l'eau, s'ils sont en excès peuvent devenir nuisible aux liants. En règle générale l'eau potable convient pour la fabrication des bétons. La quantité d'eau de gâchage introduite dans la composition du béton influe d'une part sur la facilité en œuvre de ce dernier et d'autre part, sur sa résistance.

L'étude du béton est très souhaitable, car elle permet d'éviter des surprises désagréables et beaucoup plus coûteuses lors de la construction de l'ouvrage lui-même.

L'objectif de l'étude est de déterminer les proportions de ciment, granulats et d'eau qui permettent, au moindre prix, d'atteindre la résistance mécanique exigée, une compacité élevée, en même temps qu'une bonne ouvrabilité.

III.3 Caractéristiques des matériaux:

III.3.1 Caractéristiques Physique Et Mécaniques De Béton:

Masse Volumique:

La masse volumique des bétons est comprise entre 2200 et 2400 kg/m³. La masse volumique peut être augmentée avec la modalité de mise en œuvre, en particulier avec la vibration. On prendra dans notre cas une masse volumique de 2500 kg/m³.

Coefficient de dilatation:

Sa valeur moyenne est prise égale à pour l'acier :

$$\lambda = 0.00001 \text{ [m/m/}^\circ\text{C]}; \lambda : \text{Coefficient de dilatation thermique.}$$

Cette circonstance a permis le développement du béton armé.

Résistance caractéristique à la compression:

Dans le cas courant un béton est défini par sa résistance à la compression à 28 jours. Cette valeur est déterminée par des essais.

Ces essais consistent en l'écrasement au moyen d'une presse, des éprouvettes constituées par des cylindres droits de béton ayant une section de 200 cm² ($\varnothing = 16 \text{ cm}$) et une hauteur de **32 cm**. A partir de la résistance moyenne obtenue, on calcule la résistance caractéristique dans notre cas on prendra comme donnée : **$f_{c28} = 30 \text{ MPa}$** .

La norme BAEL-91 (Rev.99) (France) préconise pour $j < 28$ jours

$$F_{cj} = \frac{jx f_{c28}}{4.76 + 0.83xj} \quad \text{si } f_{c28} \leq 40 \text{ Mpa}$$

$$F_{cj} = \frac{jx f_{c28}}{1.40 + 0.95xj} \quad \text{si } f_{c28} > 40 \text{ Mpa}$$

Résistance caractéristique à la traction:

Résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, F_{tj} , est conventionnellement définie par la relation :

$$F_{tj} = 0.6 + 0.06 F_{cj}$$

Module de déformation longitudinale:

Pour le module de déformation longitudinale :

Les règles BAEL-91 (Révision-99) le fixe aux valeurs suivantes :

$$E_{ij} = 11000 * (f_{cj})^{1/3} \quad (\text{pour les charges d'une durée d'application } < 24 \text{ h})$$

$$E_{ij} = 3700 * (f_{cj})^{1/3} \quad (\text{pour les charges de longue durée}).$$

Coefficient de poisson:

$\nu = 0$ pour le calcul des sollicitations

$\nu = 0.20$ pour le calcul des déformations

III.3.2 Acier:

L'acier est un matériau caractérisé par une bonne résistance aussi bien en traction qu'en compression. Sa bonne adhérence au béton, constitue un matériau homogène.

Les armatures utilisées sont de types:

- **Aciers ronds lisses 'RL':**

Tous les aciers lisses utilisés sont de la nuance Fe E 235 et soudables.

$f_{elim} = 235$ [MPa] Module d'élasticité

$E_s = 200000$ [MPa] Module de déformation longitudinal

$\lambda = 0.00001$ [m/m/°C] Coefficient de dilatation thermique

$\eta = 1.0$ Coefficient d'adhérence de fissuration

$\Psi_s = 1.0$ Coefficient d'adhérence de scellement

$\gamma = 7,85$ [t/m³] Masse volumique de l'acier

- **Aciers à haute adhérence 'HA':**

Ce sont des aciers de type 1 de nuance. Fe E 400 caractérisées par :

$f_{elim} = 400$ [MPa]

$E_s = 200000$ [MPa] Module de déformation longitudinal

$\lambda = 10^{-5}$ [m/m/°C] Coefficient de dilatation thermique

$\eta = 1.6$ Coefficient d'adhérence de fissuration

$\Psi_s = 1.5$ Coefficient d'adhérence de scellement

$\gamma = 7.85$ [t/m³] Masse volumique de l'acier

Module d'élasticité de l'acier:

$$E_s = 2.10^5 \text{ MPa}$$

Contraintes limites:

Contraintes limites à l'ELU:

$$\sigma_s = f_e / \gamma_s \quad \text{aciers naturels}$$

$$\sigma_s = 1.1 f_e / \gamma_s \quad \text{aciers écrouis}$$

Avec :

γ_s : Coefficient de sécurité dépend de type de situation.

$$\gamma_s = 1.15 \quad \text{en situation courante} \quad \sigma_s = 348 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 1 \quad \text{en situation accidentelle} \quad \sigma_s = 400 \text{ MPa}$$

Contrainte limite de service:

Les contraintes limites de l'acier σ_s sont données en fonction de l'état limite d'ouverture des fissures :

$$\text{Fissuration préjudiciable:} \quad \sigma_s = \text{Min} (2 f_e / 3 ; 150\mu).$$

$$\text{Fissuration très préjudiciable:} \quad \sigma_s = (f_e / 2 ; 110\mu).$$

μ : Coefficient de sécurité dépend de l'adhérence :

$$\mu = 1 \quad \text{pour les ronds lisses (RL).}$$

$$\mu = 1,6 \quad \text{pour les aciers (HA).}$$

Leur rôle est d'absorber les efforts de traction de cisaillement et de torsion on distingue :

Les fers doux (rond, ordinaires...)

Les fers à nuance (tore...) à haute adhérence.

Leur caractéristique de référence est la valeur de la limite d'élasticité.

Dans notre cas on utilisera des aciers naturels Fe E 400.

Association acier béton:

Contrainte limite d'adhérence ultime :

$$\tau_s = 0,6 \times f_{t28} \times \Psi_s^2 ;$$

$\tau_s = 1.44$ [MPa] Pour l'acier doux

$\tau_s = 3.24$ [MPa] Pour l'acier haute adhérence

Longueurs de scellement droit sont données dans le tableau suivant:

Aciers HA

Tableau III. 2:Longueurs de scellement droit.

10	12	14	16	20	25	32
0.367	0.441	0.514	0.588	0.735	0.919	1.176

III.4 Calcul des charges statique et dynamique:

Introduction:

Les règlements de charges sur les ponts sont regroupés dans le fascicule 61, titre I, II et III du Cahier des Prescriptions Communes (C.P.C.). Ces titres sont relatifs respectivement aux ponts-rails, ponts-routes et ponts-canaux.

Le titre III est très réduit en volume et indique essentiellement la prise en compte d'une sur hauteur de 0,30 m d'eau par rapport à son niveau normal [3].

Le titre I [1], relatif aux ponts rails, présente essentiellement un train-type. Mais ce titre est abrogé, en France, depuis 1978 et les ponts ferroviaires sont étudiés sur la base de recommandations internationales (Convoi Union Internationale des Chemins de fer "UIC") destinées à devenir un règlement de charges.

Le titre II du fascicule 61 du CPC intitulé "Conception, Calcul et Epreuves des Ouvrages d'Art" [2] est approuvé en 1971 et réédité en 1981. A noter que ce texte est aussi en cours de révision en vue de laisser de place aux EuroCodes, mais il est encore applicable en Algérie et en France. Une présentation de ce titre sera donnée dans les paragraphes suivants.

III.4.1 Types de charges et surcharges

Le texte du titre II [2] définit essentiellement :

- Les charges routières normales avec deux systèmes différents: Système **A** et système **B**;
- Les charges routières à caractère particulier du type **militaire** et du type **exceptionnel**;
- Les charges sur les trottoirs et sur les pistes cyclables du **type local** et du **type général** ;
- Les charges sur remblais;
- Les charges dues au vent, aux séismes et les efforts dus à un choc de bateaux sur un appui de pont.

Les systèmes A, B, militaires et exceptionnels sont distincts et indépendants, leur effets ne peuvent être appliqués simultanément. Le système A ne donne pas un effet défavorable pour le calcul des hourdis et par conséquent ne sera utilisé que pour le calcul des sollicitations dans les autres éléments comme celui des poutres principales. Le système B est en général utilisé pour tous les éléments d'un pont. Alors que les charges routières à caractère particulier ne sont à prendre en compte que pour les itinéraires classés à cet effet.

III.4.1.1 Actions permanentes:

Les actions permanentes comprennent :

Le poids des éléments porteurs : (dalle, les poutres...).

Le poids des éléments non porteurs : dont l'existence est imposée par la fonction de l'ouvrage : (mur en tête le corps de chaussée, glissières...).

III.4.1.2 Actions variables:

Charges climatiques :

Essentiellement l'eau et températures et la charge hydraulique.

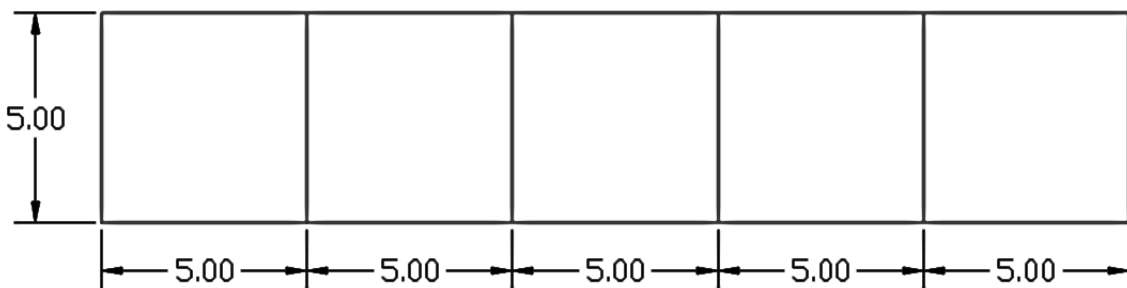
Charges permanentes et compléments des Charges permanentes:

Les charges permanentes comprennent le poids propre de la structure porteuse, et les compléments des Charges permanentes sont des éléments non porteurs et des installations fixes; on les appelle accessoires.

III.4.2 Principe de calcul des sollicitations

De manière générale, les études seront faites par bande d'un (01) mètre de dalot ($b=1\text{m}$) dans notre étude, compte tenu de la symétrie de géométrie de notre ouvrage et de la non symétrie de chargement, nous avons considéré que les piédroits intermédiaires sont dimensionnés en compression simple, ce qui nous permet d'annuler le moment au niveau de ces piédroits, d'où la possibilité d'utiliser la méthode des rotations pour l'étude de l'équilibre de chaque nœud.

Nous proposons de construire un ouvrage avec une potée de 25.5 m (compte tenu de soit : une batterie de section 5x5x5).



FigureIII-2 : Schéma de calcul équivalent

Avant de procéder à l'étude de ces chargements, on définit tout d'abord certaines notions qui seront utiles pour la suite.

III.4.2.1 Définitions et Pré-dimensionnement:

Définitions :

Toutes les parties de tablier ne sont pas forcément à charger par les charges de chaussée. Il faut donc définir une largeur chargeable qui se déduit elle-même de la largeur roulable. On donne ci-dessous les définitions correspondantes:

→ *Largeur roulable (Lr):*

C'est la largeur de tablier comprise entre dispositifs de retenue, s'il y en a, ou bordures. Elle comprend donc la chaussée proprement dite et les sur largeurs éventuelles telles que les bandes d'arrêt d'urgence (BAU), bandes dérasées (BDG), etc.

→ *Largeur chargeable (Lch):*

$$Lch = Lr - n \cdot 0,5$$

Lch: largeur chargeable en m.

Lr: Largeur roulable en m

n: Nombre de dispositifs de retenue; $n = 0$.

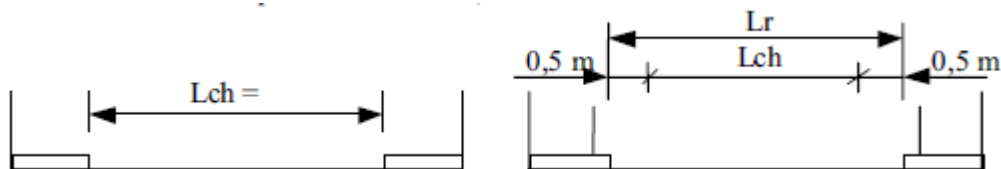


Figure III-3 Largeur roulable (Lr) , Largeur chargeable(Lch)

→ *Nombre de voies (Nv):*

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

$$Nv = E(Lch/3)$$

Avec : **Lch**: largeur chargeable en m.

Le symbole **E** désigne la partie entière. Exemple : $Lch = 7 \text{ m} \rightarrow Nv = E(7/3) = 2 \text{ voies}$.

Exceptions: Les chaussées comprises entre 5 m (inclus) et 6 m sont considérées comme ayant 2 voies. $5 \leq Lch \leq 6 \text{ m} \rightarrow Nv = 2 \text{ voies}$.

→ *Largeur d'une voie (V)*:

La largeur d'une voie de circulation , V, est donné par:

$$V = L_{ch}/N_v ;$$

→ *Classe des ponts* :

Les ponts sont rangés en 3 classes suivant leur largeur roulable, L_r , et leur destination:

1ère classe:

Tous les ponts supportant une largeur roulable supérieure ou égale à 7 m c.à.d. $L_r \geq 7 \text{ m}$ et ceux portant des bretelles d'accès à de telles chaussées, ainsi que les autres ponts éventuellement désigné par le Cahier des Prescriptions Spéciales (C.P.S.), tels que ponts urbains ou en zone industrielle avec risque d'accumulation de poids lourds quelque soit leur largeur.

2ème classe:

Tous les ponts autres que ceux de la 1ère classe supportant des chaussées de largeur roulable comprise strictement entre 5,50 m et 7 m, c.à.d., $5,5 \text{ m} < L_r < 7 \text{ m}$.

3ème classe:

Les ponts autres que ci-dessus portant des chaussées de 1 ou 2 voies de largeur roulable inférieure ou égale à 5,5 m. c.à.d. $L_r \leq 5,5 \text{ m}$.

Tableau III. 3: Tableau de classe de pont.

La classe	La largeur roulable (L_r)
1	$L_r \geq 7 \text{ m}$
2	$5.5 \text{ m} < L_r < 7 \text{ m}$
3	$L_r < 5.5 \text{ m}$

Pré-dimensionnement :

Le règlement introduit également deux autres notions géométriques. Il s'agit du nombre de voies de circulation et de la classe de pont.

$L_r = 8.00 \text{ m}$ (dans notre projet)

La largeur chargeable (L_{ch}) :La largeur chargeable se déduit de la largeur roulable en enlevant une bande de 0.5 m le long de chaque dispositif de retenue (glissière ou barrière)

lorsqu'il existe, elle est définie par la formule $L_{ch} = L_r - n$ (0.5), puisque L_{ch} est largeur chargeable en m et n est nombre de dispositifs de retenue ; $n \leq 2$.

Donc : Il n'est pas prévu de dispositifs de retenues d'où : $n = 0$ et $L_r = L_{ch} = 8$ m

D'après le tableau ci-dessus notre pont cadre est de **classe 1**

Le nombre de voies :

Par convention, les chaussées comportent de voies de circulation égale à la partie entière du quotient par 3 de leur largeur chargeable :

$$N_v = E (L_{ch}/3) = 8/3 = 2 \quad \text{donc} \quad N_v = 2 \text{ voies.}$$

III.5 Calcul des charges, surcharges sur le dalot:

III.5.1 Charges permanentes :

Au niveau du tablier :

On a la formule suivante : $\gamma \times e \times b$ avec :

γ : poids volumique du béton armé (25 kN/m^3)

e : épaisseur du tablier (m)

b : 1 ml (les calculs sont effectués par bande de 1 ml de dalot)

Poids propre du tablier : $25 \times 0.5 \times 1 = 12.5 \text{ kN/ml}$

Poids propre des guides roues : $25 \times 0.5 \times 0.25 \times 1 \times 2 = 6.25 \text{ kN/ml}$

Poids propre de chaussée : $0.5 \times 22 \times 1 = 11 \text{ kN/ml}$

Donc la charge permanente sur le tablier est la somme des actions permanentes sur ce tablier :

$$P_{\text{tablier}} = 12.5 + 6.25 + 11 = \mathbf{29.75 \text{ kN/m}}$$

1) Au niveau du radier :

Poids propre du radier : $25 \times 0.5 \times 1 = 12.5 \text{ kN/ml}$

Poids propre des guides roues : $25 \times 0.5 \times 0.25 \times 1 \times 2 = 6.25 \text{ kN/ml}$

Poids propre de chaussée : $0.5 \times 22 \times 1 = 11 \text{ kN/ml}$

Poids propre du tablier : $25 \times 0.5 \times 1 = 12.5 \text{ kN/ml}$

Poids propre du piédroit : $\frac{e \times h \times 25 \times 1 \times 4}{3L + 4e} = 14.52 \text{ kN/ml}$

La somme est :

$$P_{\text{radier}} = 12.5 + 6.25 + 11 + 12.5 + 14.52 = \mathbf{56.77 \text{ kN/ml}}$$

III.5.2 Sous l'action de la poussée des terres:

1) Poussée du remblai sur un piédroit uniquement :

$$P_t = k_a \cdot \rho_t \cdot h$$

Avec :

$k_a = 0.333$: coefficient de poussée des terres

$\rho_t = 18 \text{ kN/m}^3$: poids volumique des terres

h = hauteur du remblai par rapport au point considéré

$$P_t(h=0) = P_{t0} = 0.333 \times 18 \times 0 = \mathbf{0 \text{ kN/m}^2}$$

$$P_t(h=5) = P_{t5} = 0.333 \times 18 \times 5 = \mathbf{29.97 \text{ kN/m}^2}$$

III.5.3 Charge hydraulique:

La charge hydraulique (Ph) et de sens contraire par rapport la poussée des terres pour les piédroits sont en contact avec le terrain, pour les piédroits intermédiaires l'application sur les deux sens va annuler la charge hydraulique.

III.5.4 Calcul des surcharges routières :

D'après le fascicule 61 titre II, les surcharges a utilisées pour le dimensionnement de notre pont sont les suivantes :

La surcharge de type A (L).

Système B (Br, Bc, Bt).

III.5.4.1 Système de charge A (L) :

Il est donné en fonction de la longueur chargée L par :

$$A(L) = 2.30 + \frac{360}{L+12}$$

La valeur obtenue est multipliée par les coefficients a_1 et a_2 .

Coefficients a_1 et a_2 :

Les coefficients a_1 et a_2 dépendent de la classe du pont et de voie.

Tableau III. 4:Coefficients de dégressivité transversale de la charge.

Classe du pont	Nombre des voies charges				
	1	2	3	4	5
1 ^{ère}	1	1	0.9	0.75	0.75
2 ^{ème}	1	0.9	-	-	-
3 ^{ème}	0.9	0.8	-	-	-

Selon le tableau : $a_1 = 1$

Les valeurs de a_2 sont définies par la formule suivante :

$$a_2 = v_0/v$$

avec : v : largeur d'une voie

v_0 : sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 5:Valeurs de v_0 .

Classe du pont	1 ^{ère}	3.50
	2 ^{ème}	3.00
	3 ^{ème}	2.75

Donc on a : $v_0 = 3.50$ m (1^{ère} classe) et $v = 4.00$ m

$$a_2 = v_0/v = 3.50/4 = 0.88 \text{ m.}$$

Les valeurs données aux coefficients a_1 et a_2 tiennent compte des majorations pour effets dynamiques.

Le pont cadre est de **classe 1**. Avec : $a_1 = 1$ et $a_2 = v_0/v = 3.5/4 = 0.88$

$$A(L) = [2.30 + \frac{360}{L+12}] \times a_1 \times a_2$$

Avec : $a_1 = 1$ et $a_2 = v_0/v = 3.5/4 = 0.88$

$$D'où : A(L) = [2.30 + \frac{360}{5+12}] \times 1 \times 0.88 = \mathbf{20.67 \text{ kN/m}^2}$$

III.5.4.2 Système de charge B :

Le système de charge B comprend trois (3) sous systèmes les suivants :

Sous système Bc: ce compose de camions de type (30T).

Sous système Bt: ce compose de groupes de deux essieux dénommés essieux tandems (8T).

Sous système Br: ce compose d'une roue isolées.

Les charges du système B sont frappées par des coefficients de majoration dynamique:

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 L} + \frac{0.6}{1 + 4 \frac{G}{Q}}$$

L : la longueur de travée

G : poids totale des surcharges permanentes.

S : poids max des surcharges.

III.5.4.2.1 Système Bc :

Le convoi Bc se compose d'un ou au maximum de deux (2) camions types par file. Dans le sens transversal le nombre de files est inférieur ou égal au nombre de voies.

On choisit le nombre et la disposition des convois de manière à produire l'effet le plus défavorable; tout en respectant le règlement suivant:

→**Dans le sens longitudinal :** le nombre de camions est limité à 2 par file, orientés dans le même sens. La distance des 2 camions d'une même file est déterminée pour produire l'effet le plus défavorable et peut être nulle (minimum 4,5 m entre essieux des 2 camions). On peut considérer une partie d'un camion, l'autre partie étant sur la travée suivante ou sur le remblai d'accès, mais on ne peut couper un camion.

→**Dans le sens transversal:** le nombre de files de camions, Nf, ne doit pas dépasser le nombre de voies, Nv, (c.à.d. $Nf \leq Nv$), même si cela est géométriquement possible. On ne peut pas couper une file de camion. De plus, une distance minimale de 0,25 m (Figure III.5) est exigée entre l'axe de la file de roues la plus excentrée et le bord de:

- la largeur chargeable s'il s'agit du calcul des poutres principales...
- la largeur roulable s'il s'agit du calcul des autres éléments du tablier (hourdis, entretoises).

Les caractéristiques du convoi Bc sont présentées dans la figure ci-après.

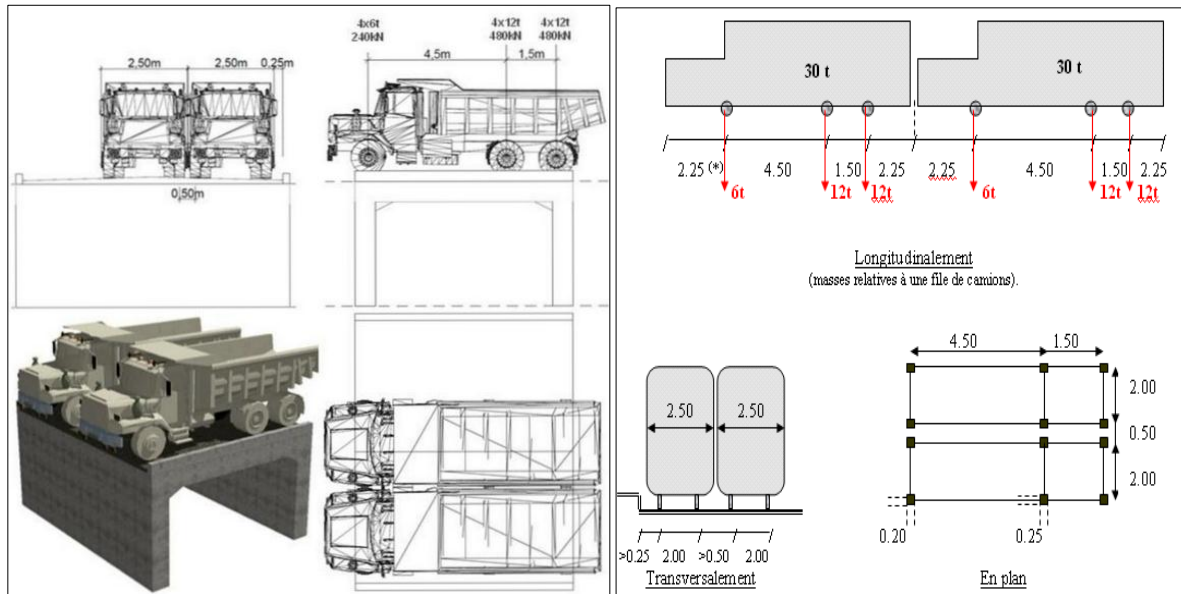


Figure III-4 Positions au centre et Charges roulantes Dues au Système Bc.

La charge répartie est de :

Les valeurs de coefficient bc est donnée par le tableau suivant:

Tableau III. 6:les valeurs de bc.

Valeur de bc	Nombre files considérées	1	2	3	4	> 4
Classe Dupont	1 ^{ère}	1.2	1.1	0.95	0.8	0.7
	2 ^{ème}	1	1	-	-	-
	3 ^{ème}	1	0.8	-	-	-

Le coefficient bc = 1.10 (selon le tableau)

Sur le tablier :

$$P_1 = \frac{p \times bc}{S_{Encombrement}} = \frac{8 \times 60 \times 1.10 \times 1}{2.5 \times 5.5} = 38.40 \text{ kN/ml}$$

Sur le radier:

$$P_2 = \frac{(120+120+60+60) \times 2 \times 1.1}{25.5 \times 7} = 4.43 \text{ kN/ml}$$

Sur un piédroit uniquement (gauche):

$$P_t = 1.20 \times p_0 \times b_c \times 1m = 1.20 \times 10 \times 1.1 \times 1 = 13.2 \text{ kN/ml}$$

$$P_{t1} = P_{t0} = 13.2 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Le coefficient de majoration : } \delta = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 L} + \frac{0.6}{1 + 4 \frac{G}{Q}}$$

Avec : L=Max (Largeur roulable ; portée de la travée)

Q = Poids total maximum des essieux du système (Bc ou Bt) qu'il est possible de placer sur la longueur L .

G = poids propre du tablier + accessoire

$L = \max(8, 5) = 8\text{m}$

$Q = 480\text{ kN}$

$G = (25 \times 0.5 \times 7 \times 4) + (22 \times 0.5 \times 7 \times 4) + (25 \times 0.5 \times 0.25 \times 1 \times 2) = 664.25\text{ kN}$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 \times 8} + \frac{0.6}{1 + 4 \frac{664.25}{480}} = 1.24$$

Alors:

Sur le tablier: $P_1 = 1.24 \times 38.40 = 47.62\text{ kN/ml}$

Sur le radier: $P_2 = 1.24 \times 4.53 = 5.62\text{ kN/ml}$

Sur un piédroit uniquement (gauche): $p_t = 1.24 \times 13.2 = 16.37\text{ kN/ml}$

III.5.4.2.2 Sous système Bt :

Un tandem se compose de 2 essieux munis de roues simples pneumatiques. Les caractéristiques du système Bt sont présentées ci-dessous (**Figure III.6**).

Il se compose de deux (2) essieux munis de roues simples pneumatiques.

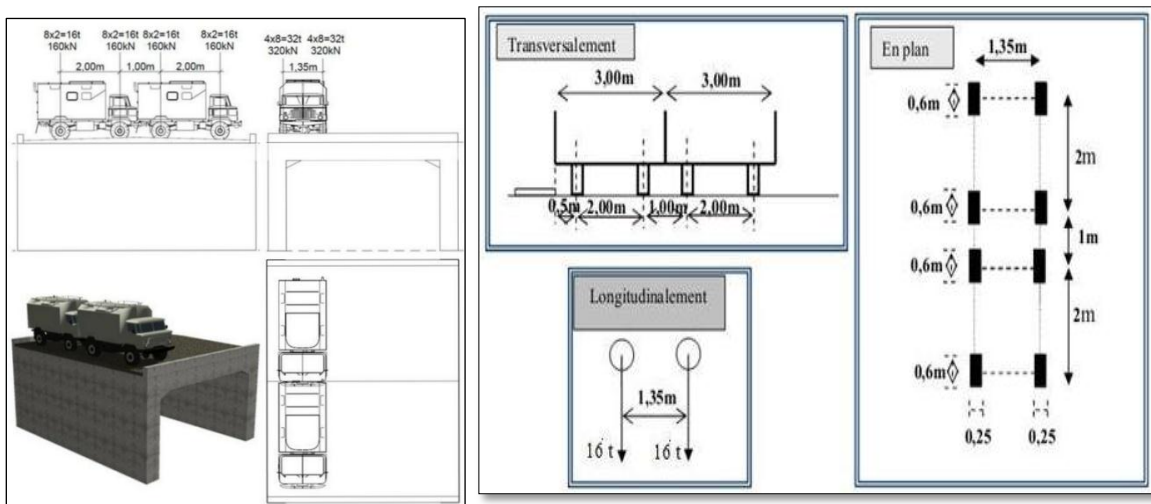
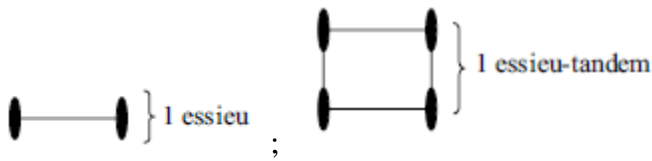


Figure III-5 Positions au centre et Charges roulantes Dues au Système Bt.

Conformément aux règles d'application du système de charge Bt, transversalement on peut disposer sur la chaussée au maximum deux (2) files Bt et longitudinalement le nombre de files.

Terminologie :



La charge répartie est de :

Sur le tablier :

$$P_1 = \frac{p \times b \times c}{S_{\text{Encombrement}}}$$

$$P_1 = \frac{8 \times 80 \times 1}{2.35 \times 6} = 45.39 \text{ kN/ml}$$

Sur le radier:

$$P_2 = \frac{(2 \times 80 + 2 \times 80) \times 2 \times 1 \times 1 \text{ m}}{25.5 \times 7} = 3.59 \text{ kN/ml}$$

Sur un piédroit uniquement (gauche):

$$P_{t1} = 1.20 \times 10 \times 1 \times 1 \text{ m} = 12 \text{ kN/ml}$$

$$P_{t1} = P_{t0} = 12 \text{ kN/ml}$$

$$L = 8 \text{ m}$$

$$G = 664.25 \text{ kN}$$

$$Q = 640 \text{ kN}$$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 \times 8} + \frac{0.6}{1 + 4 \frac{664.25}{640}} = 1.27$$

Alors:

$$\text{Sur le radier: } P_1 = 1.27 \times 45.39 = 57.65 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Sur le radier: } P_2 = 1.27 \times 3.59 = 4.56 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Sur un piédroit uniquement (gauche): } p_t = 1.27 \times 12 = 15.24 \text{ kN/ml}$$

III.5.4.2.3 Sous système Br :

C'est une roue isolée disposée normalement à l'axe longitudinal de la chaussée.

Les caractéristiques de cette roue sont présentées ci-après (Figure III.7).

La connaissance du sens de déplacement des roues de Bt et de Br est importante lors de calcul du hourdis des ponts.

Le rectangle d'impact de la roue peut être placé n'importe où sur la largeur roulable de manière (bien sûre) à produire l'effet le plus défavorable.

Tableau III. 7:Résumé des règles d'application du système B.

Système	Max longitudinal par file	Transversal
Bc	2 camions	$N_f \leq 7 N_v$
Bt	1 tandem	$N_v = 1 \rightarrow N_v = 1$ $N_v \geq 2 \rightarrow N_v = 2$
Br	1 roue	1 roue

- **Masse totale : 10 tonnes**
- **Surface d'impact de la roue : 0,30 m x 0,60 m (longitudinalement 0,30 m et transversalement 0.60 m)**

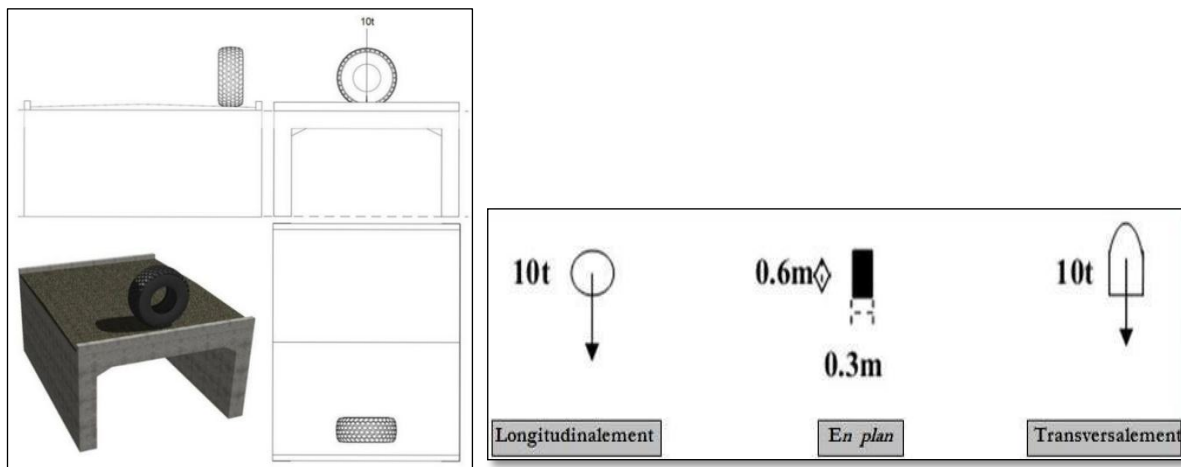


Figure III.7 Positions et Charges roulantes Dues au Système Br.

Conclusion :

Pour le calcul des charges et des surcharges en a utilisé la norme française de CPC Fascicule n° 62 - Titre II.

Les charges calculées sont les charges permanentes et compléments, des Charges permanentes et les surcharges routier (Bc, Bt, Br) et le système A1.

IV Calcul des sollicitations et les Ferrailages

IV.1 Hypothèse du calcul :

Le but de cette partie est de dimensionner le pont cadre, Nous étudierons:

- Dimensionnement des armatures du canal.
- Principes de ferrailages du cadre.

IV.1.1 Matériaux :

Béton :

Dosage: 400 kg / m^3

Résistance en compression: $f_{c28} = 30 \text{ MPa}$

Résistance en traction $f_{t28} = 0.6 + 0.06 f_{c28} = 2.4 \text{ MPa}$

Densité du béton: 25 KN/m^3

Contrainte admissible du béton en compression à l'ELU :

$$\sigma_{bc} = \frac{0.85 f_{c28}}{2\alpha} = \frac{0.85 \times 30}{1.5} \rightarrow \sigma_{bc} = 17 \text{ MPa}$$

Contrainte admissible du béton en compression à L'ELS :

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0.6 \times f_{c28} = 0.6 \times 30 \rightarrow \bar{\sigma}_{bc} = 18 \text{ MPa}$$

Acier :

Nuance :

Acier a Haute Adhérence (HA) FeE 400

Limite d'élasticité $f_e = 400 \text{ MPa}$

Contrainte de calcul de l'acier : $\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} = \frac{400}{1.15} = 347.83 \text{ MPa}$

Fissuration préjudiciable : $\bar{\sigma}_s = \min \left\{ \frac{2}{3} f_e; \max(0.5 f_e; 110 \sqrt{n f_{t28}}) \right\}$

$$\bar{\sigma}_s = \min \{ 226.67; \max(200; 110 \sqrt{1.6 \times 2.4}) \}$$

$$\bar{\sigma}_s = \min \{ 226.67; \max(200; 215.55) \}$$

$$\bar{\sigma}_s = 226.67 \text{ MPa}$$

Remblai :

Remblai d'accès en graveleux latéritique : $\gamma_d = 18 \text{ KN/m}^3$ et $k_a = 0.333$

Coefficient de poussée des terres : $k_a = 0.333$

Règlement utilisé : BAEL 99 (voir références).

IV.2.1 SCHEMA STATIQUE DU DALOT :

En phase définitive, le cadre sera dimensionné sur une mètre de long par les éléments :

- Voiles (piédroits): élément barre
- Radier : élément barre sur sol élastique

Pour l'étude de l'équilibre de chaque nœud, nous allons utiliser la méthode des rotation appliquée au schéma statique ci-dessus du dalot assimilé à des barres.

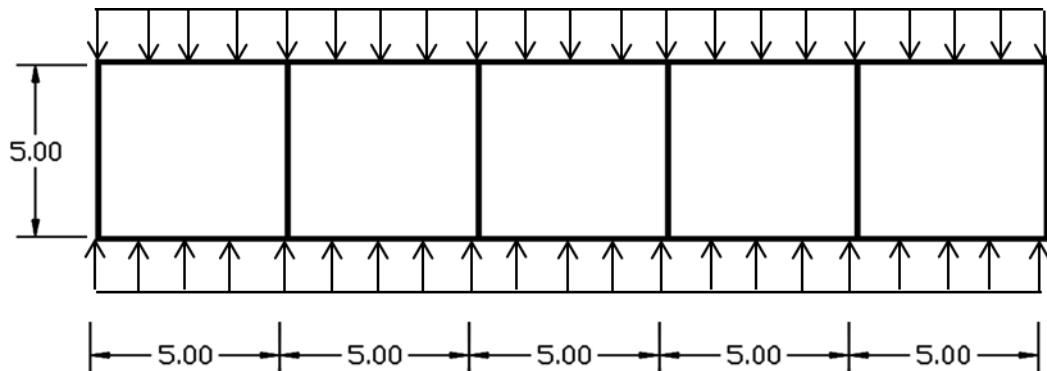


Figure IV-1: schéma statique du dalot

Moment d'inertie du tablier et du radier = I_1 = Moment d'inertie du piédroit = I_2 .

Module d'élasticité E: ce paramètre étant constant (même matériau), on peut le prendre E=1.

Désignons par :

$M_{i,j}$ = moment statique appliqué au nœud i par la barre ij

$M_{i,j}$ = moment d'encastrement appliqué au nœud i par la barre j

(déterminé par les charges appliquées à la barre)

α_i = rotation du nœud i

k_1 = caractéristique de la rigidité des barres horizontales = $\frac{2 \times E \times I_1}{l} = \frac{2 \times I_1}{l}$

k_2 = caractéristique de la rigidité des barres verticales = $\frac{2 \times E \times I_2}{l} = \frac{2 \times I_2}{l}$

$M_{i,j} = k (2 \cdot \alpha_i \cdot \alpha_j) + m_{i,j}$, $k = k_1$ ou k_2

b_i = constante du nœud i

IV.2 Calcul des sollicitations

En considérant pour l'ouvrage, une bande de largeur $b = 1$ m

$$I_1 = I_2 = \frac{h \times b^3}{12} = \frac{500 \times 1000^3}{12} = 4.17 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$k_1 = k_2 = \frac{2 \times 4.17 \times 10^{10}}{5000} = 1.67 \times 10^7 \text{ N/mm}$$

$$2 \cdot (k_1 + k_2) = 2 \times (1.67 \times 10^7 + 1.67 \times 10^7) = 6.68 \times 10^7 \text{ N/mm}$$

$$2 \times (2 \times k_1 + k_2) = 2 \times (2 \times 1.67 \times 10^7 + 1.67 \times 10^7) = 10.02 \times 10^7 \text{ N/mm}$$

L'équilibre du nœud 1 s'écrit :

$$M_{12} = M_{112} = 0$$

$$k_1 (2 \times \alpha_1 \times \alpha_2) + m_{12} + k_2 (2 \times \alpha_1 \times \alpha_{12}) + m_{112} = 0$$

$$2 \times (k_1 + k_2) \alpha_1 + k_1 \times \alpha_2 + k_2 \times \alpha_{12} = - (m_{12} + m_{112})$$

En écrivant l'équilibre de tous les nœuds, nous obtenons 12 équations à 12 inconnues :

$$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12})$$

$$\text{Nœud 1 : } 2 (k_1 + k_2) \alpha_1 + k_1 \times \alpha_2 + k_2 \times \alpha_{12} = - (m_{12} + m_{112}) = \mathbf{b}_1$$

$$\text{Nœud 2 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_2 + k_1 \times \alpha_1 + k_1 \times \alpha_3 + k_2 \times \alpha_{11} = - (m_{21} + m_{23} + m_{211}) = \mathbf{b}_2$$

$$\text{Nœud 3 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_3 + k_1 \times \alpha_2 + k_1 \times \alpha_4 + k_2 \times \alpha_{10} = - (m_{32} + m_{34} + m_{310}) = \mathbf{b}_3$$

$$\text{Nœud 4 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_4 + k_1 \times \alpha_3 + k_1 \times \alpha_5 + k_2 \times \alpha_9 = - (m_{43} + m_{45} + m_{49}) = \mathbf{b}_4$$

$$\text{Nœud 5 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_5 + k_1 \times \alpha_4 + k_1 \times \alpha_6 + k_2 \times \alpha_8 = - (m_{54} + m_{56} + m_{58}) = \mathbf{b}_5$$

$$\text{Nœud 6 : } 2 (k_1 + k_2) \alpha_6 + k_1 \times \alpha_5 + k_2 \times \alpha_7 = - (m_{65} + m_{67}) = \mathbf{b}_6$$

$$\text{Nœud 7 : } 2 (k_1 + k_2) \alpha_7 + k_1 \times \alpha_6 + k_2 \times \alpha_8 = - (m_{76} + m_{78}) = \mathbf{b}_7$$

$$\text{Nœud 8 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_8 + k_1 \times \alpha_7 + k_1 \times \alpha_9 + k_2 \times \alpha_5 = - (m_{87} + m_{89} + m_{85}) = \mathbf{b}_8$$

$$\text{Nœud 9 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_9 + k_1 \times \alpha_8 + k_1 \times \alpha_{10} + k_2 \times \alpha_4 = - (m_{98} + m_{910} + m_{94}) = \mathbf{b}_9$$

$$\text{Nœud 10 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_{10} + k_1 \times \alpha_9 + k_1 \times \alpha_{11} + k_2 \times \alpha_3 = - (m_{109} + m_{1011} + m_{103}) = \mathbf{b}_{10}$$

$$\text{Nœud 11 : } 2 (2k_1 + k_2) \alpha_{11} + k_1 \times \alpha_{10} + k_1 \times \alpha_{12} + k_2 \times \alpha_2 = - (m_{1110} + m_{1112} + m_{112}) = \mathbf{b}_{11}$$

$$\text{Nœud 12 : } 2 (k_1 + k_2) \alpha_{12} + k_1 \times \alpha_{11} + k_2 \times \alpha_1 = - (m_{1211} + m_{121}) = \mathbf{b}_{12}$$

IV.2.1 Charges permanentes :

➤ Les charges permanentes seront évaluées pour 1 m de largeur de dalot

$$\text{Sur le tablier : } g = 29.75 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Sur le radier : } g = 56.77 \text{ kN/ml}$$

➤ Poussée du remblai sur un piedroit uniquement : $g = 29.97 \text{ kN/ml}$

IV.2.1.1 Les moments d'encastrement pour 1 m:

$$m_{1,2} = -\frac{p_1 x l^2}{12} = -29.75 \times \frac{5^2}{12} = -61.98 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,2} = m_{2,3} = m_{3,4} = m_{4,5} = m_{5,6} = -61.98 \text{ kN.m}$$

$$-m_{1,2} = m_{2,1} = m_{3,2} = m_{4,3} = m_{5,4} = m_{6,5} = -m_{1,2} = 61.98 \text{ kN.m}$$

$$m_{7,8} = -\frac{p_2 x l^2}{12} = -56.77 \times \frac{5^2}{12} = -118.27 \text{ kN/ml}$$

$$m_{7,8} = m_{8,9} = m_{9,10} = m_{10,11} = m_{11,12} = -118.27 \text{ kN.m}$$

$$-m_{7,8} = m_{8,7} = m_{9,8} = m_{10,9} = m_{11,10} = m_{12,11} = 118.27 \text{ kN.m}$$

$$m_{12,1} = -(p_{t1} - p_{t0}) \times \frac{H^2}{20} - p_{t0} \times \frac{H^2}{12} = -(29.97 - 0) \times \frac{5^2}{20} - 0 \times \frac{5^2}{12} = -37.46 \text{ kN.m}$$

$$m_{12,1} = -37.46 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,12} = (p_{t1} - p_{t0}) \times \frac{H^2}{30} - p_{t0} \times \frac{H^2}{12} = (29.97 - 0) \times \frac{5^2}{30} - 0 \times \frac{5^2}{12} = 24.98 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,12} = 24.98 \text{ kN.m}$$

$$m_{2,11} = m_{11,2} = m_{3,10} = m_{10,3} = m_{4,9} = m_{9,4} = m_{5,8} = m_{8,5} = m_{6,7} = m_{7,8} = 0.00 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{1,2} + m_{1,12}) = \mathbf{b_1} = -(-61.98 + 24.98) = 37.00 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,11}) = \mathbf{b_2} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{3,2} + m_{3,4} + m_{3,10}) = \mathbf{b_3} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{4,3} + m_{4,5} + m_{4,9}) = \mathbf{b_4} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{5,4} + m_{5,6} + m_{5,8}) = \mathbf{b_5} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{6,5} + m_{6,7}) = \mathbf{b_6} = -(61.98 + 0) = -61.98 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{7,6} + m_{7,8}) = \mathbf{b_7} = -(0 - 118.27) = -118.27 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{8,7} + m_{8,9} + m_{8,5}) = \mathbf{b_8} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{9,8} + m_{9,10} + m_{9,4}) = \mathbf{b_9} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{10,9} + m_{10,11} + m_{10,3}) = \mathbf{b_{10}} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{11,10} + m_{11,12} + m_{11,2}) = \mathbf{b_{11}} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{12,11} + m_{12,1}) = \mathbf{b_{12}} = -(-37.46 + 118.27) = -80.81 \text{ kN.m}$$

La résolution du système d'équations obtenu donne :

$\alpha_1 = 9.95 \times 10^{-7}$	$\alpha_2 = -2.28 \times 10^{-7}$	$\alpha_3 = 6.58 \times 10^{-8}$	$\alpha_4 = -8.75 \times 10^{-8}$
$\alpha_5 = 3.55 \times 10^{-7}$	$\alpha_6 = -1.59 \times 10^{-6}$	$\alpha_7 = 2.28 \times 10^{-6}$	$\alpha_8 = -4.57 \times 10^{-7}$
$\alpha_9 = 1.04 \times 10^{-7}$	$\alpha_{10} = -7.95 \times 10^{-8}$	$\alpha_{11} = 3.07 \times 10^{-7}$	$\alpha_{12} = -1.54 \times 10^{-6}$

Nous déduisons alors les moments :

$M_{1,2} = -32.55 \text{ kN/ml}$	$M_{1,12} = 32.58 \text{ kN/ml}$	$M_{2,1} = 70.99 \text{ kN/ml}$	$M_{2,3} = -68.49 \text{ kN/ml}$
$M_{2,11} = -2.48 \text{ kN/ml}$	$M_{3,2} = 60.37 \text{ kN/ml}$	$M_{3,4} = -61.24 \text{ kN/ml}$	$M_{3,10} = 0.87 \text{ kN/ml}$
$M_{4,3} = 60.16 \text{ kN/ml}$	$M_{4,5} = -58.97 \text{ kN/ml}$	$M_{4,9} = -1.19 \text{ kN/ml}$	$M_{5,4} = 72.38 \text{ kN/ml}$
$M_{5,6} = -76.62 \text{ kN/ml}$	$M_{5,8} = 4.24 \text{ kN/ml}$	$M_{6,5} = 14.91 \text{ kN/ml}$	$M_{6,7} = -14.91 \text{ kN/ml}$
$M_{7,6} = 49.70 \text{ kN/ml}$	$M_{7,8} = -49.70 \text{ kN/ml}$	$M_{8,5} = -9.32 \text{ kN/ml}$	$M_{8,7} = 141.11 \text{ kN/ml}$
$M_{8,9} = -131.79 \text{ kN/ml}$	$M_{9,4} = 2.01 \text{ kN/ml}$	$M_{9,8} = 114.11 \text{ kN/ml}$	$M_{9,10} = -116.13 \text{ kN/ml}$
$M_{10,3} = -1.56 \text{ kN/ml}$	$M_{10,9} = 117.35 \text{ kN/ml}$	$M_{10,11} = -115.80 \text{ kN/ml}$	$M_{11,2} = 6.45 \text{ kN/ml}$
$M_{11,10} = 127.20 \text{ kN/ml}$	$M_{11,12} = -133.65 \text{ kN/ml}$	$M_{12,1} = -72.12 \text{ kN/ml}$	$M_{12,11} = 72.12 \text{ kN/ml}$

IV.2.1.2 Les moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits sont :

$$\text{Tablier: } M_{0t} = \frac{p1 \times l^2}{8} = \frac{29.75 \times (5)^2}{8} = 92.97 \text{ kN.m/ml}$$

$$\text{Radier: } M_{0r} = -\frac{p2 \times l^2}{8} = -\frac{56.77 \times (5)^2}{8} = -177.41 \text{ kN.m/ml}$$

$$\text{Piédroit: } M_{0p} = \frac{p0 \times l^2}{8} + \frac{(pt1-pt0) \times H^2}{16} = \frac{0 \times (5)^2}{8} + \frac{(29.97-0) \times (5)^2}{16} = 46.83 \text{ kN.m/ml}$$

IV.2.1.3 Les moments maximum en travées et sur appuis:

Tablier :

- Au milieu de la travée 1: $\frac{Magt + Madt}{2} + M_{0t} = \frac{-32.55 - 70.99}{2} + 92.97 = 41.20 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 2: $\frac{Magt + Madt}{2} + M_{0t} = \frac{-68.49 - 60.37}{2} + 92.97 = 28.54 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 3: $\frac{Magt + Madt}{2} + M_{0t} = \frac{-61.24 - 60.16}{2} + 92.97 = 32.27 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 4: $\frac{Magt + Madt}{2} + M_{0t} = \frac{-58.97 - 72.38}{2} + 92.97 = 27.29 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 5: $\frac{Magt + Madt}{2} + M_{0t} = \frac{-76.62 - 14.91}{2} + 92.97 = 47.21 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 1: Les moments maximum des charges permanentes du tablier en travées et sur appuis.

Les travées	Les appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Travée1	Appui gauche	$M_{agt} = M_{1,2} = -32.55$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{2,1} = -70.99$
	Au milieu de la travée 1	41.20
Travée2	Appui gauche	$M_{agt} = M_{2,3} = -68.49$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{3,2} = -60.37$
	Au milieu de la travée 2	28.54
Travée3	Appui gauche	$M_{agt} = M_{3,4} = -61.24$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{4,3} = -60.16$
	Au milieu de la travée 3	32.27
Travée4	Appui gauche	$M_{agt} = M_{4,5} = -58.97$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{5,4} = -72.38$
	Au milieu de la travée 4	27.29
Travée5	Appui gauche	$M_{agt} = M_{5,6} = -76.62$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{6,5} = -14.91$
	Au milieu de la travée 5	47.21

Radier :

- Au milieu de la travée 1: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{72.12 + 133.65}{2} - 177.41 = -74.52 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 2: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{127.20 + 115.80}{2} - 177.41 = -55.91 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 3: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{117.35 + 116.13}{2} - 177.41 = -60.67 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 4: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{114.11 + 131.79}{2} - 177.41 = -54.46 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 5: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{141.11 + 49.70}{2} - 177.41 = -82.00 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 2: Les moments maximum des charges permanentes du radier en travées et sur appuis.

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Travée1	Appui gauche	$M_{agr} = M_{12.11} = 72.12$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{11.12} = 133.65$
	Au milieu de la travée 1	-74.52
Travée2	Appui gauche	$M_{agr} = M_{11.10} = 127.20$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{10.11} = 115.80$
	Au milieu de la travée 2	-55.91
Travée3	Appui gauche	$M_{agr} = M_{10.9} = 117.35$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{9.10} = 116.13$
	Au milieu de la travée 3	-60.67
Travée4	Appui gauche	$M_{agr} = M_{9.8} = 114.11$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{8.9} = 131.79$
	Au milieu de la travée 4	-54.46
Travées5	Appui gauche	$M_{agr} = M_{8.7} = 141.11$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{7.8} = 49.70$
	Au milieu de la travée 5	-82.00

Piédroit :

- **Piédroit extrême gauche:** $\frac{Maip + Masp}{2} + M0p = \frac{-72.12 - 32.58}{2} + 46.83 = -5.52 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 1 :** $\frac{Maip + Masp}{2} = \frac{6.46 + 2.48}{2} = 4.47 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 2 :** $\frac{Maip + Masp}{2} = \frac{-1.56 - 0.87}{2} = -1.21 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 3 :** $\frac{Maip + Masp}{2} = \frac{2.01 + 1.19}{2} = 1.60 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 4 :** $\frac{Maip + Masp}{2} = \frac{-9.32 - 4.24}{2} = -6.78 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit extrême droit:** $\frac{Maip + Masp}{2} + M0p = \frac{49.70 + 14.91}{2} + 46.83 = 79.13 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 3: Les moments maximum des charges permanentes du piédroit en travées et sur appuis.

Les Piédroit	Les Appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Piédroit extrême gauche	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{12.1} = -72.12$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{1.12} = -32.58$
	Au milieu de la travée 1	-5.52
Piédroit intérieur 1 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{11.2} = 6.45$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{2.11} = 2.48$
	Au milieu de la travée 2	4.47
Piédroit intérieur 2 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{10.3} = -1.56$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{3.10} = -0.87$
	Au milieu de la travée 3	-1.21
Piédroit intérieur 3 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{9.4} = 2.01$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{4.9} = 1.19$
	Au milieu de la travée 4	1.60
Piédroit intérieur 4 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{8.5} = -9.32$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{5.8} = -4.24$
	Au milieu de la travée 5	- 6.78
Piédroit extrême droit:	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{7.6} = 49.70$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{6.7} = 14.91$
	Au milieu de la travée 6	79.13

IV.2.2.1 Les réactions à chaque appui :

Tablier :

➤ Travée1 :

○ Appui gauche : $R_{agt} = \frac{M_{adt} - M_{agt}}{L} + \frac{p \cdot 1 \cdot x_l}{2} = \frac{-70.99 - (-32.55)}{5} + \frac{29.75 \times 5}{2} = 66.69 \text{ kN.m/ml}$

○ Appui gauche : $R_{adt} = \frac{M_{agt} - M_{adt}}{L} + \frac{p \cdot 1 \cdot x_l}{2} = \frac{-32.55 - (-70.99)}{5} + \frac{29.75 \times 5}{2} = 82.06 \text{ kN.m/ml}$

et la même méthode du calcul pour les autres travées :

Tableau IV. 4: Les réactions des charges permanentes sur appuis du tablier.

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des réactions (kN/ml)
Travée1	Appui gauche	$R_{agt} = 66.69$
	Appui droit	$R_{adt} = 82.06$
Travée2	Appui gauche	$R_{agt} = 76.00$
	Appui droit	$R_{adt} = 72.75$
Travée3	Appui gauche	$R_{agt} = 74.59$
	Appui droit	$R_{adt} = 74.16$
Travée4	Appui gauche	$R_{agt} = 71.69$
	Appui droit	$R_{adt} = 77.06$
Travée5	Appui gauche	$R_{agt} = 86.72$
	Appui droit	$R_{adt} = 62.03$

Radier :

➤ **Travée1 :**

- **Appui gauche : $R_{agr} = \frac{M_{dr} - M_{agr}}{L} - \frac{p_2 \times l}{2} = \frac{133.65 - 72.12}{5} - \frac{56.77 \times 5}{2} = -129.62 \text{ kN.m/ml}$**
- **Appui gauche : $R_{adr} = \frac{M_{agr} - M_{dr}}{L} - \frac{p_2 \times l}{2} = \frac{72.12 - 133.65}{5} - \frac{56.77 \times 5}{2} = -154.23 \text{ kN.m/ml}$**

et la même méthode du calcul pour les autres travées :

Tableau IV. 5: Les réactions des charges permanentes sur appuis du radier.

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des réactions (kN/ml)
Travée1	Appui gauche	$R_{agr} = -129.62$
	Appui droit	$R_{adr} = -154.23$
Travée2	Appui gauche	$R_{agr} = -144.21$
	Appui droit	$R_{adr} = -139.64$
Travée3	Appui gauche	$R_{agr} = -142.17$
	Appui droit	$R_{adr} = -141.68$
Travée4	Appui gauche	$R_{agr} = -138.39$
	Appui droit	$R_{adr} = -145.46$
Travée5	Appui gauche	$R_{agr} = -160.21$
	Appui droit	$R_{adr} = -123.64$

Les efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits sont :

- **Piédroit extrême gauche : $P_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 66.69 + 129.62 = 196.31 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 1 : $P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (82.06 + 154.23) = 472.58 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 2 : $P_{int2} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (72.75 + 139.64) = 424.79 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 3 : $P_{int3} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (74.16 + 141.68) = 431.67 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 4 : $P_{int4} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (77.06 + 145.46) = 445.04 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit extrême droit : $R_{extd} = R_{agd} - R_{agd} = 86.72 + 160.21 = 246.93 \text{ kN.m/ml}$**

IV.3 Charges routières:

IV.3.1 Sous système Bc:

➤ Sur le tablier :

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de : $p_1 = 47.62 \text{ kN.m/ml}$

➤ Sur le radier

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de : $p_2 = 5.62 \text{ kN.m/ml}$

➤ Sur un piédroit uniquement (piédroit gauche) : $p_{t1} = p_{t0} = 16.37 \text{ kN.m/ml}$

IV.3.1.1 Les moments d'encastrement pour 1 m :

$$m_{1,2} = -\frac{p_1 x l^2}{12} = -47.62 \times \frac{(5)^2}{12} = -99.21 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,2} = m_{2,3} = m_{3,4} = m_{4,5} = m_{5,6} = -99.21 \text{ kN.m}$$

$$-m_{1,2} = m_{2,1} = m_{3,2} = m_{4,3} = m_{5,4} = m_{6,5} = -m_{1,2} = 99.21 \text{ kN.m}$$

$$m_{7,8} = -\frac{p_2 x l^2}{12} = -5.62 \times \frac{(5)^2}{12} = -11.71 \text{ kN.m}$$

$$m_{7,8} = m_{8,9} = m_{9,10} = m_{10,11} = m_{11,12} = -11.71 \text{ kN.m}$$

$$-m_{7,8} = m_{8,7} = m_{9,8} = m_{10,9} = m_{11,10} = m_{12,11} = 11.71 \text{ kN.m}$$

$$m_{12,1} = - (p_{t1} - p_{t0}) \times \frac{H^2}{20} - p_{t0} \times \frac{H^2}{12} = - (16.37 - 16.37) \times \frac{(5)^2}{20} - 16.37 \times \frac{(5)^2}{12} = -34.10 \text{ kN.m}$$

$$m_{12,1} = -34.10 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,12} = (p_{t1} - p_{t0}) \times \frac{H^2}{30} - p_{t0} \times \frac{H^2}{12} = (16.37 - 16.37) \times \frac{(5)^2}{30} + 16.37 \times \frac{(5)^2}{12} = 34.10 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,12} = 34.10 \text{ kN.m}$$

$$m_{2,11} = m_{11,2} = m_{3,10} = m_{10,3} = m_{4,9} = m_{9,4} = m_{5,8} = m_{8,5} = m_{6,7} = m_{7,8} = 0.00 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{1,2} + m_{1,12}) = \mathbf{b}_1 = -(-99.21 + 34.10) = 65.11 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,11}) = \mathbf{b}_2 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{3,2} + m_{3,4} + m_{3,10}) = \mathbf{b}_3 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{4,3} + m_{4,5} + m_{4,9}) = \mathbf{b}_4 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{5,4} + m_{5,6} + m_{5,8}) = \mathbf{b}_5 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{6,5} + m_{6,7}) = \mathbf{b}_6 = -(99.21 + 0) = -99.21 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{7,6} + m_{7,8}) = \mathbf{b}_7 = -(0 - 11.71) = 11.71 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{8,7} + m_{8,9} + m_{8,5}) = \mathbf{b}_8 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{9,8} + m_{9,10} + m_{9,4}) = \mathbf{b}_9 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{10,9} + m_{10,11} + m_{10,3}) = \mathbf{b}_{10} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{11,10} + m_{11,12} + m_{11,2}) = \mathbf{b}_{11} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{12,11} + m_{12,1}) = \mathbf{b}_{12} = -(11.71 - 34.10) = 22.39 \text{ kN.m}$$

La résolution du système d'équations obtenu donne :

$\alpha_1 = 9.99 \times 10^{-7}$	$\alpha_2 = -1.77 \times 10^{-7}$	$\alpha_3 = 4.40 \times 10^{-8}$	$\alpha_4 = -6.91 \times 10^{-8}$
$\alpha_5 = 3.28 \times 10^{-7}$	$\alpha_6 = -1.73 \times 10^{-6}$	$\alpha_7 = 6.50 \times 10^{-7}$	$\alpha_8 = -1.70 \times 10^{-7}$
$\alpha_9 = 4.28 \times 10^{-8}$	$\alpha_{10} = -1.76 \times 10^{-8}$	$\alpha_{11} = 1.90 \times 10^{-8}$	$\alpha_{12} = 8.07 \times 10^{-8}$

Nous déduisons alors les moments

$M_{1,2} = -68.81 \text{ kN/ml}$	$M_{1,12} = 68.81 \text{ kN/ml}$	$M_{2,1} = 109.94 \text{ kN/ml}$	$M_{2,3} = -104.32 \text{ kN/ml}$
$M_{2,11} = -5.59 \text{ kN/ml}$	$M_{3,2} = 97.72 \text{ kN/ml}$	$M_{3,4} = -98.90 \text{ kN/ml}$	$M_{3,10} = 1.17 \text{ kN/ml}$
$M_{4,3} = 97.63 \text{ kN/ml}$	$M_{4,5} = -96.04 \text{ kN/ml}$	$M_{4,9} = -1.59 \text{ kN/ml}$	$M_{5,4} = 109.02 \text{ kN/ml}$
$M_{5,6} = -117.14 \text{ kN/ml}$	$M_{5,8} = 8.12 \text{ kN/ml}$	$M_{6,5} = 46.92 \text{ kN/ml}$	$M_{6,7} = -46.92 \text{ kN/ml}$
$M_{7,6} = -7.17 \text{ kN/ml}$	$M_{7,8} = 7.17 \text{ kN/ml}$	$M_{8,5} = -0.20 \text{ kN/ml}$	$M_{8,7} = 16.88 \text{ kN/ml}$
$M_{8,9} = -16.88 \text{ kN/ml}$	$M_{9,4} = 0.28 \text{ kN/ml}$	$M_{9,8} = 10.30 \text{ kN/ml}$	$M_{9,10} = -10.30 \text{ kN/ml}$
$M_{10,3} = 0.15 \text{ kN/ml}$	$M_{10,9} = 11.84 \text{ kN/ml}$	$M_{10,11} = -11.98 \text{ kN/ml}$	$M_{11,2} = -2.32 \text{ kN/ml}$
$M_{11,10} = 12.05 \text{ kN/ml}$	$M_{11,12} = -9.73 \text{ kN/ml}$	$M_{12,1} = -14.72 \text{ kN/ml}$	$M_{12,11} = 14.72 \text{ kN/ml}$

IV.3.1.2 Les moments isostatiques :

Au milieu des travées du tablier, du radier et piédroits sont :

- **Tablier:** $M0_t = \frac{p1 \times l^2}{8} = \frac{47.62 \times (5)^2}{8} = 148.81 \text{ kN.m/ml}$
- **Radier:** $M0_r = -\frac{p2 \times l^2}{8} = -\frac{5.62 \times (5)^2}{8} = -17.56 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit:** $M0_p = \frac{pt0 \times l^2}{8} + \frac{(pt1-pt0) \times H^2}{16} = \frac{16.37 \times (5)^2}{8} + \frac{0 \times (5)^2}{16} = 51.16 \text{ kN.m/ml}$

IV.3.1.3 Les moments maximum en travées et sur appuis :

Tablier :

- **Au milieu de la travée 1:** $\frac{Magt + Madt}{2} + M0t = \frac{-68.81 - 109.98}{2} + 148.81 = 59.42 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 2:** $\frac{Magt + Madt}{2} + M0t = \frac{-104.39 - 97.72}{2} + 148.81 = 47.76 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 3:** $\frac{Magt + Madt}{2} + M0t = \frac{-98.80 - 97.72}{2} + 148.81 = 50.54 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 4:** $\frac{Magt + Madt}{2} + M0t = \frac{-96.04 - 109.02}{2} + 148.81 = 46.28 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 5:** $\frac{Magt + Madt}{2} + M0t = \frac{-117.14 - 46.92}{2} + 148.81 = 66.78 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 6 : Les moments maximum des charges routières du tablier en travées et sur appuis (Bc)

Les travées	Les appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Travée1	Appui gauche	$M_{agt} = M_{1,2} = -68.81$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{2,1} = -109.98$
	Au milieu de la travée 1	59.42
Travée2	Appui gauche	$M_{agt} = M_{2,3} = -104.39$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{3,2} = -97.72$
	Au milieu de la travée 2	47.76
Travée3	Appui gauche	$M_{agt} = M_{3,4} = -98.90$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{4,3} = -97.63$
	Au milieu de la travée 3	50.54
Travée4	Appui gauche	$M_{agt} = M_{4,5} = -96.04$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{5,4} = -109.02$
	Au milieu de la travée 4	46.28
Travée5	Appui gauche	$M_{agt} = M_{5,6} = -117.14$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{6,5} = -46.92$
	Au milieu de la travée 5	66.78

Radier :

- Au milieu de la travée 1: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{14.72 + 9.73}{2} - 17.56 = -5.33 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 2: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{12.05 + 11.98}{2} - 17.56 = -5.54 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 3: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{11.84 + 10.57}{2} - 17.56 = -6.35 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 4: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{10.30 + 16.68}{2} - 17.56 = -4.07 \text{ kN.m/ml}$
- Au milieu de la travée 5: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{16.88 - 7.17}{2} - 17.56 = -12.70 \text{ kN.m/ml}$

**Tableau IV. 7: Les moments max des charges Bc
du radier en travées et sur appuis.**

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Travée1	Appui gauche	$M_{agr} = M_{12.11} = 14.72$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{11.12} = 9.73$
	Au milieu de la travée 1	-5.33
Travée2	Appui gauche	$M_{agr} = M_{11.10} = 12.05$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{10.11} = 11.98$
	Au milieu de la travée 2	-5.54
Travée3	Appui gauche	$M_{agr} = M_{10.9} = 11.84$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{9.10} = 10.57$
	Au milieu de la travée 3	-6.35
Travée4	Appui gauche	$M_{agr} = M_{9.8} = 10.30$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{8.9} = 16.68$
	Au milieu de la travée 4	-4.07
Travée5	Appui gauche	$M_{agr} = M_{8.7} = 16.88$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{7.8} = -7.17$
	Au milieu de la travée 5	-12.70

Piédroit :

- Piédroit extrême gauche: $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} + M_{0p} = \frac{-14.73 - 68.81}{2} + 51.16 = 9.39 \text{ kN.m/ml}$
- Piédroit intérieur 1 : $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{-2.32 + 5.59}{2} = 1.64 \text{ kN.m/ml}$
- Piédroit intérieur 2 : $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{0.15 - 1.17}{2} = -0.51 \text{ kN.m/ml}$
- Piédroit intérieur 3 : $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{0.28 + 1.59}{2} = 0.49 \text{ kN.m/ml}$

- **Piédroit intérieur 4 :** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{-0.20 - 8.12}{2} = -4.16 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit extrême droit:** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} + M_{0p} = \frac{-7.17 + 46.92}{2} + 51.16 = 71.03 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 8: Les moments maximum des charges routières du piédroit en travées et sur appuis (Bc)

Les Piédroit	Les Appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Piédroit extrême gauche	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{12,1} = -14.72$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{1,12} = -68.81$
	Au milieu de la travée 1	9.39
Piédroit intérieur 1 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{11,2} = -2.32$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{2,11} = 5.59$
	Au milieu de la travée 2	1.64
Piédroit intérieur 2 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{10,3} = 0.15$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{3,10} = -1.17$
	Au milieu de la travée 3	-0.51
Piédroit intérieur 3 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{9,4} = 0.28$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{4,9} = 1.59$
	Au milieu de la travée 4	0.94
Piédroit intérieur 4 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{8,5} = -0.20$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{5,8} = -8.12$
	Au milieu de la travée 5	-4.16
Piédroit extrême droit:	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{7,6} = -7.17$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{6,7} = 46.92$
	Au milieu de la travée 6	71.03

IV.3.1.4 Les réactions à chaque appui:

Tablier :

➤ **Travée1 :**

- **Appui gauche : $R_{agt} = \frac{M_{adt} - M_{agt}}{L} + \frac{p_1 \times l}{2} = \frac{-109.98 - (-68.81)}{5} + \frac{47.62 \times 5}{2} = 110.82 \text{ kN.m/ml}$**
- **Appui gauche : $R_{adt} = \frac{M_{agt} - M_{adt}}{L} + \frac{p_1 \times l}{2} = \frac{-68.81 - (-109.94)}{5} + \frac{47.62 \times 5}{2} = 127.72 \text{ kN.m/ml}$**

et la même méthode du calcul pour les autres travées :

**Tableau IV. 9:Les réactions des charges routières sur appuis
du tablier (Bc).**

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des réactions (kN/ml)
Travée1	Appui gauche	$R_{agt} = 110.82$
	Appui droit	$R_{adt} = 127.28$
Travée2	Appui gauche	$R_{agt} = 120.38$
	Appui droit	$R_{adt} = 117.72$
Travée3	Appui gauche	$R_{agt} = 119.30$
	Appui droit	$R_{adt} = 118.80$
Travée4	Appui gauche	$R_{agt} = 116.45$
	Appui droit	$R_{adt} = 121.65$
Travée5	Appui gauche	$R_{agt} = 133.09$
	Appui droit	$R_{adt} = 105.01$

Radier :

➤ **Travée1 :**

○ **Appui gauche :Ragr** = $\frac{Madr - Magr}{L} - \frac{p2 \times l}{2} = \frac{9.73 - 14.72}{5} - \frac{5.62 \times 5}{2} = -5.33 \text{ kN.m/ml}$

○ **Appui gauche :Radr** = $\frac{Magr - Madr}{L} - \frac{p2 \times l}{2} = \frac{14.72 - (9.69)}{5} - \frac{5.62 \times 5}{2} = -12.70 \text{ kN.m/ml}$

et la même méthode du calcul pour les autres travées :

Tableau IV. 10:Les réactions des charges routières sur appuis du radier (Bc).

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des réactions (kN/ml)
Travée1	Appui gauche	$R_{agr} = -15.05$
	Appui droit	$R_{adr} = -13.05$
Travée2	Appui gauche	$R_{agr} = -14.06$
	Appui droit	$R_{adr} = -14.04$
Travée3	Appui gauche	$R_{agr} = -14.30$
	Appui droit	$R_{adr} = -13.80$
Travée4	Appui gauche	$R_{agr} = -12.77$
	Appui droit	$R_{adr} = -15.33$
Travée5	Appui gauche	$R_{agr} = -18.86$
	Appui droit	$R_{adr} = -9.24$

Les efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits sont :

- **Piédroit extrême gauche : $P_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 110.82 + 15.05 = 125.87 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 1 : $P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (127.28 + 13.05) = 280.66 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 2 : $P_{int2} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (117.72 + 14.04) = 263.51 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 3 : $P_{int3} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (118.80 + 13.80) = 265.20 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit intérieur 4 : $P_{int4} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (121.65 + 15.33) = 273.96 \text{ kN.m/ml}$**
- **Piédroit extrême droit : $R_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 133.09 + 18.86 = 151.95 \text{ kN.m/ml}$**

IV.3.2 Sous système Bt

➤ **Sur le tablier :**

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de : $p_1 = 57.65 \text{ kN.m/ml}$

➤ **Sur le radier :**

La charge s'appliquant par mètre linéaire est de : $p_2 = 4.56 \text{ kN.m/ml}$

➤ **Sur un piédroit uniquement (piédroit gauche) : $p_t = 15.24 \text{ kN.m/ml}$**

IV.3.2.1 Les moments d'encastrement :

Pour 1 m de largeur de dalot sont :

$$m_{1,2} = -\frac{p_1 x l^2}{12} = -57.65 \times \frac{(5)^2}{12} = -120.10 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,2} = m_{2,3} = m_{3,4} = m_{4,5} = m_{5,6} = -120.10 \text{ kN.m}$$

$$-m_{1,2} = m_{2,1} = m_{3,2} = m_{4,3} = m_{5,4} = m_{6,5} = -m_{1,2} = 120.10 \text{ kN.m}$$

$$m_{7,8} = -\frac{p_2 x l^2}{12} = -4.56 \times \frac{(5)^2}{12} = -9.50 \text{ kN.m}$$

$$m_{7,8} = m_{8,9} = m_{9,10} = m_{10,11} = m_{11,12} = -9.50 \text{ kN.m}$$

$$-m_{7,8} = m_{8,7} = m_{9,8} = m_{10,9} = m_{11,10} = m_{12,11} = 9.50 \text{ kN.m}$$

$$m_{12,1} = -(p_{t1} - p_{t0}) \times \frac{H^2}{20} - p_{t0} \times \frac{H^2}{12} = -(15.24 - 15.24) \times \frac{(5)^2}{20} - 15.24 \times \frac{(5)^2}{12} = -31.75 \text{ kN.m}$$

$$m_{12,1} = -31.75 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,12} = (p_{t1} - p_{t0}) \times \frac{H^2}{30} - p_{t0} \times \frac{H^2}{12} = (15.24 - 15.24) \times \frac{(5)^2}{30} + 15.24 \times \frac{(5)^2}{12} = 31.75 \text{ kN.m}$$

$$m_{1,12} = 31.75 \text{ kN.m}$$

$$m_{2,11} = m_{11,2} = m_{3,10} = m_{10,3} = m_{4,9} = m_{9,4} = m_{5,8} = m_{8,5} = m_{6,7} = m_{7,8} = 0.00 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{1,2} + m_{1,12}) = \mathbf{b}_1 = -(-120.10 + 31.75) = 88.35 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{2,1} + m_{2,3} + m_{2,11}) = \mathbf{b}_2 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{3,2} + m_{3,4} + m_{3,10}) = \mathbf{b}_3 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{4,3} + m_{4,5} + m_{4,9}) = \mathbf{b}_4 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{5,4} + m_{5,6} + m_{5,8}) = \mathbf{b}_5 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{6,5} + m_{6,7}) = \mathbf{b}_6 = -(120.10 + 0) = -120.10 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{7,6} + m_{7,8}) = \mathbf{b}_7 = -(0 - 9.50) = 9.50 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{8,7} + m_{8,9} + m_{8,5}) = \mathbf{b}_8 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{9,8} + m_{9,10} + m_{9,4}) = \mathbf{b}_9 = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{10,9} + m_{10,11} + m_{10,3}) = \mathbf{b}_{10} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{11,10} + m_{11,12} + m_{11,2}) = \mathbf{b}_{11} = 0 \text{ kN.m}$$

$$-(m_{12,11} + m_{12,1}) = \mathbf{b}_{12} = -(9.50 - 31.75) = 22.25 \text{ kN.m}$$

La résolution du système d'équations obtenu donne :

$\alpha_1 = 1.93 \times 10^{-6}$	$\alpha_2 = -2.51 \times 10^{-7}$	$\alpha_3 = 6.02 \times 10^{-8}$	$\alpha_4 = -8.36 \times 10^{-7}$
$\alpha_5 = 3.91 \times 10^{-7}$	$\alpha_6 = -2.07 \times 10^{-6}$	$\alpha_7 = 7.08 \times 10^{-7}$	$\alpha_8 = -1.92 \times 10^{-7}$
$\alpha_9 = 5.04 \times 10^{-8}$	$\alpha_{10} = -2.69 \times 10^{-8}$	$\alpha_{11} = 5.08 \times 10^{-8}$	$\alpha_{12} = -2.77 \times 10^{-7}$

Nous déduisons alors les moments

$M_{1,2} = -77.79 \text{ kN.m/ml}$	$M_{1,12} = 77.79 \text{ kN.m/ml}$	$M_{2,1} = 134.98 \text{ kN.m/ml}$	$M_{2,3} = -127.46 \text{ kN.m/ml}$
$M_{2,11} = -7.52 \text{ kN.m/ml}$	$M_{3,2} = 117.93 \text{ kN.m/ml}$	$M_{3,4} = -119.49 \text{ kN.m/ml}$	$M_{3,10} = 1.56 \text{ kN.m/ml}$
$M_{4,3} = 118.31 \text{ kN.m/ml}$	$M_{4,5} = -116.36 \text{ kN.m/ml}$	$M_{4,9} = -1.95 \text{ kN.m/ml}$	$M_{5,4} = 131.77 \text{ kN.m/ml}$
$M_{5,6} = -141.64 \text{ kN.m/ml}$	$M_{5,8} = 9.87 \text{ kN.m/ml}$	$M_{6,5} = 57.40 \text{ kN.m/ml}$	$M_{6,7} = -57.40 \text{ kN.m/ml}$
$M_{7,6} = -10.96 \text{ kN.m/ml}$	$M_{7,8} = 10.96 \text{ kN.m/ml}$	$M_{8,5} = 0.13 \text{ kN.m/ml}$	$M_{8,7} = 14.93 \text{ kN.m/ml}$
$M_{8,9} = -15.06 \text{ kN.m/ml}$	$M_{9,4} = 0.29 \text{ kN.m/ml}$	$M_{9,8} = 7.98 \text{ kN.m/ml}$	$M_{9,10} = -8.27 \text{ kN.m/ml}$
$M_{10,3} = 0.11 \text{ kN.m/ml}$	$M_{10,9} = 9.44 \text{ kN.m/ml}$	$M_{10,11} = -9.55 \text{ kN.m/ml}$	$M_{11,2} = -2.49 \text{ kN.m/ml}$
$M_{11,10} = 10.75 \text{ kN.m/ml}$	$M_{11,12} = -8.26 \text{ kN.m/ml}$	$M_{12,1} = -9.43 \text{ kN.m/ml}$	$M_{12,11} = 9.43 \text{ kN.m/ml}$

IV.3.2.2 Les moments isostatiques au milieu des travées :

Du tablier, du radier et piédroits sont :

- **Tablier:** $M_{0t} = \frac{p_1 \times l^2}{8} = \frac{57.65 \times (5)^2}{8} = 180.16 \text{ kN.m/ml}$
- **Radier:** $M_{0r} = -\frac{p_2 \times l^2}{8} = -\frac{4.56 \times (5)^2}{8} = -14.25 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit:** $M_{0p} = \frac{pt_0 \times l^2}{8} + \frac{(pt_1 - pt_0) \times H^2}{16} = \frac{15.24 \times (5)^2}{8} + \frac{0 \times (5)^2}{16} = 47.63 \text{ kN.m/ml}$

IV.3.2.3 Les moments maximum :

En travées et sur appuis sont donc : pour Tablier :

- **Au milieu de la travée 1:** $\frac{M_{agt} + M_{adt}}{2} + M_{0t} = \frac{-77.79 - 134.98}{2} + 178.72 = 73.78 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 2:** $\frac{M_{agt} + M_{adt}}{2} + M_{0t} = \frac{-127.56 - 117.93}{2} + 178.72 = 57.47 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 3:** $\frac{M_{agt} + M_{adt}}{2} + M_{0t} = \frac{-119.49 - 118.31}{2} + 178.72 = 61.26 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 4:** $\frac{M_{agt} + M_{adt}}{2} + M_{0t} = \frac{-116.36 - 131.77}{2} + 178.72 = 56.09 \text{ kN.m/ml}$
- **Au milieu de la travée 5:** $\frac{M_{agt} + M_{adt}}{2} + M_{0t} = \frac{-141.64 - 57.40}{2} + 178.72 = 80.64 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 11: Les moments maximum des charges routières du tablier en travées et sur appuis (Bt)

Les travées	Les appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Travée1	Appui gauche	$M_{agt} = M_{1,2} = -77.79$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{2,1} = -134.98$
	Au milieu de la travée 1	73.78
Travée2	Appui gauche	$M_{agt} = M_{2,3} = -127.46$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{3,2} = -117.93$
	Au milieu de la travée 2	57.47
Travée3	Appui gauche	$M_{agt} = M_{3,4} = -119.49$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{4,3} = -118.31$
	Au milieu de la travée 3	61.26
Travée4	Appui gauche	$M_{agt} = M_{4,5} = -116.36$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{5,4} = -131.77$
	Au milieu de la travée 4	56.09
Travée5	Appui gauche	$M_{agt} = M_{5,6} = -141.64$
	Appui droit	$M_{adt} = -M_{6,5} = -57.40$
	Au milieu de la travée 5	80.64

Radier :

- Au milieu de la travée 1: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{9.43+8.26}{2} - 14.25 = -5.41$ kN.m/ml
- Au milieu de la travée 2: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{10.75 + 9.55}{2} - 14.25 = -4.10$ kN.m/ml
- Au milieu de la travée 3: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{9.44 + 8.27}{2} - 14.25 = -5.40$ kN.m/ml
- Au milieu de la travée 4: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{7.98 + 15.06}{2} - 14.25 = -2.73$ kN.m/ml
- Au milieu de la travée 5: $\frac{M_{agr} + M_{adr}}{2} + M_{0r} = \frac{14.93-10.96}{2} - 14.25 = -12.27$ kN.m/ml

Tableau IV. 12: Les moments maximum des charges routières du radier en travées et sur appuis (Bt)

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Travée1	Appui gauche	$M_{agr} = M_{12.11} = 9.43$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{11.12} = 8.26$
	Au milieu de la travée 1	-5.41
Travée2	Appui gauche	$M_{agr} = M_{11.10} = 10.75$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{10.11} = 9.55$
	Au milieu de la travée 2	-4.10
Travée3	Appui gauche	$M_{agr} = M_{10.9} = 9.44$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{9.10} = 8.27$
	Au milieu de la travée 3	-5.40
Travée4	Appui gauche	$M_{agr} = M_{9.8} = 7.98$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{8.9} = 15.06$
	Au milieu de la travée 4	-2.73
Travée5	Appui gauche	$M_{agr} = M_{8.7} = 14.93$
	Appui droit	$M_{adr} = -M_{7.8} = -10.96$
	Au milieu de la travée 5	-12.27

➤ **Piédroit :**

- **Piédroit extrême gauche:** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} + M_{0p} = \frac{-9.43 - 77.79}{2} + 47.25 = 4.02 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 1 :** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{-2.49 + 7.52}{2} = 2.52 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 2 :** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{-0.11 - 1.56}{2} = -0.75 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 3 :** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{0.29 + 1.95}{2} = 1.12 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 4 :** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} = \frac{0.13 - 9.87}{2} = -4.87 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit extrême droit:** $\frac{M_{aip} + M_{asp}}{2} + M_{0p} = \frac{-10.96 + 57.40}{2} + 47.25 = 70.85 \text{ kN.m/ml}$

Tableau IV. 13: Les moments maximum des charges routières du piédroit en travées et sur appuis (Bt)

Les Piédroit	Les Appuis	Les valeurs des moments (kN.m/ml)
Piédroit extrême gauche	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{12.1} = -9.43$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{1.12} = -77.79$
	Au milieu de la travée 1	4.02
Piédroit intérieur 1 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{11.2} = -2.49$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{2.11} = 7.52$
	Au milieu de la travée 2	2.52
Piédroit intérieur 2 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{10.3} = 0.11$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{3.10} = -1.56$
	Au milieu de la travée 3	-0.73
Piédroit intérieur 3 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{9.4} = 0.29$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{4.9} = 1.95$
	Au milieu de la travée 4	1.12
Piédroit intérieur 4 :	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{8.5} = 0.13$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{5.8} = -9.87$
	Au milieu de la travée 5	-4.87
Piédroit extrême droit:	Appui inférieur	$M_{aip} = M_{7.6} = -10.96$
	Appui supérieur	$M_{asp} = -M_{6.7} = 57.40$
	Au milieu de la travée 6	70.85

IV.3.2.4 Les réactions à chaque appui:

Tablier :

➤ Travée1 :

- Appui gauche : $R_{agt} = \frac{M_{adt} - M_{agt}}{L} + \frac{p1 \times l}{2} = \frac{-134.98 - (-77.79)}{5} + \frac{57.65 \times 5}{2} = 132.69 \text{ kN.m/ml}$

- Appui droite : $R_{adt} = \frac{M_{agt} - M_{adt}}{L} + \frac{p1 \times l}{2} = \frac{-77.79 - (-134.98)}{5} + \frac{57.65 \times 5}{2} = 155.56 \text{ kN.m/ml}$

et la même méthode du calcul pour les autres travées :

Tableau IV. 14: Les réactions des charges routières sur appuis du tablier (Bc)

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des réactions (kN/ml)
Travée1	Appui gauche	$R_{agt} = 132.69$
	Appui droit	$R_{adt} = 155.56$
Travée2	Appui gauche	$R_{agt} = 146.03$
	Appui droit	$R_{adt} = 142.22$
Travée3	Appui gauche	$R_{agt} = 144.36$
	Appui droit	$R_{adt} = 143.89$
Travée4	Appui gauche	$R_{agt} = 141.04$
	Appui droit	$R_{adt} = 147.21$
Travée5	Appui gauche	$R_{agt} = 160.97$
	Appui droit	$R_{adt} = 127.28$

Radier :

➤ Travée1 :

- Appui gauche : $R_{agr} = \frac{M_{adr} - M_{agr}}{L} - \frac{p2 \times l}{2} = \frac{8.26 - (9.43)}{5} - \frac{8.73 \times 5}{2} = -11.63 \text{ kN.m/ml}$

- Appui droite : $R_{adr} = \frac{M_{agr} - M_{adr}}{L} - \frac{p2 \times l}{2} = \frac{9.43 - (8.26)}{5} - \frac{8.73 \times 5}{2} = -11.17 \text{ kN.m/ml}$

et la même méthode du calcul pour les autres travées :

Tableau IV. 15: Les réactions des charges routières sur appuis du tablier (Bc)

Les Travées	Les Appuis	Les valeurs des réactions (kN/ml)
Travée1	Appui gauche	$R_{agr} = -11.63$
	Appui droit	$R_{adr} = -11.17$
Travée2	Appui gauche	$R_{agr} = -11.64$
	Appui droit	$R_{adr} = -11.16$
Travée3	Appui gauche	$R_{agr} = -11.64$
	Appui droit	$R_{adr} = -11.16$
Travée4	Appui gauche	$R_{agr} = -9.98$
	Appui droit	$R_{adr} = -12.82$
Travée5	Appui gauche	$R_{agr} = -16.58$
	Appui droit	$R_{adr} = -6.22$

Les efforts de compression à prendre en compte dans les piédroits sont :

- **Piédroit extrême gauche** : $P_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 132.69 + 11.63 = 144.32 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 1** : $P_{int1} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (155.56 + 11.17) = 333.46 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 2** : $P_{int2} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (142.22 + 11.16) = 306.76 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 3** : $P_{int3} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (143.89 + 11.16) = 310.10 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit intérieur 4** : $P_{int4} = 2 \times (R_{adt} - R_{adr}) = 2 \times (147.21 + 12.82) = 320.06 \text{ kN.m/ml}$
- **Piédroit extrême droit** : $R_{extg} = R_{agt} - R_{agr} = 160.97 + 16.58 = 177.55 \text{ kN.m/ml}$

IV.4 Récapitulatif des sollicitations

Pour une uniformisation des aciers dans les différentes parties de l'ouvrage ainsi que pour une facilité de mise en œuvre, nous avons décidé de prendre les moments maximaux en travée et sur appuis ainsi que les efforts normaux maximaux pour le calcul de nos sections d'armature.

Tableau IV. 16:Récapitulatif des sollicitations.

PARTIE D'OUVRAGE	Sollicitations kN.m/ml et kN/ml		Charges permanentes G	Système Bc	Système Bt
TABLIER	Moment fléchissant	à gauche	-76.62	-117.14	-141.64
		à droite	-72.38	-109.98	-134.98
		au milieu	47.21	66.78	80.04
RADIER	Moment fléchissant	à gauche	141.11	16.88	14.93
		à droite	133.65	16.68	15.06
		au milieu	-82	-12.7	-12.27
PIEDROITS EXTREMES	Moment fléchissant	Inférieur	-72.12	-14.72	-10.96
		Supérieur	-32.58	-68.81	-77.19
		Milieu	79.13	71.03	70.85
	Effort normal		246.93	151.95	177.55
PIEDROITS INTERIEURS	Moment fléchissant	Inférieur	-9.32	-2.32	-2.49
		Supérieur	-4.24	-8.12	-9.87
		Milieu	-6.78	-4.16	-4.87
	Effort normal		472.58	280.66	333.46

Les sollicitations à retenir sont les plus grandes de chacun des deux cas

Les différentes combinaisons :

ELU

ELS

Cas 1 : 1.35 G + 1.6 Bc

G + 1.2 Bc

Cas 2 : 1.35 G + 1.6 Bt

G + 1.2 Bt

Tableau IV. 17: Les sollicitations à retenir sont les plus grandes de chacun des combinaisons.

PARTIE D'OUVRAGE	Sollicitations kN.m/ml et kN/ml		CAS 1		CAS 2		MAXIMUM	
			ELU	ELS	ELU	ELS	ELU	ELS
TABLIER	Moment fléchissant	à gauche	-290.86	-217.19	-330.06	-246.59	-330.06	-246.59
		à droite	-273.68	-204.36	-313.68	-234.36	-313.68	-234.36
		au milieu	170.58	127.35	191.80	143.26	191.80	143.26
RADIER	Moment fléchissant	à gauche	217.51	161.37	214.39	159.03	217.51	161.37
		à droite	207.12	153.67	204.52	151.72	207.12	153.67
		au milieu	-131.02	-97.24	-130.33	-96.72	-131.02	-97.24
PIEDROITS EXTREMES	Moment fléchissant	à gauche	-120.91	-89.78	-114.90	-85.27	-120.91	-89.78
		à droite	-154.08	-115.15	-167.49	-125.21	-167.49	-125.21
		au milieu	220.47	164.37	220.19	164.15	220.47	164.37
	Effort normal		576.48	429.27	617.44	459.99	617.44	459.99
PIEDROITS INTERIEURS	Moment fléchissant	à gauche	-16.29	-12.10	-16.57	-12.31	-16.57	-12.31
		à droite	-18.72	-13.98	-21.52	-16.08	-21.52	-16.08
		au milieu	-15.81	-11.77	-16.95	-12.62	-16.95	-12.62
	Effort normal		1087.04	809.37	1171.52	872.73	1171.52	872.73

IV.4.1 CALCUL DES SECTIONS D'ARMATURES

IV.4.1.1 Calcul des armatures du tablier

Données de calcul: $h = 0.5\text{m}$ $d = 0.9 \times h = 0.9 \times 0.5 = 0.45\text{m}$ $b = 1\text{m}$

$$F_{bu} = \sigma_{bc} = 17 \text{ MPa} \quad \sigma_s = f_{su} = 347.83 \text{ MPa}$$

➤ **A mi-travée**

- **Calcul à l'ELU**

Moment ultime : $M_u = 191.80 \text{ kN.m/ml}$

Moment réduit /Recherche du pivot :

$$\mu = \frac{Mu}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{191.80 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.06$$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.06}) = 0.07$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.07) = 0.44$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{191.80 \times 10^{-3}}{0.43 \times 347.83} = 12.53 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = \mathbf{12.53 \text{ cm}^2}$$

- **Calcul à l'ELS**

Moment à l'état de service : $M_{ser} = 143.36 \text{ kN.m/ml}$

Paramètre de déformation

$$\bar{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215.55} = 0.56$$

Fibre neutre :

$$\bar{\gamma}_{ser} = \bar{\alpha}_{ser} \times d = 0.56 \times 0.45 = 0.25$$

Bras de levier

$$\bar{z}_{ser} = d - \frac{\bar{\gamma}_{ser}}{3} = 0.45 - \frac{0.25}{3} = 0.37 \text{ m}$$

Moment résistant :

$$M_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \bar{\gamma}_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times \bar{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 0.25 \times 18 \times 0.37 = \mathbf{416.25 \text{ kN.m/ml}}$$

On a: $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Armature simple ($A_{sc} = 0$)

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{143.26 \times 10^{-3}}{0.37 \times 215.55} = 17.96 \text{ cm}^2$$

- **Condition de non fragilité de lasection :**

$$A_{min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = 6.12 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est donc : $A_{st} = 17.96 \text{ cm}^2$

Soit $A_{st} = 17.96 \text{ cm}^2 \rightarrow 6\text{HA}20$

➤ Sur appui gauche

- **Calcul à l'ELU**

Moment ultime : $M_u = 333.06 \text{ kN.m/ml}$

Moment réduit Recherche du pivot : $\mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{333.06 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.10$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.10}) = 0.13$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.13) = 0.43$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{333.06 \times 10^{-3}}{0.42 \times 347.83} = 22.26 \text{ cm}^2$$

- **Calcul à l'ELS**

Moment à l'état de service : 246.59 kN.m/ml

Paramètre de déformation

$$\bar{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} = \frac{15 \times 18}{15 \times 18 + 215.55} = 0.56$$

Fibre neutre :

$$\bar{\gamma}_{ser} = \bar{\alpha}_{ser} \times d = 0.56 \times 0.45 = 0.25$$

Bras de levier :

$$\bar{z}_{ser} = d - \frac{\bar{\gamma}_{ser}}{3} = 0.45 - \frac{0.25}{3} = 0.37$$

Moment résistant :

$$M_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \bar{\gamma}_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times \bar{z}_{ser} = \frac{1}{2} \times 0.5 \times 0.25 \times 18 \times 0.37 = 416.25 \text{ kN.m/ml}$$

On a : $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Armature simple ($A_{sc} = 0$)

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{246.59 \times 10^{-3}}{0.37 \times 215.55} = \mathbf{30.91 \text{ cm}^2}$$

Condition de non fragilité de la section :

$$A_{min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{c28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = \mathbf{6.12 \text{ cm}^2}$$

La section d'acier retenue est donc : $A_{st} = \mathbf{30.91 \text{ cm}^2}$

$$\text{Soit } A_{st} = 30.91 \text{ cm}^2 \rightarrow \mathbf{10HA20}$$

➤ **Sur appui droit**

• **Calcul à l'ELU**

Moment ultime : $M_u = \mathbf{313.68 \text{ kN.m/ml}}$

Moment réduit Recherche du pivot : $\mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{313.68 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.09$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.09}) = 0.12$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.12) = 0.43$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{313.68 \times 10^{-3}}{0.42 \times 347.83} = \mathbf{20.97 \text{ cm}^2}$$

• **Calcul à l'ELS**

Moment à l'état de service : $\mathbf{234.36 \text{ kN.m/ml}}$

Paramètre de déformation :

$$\bar{\alpha}_{ser} = 0.56$$

Fibre neutre :

$$\bar{\gamma}_{ser} = 0.25$$

Bras de levier

$$\bar{z}_{ser} = 0.37$$

Moment résistant :

$$M_{rserb} = \mathbf{416.25 \text{ kN.m/ml}}$$

On a : $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Armature simple ($A_{sc} = 0$)

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{234.36 \times 10^{-3}}{0.37 \times 215.55} = \mathbf{29.38 \text{ cm}^2}$$

Condition de non fragilité de la section :

$$A_{min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{c28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = \mathbf{6.21 \text{ cm}^2}$$

La section d'acier retenue est donc : $A_{st} = \mathbf{29.38 \text{ cm}^2}$

$$\text{Soit } A_{st} = 29.38 \text{ cm}^2 \rightarrow \mathbf{10HA20}$$

IV.4 .1.2 Calcul des armatures du radier :

➤ **A mi-travée**

- **Calcul à l'ELU**

Moment ultime : $\mathbf{M_u = 131.02 \text{ kN.m/ml}}$

Moment réduit Recherche du pivot :

$$\mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{131.02 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.04$$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.04}) = 0.05$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.05) = 0.44$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{139.52 \times 10^{-3}}{0.43 \times 347.83} = \mathbf{9.12 \text{ cm}^2}$$

- **Calcul à l'ELS**

Moment à l'état de service : $\mathbf{97.24 \text{ kN.m/ml}}$

Paramètre de déformation

$$\bar{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} = 0.56$$

Fibre neutre :

$$\bar{\gamma}_{ser} = \bar{\alpha}_{ser} \times d = \bar{\alpha}_{ser} \times d = 0.25$$

Bras de levier

$$\bar{z}_{ser} = d - \frac{\bar{\gamma}_{ser}}{3} = 0.37$$

Moment résistant :

$$M_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \bar{\gamma}_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times \bar{z}_{ser} = \mathbf{416.25 \text{ kN.m/ml}}$$

On a: $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Armature simple ($A_{sc} = 0$)

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{97.24 \times 10^{-3}}{0.37 \times 215.55} = 12.19 \text{ cm}^2$$

Condition de non fragilité de la section :

$$A_{min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{c28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = 6.12 \text{ cm}^2$$

La section d'acier retenue est donc : $A_{st} = 12.99 \text{ cm}^2$

Soit $A_{st} = 12.19 \text{ cm}^2 \rightarrow 7\text{HA}16$

➤ Sur appui gauche

• Calcul à l'ELU

Moment ultime : $M_u = 217.51 \text{ kN.m/ml}$

Moment réduit Recherche du pivot : $\mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{217.51 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.06$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.06}) = 0.08$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.08) = 0.44$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{217.51 \times 10^{-3}}{0.43 \times 347.83} = 14.21 \text{ cm}^2$$

• Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service : 161.37 kN.m/ml

Paramètre de déformation

$$\bar{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} = 0.56$$

Fibre neutre :

$$\bar{\gamma}_{ser} = \bar{\alpha}_{ser} \times d = 0.25$$

Bras de levier

$$\bar{z}_{ser} = d - \frac{\bar{\gamma}_{ser}}{3} = d - \frac{0.25}{3} = 0.37$$

Moment résistant :

$$M_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \bar{\gamma}_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times \bar{z}_{ser} = 416.25 \text{ kN.m/ml}$$

On a: $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Armature simple ($A_{sc} = 0$)

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{161.37 \times 10^{-3}}{0.37 \times 215.55} = \mathbf{20.33 \text{ cm}^2}$$

Condition de non fragilité de la section :

$$A_{min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{c28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = \mathbf{6.12 \text{ cm}^2}$$

La section d'acier retenue est donc : $A_{st} = \mathbf{20.33 \text{ cm}^2}$

Soit $A_{st} = 20.33 \text{ cm}^2 \rightarrow \mathbf{11HA16}$

➤ Sur appui droit

• Calcul à l'ELU

Moment ultime : $M_u = \mathbf{207.12 \text{ kN.m/ml}}$

Moment réduit Recherche du pivot : $\mu = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{207.12 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.06$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.06}) = 0.08$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.08) = 0.44$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{207.12 \times 10^{-3}}{0.44 \times 347.83} = \mathbf{13.53 \text{ cm}^2}$$

• Calcul à l'ELS

Moment à l'état de service : $\mathbf{153.67 \text{ kN.m/ml}}$

Paramètre de déformation

$$\bar{\alpha}_{ser} = \frac{n \times \bar{\sigma}_{bc}}{n \times \bar{\sigma}_{bc} + \bar{\sigma}_{st}} = 0.56$$

Fibre neutre :

$$\bar{y}_{ser} = \bar{\alpha}_{ser} \times d = 0.56 \times 0.45 = \mathbf{0.25}$$

Bras de levier

$$\bar{z}_{ser} = d - \frac{\bar{y}_{ser}}{3} = 0.45 - \frac{0.25}{3} = \mathbf{0.37}$$

Moment résistant :

$$M_{rserb} = \frac{1}{2} \times b_0 \times \bar{y}_{ser} \times \bar{\sigma}_{bc} \times \bar{z}_{ser} = \mathbf{416.25 \text{ kN.m/ml}}$$

On a: $M_{ser} < M_{rserb} \rightarrow$ Armature simple ($A_{sc} = 0$)

$$A_{ser} = \frac{M_{ser}}{\bar{z}_{ser} \times \bar{\sigma}_{st}} = \frac{153.67 \times 10^{-3}}{0.37 \times 215.55} = \mathbf{19.27 \text{ cm}^2}$$

Condition de non fragilité de la section :

$$A_{min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{c28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = \mathbf{6.12 \text{ cm}^2}$$

La section d'acier retenue est donc : $A_{st} = \mathbf{19.27 \text{ cm}^2}$

$$\text{Soit } A_{st} = 19.27 \text{ cm}^2 \rightarrow \mathbf{11HA16}$$

IV.4 .1.3 Calcul des armatures des piédroits centraux :

Les calculs sont effectués pour un piédroit considéré au mètre linéaire comme un poteau de 1m x 0,50 m

$$\text{Données: } H = 5 \text{ m} \quad h = 0.5 \text{ m} \quad c = 0.02 \quad b = 1 \text{ m}$$

➤ Effort normal sollicitant le poteau

$$N_u = \mathbf{1171.52 \text{ kN/ml}}$$

Longueur de flambement :

$$L_f = 0.7 \times H = 0.7 \times 5 = 3.50 \text{ m}$$

$$\text{Elancement : } \lambda = 3.46 \times \frac{H}{h} = 34.60$$

$$\text{On a : } \lambda \leq 50 \rightarrow \beta = 1 + 0.2 \times \left(\frac{\lambda}{35}\right)^2 = 1.20$$

$$B_r = (h - c) \times (b - c) = (0.5 - 0.02) \times (1 - 0.02) = 4704 \text{ cm}^2$$

$$\text{Le béton équilibre : } N_b = \frac{B_r \times f_{bu}}{0.9} = \frac{0.4704 \times 17}{0.9} = \mathbf{8885.33 \text{ kN}}$$

$$\text{Les aciers équilibrent : } N_s = \frac{k \times \beta \times N_u - N_b}{0.85} = \frac{1.10 \times 1.20 \times 1171.52 - 8885.33}{0.85} = \mathbf{- 8634.03 \text{ kN}}$$

Avec $k = 1,10$ car plus de la moitié des charges est appliquée avant 90 jours

$N_s < 0$ le béton est surabondant ; il suffit de prévoir de la section minimale :

➤ Calcul de la section minimale d'armatures

$$U = 2 (h + b) = 2 (0.50 + 1) = 3 \text{ m}$$

$$B = h \times b = 0.50 \times 1 = 0.50 \text{ m}^2$$

$$A_{min} = M_{ax} \left\{ \begin{array}{l} \frac{4 \text{ cm}^2}{m} \times u \text{ en cm}^2 \\ 0.2 \times \frac{B}{100} \end{array} \right\}$$

$$A_{min} = M_{ax} \left\{ \begin{array}{l} 4 \times 3 = 12 \text{ cm}^2 \\ 0.2 \times \frac{5000}{100} = 10 \text{ cm}^2 \end{array} \right\}$$

$$\text{Donc } A = A_{min} = 12 \text{ cm}^2$$

$$\text{Vérification : } A_{max} = 5 \times \frac{B}{100} = 5 \times \frac{5000}{100} = 250 \text{ cm}^2 \rightarrow A_{min} < A_{max} \quad \text{OK}$$

$$\text{D'où } A_{st} = 12 \text{ cm}^2$$

Soit $A_{st} = 6 \text{ cm}^2$ sur chaque face

Soit $A_s = 6 \text{ cm}^2 \rightarrow 3\text{HA}16$ sur chaque face

IV.4 .1.4 Calcul des armatures du piedroit extrême :

➤ Calcul à l'ELU :

$$M_{jGo} = 220.47 \text{ kN.m/ml}$$

$$N_i = 617.44 \text{ kN/ml}$$

$$e_a = \max(2\text{cm}, h/225) \rightarrow e_a = 2\text{cm}$$

$$e_1 = \frac{M_{jGo}}{N_i} + e_a = \frac{220.47}{617.44} + 0.02 = 0.38 \text{ m}$$

➤ Sollicitations ultimes corrigées pour flambement

$$\text{Elancement géométrique: } L_f = 0.7 \times L_0 = 0.7 \times 5 = 3.50 \text{ m}$$

➤ Type de calcul :

Pièce chargée de façon excentrée :

$$\frac{L_f}{h} < 15 < \max\left(\frac{15}{20 \times \frac{e_a}{h}}\right) \rightarrow \frac{3.50}{0.5} < 15 < \max\left(\frac{15}{20 \times \frac{2}{0.5}}\right)$$

Calcul en flexion composée en tenant compte de façon forfaitaire de l'excentricité de 2^{ème} ordre :

Excentricité de 2^{ème} ordre :

$$\alpha = \frac{M_1^L}{M_1} = \frac{79.13}{79.13 + 70.85} = 0.53$$

$$e_2 = \frac{3 L_f^2}{10^4 \times h} (2 + \alpha \times \phi) = \frac{3 \times 3.5^2}{10^4 \times 0.5} (2 + 0.53 \times 2) = 0.02 \text{ m} = 2 \text{ cm}$$

Avec $\phi = 2$ cas courant

Sollicitation corrigées pour le calcul en flexion composée :

$$\left\{ \begin{array}{l} Nu = Ni \\ NuGo = Nu(e_1 + e_2) \\ e_0 = e_1 + e_2 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Nu = 617.44 \text{ KN/ml} \\ NuGo = 617.44 \times (0.38 + 0.02) = 246.98 \text{ KN.m} \\ e_0 = 0.38 + 0.02 = 0.40 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Sollicitation ramenées au centre de gravité des aciers tendus :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_A = e_0 + (d - \frac{h}{2}) \\ MuA = Nu \times e_A \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e_A = 0.40 + (0.45 - \frac{0.5}{2}) = 0.60 \text{ m} \\ MuA = 617.44 \times 0.60 = 370.46 \text{ KN.m} \end{array} \right\}$$

Moment réduit de référence à l'ELU :

$$\mu_{Bc} = 0.8 \times \frac{h}{d} \times (1 - 0.4 \times \frac{h}{d}) = 0.8 \times \frac{0.5}{0.45} \times (1 - 0.4 \times \frac{0.5}{0.45}) = 0.49$$

Moment réduit agissant :

$$\mu_{uA} = \frac{MuA}{b_0 \times d^2 \times f_{bu}} = \frac{370.46 \times 10^{-3}}{0.5 \times 0.45^2 \times 17} = 0.22$$

➤ **Calcul à l'ELS :**

$$\left\{ \begin{array}{l} Nser = Ng + Nq \\ MserGo = Mg + Mq \\ e_{ser0} = \frac{M_{serGo}}{N_{ser}} \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Nser = 459.99 \text{ KN} \\ MserGo = 164.37 \text{ KN.m} \\ e_{ser0} = 0.36 \text{ m} \end{array} \right\}$$

Sollicitations ramenées au centre de gravité des aciers tendus

$$\left\{ \begin{array}{l} e_A = e_{ser0} + (d - \frac{h}{2}) \\ MserA = Nser \times e_A \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} e_A = 0.36 + (0.45 - \frac{0.5}{2}) = 0.56 \text{ m} \\ MserA = 459.99 \times 0.56 = 257.59 \text{ KN.m} \end{array} \right\}$$

Moment réduit limite :

$$\gamma_M = \frac{MuA}{M_{serA}} = \frac{370.46}{257.59} = 1.44$$

$$10^4 \mu_{lu} = 3440 \times \theta \times \gamma_M + 49 \times \frac{f_{28}}{\theta} - 3100$$

$$10^4 \mu_{lu} = 3440 \times 1 \times 1.44 + 49 \times \frac{30}{1} - 3100 = 3323.6$$

$$\mu_{lu} = 0.31$$

On a $\mu_{uA} < \mu_{Bc}$ ➔ section partiellement comprimée

Et $\mu_{uA} < \mu_{lu}$ ➔ pas besoin d'acier comprimé

Paramètres de déformation :

$$\alpha_{uA} = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2\mu_{uA}}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.22}) = 0.31$$

Bras de levier :

$$z_{uA} = d (1 - 0.4 \times \alpha_{uA}) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.31) = 0.39$$

$$A = \frac{MuA}{z_{uA} \times \sigma_s} = \frac{370.46 \times 10^{-3}}{0.39 \times 347.83} = \mathbf{27.31 \text{ cm}^2}$$

Section théorique d'acier :

$$A_u = A - \frac{N_u}{\sigma_s} = 27.31 \times 10^{-4} - \frac{617.44 \times 10^{-3}}{347.83} = 9.56 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = \mathbf{9.56 \text{ cm}^2}$$

Condition de non fragilité de la section :

$$A_{\min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{c28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = \mathbf{6.21 \text{ cm}^2}$$

La section d'acier retenue est donc : $A_s = \mathbf{9.56 \text{ cm}^2}$

Soit $A_{st} = 9.56 \text{ cm}^2 \rightarrow \mathbf{5HA16}$

Tableau IV. 18:Récapitulatif des sections d'armatures.

PARTIE D'OUVRAGE	Sollicitations kN.m/ml et kN/ml		ELU	ELS	Section de béton (cm)		Section d'acier (cm ²)	
					b	h	Théorique	Choix
TABLIER	Moment fléchissant	à gauche	-330.06	-246.59	100	50	30.91	10HA20
		à droite	-313.68	-234.36	100	50	29.91	10HA20
		au milieu	191.80	143.26	100	50	17.96	6HA20
RADIER	Moment fléchissant	à gauche	217.51	161.37	100	50	20.33	11HA16
		à droite	207.12	153.67	100	50	19.27	11HA16
		au milieu	-131.02	-97.24	100	50	12.19	7HA16
PIEDROITS EXTREMES	Moment fléchissant	à gauche	-120.91	-89.78	100	50	9.56/face	5HA16
		à droite	-167.49	-125.21	100	50		
		au milieu	220.47	164.37	100	50		
	Effort normal		617.44	459.99	100	50		
PIEDROITS INTERIEURS	Moment fléchissant	à gauche	-16.57	-12.31	100	50	12 soit 6/face	3HA16
		à droite	-21.52	-16.08	100	50		
		au milieu	-16.95	-12.62	100	50		
	Effort normal		1171.52	872.73	100	50		

IV.5 Dimensionnement du Mur en aile

IV.5 .1 Pré-dimensionnement

H : la hauteur totale du dalot,

b : la largeur de la semelle,

e : l'épaisseur de la semelle,

c : la longueur du patin,

a : la longueur du talon,

e_r : l'épaisseur du rideau

❖ Soit $H = 5$ m

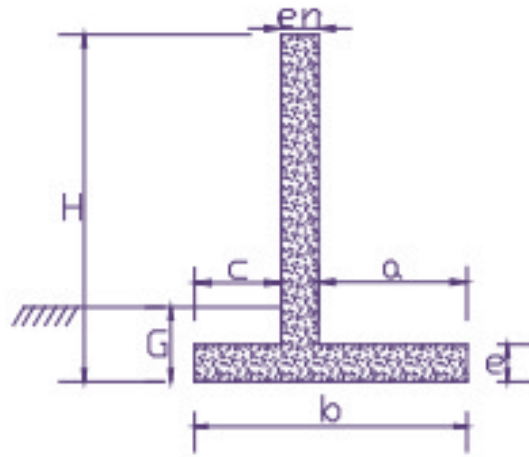


Figure IV-2 Dimensions de mur en aile

La largeur de la semelle : $b = (0,2 \text{ à } 0,51) \times H$

$$b = (0,2 \text{ à } 0,51) \times 5 = (1 \text{ à } 2,55)$$

❖ Soit $b = 2,25$ m

L'épaisseur de la semelle : $e = 0,08333 \times H$

$$e = 0,08333 \times 5 = 0,42 \text{ m}$$

Soit $e = 0,42$ m.

La hauteur du rideau : $H_r = H - e$

$$H_r = 5 - 0,5 = 4,5 \text{ m}$$

❖ Soit $H_r = 4,5$ m

L'épaisseur du rideau : $e_r = 0,08333 \times H$

❖ Soit $e_r = 0,42$ m.

La longueur du patin : $c = (0,125 \text{ à } 0,20) \times H$

$$c = (0.125 \text{ à } 0.2) \times 5$$

$$c = (0.625 \text{ à } 1)$$

❖ Soit $c = 0.80 \text{ m}$.

La longueur du talon : $a = b - c - e_r$

$$a = 2.25 - 0.8 - 0.42 = 1.03 \text{ m}$$

Soit $a = 1.03 \text{ m}$.

Tableau IV. 19: récapitulatif du pré-dimensionnement du mur en aile.

Hauteur totale du dalot	Largeur de la semelle	Epaisseur de la semelle	Hauteur du rideau	Epaisseur du rideau	Longueur du patin	Longueur du talon
5.0 m	2.25 m	0.42 m	4.5 m	0,42 m	0.80 m	1.03

- **Calcul des sollicitations :**

Calcul de K,

$$\text{Soit } \varphi = 35^\circ$$

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$K\gamma = kq = tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) = tg^2 \left(45 - \frac{35}{2}\right) = 0.27$$

$$K\gamma = kq = 0.27$$

- ❖ **Calcul des contraintes verticales**

$$\sigma_v = \gamma \times H$$

$$\text{Pour } H = 0 \quad \sigma_v = 0$$

$$\text{Pour } H = 4.5 \quad \sigma_v = 81 \text{ KPa}$$

$$\text{Pour } H = 5.0 \quad \sigma_v = 90 \text{ KPa}$$

- ❖ **Calcul des poussées**

$$\sigma_h = K \times \sigma_v \quad \text{avec } K = 0.27$$

$$\text{Pour } H = 0 \quad \sigma_h = 0$$

$$\text{Pour } H = 4.5 \quad \sigma_h = 21.87 \text{ KPa}$$

Pour $H = 5.0$ $\sigma_h = 24.30 \text{ KPa}$

IV.5 .2 Inventaire des actions agissant sur le mur en aile:

❖ Charges verticales

Poids propre du rideau (voile) W_r

Poids propre de la semelle W_s

Poids propre du massif du sol W_{sol}

Charge d'exploitation W_q

❖ Charges horizontales

Poussée du sol P_s

Charge d'exploitation P_q

IV.5 .2.1 Détermination des charges du mur en aile

❖ Charges verticales

Poids propre du rideau (voile) W_r

$$W_r = \gamma b \times H_r \times e_r$$

$$W_r = 25 \times 4.5 \times 0,42 = \mathbf{47.25 \text{ kN/ml}}$$

Poids propre de la semelle W_s

$$W_s = \gamma b \times b \times e$$

$$W_s = 25 \times 2.25 \times 0,42 = \mathbf{23.63 \text{ kN/ml}}$$

Poids propre du massif du sol W_{sol}

$$W_{sol} = \gamma \times H_r \times a,$$

$$W_{sol} = 18 \times 4.5 \times 1.03 = \mathbf{83.43 \text{ kN/ml}}$$

Charge d'exploitation W_q

$$W_q = q \times a,$$

$$W_q = 10 \times 1.03 = \mathbf{10.3 \text{ kN/ml}}$$

❖ Charges horizontales

$$P_s = \sigma_h \times \frac{1}{2} \times H$$

$$P_s = 21.87 \times 0.5 \times 5 = \mathbf{54.68 \text{ kN/ml}}$$

Charge d'exploitation P_q

$$P_q = q \times k \times H$$

$$P_q = 10 \times 0,27 \times 5 = \mathbf{13.5 \text{ kN/ml}}$$

IV.5.2.2 Détermination des moments du aux différentes charges

❖ Charges verticales

Moment du rideau (voile) M_{wr}

$$M_{wr} = W_r \times c \times \frac{1}{2} \times e_r$$

$$M_{wr} = 47.25 \times 0.80 \times \frac{1}{2} \times 0.42 = \mathbf{7.94 \text{ kN.m/ml}}$$

Poids propre de la semelle M_{ws}

$$M_{ws} = W_s \times \frac{1}{2} \times b$$

$$M_{ws} = 23.63 \times \frac{1}{2} \times 2.25 = \mathbf{26.58 \text{ kN.m/ml}}$$

Poids propre du massif du sol M_{wsol}

$$M_{wsol} = W_{sol} \times (b - \frac{1}{2} \times a)$$

$$M_{wsol} = 83.43 (2.25 - \frac{1}{2} \times 1.03) = \mathbf{144.75 \text{ kN.m/ml}}$$

Charge d'exploitation M_{wq}

$$M_{wq} = W_q \times (b - \frac{1}{2} \times a)$$

$$M_{wq} = 10.3 \times (2.25 - \frac{1}{2} \times 1.03) = \mathbf{17.87 \text{ kN.m/ml}}$$

❖ Charges horizontales

Moment du au poussée du sol Mps

$$Mp_s = P_s \times \frac{1}{3} \times H$$

$$Mp_s = 54.68 \times \frac{1}{3} \times 5 = \mathbf{91.13 \text{ kN.m/ml}}$$

Moment du au charge d'exploitation Mpq

$$Mp_q = P_q \times \frac{1}{2} \times H$$

$$Mp_q = 13.5 \times \frac{1}{2} \times 5 = \mathbf{33.75 \text{ kN.m/ml}}$$

Après avoir effectué l'inventaire et déterminer le poids propre des actions agissant sur le mur
Nous avons calculés les sollicitations et les moments dus à ces différentes charges, les résultats de nos calculs sont résumés dans le tableau ci-dessous:

Tableau IV. 20: Récapitulatif des résultats du calcul des efforts du mur en aile.

		Sollicitations en kN	Moments en kN.m/ml
Charges verticales	Poids propre du rideau (voile) W_r	47.25	7.94
	Poids propre de la semelle W_s	23.63	26.58
	Poids propre du massif du sol W_{sol}	83.43	144.75
	Charge d'exploitation W_q	10.3	17.87
TOTAL		191.61	197.17
Charges horizontales	Poussée du sol P_s	54.68	91.13
	Charge d'exploitation P_q	13.15	33.75
TOTAL		67.83	124.88

IV.5 .3 Vérification du redimensionnement

La portance (on suppose que le sol est en compression simple)

$$\sigma \leq qd = 0.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma = F / S$$

Avec F = Somme totale des charges verticales

S = Section de la semelle

$$\sigma = F / S = 191.61 / (2.25 \times 0.42) = 185.13 \text{ kPa}$$

$$\sigma = 185.13 < 200 \text{ kPa}$$

❖ Stabilité au renversement

$$\frac{\sum M_{vertical}}{\sum M_{horizontal}} \geq 1$$

$$\frac{\sum M_{vertical}}{\sum M_{horizontal}} = 1.50 > 1$$

❖ Stabilité au glissement

$$\frac{R_h}{P_h} > 1,5$$

Avec $R_h = \tan \varphi \times F = \tan 35 \times 191.61 = 134.17 \text{ kN}$

Avec : $R_h =$ des charges horizontales dues aux charges verticales

$P_h =$ somme totale des charges horizontales

$$\frac{R_h}{P_h} > 1,5 \rightarrow \frac{134.17}{67.83} = 1.98 > 1.5$$

Le pré-dimensionnement du mur en aile est bon

IV.5.4 Calculs du béton armé

➤ Calcul de la semelle

- l'effort normal N_u :

$$N_u = 1,35 \times (W_r + W_{sol}) + 1,5 \times W_q$$

$$N_u = 1,35 \times (47.25 + 83.43) + 1,5 \times 10.3 = 191.87 \text{ kN.m}$$

- Le moment M_u :

$$M_u = 1,35 \times (W_r + e_1 + W_{sol} \times e_2 + P_s \times h_s) + 1,5 \times (W_q \times e_2 + P_q \times h_q)$$

$$\text{Avec : } e_1 = (b - a)/3$$

$$e_2 = (b - a)/2,$$

$$h_s = H/3 ,$$

$$h_q = Hr/3$$

$$M_u = 1.35 \times (47.25 + 0.41 + 83.43 \times 0.61 + 54.68 \times 1.67) + 1.5 \times (10.3 \times 0.61 + 13.15 \times 1.5)$$

$$= 295.33 \text{ kN.m}$$

$$\text{Soit } M_u = 295.33 \text{ kN.m}$$

La répartition des contraintes au sol sous la semelle n'est pas uniforme mais trapézoïdale et sa résultante F est appliquée à une distance X_f

$$\sigma_M = \frac{N_U}{b} + \frac{6 \times M_U}{b^2} = \frac{191.87}{2.25} + \frac{6 \times 295.33}{2.25^2} = 435.30 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_m = \frac{N_U}{b} - \frac{6 \times M_U}{b^2} = \frac{191.87}{2.25} - \frac{6 \times 295.33}{2.25^2} = -264.75 \text{ kN/m}^2$$

$$F = \frac{\sigma_M + \sigma_m}{2} \times b = 191.87 \text{ kN/m}^2$$

$$X_f = \frac{\sigma_M + 2 \times \sigma_m}{\sigma_M + \sigma_m} \times \frac{b}{3} = -0.41 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_{3/4} = \frac{3 \times (\sigma_M + \sigma_m)}{4} \leq q_s = 0,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{3/4} = 127.91 \text{ Kpa} \leq 200 \text{ MPa}$$

➤ Armature du rideau

$$M_u = 1,35 \times P_s \times (h_s - e) + 1,5 \times P_q \times (h_q - e)$$

$$N_u = 1,35 \times P_s + 1,5 \times P_q$$

Par application numériques on obtient:

$$M_u = 295.33 \text{ kN.m}$$

$$N_u = 191.87 \text{ kN.m}$$

➤ **Calcul des armatures principales**

$$\mu = \frac{Mu}{b \times d^2 \times F_{bu}} = \frac{295.33 \times 10^{-3}}{1 \times 0.45^2 \times 17} = 0.09$$

On a $0 \leq \mu \leq 0.186 \rightarrow$ pivot A

Paramètres de déformation :

$$\alpha_u = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times \mu}) = 1.25 (1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.09}) = 0.12$$

$$z_u = d (1 - 0.4 \times \alpha_u) = 0.45 (1 - 0.4 \times 0.12) = 0.43$$

Section théorique d'acier :

$$A_{u1} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{295.33 \times 10^{-3}}{0.43 \times 347.83} = 19.75 \text{ cm}^2$$

$$A_{\min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = 6.12 \text{ cm}^2$$

Choix $A_u = 19.75 \text{ cm}^2 \rightarrow 10\text{HA}16$

➤ **Calcul des armatures de répartition :**

$$A_r \geq \max \left(\frac{A_u}{4}; 0.08 \times e \right) A_r \geq \max (4.93 ; 3.36)$$

$$A_r = 4.93 \text{ cm}^2 \rightarrow \text{choix}$$

➤ **Armature du talon :**

$$M_u = (1.35 \times W_{\text{sol}} + 1.5 W_q) \times a/2 - x \times a^2/2 - (\sigma M - \sigma m) \times a^3/6xb$$

$$M_u = 144.48 \text{ kN.m}$$

$$N_u = (1.35 \times W_{\text{sol}} + 1.5 W_q) - \sigma m \times a - (\sigma M - \sigma m) \times a^2/2xb$$

$$N_u = 232.76 \text{ kN}$$

➤ **Calcul des armatures principales :**

$$A_{u2} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{144.48 \times 10^{-3}}{0.437 \times 347.83} = 2.78 \times 10^{-3} \text{ m}^2 = 9.51 \text{ cm}^2$$

$$A_{\min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = 6.12 \text{ cm}^2$$

Choix $A_u = 9.51 \text{ cm}^2 \rightarrow 9\text{HA}12$

➤ **Calcul des armatures de répartition :**

$$A_r \geq \max \left(\frac{A_u}{4}; 0.08 \times e \right)$$

$$A_r = 3.28 \text{ cm}^2 \quad \text{choix} \quad \rightarrow 3\text{HA}12$$

➤ **Armature du patin :**

Par application numériques on obtient :

$$M_u = (\sigma_M \times (1 - c/b) + \sigma_m \times c/b) \times c^2/b + (\sigma_M - \sigma_m) \times c^3/2xb$$

$$M_u = 136.40 \text{ kN.m}$$

$$N_u = (\sigma_M \times (1 - c/b) + \sigma_m \times c/b) \times b + (\sigma_M - \sigma_m) \times a^3/2xb$$

$$N_u = 229.72 \text{ kN.m}$$

➤ **Calcul des armatures principales :**

$$A_u = \frac{M_u}{z_u \times \sigma_s} = \frac{333.40 \times 10^{-3}}{0.43 \times 347.83} = 22.29 \text{ cm}^2$$

$$A_{\min} = \frac{0.23 \times b \times d \times f_{t28}}{f_e} = \frac{0.23 \times 1 \times 0.45 \times 2.4}{400} = 6.12 \text{ cm}^2$$

Choix $A_u = 9.11 \text{ cm}^2 \rightarrow 9\text{HA}12$

➤ **Calcul des armatures de répartition :**

$$A_r \geq \max \left(\frac{A_u}{4}; 0.08 \times e \right)$$

$$A_r = 5.57 \text{ cm}^2 \quad \text{choix} \quad \rightarrow 3\text{HA}12$$

NB: nous notons que pour le dalot il est prévu une protection pour limiter les dégradations dues à l'eau:

- Construction de mur en aile en amont et en aval de l'ouvrage
- Mise en place d'une couche d'enrochement à l'amont de l'ouvrage
- Mise en place d'une couche de gabions à l'aval de l'ouvrage.

Tableau IV. 21: Récapitulatif des sections d'armature du mur en ail.

Parties d'ouvrage		Sections d'acier (cm ²) Armatures principales		Sections d'acier (cm ²) Armatures de répartitions	
		Théorique	Choix	Théorique	Choix
rideau		19.75	10HA16	4.93	4HA14
Semelle	Talon	9.51	9HA12	3.36	3HA12
	Patin	9.11	9HA12	3.36	3HA12

V Modélisation de l'ouvrage avec le logiciel PICF CYPE

V.1 Introduction:

Lors de l'étude d'une structure le recours à l'outil informatique est bien souvent inévitable, celui-ci permet en effet d'effectuer des calculs complexes difficilement réalisables par des méthodes manuelles et procure un gain de temps important en évitant des opérations longues et fastidieuses.

Pour que l'ingénieur fasse appel à un logiciel, il lui incombe dans tous les cas de poser le problème correctement, de modéliser la structure, et de définir les sorties graphiques ou les tableaux de résultats qu'il compte utiliser.

V.2 Définition de la société CYPE:

CYPE est une société espagnole de plus de 25 ans d'expérience dans l'édition de software, composée de plus de 130 personnes.

CYPE crée des logiciels qui allient puissance de calcul, fiabilité et rapidité, afin de coller au mieux aux besoins des professionnels du BTP ayant à réaliser des études techniques

V.3 Présentation du logiciel PICF-CYPE 2014:

PICF-CYPE est un logiciel de calcul ou du moins de dimensionnement des ouvrages type dalots. Ce dernier fera l'objet de notre étude. Le logiciel utilise la méthode de calcul par éléments finis triangulaires de type lamelle épaisse tridimensionnel qui prend en compte la résistance à l'effort tranchant. Les normes pouvant être prises en compte pour la justification et le dimensionnement des armatures des sections par le logiciel CYPE 2014 sont les suivantes:

- **BAEL 91 modifié 99(France).**
- **EHE(Espagne).**
- **REBAP(Portugal).**
- **ACI 318M-11 (USA International).**
- ACI 318-11(USA).
- **Euro code2.**
- IS 456: 2000(Inde).
- NTC: 14-01-2008(Italie).

V.4 Resultas:

La note de calcul présentée comprend :

- **Les normes et les matériaux utilisés par le logiciel.**
- **La géométrie**
- **Le terrain : c'est la valeur du module de réaction, la contrainte admissible, le poids volumique.**
- **l'angle de frottement interne et celui de transmission des charges.**
- **Les actions générées : les actions générées sont les surcharges, le poids propre et les charges en bande.**
- **La combinaison : c'est les résultats des différentes sollicitations à l'ELU et à l'ELS entre les actions c'est-à-dire les sollicitations.**
- **Le ferrailage : c'est le plan de ferrailage et les diamètres des différents fers.**
- **Le quantitatif : c'est la quantité de fer pour chaque élément du dalot à part cela, nous avons le plan de coffrage qui nous est offert ainsi que le plan de ferrailage de tous les éléments constitutif. Nous pouvons donc l'exporter sous plus d'un format comme AutoCAD, PDF,DOCX,...**

V.5 Extensions:

Après modélisation et calcul, les résultats fournis par le logiciel peuvent être donnés sous plusieurs formats, parmi lesquels on a:

- **Le format AutoCAD : les plans de ferrailage son extensible en AutoCAD ; ceci nous permet de modifier certaines présentations et de faire des mises en formes à notre guise. Que ce soit la couleur ou l'épaisseur de certains traits.**
- **Le format PDF : pour une impression facile.**
- **Le format DOCX : c'est un format de Word pour facilite la modification des textes et l'assemblage des résultats.**
- **Le format JPG : étant un format image on peut visualiser nos résultats sous forme d'image.**

V.6 Les principes de calcul du logiciel

Le logiciel utilise la méthode de calcul par les éléments finis triangulaires de type lamelle épaisse tridimensionnelle qui prend en compte la résistance à l'effort tranchant. Les éléments comportent 6 nœuds situés sur chaque sommet et au centre de chaque côté et ayant chacun 6 degrés de liberté.

Il est possible d'introduire des convois de charge en différentes positions en indiquant graphiquement le parcours de l'axe et le nombre de positions du convoi, des charges en bande, des charges sur les dalles, etc.

V.7 Méthode de calcul :

Le logiciel utilise la méthode de calcul par éléments finis triangulaires de type lamelle épaisse tridimensionnel six nœuds, qui considère la déformation par l'effort tranchant.

V.8 Les actions :

Les actions prises en compte par le logiciel sont entre autre le poids propre, la poussée du terrain, les charges appliquées sur le tablier (convois civils, remblai).

V.8.1 Légende pour les efforts internes :

Tableau V. 1:Légende pour les efforts internes.

Abréviation	Signification	Unités
N_x	Effort normal X	kN/m
N_y	Effort normal Y	kN/m
N_{xy}	Effort normal XY	kN/m
M_x	Moment fléchissant X	kN·m/m
M_y	Moment fléchissant Y	kN·m/m
M_{xy}	Moment fléchissant XY	kN·m/m
Q_x	Effort tranchant X	kN/m
Q_y	Effort tranchant Y	kN/m
D_x	Déplacement X	mm
D_y	Déplacement Y	mm
D_z	Déplacement Z	mm
G_x	Rotation X	mRad
G_y	Rotation Y	mRad
G_z	Rotation Z	mRad

Résultats:

La note de calcul présentée comprend :

- **Les normes et les matériaux utilisés par le logiciel**
- **La géométrie**
- **Le terrain : c'est la valeur du module de réaction, la contrainte admissible, le poids volumique,**
- **l'angle de frottement interne et celui de transmission des charges**
- **Les actions générées : les actions générées sont les surcharges, le poids propre et les charges en bande**
- **La combinaison : c'est les résultats des différentes sollicitations à l'ELU et à l'ELS entre les actions c'est-à-dire les sollicitations.**
- **Le ferrailage : c'est le plan de ferrailage et les diamètres des différents fers.**
- **Le quantitatif : c'est la quantité de fer pour chaque élément du dalot à part cela, nous avons le plan de coffrage qui nous est offert ainsi que le plan de ferrailage de tous les éléments constitutif. Nous pouvons donc l'exporter sous plus d'un format comme AutoCAD, PDF, DOCX,...**

Extensions:

Après modélisation et calcul, les résultats fournis par le logiciel peuvent être donnés sous plusieurs formats, parmi lesquels on a:

- **Le format AutoCAD : les plans de ferrailage sont extensibles en AutoCAD ; ceci nous permet de modifier certaines présentations et de faire des mises en formes à notre guise. Que ce soit la couleur ou l'épaisseur de certains traits.**
- **Le format PDF : pour une impression facile.**
- **Le format DOCX : c'est un format de Word pour faciliter la modification des textes et l'assemblage des résultats.**
- **Le format JPG : étant un format image on peut visualiser nos résultats sous forme d'image**

V.9 Le ferrailage proposé par le logiciel :

Le logiciel propose un plan de ferrailage en fonction des résultats du dimensionnement. Mais il est possible de modifier ce ferrailage ; c'est-à-dire modifier les diamètres proposés en baisse ou en hausse. Il faut savoir qu'il est impossible de modifier la disposition des aciers. Pour pouvoir le faire, la seule alternative est celle de la version exportée.

Il faut noter que CYPE propose un ferrailage optimal après calcul des différentes sollicitations auxquelles le dalot est soumis.

Comparativement, le calcul manuel donne un ferrailage qui nous reviendra beaucoup plus cher. En ce sens que le prix de l'acier varie en fonction du diamètre, donc plus on a un nombre important de gros diamètres, plus on dépensera plus pour les aciers. En témoigne le tableau comparatif des piédroits montrant les prix des deux méthodes.

V.10 Présentation en 3D:

Cette présentation permet de voir et d'apprécier la structure en 3D dans toutes ses formes et tous ses côtés et pour vérifier les épaisseurs les données géométriques remplissent.

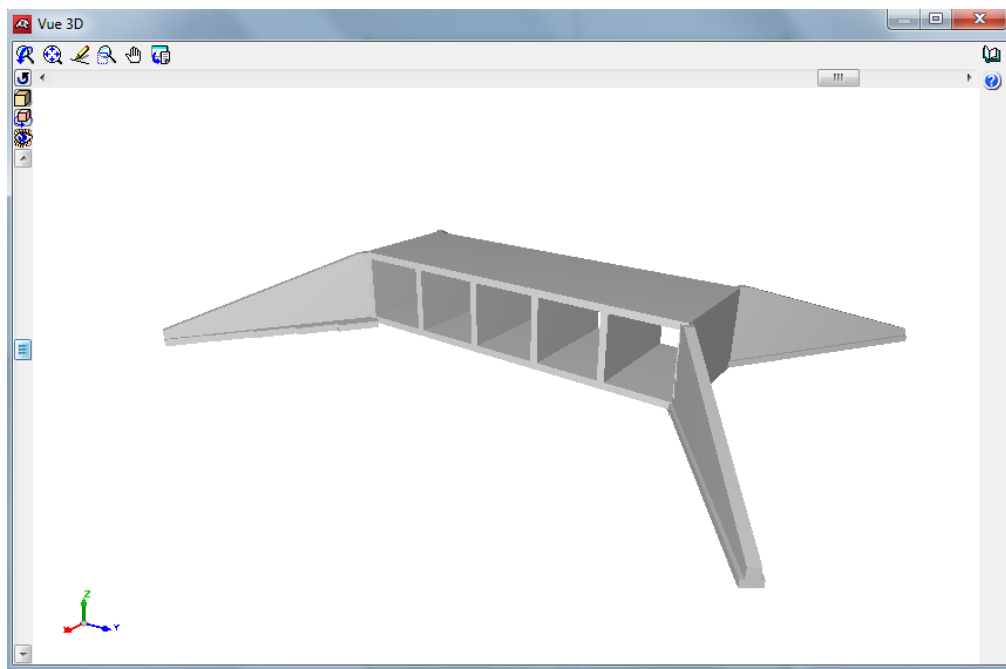


Figure V-1 **Présentation en 3D du dalot**

Après l'ouverture le logiciel CypeCAD comme il est dans la figure V.2 en va choisies l'application de ponts-cadre PICF pour accéder a le dimensionnement et la justification de ponts-cadres en béton armé de section rectangulaire ou trapézoïdale.

V.11 Introduction des données:

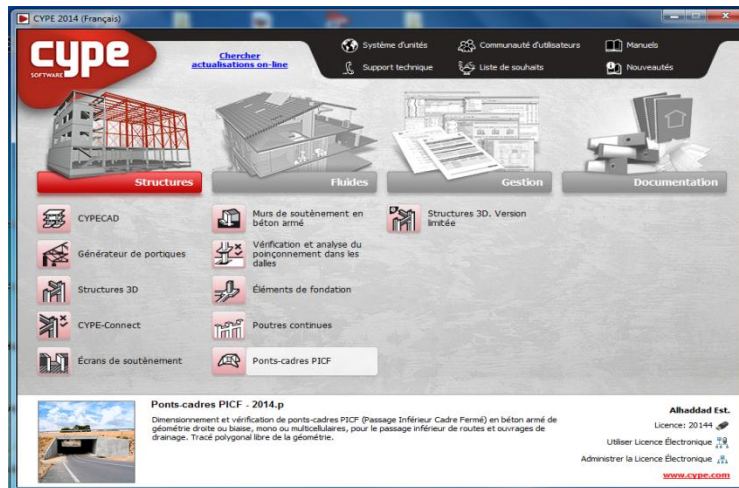


Figure V-2 Fenêtre de démarrage des applications Cype 2014

V.12 Etapes à suivre dans PICFCYPE 2014:

➤ Nom de fichier:

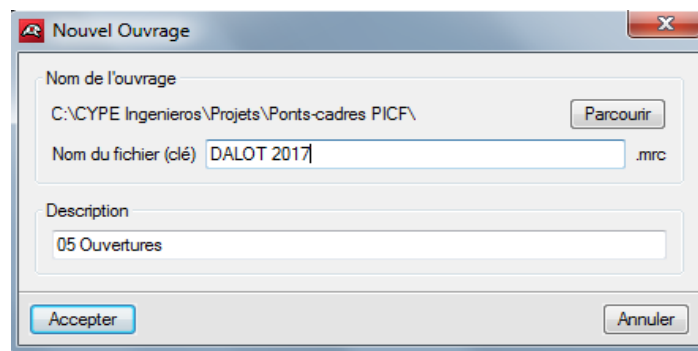


Figure V-3 Nom d'un fichier.

❖ Choix de l'assistant:

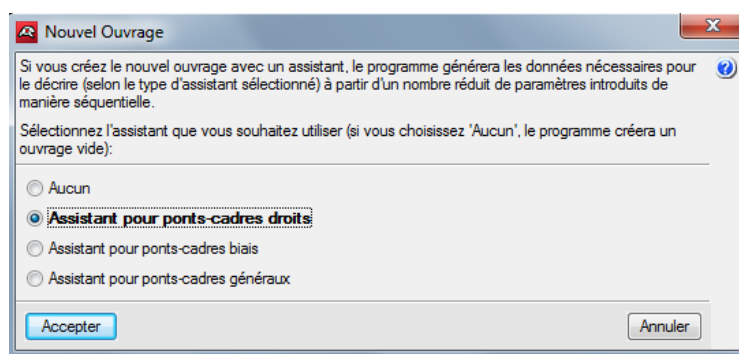


Figure V-4 Choix de type de la géométrie de l'ouvrage.

Sélectionnez l'assistant que vous souhaitez utiliser :

- **Aucun.** Le programme ouvrira un document vide.
- **Assistant pour les ponts-cadres droits.**

Il permet de définir un pont -cadre avec bords libres et piédroits parallèles, c'est-à-dire avec dalle rectangulaire. A titre d'exemple, les données à introduire sont décrites ci-dessous. Pour les autres types de ponts-cadres, les données varient légèrement.

Cet assistant vous demande le gabarit ou la hauteur intérieure libre des modules, la portée et la longueur totale des modules. La cote du plan supérieur de roulement n'est pas à introduire. Ce plan sera donné par l'épaisseur de la dalle supérieure qui est fonction de la portée libre (voir la table présentée précédemment).

- **Assistant pour les ponts-cadres biais:**

Il permet de définir un pont -cadre avec des bords libres d'angle variable et des piédroits parallèles.

- **Assistant pour les ponts-cadres généraux:**

Il permet de définir un pont -cadre avec des bords libres et des piédroits d'angle variable. Quel que soit l'assistant utilisé,

Remarque :

Dans notre cas en a choisi le 2^{ème} choix « Assistant pour les ponts-cadres droits ».

❖ **Définition de géométrie:**

Le programme utilise le critère suivant de dimensionnement des épaisseurs :

Tableau V. 2: Tableau des épaisseurs de tablier et de radier.

Portée	Epaisseur de tablier	Epaisseur de Radier
$L \leq 5$	$0.02 \times L^2 + 0.10$	$0.02 \times L^2 + 0.10$
$5 < L < 7$	0.5	0.4
$L \geq 7$	$0.0835 \times L^2 + 0.10$	$0.0816 \times L^2 + 0.10$

Pour tous les assistants, les plans de roulement générés sont horizontaux.

Tableau V. 3: Choix de gabarit et épaisseur piédroit.

Gabarit	Epaisseur de piédroit
$G \leq 4.5$	$0.02 \times G^2 + 0.10$
$4.5 < G < 7$	0.5
$G \geq 7$	$0.07126 \times G$

Le remplissage des donnes géométriques pour notre ouvrage :

$$G = 4.50 \text{ m}$$

$$L_e = 24.5 \text{ m}$$

$$L_i = 8 \text{ m}$$

L'ouverture dans un cas d'un dalot en prend l'ouverture général et après en va diviser avec une outre fonction. Il faut noter que lorsqu'on a un dalot multicellulaire, il va falloir générer ces ouvertures car à l'introduction des données on introduit la longueur et la largeur totale en considérant le dalot comme étant à une seule ouverture. C'est après avoir généré le modèle qu'on passe à la subdivision des cellules.

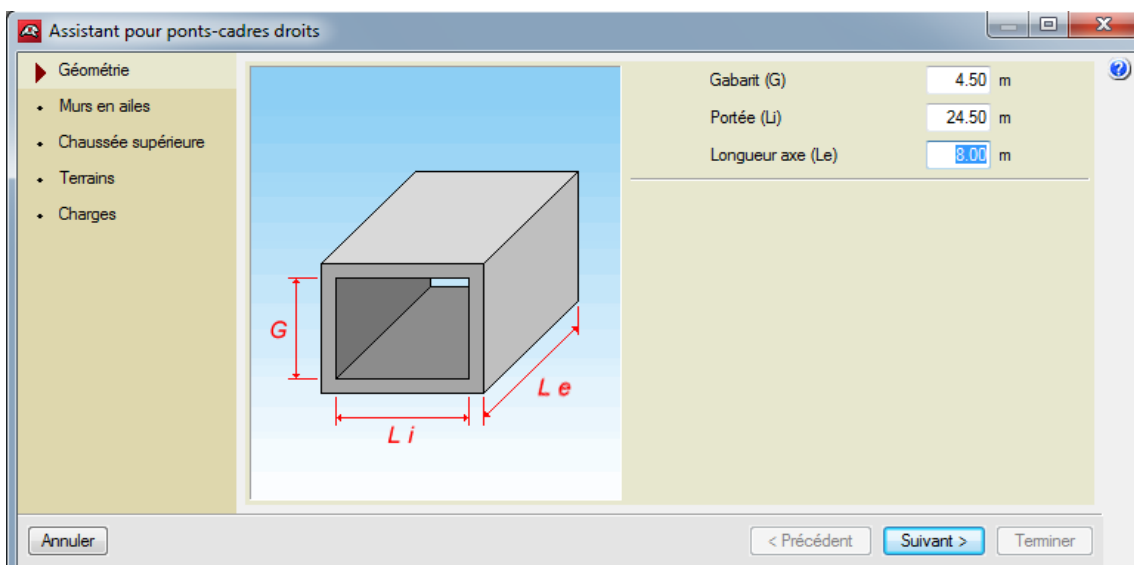


Figure V-5 Définition de géométrie de notre ouvrage d'art

V.13 Murs en ailes :

Vous pouvez activer ou non la présence de murs en aile et leurs orientations. Le programme génère la charge sur le remblai présent sur l'extrados des murs en aile en fonction du sinus de l'angle en prolongation. Par exemple, en supposant que l'on ait une surcharge de

1 t/m², un angle de 0 degrés génère 0 t/m² de surcharge, un angle de 45 degrés génère 0,7 t/m² et un angle de 90 degrés génère 1t/m².

Pour notre projet en a choisie $\Phi=35^\circ$

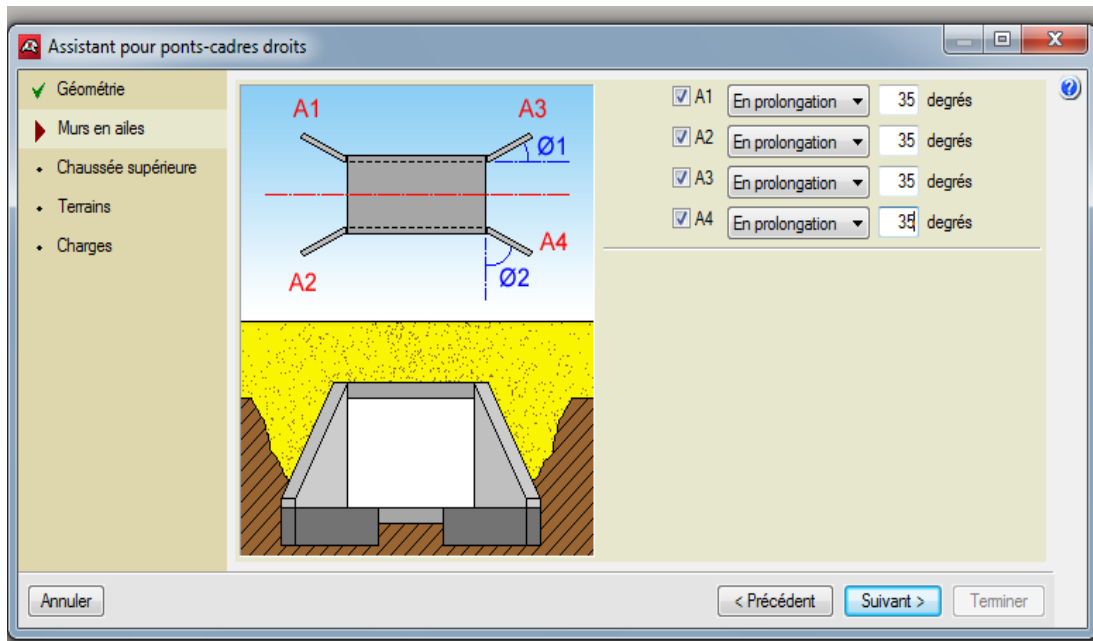


Figure V-6 Définition des murs en ails et leur orientation

V.14 La chaussée supérieure :

La définition de la position de la chaussée et sens coordonnée axe et largeur A et l'angle Φ de l'inclinaison par rapport le vertical avec hauteur par rapport radier(h).

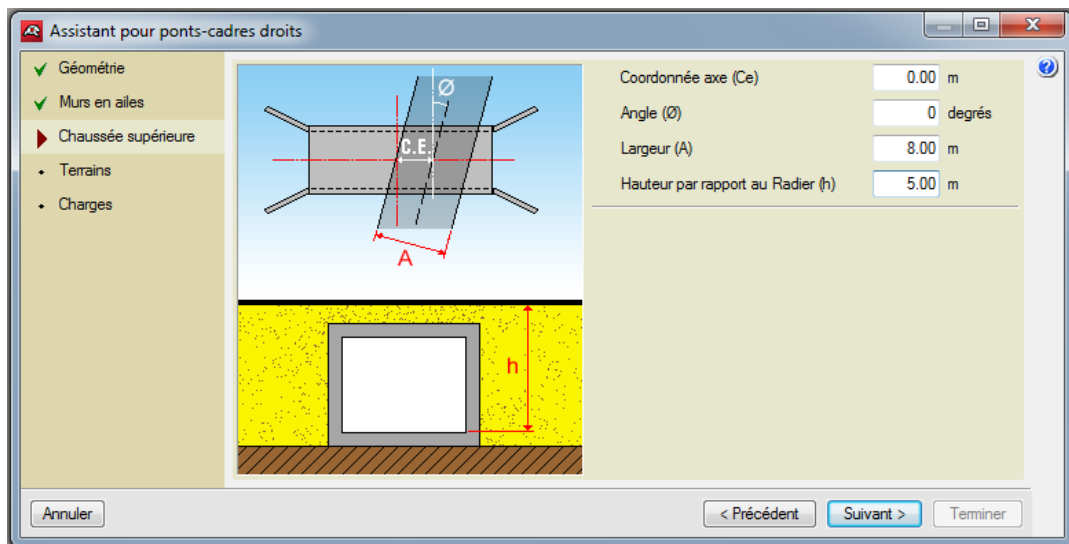


Figure V-7 Définition de la position de la chaussée par rapport l'ouvrage

V.15 Le type de terrains :

Le choix de base (B) remblais (R) sur des types proposer par logiciel cype-pcif et angle du talus.

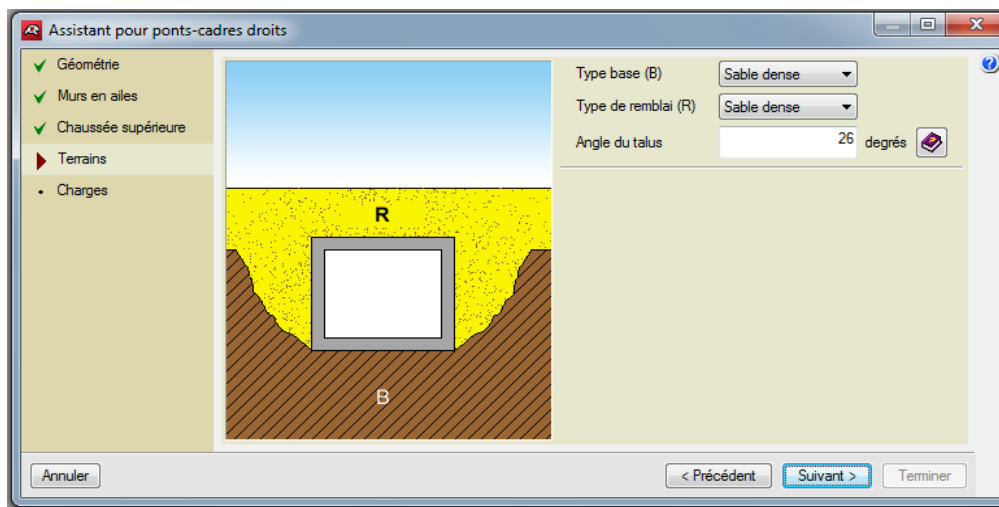


Figure V-8 Type des terrains

Angle du talus (A): C'est l'angle des terres qui forment le terre-plein avec l'horizontale, en degrés $A = 26^\circ$

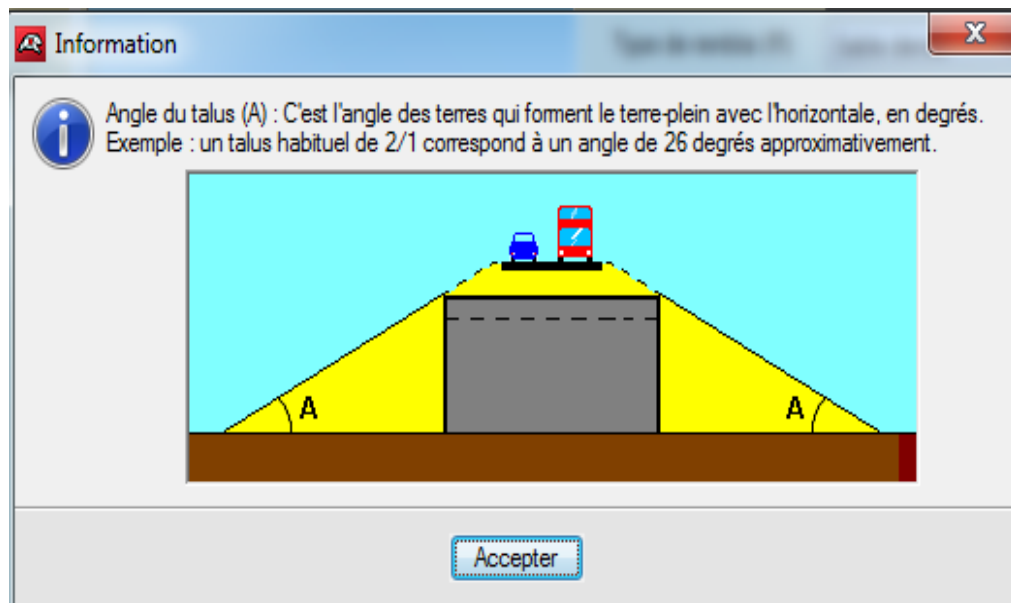


Figure V-9 Angle de talus

V.16 Le chargement :

Le choix de chargement sur le radier si la charger hydraulique et la charge sur la chaussée seulement en va choisies règlement et pour notre projet le règlement française CPC fascicule 61 titre II classe1 [2].

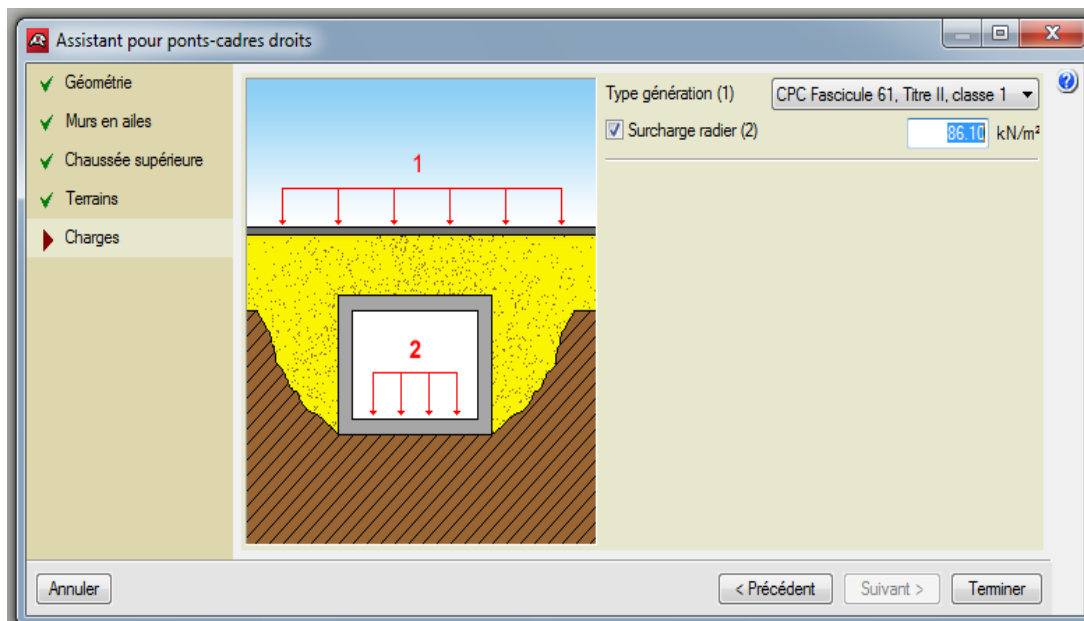


Figure V-10 Les charges sur le radier et la chaussée

La fiche des données : un résumé des paramètres de génération du pont-cadre s'affiche sur la figure suivante pour la vérification.

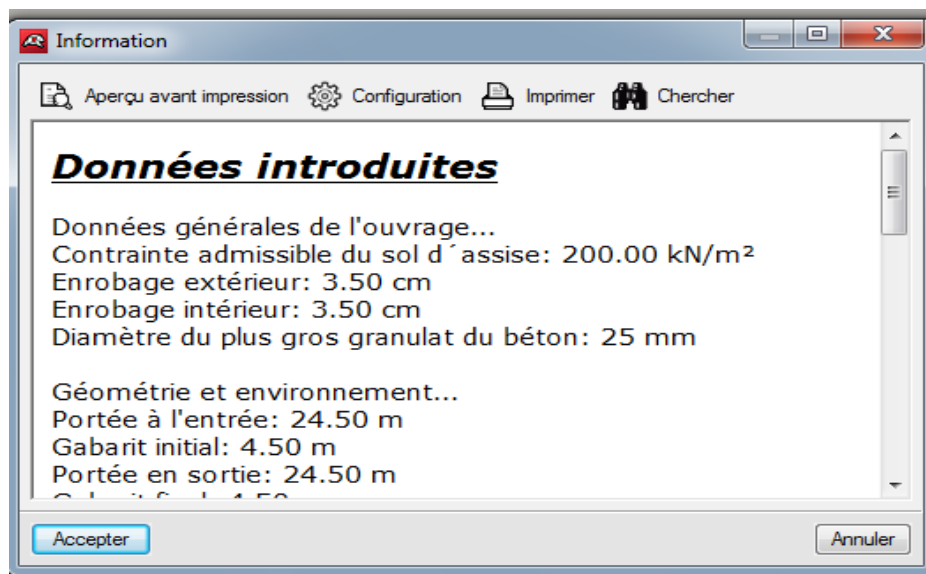
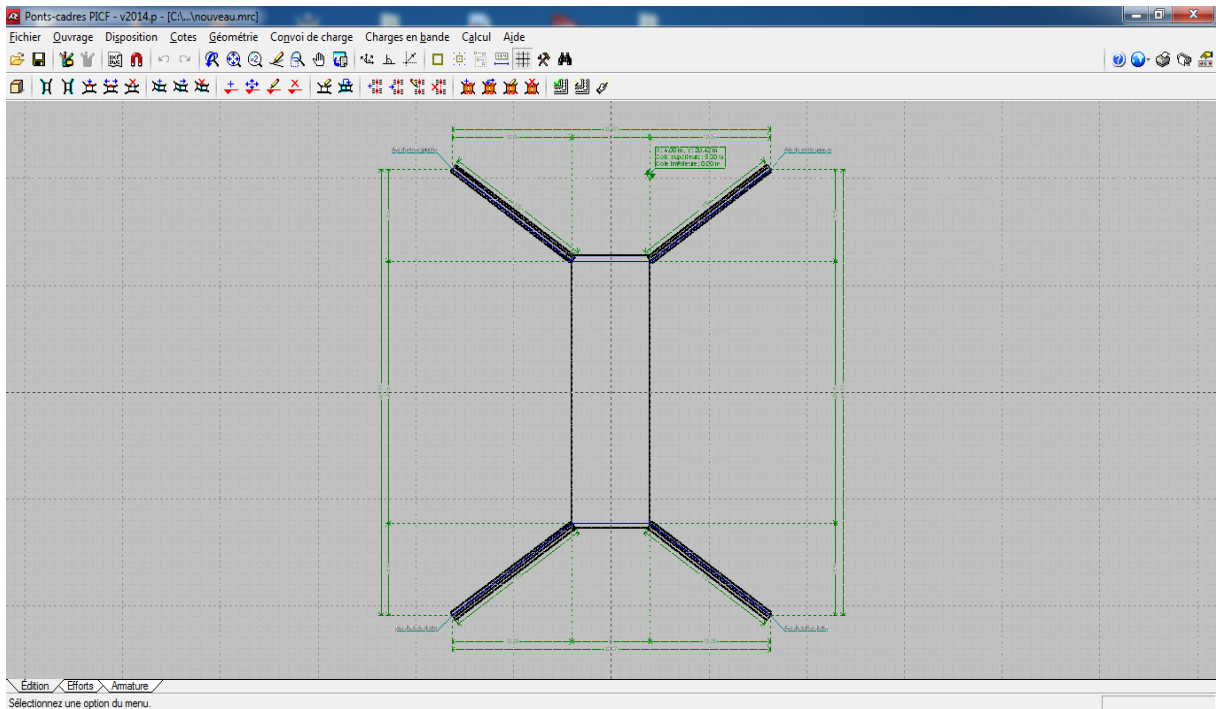


Figure V-11 Fiche des données

Une fois la génération terminée, l'utilisateur peut modifier toutes les données qu'il désire. L'affichage de projet :



FigureV-12 L'affichage de projet

V.17 La modification de l'ouvrage :

Logiciel donne la main dans ce pas pour crier les ouvertures pour notre projet et aussi les épaisseurs des éléments (radier, tablier, les piédroits), et doter cotée la modification des murs en aile pour l'arriver à la géométrie complète de notre ouvrage comme elle est à **la figure V.13,**

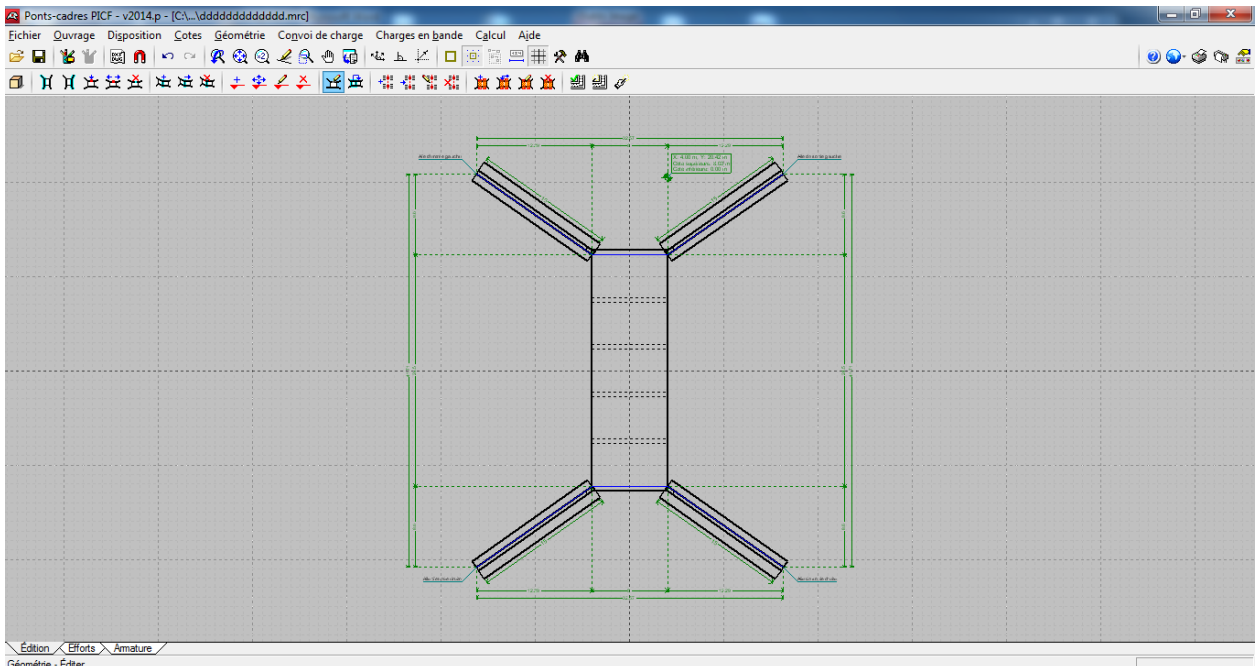


Figure V-13 Modification de l'ouvrage

V.17.1 L'analyse de l'ouvrage:

La définition des matériaux : Logiciel propose les caractéristiques des matériaux, béton et aciers, selon les normes françaises BAEL 91 R 99.

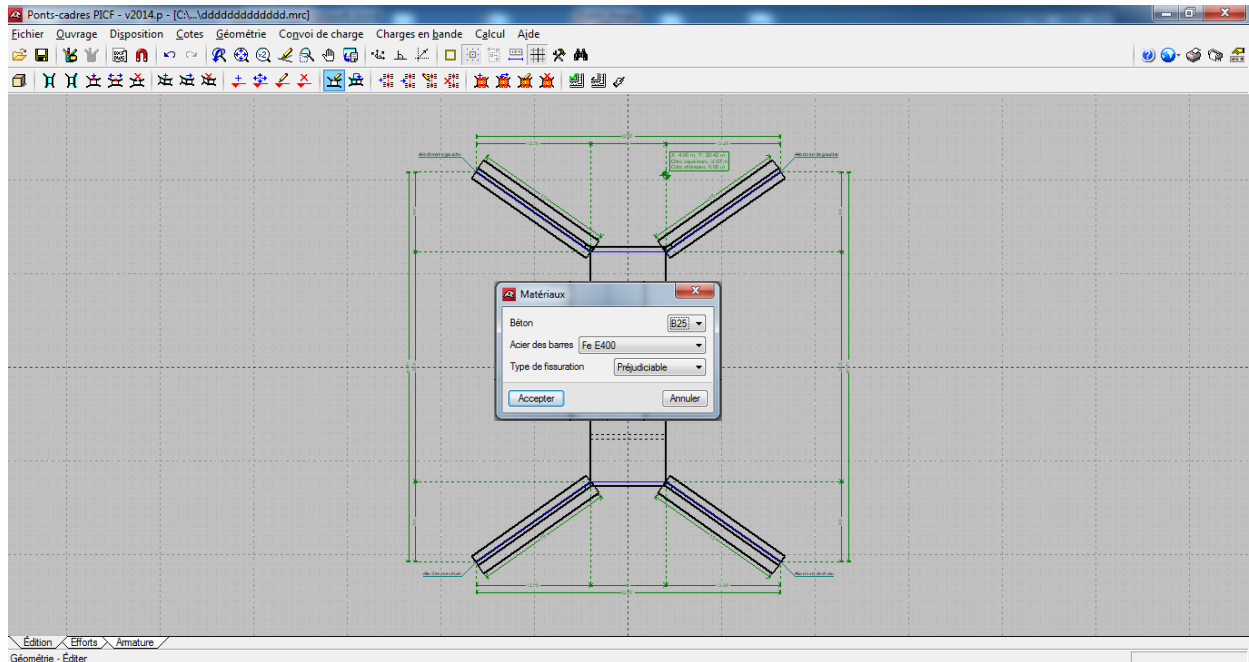


Figure V-14 Définition du matériau

Les données générales sur l'ouvrage :

La fenêtre représente le remplissage des données générales suivantes :

Sur les terrains, le remblai, la géométrie, les charges, les paramètres de béton armé (enrobage diamètre du plus gros granulats).

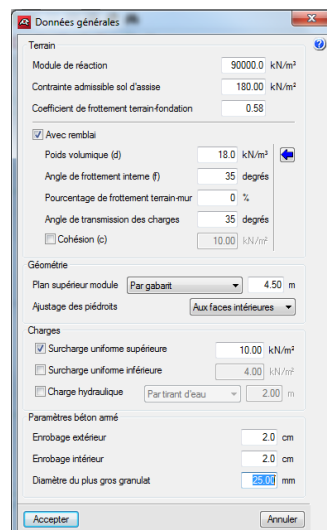
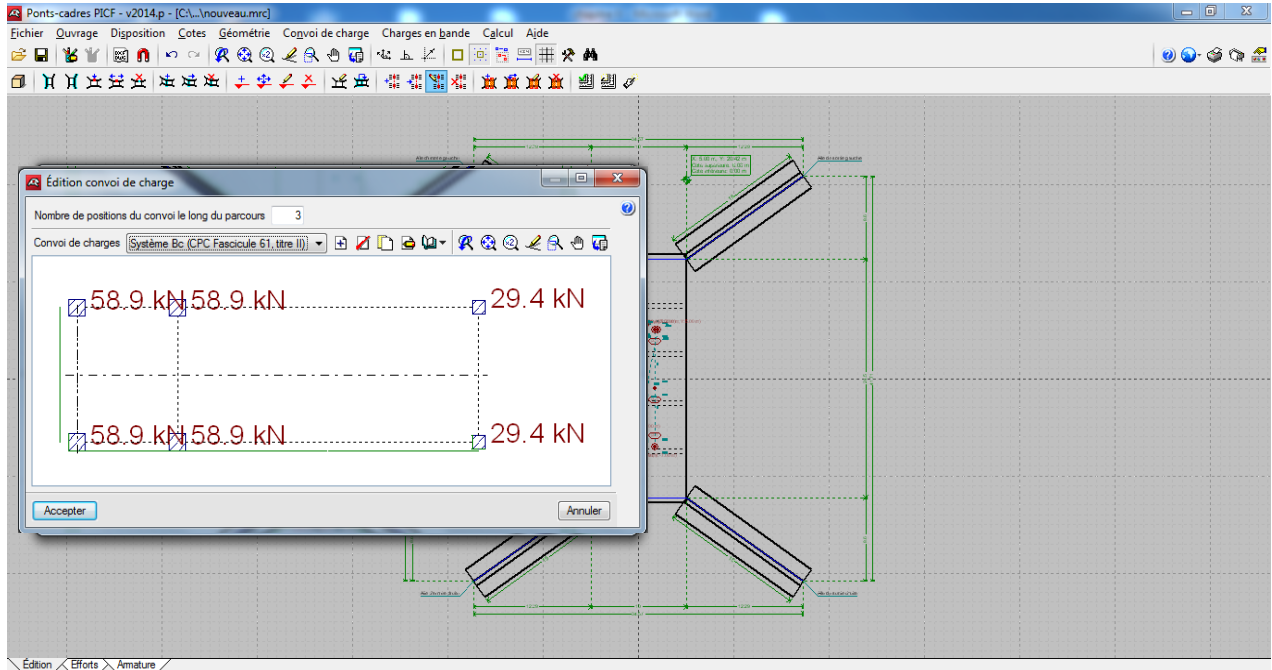


Figure V-15 Données générales.

V.17.2 Introduction des charges et des surcharges:

Les convois de charge (Bc, Bt, Br): L'introduction des charges B selon la norme française fascicule 61 proposée par la bibliothèque de logiciel, ce dernier facilite la modification de la direction, la position des charges et la création de nouvelles surcharges.



FigureV-16 Convois de charge (Bc, Bt, Br).

Charges en bande: Dans le cas des charges en bande, il tient compte de tous les surcharges qui sont sur le tablier comme le remblai et les murs en têtes... etc.

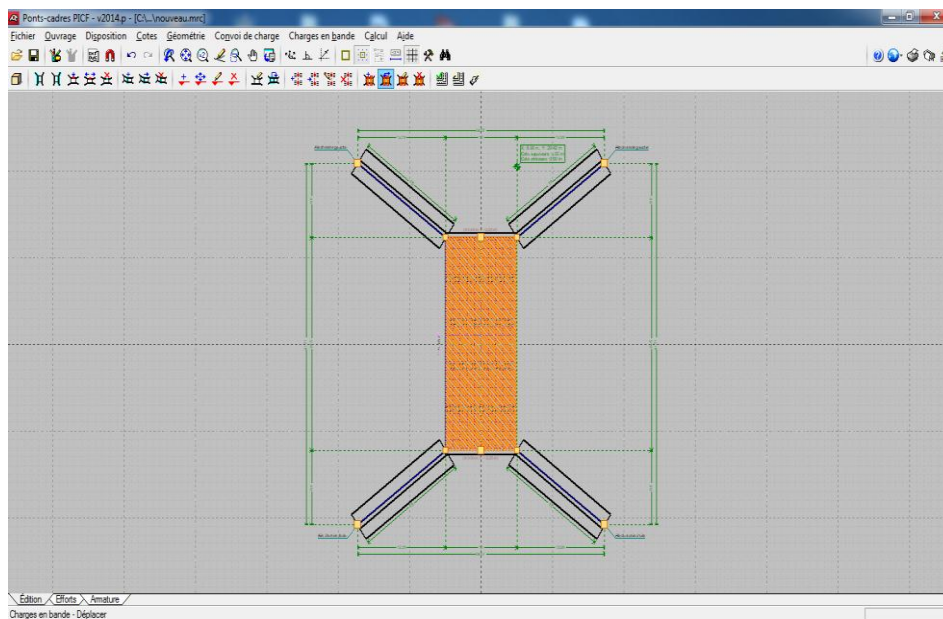


Figure V-17 Charges en bande

V.18 Dimensionnement de l'ouvrage:

Dimensionner l'élément sélectionné, que ce soit le module ou l'aile. Ce dimensionnement consiste en :

1. **Calcul préalable, s'il n'a pas été fait, des déplacements et efforts de l'ensemble du l'ouvrage.**
2. **Dimensionnement de l'armature de l'élément sélectionné.**
3. **Vérification de l'élément sélectionné, avec la possibilité de consulter un récapitulatif des vérifications effectuées. De plus, dans le cas où l'élément en question ne vérifie aucune des conditions, celui-ci sera signalé d'une couleur rouge.**

Dans le cas du module, seule l'armature est dimensionnée, les épaisseurs sont conservées.

Aucune modification de la géométrie n'est réalisée, ce qui implique, par exemple, que les épaisseurs du module sont conservées.

Dans le cas des ailes, l'épaisseur des murs et les dimensions des semelles.

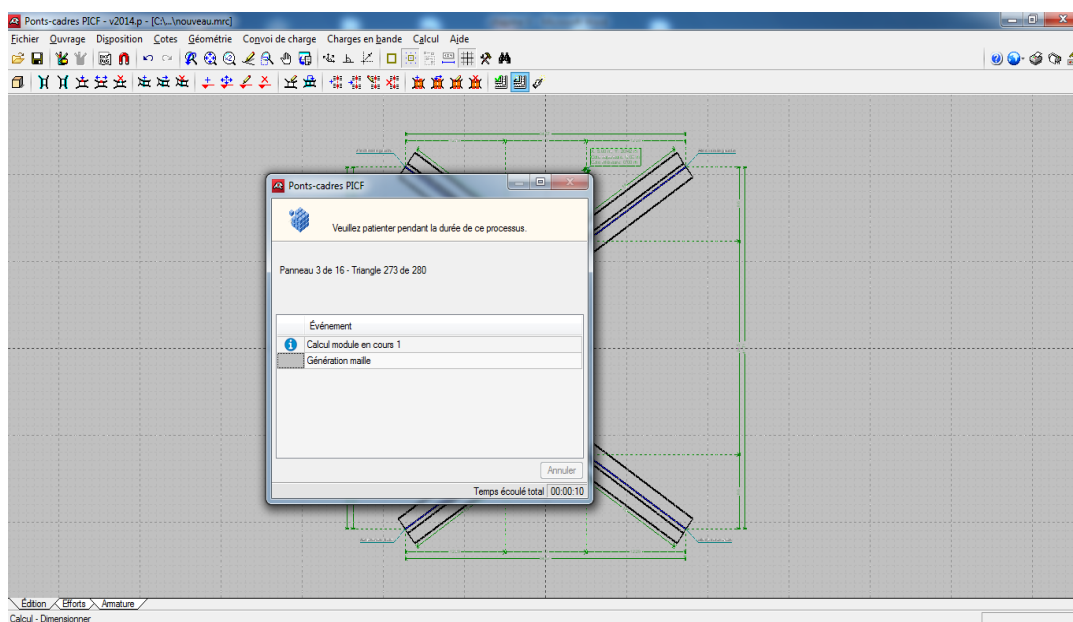


Figure V-18 Dimensionnement de l'ouvrage.

V.18.1 Vérification et dimensionnement final:

Option similaire a 'Calcul > Dimensionner', mais qui réalise le dimensionnement et la vérification de tous les éléments du l'ouvrage.

Référence: Module	Valeurs	État
Vérification		
Tableaux:		
-Armature (Longitudinal):	Vérification à 100%	Vérifiée
-Ratio minimal supérieur:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Ratio minimal inférieur:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Flexion composée moment positif:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Flexion composée moment négatif:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Armature (Transversal):	Vérification à 100%	Vérifiée
-Ratio minimal supérieur:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Ratio minimal inférieur:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Flexion composée moment positif:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Flexion composée moment négatif:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Effort tranchant maximum:	Vérification à 100%	Vérifiée
-Déplacement maximum:	Maximum: 50 mm	Vérifiée
Perpendiculaire au plan du plancher:	Calculé: 2.85 mm	Vérifiée
-Distorsion angulaire maximale:	Minimum: 150	Vérifiée
	Calculé: 15792	Vérifiée
	Minimum: 250	Vérifiée
	Calculé: 1595	Vérifiée
	Calculé: 1578	Vérifiée
	Maximum: 100	Vérifiée
	Calculé: 12	Vérifiée
-Flèche relative:		
-Longitudinal:		
-Transversal:		
-Élancement mécanique:		
-Longueur d'ancrage:		
BAEL-91, Article A.6.1.2		
-Armature de base transversale extérieure:	Minimum: 29 cm	Vérifiée
	Calculé: 29 cm	Vérifiée
-Armature de base transversale intérieure:	Minimum: 22 cm	Vérifiée
	Calculé: 22 cm	Vérifiée
-Armature de base longitudinale extérieure:	Minimum: 88 cm	Vérifiée
	Calculé: 88 cm	Vérifiée
-Armature de base longitudinale intérieure:	Minimum: 88 cm	Vérifiée
	Calculé: 88 cm	Vérifiée

Figure V-19 Dimensionnement final.

V.18.3 La présentation de déformation:

Le logiciel donne l'affichage de déformation comme un changement de couleur par rapport de chargement sollicitée et la comparaison avec une bonde aux dessous de la fenêtre.

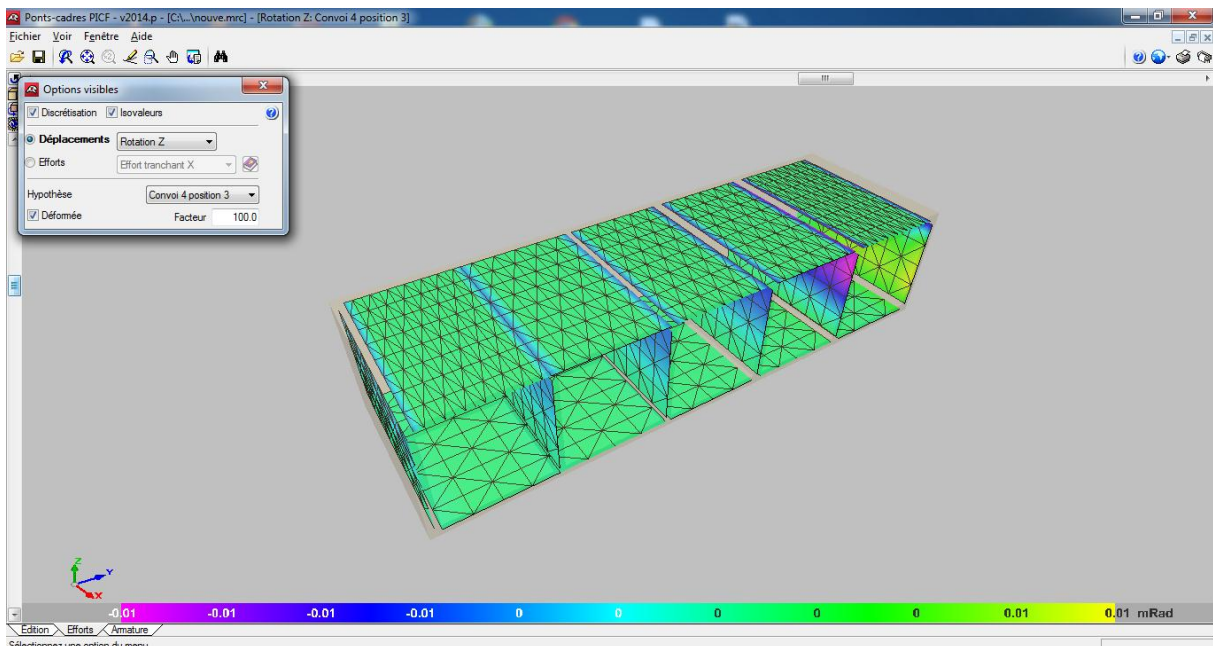


Figure V-20 Présentation de déformation.

V.18.4 Le ferrailage proposé par le logiciel:

Le logiciel propose un plan de ferrailage en fonction des résultats du dimensionnement. Mais il est possible de modifier ce ferrailage, c'est-à-dire modifier les diamètres proposés en baisse ou en hausse. Il faut savoir qu'il est impossible de modifier la disposition des aciers. Pour pouvoir le faire, la seule alternative est celle de la version exportée.

Il faut noter que PICF-CYPE propose un ferrailage optimal après le calcul des différentes sollicitations auxquelles le dalot est soumis.

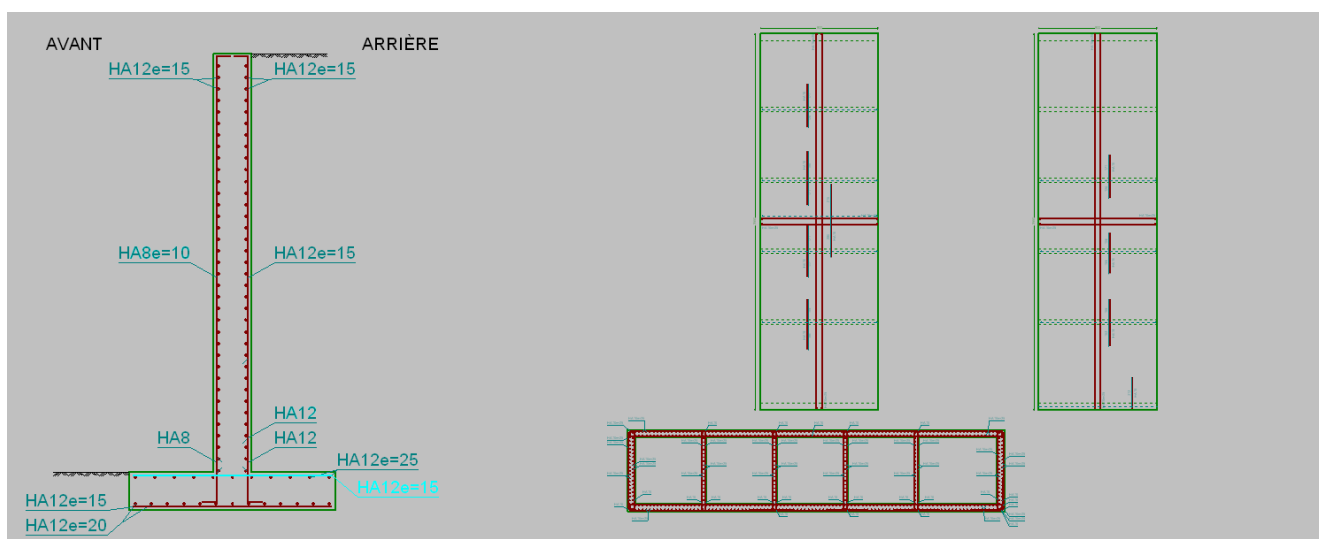
En ce sens que le prix de l'acier varie en fonction du diamètre, donc plus on a un nombre important de gros diamètres, plus on dépensera plus pour les aciers.

Plan de ferrailage des éléments de l'ouvrage:

Les résultats de ferrillages fournis par le logiciel PICF-CYPE sous forme des tableaux détaillés sont dans l'annexe.

Résumé de ferrillage des modules:

Les résultats de ferrillage des différents modules sont représentés sur **Tableau V.21** ci-dessous.



FigureV-21: Plans de ferrillage

Plan de ferrillage des éléments de l'ouvrage:

Les résultats de ferrillages fournis par le logiciel PICF-CYPE sous forme des tableaux détaillés sont dans l'annexe.

V.18.5 Résumé de ferrailage des modules:

Les résultats de ferrailage des différents modules sont représentés sur **Tableau V.4** ci-dessous.

Tableau V. 4: Résultats des ferrailages pour le module.

	Position	Direction	Choix	Espacement
Radier	Supérieur	Longitudinal	HA16	25
		Transversal	HA16	25
	Inférieur	Longitudinal	HA16	20
		Transversal	HA16	20
Tablier	Supérieur	Longitudinal	HA16	15
		Transversal	HA16	15
	Inférieur	Longitudinal	HA16	20
		Transversal	HA16	20
Piédroits extrêmes	Arrière	Vertical	HA16	20
		Horizontal	HA16	20
	Avant	Vertical	HA16	20
		Horizontal	HA16	20
Piédroits intermédiaires	Gauche	Vertical	HA16	25
		Horizontal	HA16	25
	Droite	Vertical	HA16	25
		Horizontal	HA16	25

V.18.6 Résumé de ferrailage de murs en ailes:

Le ferrailage pour les murs en ailes nous avons le même ferrailage représentés sur

Tableau V. 5: Résumé de ferrailage de murs en ailes.

	Position	Direction	Choix	Espacement
Mur en ail	Horizontal	Inf.	HA12	15
		Sup	HA12	15
	Vertical	AR	HA12	15
		AV	HA8	10
Semelle	Transversal	Inf.	HA12	15
		Sup	HA12	25
	Longitudinal	Inf.	HA12	20
		Sup	HA12	15

Les plans de ferrailage des différents constituants de l'ouvrage à savoir : Tablier, Radier, Piedroits, Murs en ailes, sont représenté sur **l'annexe**.

V.18.7 Coffrage et ferrailage de Guide Roue :

Le guide roue c'est élément terminal qui figure aux bords de l'ensemble des voies routiers et pour le ferrailage de cet élément on adopte les valeurs courantes.

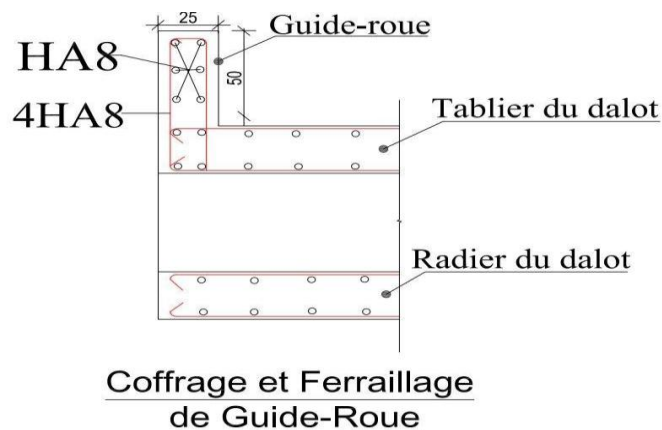


Figure V-22 Coffrage et ferrailage de Guide Roue

V.19 Les avantages du logiciel PICF-CYPE:

Vue les résultats obtenus par le dimensionnement avec le logiciel, nous pouvons déduire comme avantages les éléments suivants :

- ❖ Point de vue économie : en ce qui concerne ce point, nous avons constaté qu'avec le logiciel on économise en temps et en coût. En ce sens que nous avons besoin de moins d'une dizaine de minute pour établir une note de calcul d'un dalot.
- ❖ Point de vue fiabilité : les résultats obtenus par le dimensionnement avec le calcul manuel sont à quelques valeurs près, similaires. Cette similarité nous laisse dire que le logiciel donne des résultats fiables. Car avec le calcul manuel nous avons tendance à sur dimensionner pour se mettre à l'abri ou du moins pour aller dans le sens de la sécurité. De plus avec la méthode de calcul utilisé, le logiciel donne des résultats à partir des calculs minutieux donc fiables.

V.20 Les inconvénients du logiciel:

Il a été constaté que logiciel ne prends pas en compte certains paramètres comme les charges thermiques, les charges de freinage et l'action des séismes.

Certes, les principes de calcul et de fonctionnement du logiciel ont été donnés mais cela ne suffit pas à l'utiliser. C'est dans le but de connaître d'avantage le logiciel et dans le souci de mieux l'utiliser afin de donner des résultats fiables, un cheminement pour dimensionner un ouvrage quelconque avec PICF-CYPE a été proposé.

Conclusion :

D'après le travail qui est fait sur le logiciel en à conclure que logiciel et facile d'utilisée et qan tienne plusieurs avantages c'est pour sa logiciel c'est un bonne avantage pour le calcul des dalots et les ponts cadre.

VI Conclusion générale

Conclusion générale :

L'établissement du projet de fin d'étude nous a permis de mettre à l'épreuve deux aspects fondamentaux de notre future profession d'ingénieur :

La première constatation est purement technique car nos valeurs et capacités de calcul ont toujours été exigées. C'est à travers nos recherches et information que nous avons pu prendre en charge certains problèmes techniques qui nous l'espérions ont abouti.

Les aspects les plus cruciaux résident dans le choix des données en entrée servant aux différents calculs et l'analyse des résultats fournis, soit par calcul manuel, soit à l'aide d'un logiciel.

Le second constat concerne en général l'ingénieur et son environnement. Notre projet nous a permis de prendre conscience que l'ingénieur civil n'est pas le seul acteur d'un projet de construction.

Le choix de l'ouvrage est basé sur les critères énumérés ci-haut mais le critère le plus déterminant sur lequel nous nous sommes basés pour faire le nôtre est celui du coût car l'ouvrage peut être joli, facile à mettre en œuvre, respectueux de l'environnement mais son coût, s'il est exorbitant, peut constituer un handicap dans son choix.

C'est pourquoi, notre choix s'est porté sur la construction d'un dalot de 05 ouvertures, de 4.50 mètres d'ouvertures et 4.50 mètres de hauteur .

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

ROUTE

B40 : guide technique d'aménagement des routes et autoroutes Ministère des travaux publics.

OUVERAGE

Ponts-cadres et portiques R Guide de Conception (Sétra 1992 - F9246).

Fascicule N° 61 Titre II.

Règles B.A.E.L 91 règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en bétons armés, suivant la méthode des états limites.

Cours de pont.

Cours de béton.

Cahier des prescriptions communes (fascicule 61 titreII)

Mémoire Yifourzoua Sébastien BAYALA dans l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et l'Environnement au Burkina Faso Promotion 2011 -2012.

LOGICIELS TECHNIQUES:

MAPLE 18

Covadis 10.1

CYPECAD 2014

AutoCAD Civil 3D v2015.

SITES WEB:

www.cype.fr

www.legeniecivil.fr

ANNEXE A

Devis quantitatif et estimatif

N°	DESIGNATION DES TRAVAUX	U	QUANTITE	PU	MONTANT
1	Fouilles en tranché et grand masse	M3	350	350.00	122,500.00
2	Mise en place du gabion de renforcement et protection	M3	800	3,000.00	2,400,000.00
3	Béton armé pour ouvrage dosé à 400 kg/m3	M3	220	40,000.00	8,800,000.00
4	F,P, garde corps en acier y compris peinture	ML	50	2,000.00	100,000.00
5	Remblais en tuff y compris compactage	M3	500	750.00	375,000.00
				Tot HT	11,797,500.00
				TVA 17%	2,005,575.00
				Tot TTC	13,803,075.00

Arrêter la somme du devis à la somme *de* **Treize millions huit cent trois mille soixante-quinze Dinars Algérien**