



Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 69 et la Pile-Culée 72 (Côte d'Ivoire)

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ Génie Civil – Bâtiment et Travaux Publics

Présenté et soutenu publiquement le 25/01/2024 par

Berthe GOUMENI NZEUGA (20200769)

Encadrant 2iE : Dr. Decroly DJOUBISSIÉ, Enseignant-Chercheur, Département Génie Civil, Institut 2iE

Maître de stage : M. Victor GIMOU, Ingénieur Génie civil, Cabinet B.S.E Consulting Sarl

Structure d'accueil du stage : Cabinet B.S.E Consulting Sarl

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dial NIANG

Membres : Césaire HEMA

Kader BANAOU DJIBO

Promotion [2023/2024]

Dédicace

Aux grandes familles TCHI-TCHI et KONDA,

Pour leurs divers soutiens et accompagnements durant ma formation.

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le Seigneur, pour tous ses bienfaits qui ont menés à réalisation de mes études et par ricochet ce travail.

Nos remerciements sincères vont également aux personnes physiques ou morales qui suivent :

- ✚ Monsieur le Directeur Général de l'Institut 2iE, ainsi que tous ses collaborateurs de l'administration, pour leur accompagnement sans faille chaque fois qu'il était nécessaires ;
- ✚ Le personnel du département de Génie Civil de l'Institut 2iE, pour leur accompagnement infailible lors de ma formation ;
- ✚ Docteur Decroly DJOUBISSIE DENOUWE, Enseignant-chercheur à l'Institut 2iE, pour ses conseils et accompagnement lors de la rédaction de ce mémoire ;
- ✚ Monsieur Victor GIMOU, Ingénieur consultant à B.S.E, mon encadreur professionnel pour suivi impeccable et toutes les connaissances qu'il a pris soin de bien me faire assimilé ;
- ✚ Le personnel de B.S.E, pour l'esprit de travail conviviale au sein de la structure ;
- ✚ La grande famille TCHI-TCHI, pour leur soutien moral comme financier qui m'ont aidé à aboutir à ce travail ;
- ✚ La grande famille KONDA, pour leurs accompagnement et conseils qui m'ont aidé lors de ma formation ;
- ✚ Tous mes camarades de promotion à l'Institut 2iE, pour les échanges constructifs qui m'ont aidé lors de ma formation ;
- ✚ Tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

La ville d'Abidjan est située au sud de la Côte d'Ivoire et est constituée d'une population majoritairement jeune et croissante, dans le souci de fluidifier le déplacement de cette population, le gouvernement ivoirien a mis sur pied un ensemble de projet de construction des routes et ouvrages d'arts, spécifiquement le pont dalle en continuité du 4^{ème} pont d'Abidjan. Le calcul numérique détient une place importante dans l'ingénierie moderne, il est difficile de concevoir l'importance de revenir aux fondamentaux du calcul analytique, notamment pour le dimensionnement des ouvrages tel que les ponts. C'est dans cette perspective que la problématique de ce mémoire a émergé, consistant à légitimer le dimensionnement du tablier d'un pont par les méthodes de calculs analytiques, étant donné que l'accès aux logiciels de dimensionnement est souvent limité et que leurs coûts peuvent être prohibitifs. Cette méthode de calcul permettra aux petites et moyennes entreprises (PME) de réduire leurs coûts de maîtrise d'œuvre, les rendant ainsi plus compétitives lors de la soumission d'offres pour des marchés publics, les logiciels de dimensionnement ayant une accessibilité réduite et leurs coûts pouvant être très élevés. Ce travail s'est articulé en trois étapes majeures afin d'illustrer, la méthodologie du calcul analytique pour le dimensionnement du tablier du OA13 du pont-dalle. Tout d'abord, le choix d'un tablier dalle en **béton précontraint** a été justifié par rapport à d'autres types de structures. La conception permet d'obtenir une épaisseur de **80 cm** du tablier à partir de l'axe, avec une largeur de chaussée variant de **15,46 m à 10,40 m** pour deux voies de **3,5 m** chacune. En second lieu, la démarche de dimensionnement structurel s'est déroulée en utilisant la méthode des foyers, qui considère les lignes et les surfaces d'influence pour évaluer les éléments de réduction. Enfin, les résultats des calculs ont révélé une valeur maximale de l'effort de précontrainte de **21,57 MN**, nécessitant l'utilisation de **23 câbles** de précontrainte de type **7T15**. Au terme de l'étude il a été proposé une notice d'EIES, qui présente un PGES visant à réduire les risques négatifs du projet sur les populations et l'environnement, et évaluer le coût partiel de notre ouvrage d'étude qui est **328 764 928 F CFA TTC**.

Mots clés :

- 1 - Précontrainte
- 2 - Pile-Culée
- 3 - Inertie variable
- 4 - Ligne d'influence
- 5 - Méthode des Foyers

Abstract

The city of Abidjan is located in the south region of Côte d'Ivoire and is made up of a mainly young and growing population, in order to facilitate the movement of this population, the government of Côte d'Ivoire has set up a set of projects for the construction of roads and engineering structures, specifically the slab bridge in continuity with the 4th bridge of Abidjan. Numerical calculation holds an important place in modern engineering, it is difficult to conceive the importance of returning to the fundamentals of analytical calculation, especially for the design of structures such as bridges. It is in this spirit that the problematic of this dissertation emerged, consisting in legitimizing the dimensioning of the bridge deck by analytical calculation methods since access to dimensioning software is often limited and its costs can be prohibitive. This study aims to enable small and medium-sized enterprises (SMEs) to reduce their project management costs, thus making them more competitive when submitting bids for public contracts, as dimensioning software has limited accessibility and can be very expensive. This work was divided into three major steps in order to illustrate the methodology of the analytical calculation for the design of the deck of the OA13 of the slab bridge. First of all, the choice of a **prestressed concrete** slab deck was justified compared to other types of structures. The design allows for a deck thickness of **80 cm** from the centerline, with a pavement width varying from **15.46 m** to **10.40 m** for two lanes of **3.5 m** each. Secondly, the structural design process was carried out using the foyer's method, which considers the lines and surfaces of influence to evaluate the reduction elements. Finally, the results of the calculations revealed a maximum value of the prestressing force of **21.57 MN**, requiring the use of **23 type 7T15** prestressing cables. At the end of the study, an ESIA notice was proposed, which presents an Environmental and Social Management Plan aimed at reducing the negative risks of the project on people and the environment, and evaluating the partial cost of our study which is **328 764 928 F CFA** all taxes included.

Keywords :

- 1 - Prestressing
- 2 - Pier-abuttement
- 3 - Variable inertia
- 4 - Line of Influence
- 5 - Foyers method

Abréviations et sigles

2iE	: Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
f_{ck}	: Valeur caractéristique de résistance à la compression du béton à 28 jours
APS	: Avant-Projet Sommaire
B.A	: Béton Armé
BDD	: Bande Dérasée de Droite
BDG	: Bande Dérasée de Gauche
BP	: Béton Précontraint
B.S.E	: Bridge Structures Engineering
CC	: Charge concentrée
CV	: Condition Vérifiée
EIES	: Etude d'Impact Environnemental et Social
F CFA	: Franc de la Communauté Financière Africaine
Id	: Identification
M.O	: Maître d'Ouvrage
N°	: Numéro
OA	: Ouvrage d'Art
PABC	: Projet d'Aménagement de la Baie de Cocody
PC	: Pile-Culée
PICF	: Passage Inférieure en Cadre Fermé
PIPO	: Passage Inférieure en Portique Ouvert
PME	: Petite et Moyenne Entreprises
POD	: Portique Ouvert Double
PRAD	: Ponts-routes à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence
PSIBA	: Passage Supérieure ou Inférieure en Dalle Précontrainte
PSIDA	: Passage Supérieure ou Inférieure en Dalle Armée
PSIDN	: Passage Supérieure ou Inférieure en Dalle Nervurée
PSIDP	: Passage Supérieure ou Inférieure en Dalle Précontrainte
SARL	: Société A Responsabilité Limité
SETRA	: Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
TBR	: Très Basse Relaxation
TPC	: Terre-Plein Central

Sommaire

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Abréviations et sigles	v
Sommaire	vi
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xii
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Présentation de la structure d'accueil et du projet.....	2
I.1. Présentation de la structure d'accueil	2
I.2. Localisation de la zone d'étude	3
I.3. Contexte et justification du projet	4
I.3.1. Objectif général de l'étude	5
I.3.2. Objectifs spécifiques de l'étude	5
Conclusion partielle.....	5
Chapitre II. Généralités et justification du choix du type d'ouvrage	6
II.1. Généralités	6
II.1.1. Principaux types de pont courants.....	6
II.1.2. Différentes parties d'un pont.....	7

II.2.	Justification du choix du type d'ouvrage.....	8
II.2.1.	Critères généraux du choix.....	8
II.2.2.	Exigences multicritères de l'APS.....	9
	Conclusion partielle.....	11
Chapitre III.	Conception et étude technique du tablier	12
III.1.	Références, règlements et logiciels utilisés.....	12
III.1.1.	Règlements et documents des prescriptions de bases.....	12
III.1.2.	Logiciels utilisés	12
III.2.	Hypothèses de calcul.....	12
III.2.1.	Contexte général	12
III.2.2.	Matériaux.....	13
III.3.	Prédimensionnement de l'ouvrage retenu.....	14
III.3.1.	Prédimensionnement du tablier	14
III.3.2.	Choix des équipements	16
III.4.	Étude technique du tablier.....	17
III.4.1.	Présentation de l'ouvrage	17
III.4.2.	Évaluation des charges	17
III.4.3.	Étude des sollicitations	19
III.4.4.	Armatures passives	41
	Conclusion partielle.....	46
Chapitre IV.	Notice d'impact environnementale et sociale, et estimation du coût de l'étude	47

IV.1.	Analyses des potentiels impacts.....	47
IV.2.	Mesures d'atténuations, compensation et/ou de bonification	50
IV.3.	Plan de gestion environnementale et sociale	52
IV.4.	Estimation du coût de l'étude.....	54
	Conclusion partielle.....	54
	Conclusion générale et recommandations	55
	Bibliographie.....	56
	Annexes	I

Liste des tableaux

Tableau II-1 : Gammes de portées des ponts courants [2]	8
Tableau II-2 : Exigences multicritères de l'APS.....	10
Tableau III-1 : Choix de largeur de BDD/BDG [2]	15
Tableau III-2 : Récapitulatif des charges permanentes sur le tablier	18
Tableau III-3 : Valeurs caractéristiques référence pour le modèle de charges LM1	19
Tableau III-4 : Formules de calculs des propriétés mécaniques à l'aide des coordonnées	20
Tableau III-5 : Coordonées de points (X,Y) du contour de la section du tablier	21
Tableau III-6 : Calcul sections géométriques de la section 0,05l de la travée 1	22
Tableau III-7 : Récapitulatif des sections géométrique de la section 0,05l de la travée 1	22
Tableau III-8 : Données du calcul des constantes mécaniques	24
Tableau III-9 : Résultats du calcul des constantes mécaniques pour chaque travée	24
Tableau III-10 : Tableau récapitulatif des coefficients de répartition transversale	27
Tableau III-11 : Résultat du calcul de l'effort de précontrainte estimée de la section 0,05l du tablier 1	31
Tableau III-12 : Résultat du calcul de l'excentricité de la section 0,05l de la travée 1.....	32
Tableau III-13 : Choix du type de câble.....	33
Tableau III-14 : Calcul nombre de câble de précontrainte.....	33
Tableau III-15 : Calcul des pertes par frottement section 0,05l de la travée 1.....	34
Tableau III-16 : Calcul des pertes par rentrée d'ancrage	35
Tableau III-17 : Pertes par raccourcissement instantanée du béton section 0,05l de la travée 135	
Tableau III-18 : Calcul des pertes dues au retrait du béton.....	36

Tableau III-19 : Calcul des pertes dues à la relaxation des armatures	36
Tableau III-20 : Calcul des pertes dues au fluage du béton	37
Tableau III-21 : Calcul de l'effort de précontrainte finale Pd.....	38
Tableau III-22 : Vérification des contraintes section 0,05l de la travée 1.....	39
Tableau III-23 : Détermination des contraintes à 0,5l de la travée 1	41
Tableau III-24 : Détermination de la section d'armature longitudinale en travée	43
Tableau III-25 : Détermination des contraintes en appui 1	44
Tableau III-26 : Détermination de la section d'armature longitudinale sur appuis	45
Tableau IV-1 : Matrice d'analyse des sources d'impacts[8].....	48
Tableau IV-2 : Mesures d'atténuations, compensation et/ou de bonification.....	50
Tableau IV-3 : Plan de gestion environnementale et sociale	52
Tableau IV-4 : Devis estimatif de l'étude	54
Tableau 0-1 : Résultats caractéristiques géométriques des sections des travées.....	III
Tableau 0-2 : Données pour le calcul du coefficient de répartition transversale k	XXIII
Tableau 0-3 : Récapitulatif des résultats du coefficient répartition transversale pour chaque bande	XXIV
Tableau 0-4 : Tableau des données nécessaires au calculs des moments et des efforts tranchants	XXXIII
Tableau 0-5 : Résultats du calcul des moments de l'appui 0 à l'appuis 1.....	XXXIV
Tableau 0-6 : Résultats du calcul des moments de la section 0,05l à 0,95l de la travée 2	XXXVI
Tableau 0-7 : Résultats du calcul des moments de l'appui 2 à l'appui 3	XXXVIII
Tableau 0-8 : Résultats du calcul des efforts tranchant de l'appui 0 à l'appuis 1	XL

Tableau 0-9 : Données d'entrées pour le calcul de la précontrainte estimée de l'appui 1 à l'appui 2.....	XLIV
Tableau 0-10 : Données d'entrées pour le calcul de la précontrainte estimée de la travée 2	XLVI
Tableau 0-11 : Données d'entrées pour le calcul de la précontrainte estimée de l'appui 2 à l'appui 3.....	XLVII
Tableau 0-12 : Précontrainte estimée et son excentricité de l'appui 0 à l'appui 1	XLIX
Tableau 0-13 : Précontrainte estimée et son excentricité travée 2	LII
Tableau 0-14 : Précontrainte estimée et son excentricité de l'appui 2 à l'appui 3.....	LIV
Tableau 0-15 : Vérification des contraintes de l'appui 1 à l'appui 2	LXI
Tableau 0-16 : Vérification des contraintes sur la travée 2	LXIV
Tableau 0-17 : Vérification des contraintes de l'appui 2 à l'appui 3	LXVI
Tableau 0-18 : Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 0	LXXI
Tableau 0-19 : Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 1	LXXIII
Tableau 0-20 Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 2	LXXV
Tableau 0-21 : Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 3	LXXVII
Tableau 0-22 : DQE du tablier de l'OA13	LXXX

Liste des figures

Figure I-1 : Carte de situation géographique du projet	3
Figure I-2 : Grahique climatique Abidjan (Côte d'Ivoire) [1]	4
Figure II-1 : Représentation des différentes parties d'un pont.....	7
Figure III-1 : Abaque choix d'épaisseur de dalle pleine à trois travées[3]	15
Figure III-2 : Coupe transversale du tablier à la section PC 72	17
Figure III-3 : Contour géométrique de la dalle.....	20
Figure III-4 : Ligne d'influence du moment fléchissant d'une poutre hyperstatique[5].....	26
Figure III-5 : Courbe enveloppe des moments min et max sous charges maximale.....	28
Figure III-6 : Courbe enveloppe de l'effort tranchant min et max.....	28
Figure III-7 : Contraintes limites dans la fibre supérieure et inférieure d'une section	29
Figure III-8 : Excentricité du câble de précontrainte	32
Figure III-9 : Evolution perte par rentrée d'ancrage	34
Figure III-10 : Fuseau de passage, cas où la section la plus sollicitée est sur-critique	40
Figure III-11 : Diagramme des contraintes dans la section 0,5l de la travée 1	42
Figure III-12 : Diagramme des contraintes dans la section 1,0l de la travée 1 (Sur appui 1) ..	45

Introduction générale

Dans le but de fluidifier les déplacements des populations dans la ville d'Abidjan, notamment entre les communes de Yopougon et du Plateau, le gouvernement ivoirien a mis sur pied un programme d'amélioration de son réseau routier, à travers la construction d'un pont dalle constitué de 17 tabliers, les ouvrages débutant à l'Est de la culée C23 du pont de Boribana jusqu'aux ouvrages prévus par le PABC au rond-point de l'Indénié. Il a été demandé par le M.O de concevoir et dimensionner, le tablier du pont dalle en béton précontraint en continuité du 4^{ème} pont d'Abidjan. Ce travail sera consacré à l'étude de l'OA13, qui franchit le boulevard de la République, et se situe entre le tablier de la PC69 et la PC72.

Les ponts sont des ouvrages d'art de grande valeur qui permettent de franchir les obstacles et, au fil des siècles divers types ont vu le jour. Les méthodes de dimensionnement de ces ouvrages ont également évolué, ayant à cœur d'améliorer le travail des ingénieurs, le calcul analytique a en partie cédé sa place au calcul numérique pour la plupart. Les logiciels de dimensionnement tels que RFEM, Pythagore, CSiBridge, Robot Structural Analysis etc, facilitent énormément le dimensionnement des ouvrages, cependant ils ne doivent pas substituer le calcul analytique, car pour une meilleure certitude de résultats de calcul, tout calcul numérique doit être corroboré par un calcul analytique. L'enjeu majeur de la conception d'une structure en génie civil est la recherche d'une plus-value économique et technologique. La ville d'Abidjan étant en plein essor économique, il nous offre un cas d'étude innovant où est prévu un pont dalle à inertie variable. Il est challengeant de démontrer les avantages que pourraient offrir le dimensionnement analytique.

Le plan de ce document s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre présentera sommairement la structure d'accueil, et situera la problématique et le contexte de cette étude. Le second chapitre rappellera des généralités sur les ponts courants et présentera l'analyse multicritère pour justifier le type de pont choisi. Le troisième chapitre se concentrera sur la conception et le dimensionnement du tablier. Le dernier chapitre, présentera une notice d'impact environnementale et sociale.

Chapitre I. Présentation de la structure d'accueil et du projet

I.1. Présentation de la structure d'accueil

Le Cabinet Bridge Structures Engineering Consulting, est un bureau d'étude en génie civil créé en Décembre 2010. Le Cabinet a pour raison sociale la SARL et est géré par M. Steve William AZEUMO.

Le Cabinet B.S.E Consulting a pour objet en République du Cameroun et dans les autres États de la zone CEMAC ou CEDEAO d'apporter tout types d'assistance en ingénierie conseil de Génie Civil, spécifiquement en Ouvrage d'Art, et Ouvrages Hydrauliques notamment :

- L'établissement des dossiers d'appel d'offre pour le compte des Maitres d'Ouvrages ;
- Le contrôle des travaux ;
- L'établissement des dossiers d'exécution pour le compte des entreprises de génie civil ;
- L'assistance et le conseil à la soumission aux appels d'offres pour le compte des entreprises de travaux ;
- La fourniture et la mise en œuvre de matériel et procédés d'exécution spéciaux, pour le compte des entreprises de travaux.

Le Cabinet B.S.E Consulting a intervenu/intervient dans plusieurs projets notamment ;

- Une sous-traitance pour le bureau d'étude INTEGC : Projet de bitumage de certaines routes de la région du centre, tronçons AWAE – ESSE – NKOTENG et ESSE – SOA ;
- Une étude d'Avant-Projet Détaillé, et production du rapport APD, de 04 ponts (Pont sur la rivière Afamba – 14 m d'ouverture, Pont sur la rivière Assamba – 12 m d'ouverture. Pont sur la rivière Nia – 12 m d'ouverture et Pont sur la rivière Zoui – 11 m d'ouverture ;
- Une sous-traitance pour l'entreprise Matière S.A.S : Études d'exécution des ponts sur les rivières MVI (longueur -100,80 m), NKROUP (longueur – 24,90 m) et MAPE (longueur – 78,10 m) dans le cadre du projet d'aménagement

projet d'aménagement progressif de l'itinéraire Fouban Tibati N'Gaoundéré, tronçon MANKI Pont de la MAPPE.

I.2. Localisation de la zone d'étude

I.2.1.1. Situation géographique

Le tablier concerné par l'étude est relié au 4^{ème} pont d'Abidjan et se trouve dans la région du sud de la Côte d'Ivoire, enjambant les communes d'Adjamé, de Yopougon et du Plateau. L'ouvrage de l'étude franchit le boulevard de la République.

La Figure I-1 présente la localisation du site du projet.

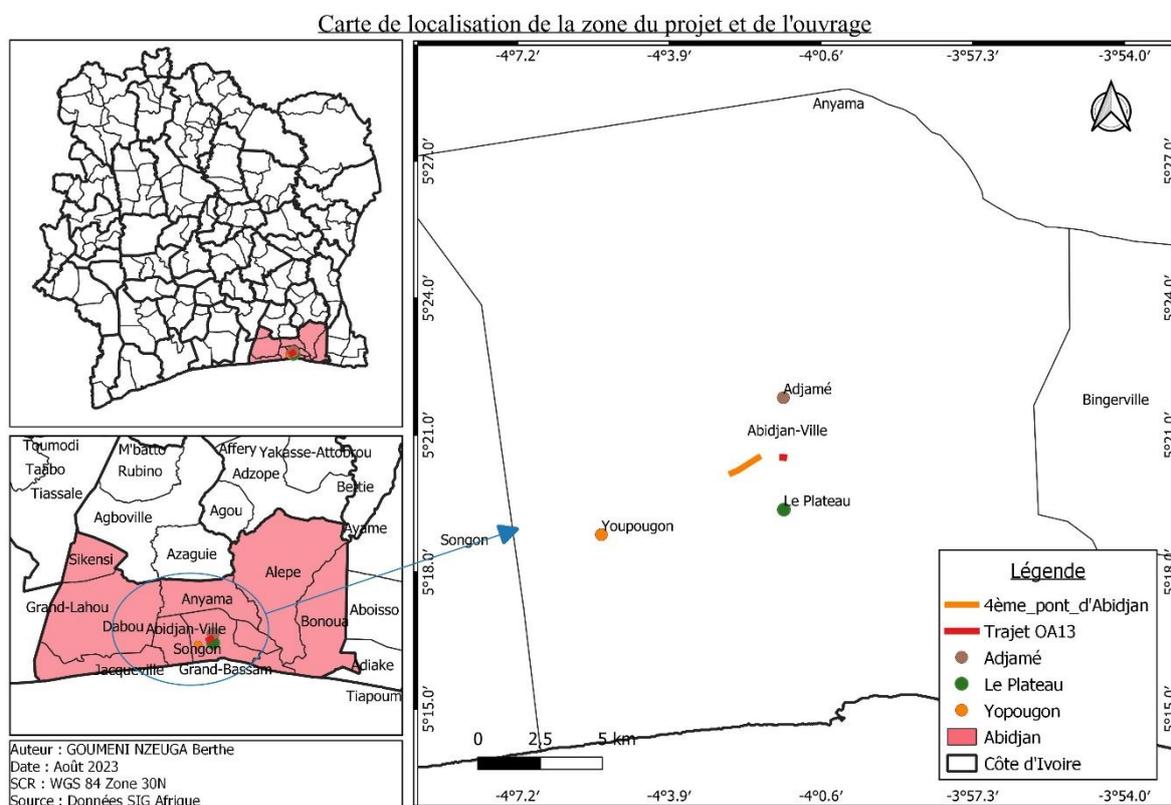


Figure I-1 : Carte de situation géographique du projet

I.2.1.2. Végétation et relief

La végétation dans la région lagunaire du domaine guinéen et du secteur ombrophile, principalement constituée de Mangroves, plantes aquatique invasives et de cultures agro-industrielles. Le climax dominant est la forme sempervirente de la forêt dense humide, on y rencontre diverses espèces de flore notamment ; Diospyros spp., Trichilia heudelotii,

Turraeanthus africanus, Uapaca guineensis, U. esculenta, Trichilia lanata, Terminalia ivorensis, Ricinodendron heudelotii, Combretodendron macrocarpum.

I.2.1.3. Climat

Le climat dans le district d'Abidjan offre généralement deux saisons, une saison de pluie (de Mars à Novembre) avec une hauteur moyenne de précipitation 1434,9 mm sur une période des 20 dernières années, et une saison sèche (allant de Décembre à Février). Notre zone d'étude a un climat tropical humide avec des températures moyenne de l'air de 24 à 33°C.

La figure suivante présente les températures moyennes pour chaque mois de l'année dans la ville d'Abidjan.

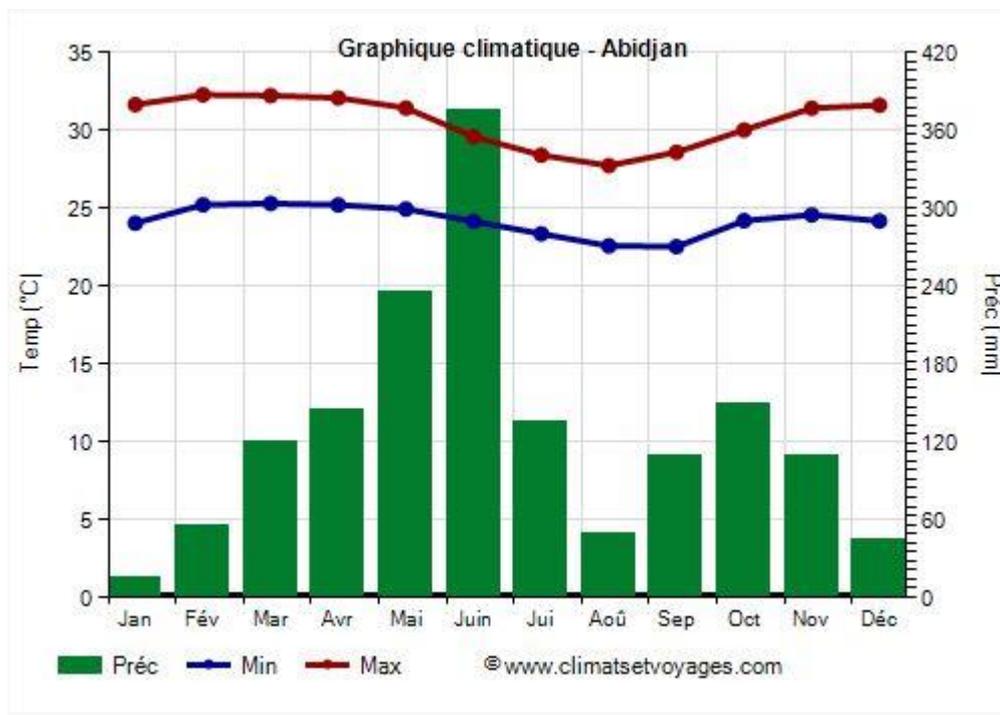


Figure I-2 : Grahique climatique Abidjan (Côte d'Ivoire) [1]

I.3. Contexte et justification du projet

Dans le cadre de ce projet, il a été demandé de concevoir et dimensionner de manière analytique, le tablier du pont dalle en continuité du 4^{ème} pont d'Abidjan. Le pont dalle est constitué de 17 tabliers, les ouvrages débutant à l'Est de la culée C23 du pont de Boribana jusqu'aux ouvrages prévus par le PABC au rond-point de l'Indénié. Ce travail sera consacré à l'étude de l'OA13, qui franchit le boulevard de la République, et se situe entre le tablier de la PC69 à la PC72. Les logiciels de dimensionnement en BP ayant des coûts exorbitants et étant difficile d'accès par

certaines entreprises. Il est important d'assister les PME du génie civil à pouvoir dimensionner les ouvrages en BP, et offrir la possibilité à certain de vérifier et contrôler le calcul numérique par un calcul analytique (Exemple : Élément fini linéique, surfacique ou volumique).

La réalisation de l'étude vise à :

- Justifier le choix du type de tablier ;
- Concevoir et dimensionner le tablier ;
- Présenter la démarche et résultats du calcul analytique d'un ouvrage en BP.

I.3.1. Objectif général de l'étude

L'objectif de l'étude est de proposer une conception et une étude technique analytique du tablier de l'OA13 du pont dalle.

I.3.2. Objectifs spécifiques de l'étude

- Faire une justification du choix du type d'ouvrage (tablier) ;
- Faire une étude structurelle analytique du tablier du pont ;
- Produire les plans d'exécution de l'ouvrage (tablier).

Conclusion partielle

A la fin de ce chapitre, la structure d'accueil, le Cabinet Bridge Structures Engineering Consulting a été présenté ainsi que la problématique, le contexte de l'étude et la justification du choix de l'étude analytique par rapport à une étude numérique. Dans le prochain chapitre il sera question de décrire les généralités des ponts, et justifier le choix du type de pont après les études d'APS.

Chapitre II. Généralités et justification du choix du type d'ouvrage

II.1. Généralités

Les ponts sont des ouvrages permettant le franchissement des obstacles (eaux, routes, rails, etc.) aux usagers, tout en privilégiant les règles de sécurité. Au fil des années divers types sont apparus, s'éloignant des premiers ponts en pierres, lianes, bois etc. La réalisation de ces différents ouvrages a toujours eu pour souci d'optimiser l'utilisation des matériaux, notamment dans ce contexte, où la préservation des ressources naturelles est un enjeu mondial. Il a été constaté que le béton armé, inventé par Joseph Monier en 1867 est limité dans son utilisation pour la construction des certains ouvrages dû à sa faible résistance à la traction contrairement au béton précontraint breveté en 1928 inventé par Eugène Freyssinet. Son principe consiste à comprimer le béton de la structure par des câbles (fils et des torons de précontrainte) fortement tendus.

II.1.1. Principaux types de pont courants

Les principaux types de ponts courants sont classés en trois grandes familles d'après le guide du SETRA. [2]

II.1.1.1. Ponts cadres et portiques

Ils sont généralement mis en œuvre sur place, et dans le cas de petites brèches à franchir (avec des portées allant généralement de 5 à 20 mètres) sous passage inférieur, avec une faible épaisseur de remblai sur la traverse. On retrouve d'innombrables types de pont sous cette catégorie, notamment les PIPO, PICF, POD, et par extension des ouvrages voûtés en béton armé.

II.1.1.2. Ponts dalles

Les ponts dalles peuvent être réalisés en béton armé (pour des portées allant de 6 à 18 mètres) ou béton précontraint (portées allant de 14 à 25 mètres voire 30 mètres). Ils permettent le passage supérieure ou inférieure de brèches un peu plus importantes que celles des ponts cadres. Il s'agit notamment des ouvrages tels que les PSIDA, PSIDP, les dalles nervurées de type PSIDN etc.

II.1.1.3. Pont à poutres

Pour le franchissement de brèches de plus grande portée (≥ 15 mètres) intervient les ponts à poutres. Dans cette catégorie pour les ouvrages en béton armé interviennent les PSIBA, les PRAD, les ponts à poutres précontraintes par câbles. Pour les ouvrages à poutres métalliques, les poutrelles enrobées, poutrelles ajourées précontraintes ou type bipoutre mixte.

II.1.2. Différentes parties d'un pont

Le pont se décompose généralement en deux parties majeures. A savoir :

- La superstructure :

Elle est constituée des accessoires liés au tablier dont font partis les trottoirs, les bordures, le revêtement de la chaussée et les barrières de sécurités.

- L'infrastructure :

Est constituée des fondations, culées, les piles qui sont des appuis intermédiaires et transmettent, les charges reçues de la superstructure et son poids propre vers les fondations.

La Figure II-1 montre les parties d'un pont vue en coupe longitudinale, cas d'un pont à hauban.

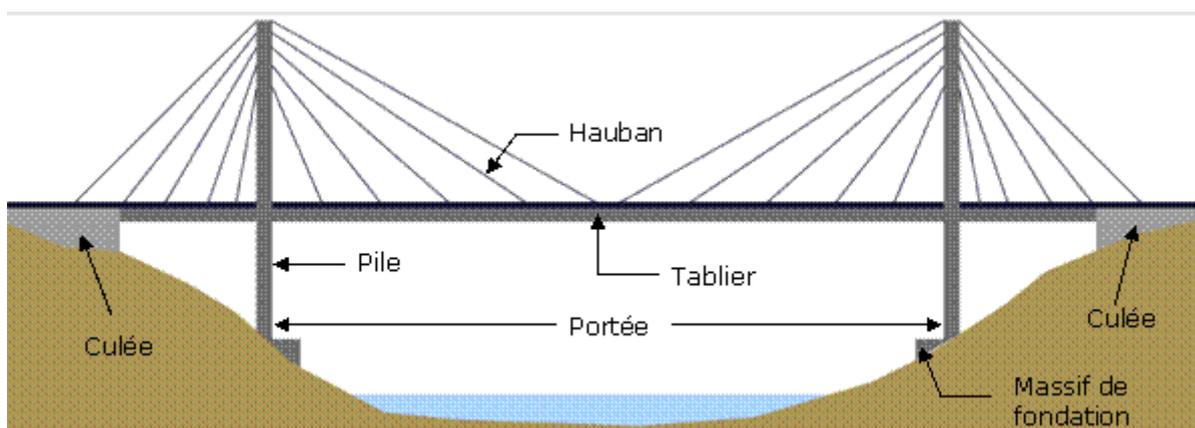


Figure II-1 : Représentation des différentes parties d'un pont

II.2. Justification du choix du type d'ouvrage

II.2.1. Critères généraux du choix

Diverses possibilités s'offrent à l'ingénieur de conception en matière de choix de type de pont à réaliser. En règle générale, le choix s'il n'est pas imposé par le maître d'ouvrage, est fait selon plusieurs critères :

- La fonctionnalité et sécurité de l'ouvrage ;
- Le coût global et les délais d'exécutions ;
- L'esthétique et la facilité de mise en œuvre ;

Le Tableau II-1 fournit les différents types de pont selon nos portées de travées.

Tableau II-1 : Gammes de portées des ponts courants [2]

Type d'ouvrage	gamme de portée	élanement		observations	balancement optimal
		sur pile	à la clé		
ouvrages mixtes courants (acier/béton)					
Poutrelles métal enrobées de BA (élanement métal seul)	10 à 25 m 10 à 30 m	1/33 1/38	Idem Idem	travées indépendantes travées continues	1.0 0.7 à 0.8
P.S.I.P.A.P. Poutrelles ajourées précontraintes transversalement (élanement métal seul)	< 28 m < 36 m	1/38 1/38	Idem Idem	travées indépendantes travées continues	1.0 0.7 à 0.8
ouvrages types en béton construits sur cintres au sol					
P.I.C.F. - P.I.P.O. P.O.D. (Ponts cadres et portiques en BA)	< 10-12 m 8-10 à 20-22 m	1/25 1/25	Idem Idem		/ /
P.S.I.B.A. (Poutres en BA)	< 25-30 m < 20-25 m	1/15 1/20	Idem Idem	travée isostatique travées continues	1.0 0.8
P.S.I.D.A. (Dalles en BA)	6-8 à 18-20 m	1/20 1/26 1/28	Idem Idem Idem	travée isostatique deux travées trois travées ou plus	1.0 1.0 0.8
P.S.I.D.P. (dalle pleine en BP)	18 à 25-30 m	1/25 1/28 1/33	Idem Idem Idem	travée isostatique deux travées trois travées ou plus	1.0 1.0 0.65 à 0.7
P.S.I.D.P. (Dalles en BP à larges encorbellements)	20 à 30-35 m	1/22 1/25 1/28	Idem Idem Idem	travée isostatique deux travées trois travées ou plus	1.0 1.0 0.65 à 0.7
P.S.I.D.E. (Dalles éléguées en BP)	25 à 35-40 m	1/22 1/25 1/30	Idem Idem Idem	travée isostatique deux travées trois travées ou plus	1.0 1.0 0.65 à 0.7
P.S.B.Q. (Ponts à béquilles en BP)	20 à 40 m	1/25	1/35	trois travées portée en tête de béquilles	0.6
ouvrages types à poutres préfabriquées					
P.R.A.D. Poutres préfabriquées à fils ou torons adhérents	10-15 à 25-30 m	1/20	Idem	travée isostatique - pré tension	portées égales
V.I.P.P. Poutres préfabriquées à câbles de précontrainte	30 à 50 m	1/17	Idem	travée isostatique - post tension	portées égales

Selon notre gamme de portée, les choix qui s'offre à ce projet lors de la conception sont le PSI-BA, PRAD, PSI-DA, PSI-DP.

II.2.2.Exigences multicritères de l'APS

Le choix du type de pont se base sur plusieurs critères, il est important de faire une analyse multicritère cependant le maitre d'ouvrage peut fixer son choix lors de l'APS. Cette analyse peut permettre à l'ingénieur de discuter le choix du Maitre d'Ouvrage.

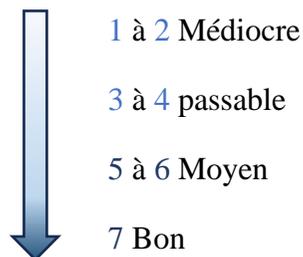
Le Tableau II-2 présente une analyse comparative rationnelle entre divers types de pont, et permettra d'encourager ou infirmer le choix du M.O après l'APS. La pondération des critères est subjective, elle est obtenue par multiplication de la note du critère (allant de 1 à 7) avec le coefficient de pondération, (qui est calculé en divisant le poids attribué à chaque critère par la note globale maximale de 7).

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau II-2 : Exigences multicritères de l'APS

Critères	Poids	Coef	PSI-DP		Note	PSI-DA		Note	PSI-BA		Note
Coût global	2	0,29	Elevé	2	0,58	Moyen	3	0,87	Faible	4	1,16
Délai d'exécution	1	0,14	Rapide	5	0,70	Moyen	4	0,56	Moyen	4	0,56
Esthétique	2	0,29	Offre plus de choix de formes pour la conception du Tablier	6,5	1,89	Tablier épais et difficulté de de réalisation des courbes	5,5	1,60	Possibilité de hauteur importante des poutres	4,5	1,31
Facilité de mise en œuvre	0,5	0,07	Exécution facile	5,5	0,39	Exécution facile	5	0,35	Exécution facile	4	0,28
Durabilité et entretien	1,5	0,21	Grande résistance au cisaillement et facile à entretenir	6	1,26		5	1,05	Moins facile à entretenir	5	1,05
Note total pondérée					4,82/7			4,43/7			4,36/7

Légende



Conclusion partielle

Dans ce chapitre il a été démontré que le choix du pont en BP à travers l'étude multicritère, par le M.O et le PSI-DP a eu la meilleure note. Dans le chapitre suivant il sera question de poser les hypothèses de calculs et dimensionner analytiquement le tablier après conception. Le dimensionnement du tablier consistera à calculer son poids propre et les charges d'exploitations, et avoirs les éléments de réduction (moment et effort tranchant) pour le calcul du nombre de câbles de précontraintes et armatures passives.

Chapitre III. Conception et étude technique du tablier

La conception du tablier de l'étude consistera à déterminer son épaisseur, et l'étude technique permettra de déterminer le câblage du tablier et vérifier les contraintes limites.

III.1. Références, règlements et logiciels utilisés

III.1.1. Règlements et documents des prescriptions de bases

- Guides du SETRA ;
- Eurocode 1 et 2.

Le complément des règlements est présenté en Annexe 1.

III.1.2. Logiciels utilisés

- EXCEL
- Word
- AutoCAD 2016

III.2. Hypothèses de calcul

Le dimensionnement structurel a été fait sur la base de plusieurs hypothèses liées au contexte du projet, et les caractéristiques des matériaux sont des exigences de l'APS.

III.2.1. Contexte général

L'ouvrage n'est pas en contact direct avec l'eau de mer, cependant il est exposé à l'air pouvant véhiculer des sels marins provenant de la lagune Ebrié. L'environnement est par conséquent agressif vis-à-vis des ions chlorures. Dans ce cas la classe d'exposition selon l'Eurocode est XS1.

Le tablier en béton est supposé coulé sur cintres en un seul bloc. La structure est par conséquent hyperstatique.

Les problèmes posés par les calculs de vérifications dans le cadre des états limites ultimes proviennent du fait que le comportement des matériaux est non linéaire. En conséquence, les méthodes de calculs utilisées à l'ELS ne sont plus applicables. Dans le cadre de cette étude,

afin de s'assurer que les délais de soumission des livrables soient respectés, les calculs à l'ELU ont été limités au calcul de l'effort tranchant. Le reste des calculs et vérifications de contraintes sont faits à l'ELS.

III.2.2. Matériaux

III.2.2.1. Béton

La durabilité des ouvrages prenant en considération plusieurs paramètres, notamment la classe d'exposition de l'ouvrage, le tablier est un béton de type B30 et sa classe d'exposition est XS1 avec un enrobage minimal est de 5 cm.

a. Résistance moyenne à la compression

A 28 jours, $f_{cm} = f_{ck} + 8$

$$f_{cm} = 30 + 8 = 38 \text{ MPa}$$

Pour $j > 28$ jours : $f_{ck}(t) = f_{ck}$

b. Résistance à la traction

$$f_{ctm} = 0,3[f_{ck}]^{2/3} \text{ Pour } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 0,3 \times [30]^{2/3} = 2,9 \text{ MPa}$$

c. Module de déformation instantanée

Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures et au plus égale à $0,4 f_{cm}$, on admet un module de déformation instantanée égal à :

$$E_{cm} = 22000 \left[\frac{f_{cm}}{10} \right]^{0,3} \text{ MPa}$$

$$\text{A } j = 28 \text{ jours, } E_{cm} = 22000 \left[\frac{38}{10} \right]^{0,3} = 32837 \text{ MPa}$$

d. Déformation due au retrait

La déformation finale maximale due au retrait est $\varepsilon_{cs,\infty} = 0,63 \text{ ‰}$

III.2.2.2. Aciers passifs

Les caractéristiques mécaniques des aciers passifs sont des aciers FeE500 ayant :

- Valeur caractéristique de la limite d'élasticité $f_{yk} = 500$ MPa ;
- Module de déformation longitudinale $E_s = 2.10^5$ MPa.

III.2.2.3. Précontrainte

- La précontrainte sera par post-tension et de classe II selon les exigences du Maître d'ouvrage ;
- Tous les câbles sont tendus au même moment ;
- Le module de déformation de l'acier de précontrainte E_p est pris égale à 200 000 MPa.

III.3. Prédimensionnement de l'ouvrage retenu

Deux choix sont possible pour le prédimensionnement des tabliers en précontrainte de PSI-DP. La dalle rectangulaire est prise par rapport à la dalle à encorbellement en fonction de la travée la plus longue, qui ne doit pas être supérieure à 20 mètres pour les dalles rectangulaire.

III.3.1. Prédimensionnement du tablier

III.3.1.1. Largeur de la travée

Les travées ne sont pas de largeur constante, variant d'une extrémité à l'autre, entre 15,46 m de la PC69 à 10,40 m de la PC70.

III.3.1.2. Longueur de travée

La section du tablier considérée pour les calculs est composée de 3 travées de longueur totale de 51,85 m, ayant deux travées de rives de 15,75 m chacune, et une travée centrale de 20,35 m.

III.3.1.3. Nombre de voies

Le tablier est de 2 voies de 3,5 m et la largeur de chaque voie est prise égale à 3 m lors du calcul des moments selon l'Eurocode pour les surcharges de type LM1.

III.3.1.4. Les bandes dérasées

La largeur des bandes s'adapte à la largeur de la chaussée du tablier, le *Tableau III-1* justifie le choix d'une largeur minimale des différentes bandes de 0,5 m est vérifiée.

Tableau III-1 : Choix de largeur de BDD/BDG [2]

TYPES DE ROUTES	BDG	CHAUSSEE 2 VOIES	BDD	
			NORMALE	MINIMALE
R	Routes 1 chaussée	7,00 m (1)	2,00 m	1,75 m
	Artères interurbaines 2 chaussées	2 × 7,00 m	2,00 m	
	Artères interurbaines 2 chaussées avec trottoirs en périurbain	0,50 m	2 × 7,00 m	1,00 m
T	Routes express 1 chaussée	7,00 m (1)	2,50 m	2,00 m

III.3.1.5. Épaisseur de travée

Le coût d'un tablier dalle varie en fonction de l'épaisseur de dalle au voisinage de l'épaisseur économique. La Figure III-1 permet d'avoir l'épaisseur minimale pour la dalle en classe II.

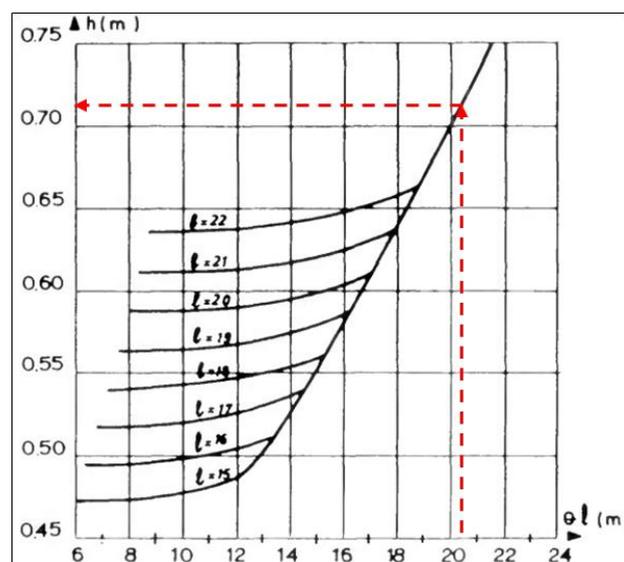


Figure III-1 : Abaque choix d'épaisseur de dalle pleine à trois travées[3]

La longueur de travée considérée étant de 20,35 m, l'épaisseur minimale est de 72 cm. Pour des raisons facilitées d'exécution et d'esthétique, l'épaisseur retenue est de 80 cm.

III.3.2. Choix des équipements

III.3.2.1. Le revêtement du tablier

Le revêtement du tablier est constitué de deux couches principales à savoir :

- Une Couche d'étanchéité en feuilles préfabriquées protégée par de l'asphalte gravillonné de 4 cm ;
- Une Couche de roulement en enrobé de 7 cm d'épaisseur et 24 KN/m³ de poids volumique.

III.3.2.2. Les joints de chaussée

Le tablier du pont subi des variations de longueurs dû à un certain nombre de paramètres, parmi lesquels la température. Dans le but de permettre la libre dilatation de l'ouvrage, des joints de chaussée sont prévus à équidistance raisonnable.

III.3.2.3. Dispositifs de retenue

Les barrières de sécurité de type BN4 sont choisies comme dispositif de retenue, car selon le guide du SETRA le niveau de sécurité est de type H.[4]

III.3.2.4. Dispositifs d'évacuation des eaux

Il est important d'évacuer l'eau pouvant être présent sur le tablier, à travers divers dispositifs. L'évacuation se fera par des fils d'eau en asphalte gravillonné.

III.3.2.5. Les corniches

Les corniches sont des éléments préfabriqués jouant un rôle esthétique. Elles seront placées aux abords du tablier.

III.4. Étude technique du tablier

III.4.1. Présentation de l'ouvrage

Le tablier est de largeur variable, avec une longueur de 51,85 m. Il a également une section trapézoïdale d'épaisseur 80 cm à partir de l'axe, ayant deux de voies. La chaussée est notamment composée de :

- Deux voies de 3,50 m chacune ;
- Des BDG et BDD et de 0,5 m chacune ;
- Des barrières de sécurités de type BN4.

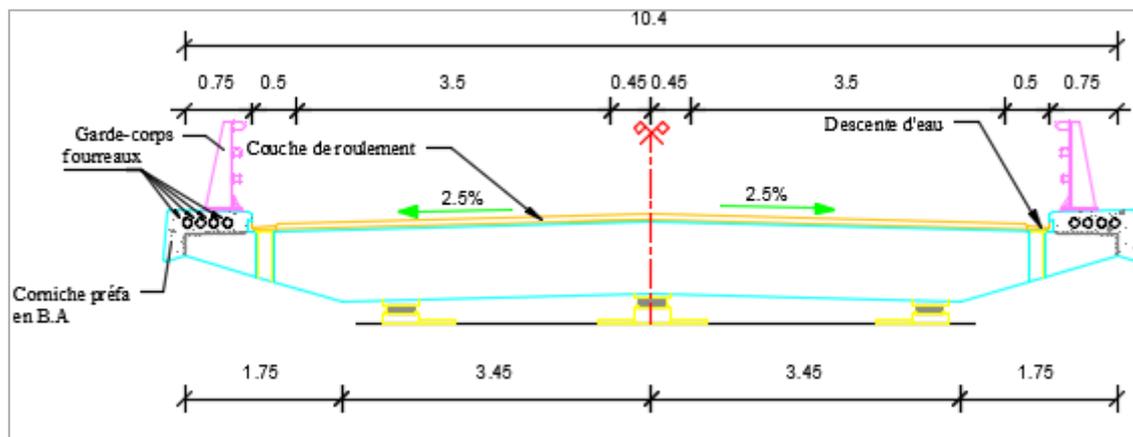


Figure III-2 : Coupe transversale du tablier à la section PC 72

III.4.2. Évaluation des charges

III.4.2.1. Action d'origines climatiques

a. Actions thermiques

Les actions thermiques sont à considérer dans le dimensionnement des joints de chaussées. Les températures dans notre zone d'études varient essentiellement entre 24 et 33°C.

b. Efforts horizontaux dues au vent

Les charges du vent sur le tablier sont reprises par les appuis. Les appuis n'étant pas dimensionnés dans notre étude, l'effet du vent est négligé sur le tablier.

III.4.2.2. Charges permanentes

Les charges qui interviennent sont dues au poids propre du tablier et ouvrages accessoires (telles que les glissières de sécurité et corniches). Le poids des éléments est obtenu par multiplication du poids volumique par la section transversale de l'élément sur 1 ml. La suite des détails de calcul pour toutes les travées sont présentés en annexe 7.

Tableau III-2 : Récapitulatif des charges permanentes sur le tablier

Actions permanentes				
Désignation	Travée 1	Travée 2	Travée 3	Unité
Poids propre				
Section moyenne de chaque travée	10,11	8,09	7,36	m ²
Poids propre au mètre linéaire	0,25	0,20	0,18	MN/ml
Superstructure				
Couche de roulement au mètre linéaire				
Section moyenne de chaque travée	0,98	0,80	0,73	m ²
Poids propre de la couche de roulement au mètre linéaire	0,023	0,019	0,017	MN/ml
Couche d'étanchéité au mètre linéaire				
Section moyenne de chaque travée	0,418	0,342	0,312	m ²
Poids propre de la couche d'étanchéité au mètre linéaire	0,008	0,007	0,006	MN/ml
Corniche				
Poids propre des Corniches au mètre linéaire	0,005	0,005	0,005	MN/ml
BN4				
Poids propre des BN4 au mètre linéaire	0,002	0,002	0,002	MN/ml
Poids de superstructure	0,038	0,033	0,030	MN/ml

III.4.2.3. Actions dues au trafic sur le pont

L'Eurocode 2 partie 3 présente différents modèles de charges sur le pont. Les détails de calculs sont présentés en annexe 7 et 8.

a. Modèle de charge LM1

Elles sont constituées d'un Tandem (TS) et une densité uniforme de Charge (UDL). Le tableau suivant donne les valeurs de références utilisées lors du calcul des éléments de réduction du pont à l'aide des lignes d'influence.

Tableau III-3 : Valeurs caractéristiques référence pour le modèle de charges LMI

	Tandem TS	Système UDL
Emplacement	Charges d'essieu Q_{ik} (kN)	Q_{ik} (ou q_{rk}) (kN/m ²)
Voie n°1	300	9
Voie n°2	200	2,5
Aire résiduelle	0	2,5

a. Modèle de charge LM2

Elle est utilisée pour les vérifications locales, notamment la vérification du tablier comme élément surfaciques reposants sur des appuis.

b. Modèle de charge LM3

Elle concerne les véhicules dites spéciaux, et est composées d'un premier groupe d'essieux allant de 100 à 200 kN, et un deuxième essieu de 240 kN.

c. Charges piétonnières

Elles sont utilisées pour simuler la charge due à la présence d'une foule sur le pont. La valeur caractéristique recommandées est de 5 kN/m².

d. Charges horizontales de freinage et centrifuges

La freinage ou l'accélération produit un effort horizontal sur la chaussée, et la rotation dans un virage produit un effort centrifuge.

III.4.3. Étude des sollicitations

III.4.3.1. Caractéristiques mécaniques des sections

Les caractéristiques mécaniques de la section sont déterminées suivant son contour divisé en une série de points (X, Y) qui décrit le contour d'un maillage de 9 points dans le sens trigonométrique.

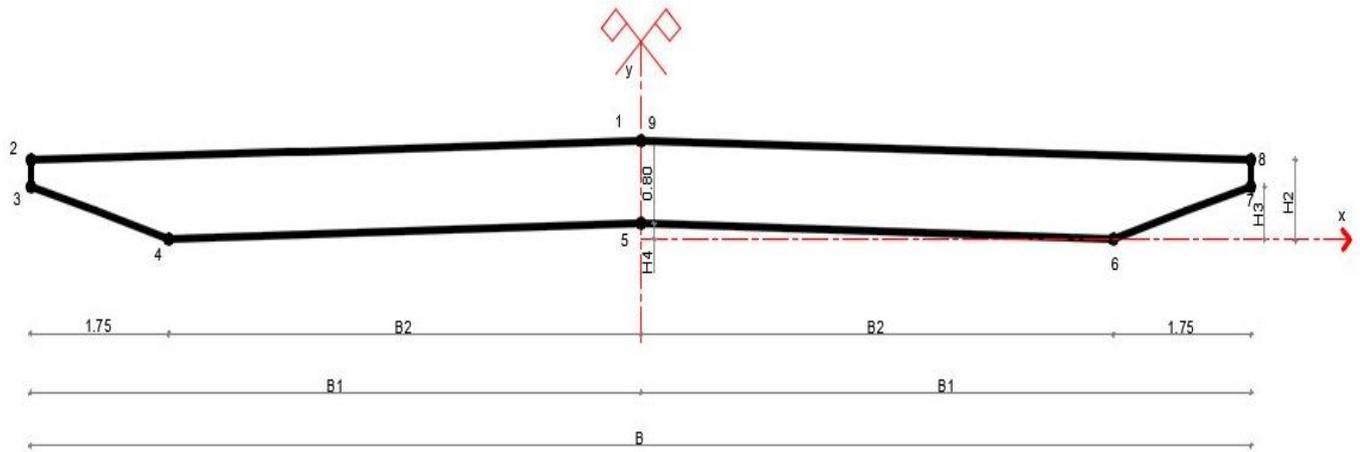


Figure III-3 : Contour géométrique de la dalle

Chaque travée est divisée en 20 sections équidistantes, qui permettra de déterminer les éléments tels que le moment d'inertie, le centre de gravité et la section de parties du tablier qui seront essentiels dans le calcul des sollicitations du tablier. Les différentes formules de calculs des propriétés mécaniques sont consignées dans le *Tableau III-4*.

Tableau III-4 : Formules de calculs des propriétés mécaniques à l'aide des coordonnées

La section est définie par une série de points (X, Y) qui décrit le contour dans le sens trigonométrique. On établit sur une feuille "Excel" un tableau composé comme suit :							
N ₀	Abscisse	Ordonnée	Section A	Moment statique S _X	Moment statique S _Y	Inertie I _X	Inertie I _Y
1	x ₁	y ₁					
2	x ₂	y ₂	A ₂	S _{X,2}	S _{Y,2}	I _{X,2}	I _{Y,2}
i	x _i	y _i	A _i	S _{X,i}	S _{Y,i}	I _{X,i}	I _{Y,i}
n	x _n	y _n	A _n	S _{X,n}	S _{Y,n}	I _{X,n}	I _{Y,n}
			$A = \sum_2^n A_i$	$S_X = \sum_2^n S_{X,i}$	$S_Y = \sum_2^n S_{Y,i}$	$I_X = \sum_2^n I_{X,i}$	$I_Y = \sum_2^n I_{Y,i}$
$A_i = \frac{1}{2}(x_{i-1} - x_i) (y_{i-1} + y_i)$				$S_{Y,i} = \frac{1}{6}(x_{i-1}^2 + x_{i-1} * x_i + x_i^2)(y_i - y_{i-1})$			
$S_{X,i} = \frac{1}{6}(x_{i-1} - x_i) (y_{i-1}^2 + y_{i-1} * y_i + y_i^2)$				$I_{X,i} = \frac{1}{12}(x_{i-1} - x_i) * (y_{i-1} + y_i) * (y_{i-1}^2 + y_i^2)$			
$I_{Y,i} = \frac{1}{12}(x_{i-1} - x_i) * (x_{i-1}^2 + x_i^2) * (y_i - y_{i-1})$							

Le rapport S_x/A donne la distance de l'axe OX au centre de gravité de la section et on en déduit les valeurs de v et v' , distance du centre de gravité aux fibres supérieure et inférieure de la section. On en déduit aussi l'inertie propre par rapport au centre de gravité : $I_0 = I_x - S_x^2/A$

L'utilisation du tableau ci-dessus, nécessite d'avoir les coordonnées de tous les points qui forment le contour de la section. Les coordonnées en chaque point d'après la géométrie du tablier est obtenu dans le tableau suivant, en entrant comme donnée la largeur du tablier. Les résultats du tableau ci-dessous sont utilisés comme données d'entrées pour le calcul des caractéristiques géométriques des sections planes.

Tableau III-5 : Coordonnées de points (X,Y) du contour de la section du tablier

Largeur B	15,34	Hauteur H	0,95
B1 =B/2	7,67	H2 = H-2,5/100*B/2	0,76
B2 = B/2-1,75	5,92	H3 = H2-0,25	0,51
O	0,0	H4 = 2,5/100*B/2-1,75	0,15
N ⁰	X	Y	
1	0,00	0,95	
2	-7,67	0,76	
3	-7,67	0,51	
4	-5,92	0,00	
5	0,00	0,15	
6	5,92	0,00	
7	7,67	0,51	
8	7,67	0,76	
9	0,00	0,95	

Tableau III-6 : Calcul sections géométriques de la section 0,05l de la travée 1

N ^o	Abscisse x (m)	Ordonnée y (m)	Section A (m ²)	Moment statique S _x (m ³)	Moment statique S _y (m ³)	Inertie I _x (m ⁴)	Inertie I _y (m ⁴)
1	0,00	0,95					
2	-7,67	0,76	6,536	2,796	-1,8801	1,602	7,210
3	-7,67	0,51	0,000	0,000	-7,3536	0,000	37,601
4	-5,92	0,00	-0,443	-0,075	-11,7519	-0,019	53,821
5	0,00	0,15	-0,438	-0,022	0,8645	-0,002	-2,559
6	5,92	0,00	-0,438	-0,022	-0,8645	-0,002	-2,559
7	7,67	0,51	-0,443	-0,075	11,7519	-0,019	53,821
8	7,67	0,76	0,000	0,000	7,3536	0,000	37,601
9	0,00	0,95	6,536	2,796	1,8801	1,602	7,210
			11,3095	5,4001	0,0000	3,1628	192,1481
Min	-7,670	0,000					
Max	7,670	0,95					

Les résultats du calcul pour chaque section des 3 travées est consigné dans l'Annexe 2. Le *Tableau III-7* présente les résultats de la section 0,05l de la travée 1.

Tableau III-7 : Récapitulatif des sections géométrique de la section 0,05l de la travée 1

Caractéristiques	0,05l	Unités
Portée travée / Section du Profil	PC69-1	15,75
Min abscisse	-7,670	m
Max abscisse	7,670	m
Min ordonnée	0,00	m
Max ordonnée	0,95	m
Section A	11,3095	m ²
X _G	0,000	m
Y _G	0,477	m
Largeur	15,340	m
v _x	7,670	m
v' _x	-7,670	m
I _y	192,148	m
Hauteur	0,95	m
v _y	0,471	m
v' _y	-0,477	m
I _x	3,1628	m ⁴
I _o	0,5844	m ⁴

III.4.3.2. Présentation de la méthode des Foyers

La méthode des Foyers découle des équations des trois moments, et elle sera utilisée pour le calcul des éléments de réduction de notre tablier. La méthodologie détaillée de chaque calcul des éléments de réduction par la méthode des foyers est présentée en Annexe 3.

a. Évaluation des constantes mécaniques

Dans notre cas d'espèce, l'inertie varie car la géométrie du tablier n'est pas de section constante. Le produit EI sera par conséquent calculé pour chaque section de travée, chaque travée étant divisé en 20 sections. Les résultats détaillés sur une feuille Excel par la méthode de trapèze d'intégration numérique et vérifiée par la méthode de Simpson. Les résultats sont consignés en Annexe 4.

➤ Formule d'intégration numérique par méthode de Trapèze

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x)dx \approx \frac{h}{2} \left[f(x_0) + 2 \left(\sum_{j=1}^{n-1} f(x_j) \right) + f(x_n) \right]$$

➤ Formule d'intégration numérique par méthode de Simpson

$$\int_{x_0}^{x_n} f(x)dx \approx \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 4f(x_{n-3}) + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)]$$

Le tableau qui suit donne les données d'entrées nécessaire à l'application des formules de calculs des constantes mécaniques dont les résultats sont consignés en Annexe 4.

Tableau III-8 : Données du calcul des constantes mécaniques

Désignation	Valeur	Unité
Soit $\int_a^b f(x)dx$		
Début d'intervalle a =	0	-
Fin de l'intervalle b =	20	-
Nombre d'intervalle n =	19	-
Pas de calcul h =	1,05	-
Résistance caractéristique du béton fck =	30	MPa
Résistance moyenne du béton fcm =	38	MPa
Module de déformation du béton E =	32837	MPa

Le *Tableau III-9* présente les résultats pour chaque travée utilisant les deux méthodes de calculs.

Tableau III-9 : Résultats du calcul des constantes mécaniques pour chaque travée

	Formule de Trapèze	Formule de Simpson
Travée 1		
a _i	0,0003638	0,0003633
b _i	0,0001907	0,0001912
c _i	0,0006379	0,0004871
Travée 2		
a _i	0,0004883	0,0004877
b _i	0,0002568	0,0002575
c _i	0,0006379	0,0006371
Travée 3		
a _i	0,0005605	0,0005597
b _i	0,0002766	0,0002774
c _i	0,0006535	0,0006527

b. Evaluation de φ et φ'

A la suite des calculs des constantes mécaniques, vient le calcul des foyers de gauche et droite, leurs différents calculs est donné par les formules suivantes :

Le foyer de gauche $\varphi_{i+1} = \frac{b_{i+1}}{c_i + a_{i+1} - b_i \varphi_i}$

Le foyer de droite $\varphi'_i = \frac{b_i}{c_i + a_{i+1} - b_{i+1} \varphi'_{i+1}}$

c. Détermination des rotations ω' et ω''

$$\omega' = - \int_0^l \frac{\mu(x)}{EI} \left(1 - \frac{x}{l}\right) dx$$

$$\omega'' = \int_0^l \frac{\mu(x)}{EI} \cdot \frac{x}{l} dx$$

d. Evaluation des moments sur appuis M_i et M_{i+1}

L'évaluation des moments d'appuis se fait à partir des valeurs de foyers, sous les hypothèses qu'une seule travée est chargée, et il n'y a pas de dénivellation d'appuis.

Les équations après transformation s'écrivent tel qu'il suit :

$$M_i = \frac{-(\varphi_i x \omega'_i)}{b_i x \left(\frac{1}{\varphi'_i} - \varphi_i\right)} \qquad M_{i+1} = \frac{\varphi'_{i+1} (\varphi_i x \omega'_i + \omega''_i)}{b_i x \left(\frac{1}{\varphi'_i} - \varphi_i\right)}$$

e. Evaluation du moment fléchissant pour chaque travée

Le moment fléchissant se calcul comme suit :

$$M(x) = \mu_i(x) + M_i \left(\frac{x}{l}\right)$$

$$\text{Où } \mu_i(x) = P x a x \left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

f. Lignes d'influences du moment fléchissant

Les éléments de réduction sont déterminés à partir des lignes d'influence de l'effet d'une charge ponctuel se déplaçant sur chaque travée. L'application consiste à charger successivement les travées les unes après les autres sur chaque vingtième de section, avec une charge ponctuelle P égale à 1, puis cumuler les lignes d'influences par travée pour étudier la poutre continue soumise à un chargement quelconque. Le résultat du cumul des lignes d'influences donne les surfaces d'influences. La multiplication des surfaces d'influences avec le poids propre en chaque section, donne le moment fléchissant.

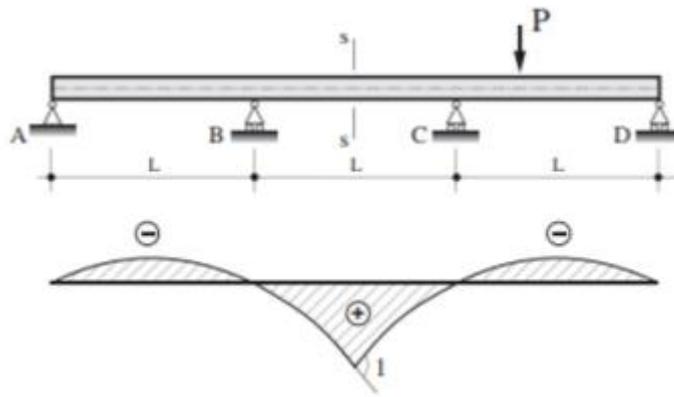


Figure III-4 : Ligne d'influence du moment fléchissant d'une poutre hyperstatique[5]

L'effet que la charge concentrée sur une travée a sur toutes les travées est calculé, et l'intégrale de ces effets donne le moment fléchissant en la section considérée. Les résultats du calcul des lignes sont utilisés pour avoir la somme des surfaces d'influences, qui permet d'obtenir l'effet globale des éléments de réduction dû à une charge (ponctuelle ou uniforme) sur une dalle.

g. Évaluation des moments à partir des lignes d'influence

Les moments min sont déterminés pour le cas où la charge uniformément répartie est assimilée au poids propre. Les moments max sont calculés pour les charges dues au trafic.

h. Lignes d'influence des efforts tranchants

L'effort tranchant se calcule comme suit :

$$T(x) = \frac{d\mu_i}{dx}(x)$$

i. Évaluation des efforts tranchants à partir des lignes d'influence

Le principe est le même que celui d'évaluation des moments à partir des lignes d'influence.

III.4.3.3. Calcul des coefficients de répartition transversale

La démarche du calcul des coefficients de répartition transversale est présentée en Annexe 5. La suite des résultats sont consignés dans l'annexe 5. Le tableau suivant présente les résultats du calcul du coefficient pour la fibre extrême du tablier de la travée 1.

Tableau III-10 : Tableau récapitulatif des coefficients de répartition transversale

Travée 1		Travée 2		Travée 3	
Fibre extrême tablier y = -7,73 m		Fibre extrême tablier y = -6,21 m		Fibre extrême tablier y = -5,20 m	
Coefficient max Travée 1 Fibre extrême	2,34	Coefficient max Travée 2 Fibre extrême	1,33	Coefficient max Travée 3 Fibre extrême	1,30
Fibre bord de chaussée tablier y = -6,48 m		Fibre bord de chaussée tablier y = -4,96 m		Fibre bord de chaussée tablier y = -3,95 m	
Coefficient max Travée 1 Fibre bord de chaussée	2,01	Coefficient max Travée 2 Fibre bord de chaussée	1,25	Coefficient max Travée 3 Fibre bord de chaussée	1,21
Axe voie 1 tablier y = -4,98 m		Axe voie 1 tablier y = -3,46 m		Axe voie 1 tablier y = -2,45 m	
Coefficient max Travée 1 Axe voie 1	1,68	Coefficient max Travée 2 Axe voie 1	1,16	Coefficient max Travée 2 Axe voie 1	1,13
Axe voie 2 tablier y = -3,48 m		Axe voie 2 tablier y = -1,96 m		Axe voie 2 tablier y = -0,95 m	
Coefficient max Travée 1 Axe voie 2	1,42	Coefficient max Travée 1 Axe voie 2	1,09	Coefficient max Travée 1 Axe voie 2	1,04
Axe tablier y = 0,00 m		Axe tablier y = 0,00 m		Axe tablier y = 0,00 m	
Coefficient max Travée 1 Axe	0,99	Coefficient max Travée 2 Axe	1,00	Coefficient max Travée 3 Axe	1,00

III.4.3.4. Courbe enveloppe des moments min et max sous charges maximale

Les résultats de calcul du moment max sont affectés par le coefficient de répartition transversale le plus défavorable pour chaque travée, pour évaluer leurs effets sur le tablier de manière transversale. La figure suivante présente la courbe du moment max de l'ensemble du tablier de l'OA13 sur la bande du bord du tablier, ce résultat du moment sera uniformisé aux autres bandes du tabliers. Le moment max en travée est de 14,757 MNm se trouve sur la travée 1 et sur appuis 1 d'une valeur de 11,072 MNm.

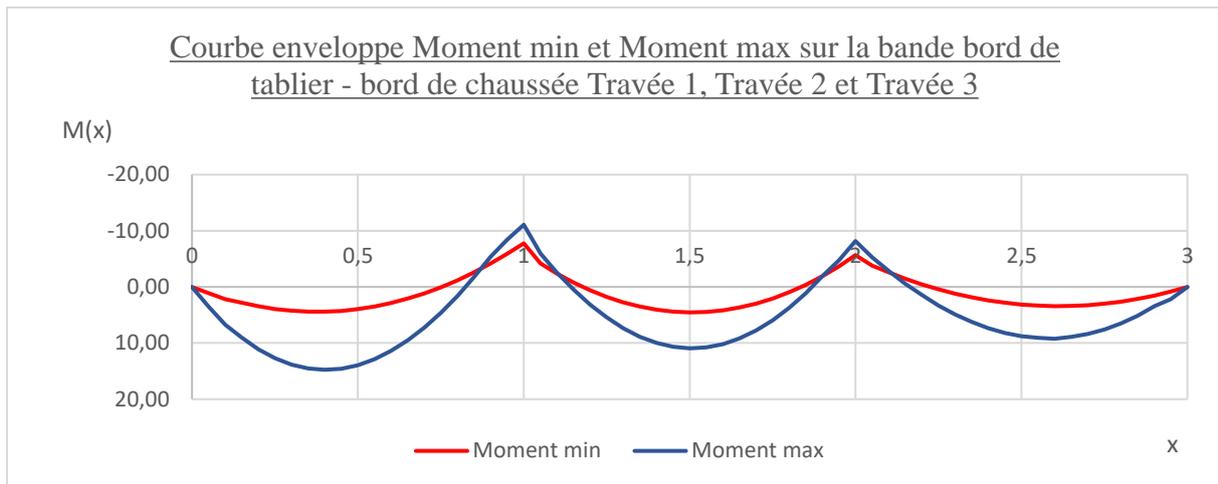


Figure III-5 : Courbe enveloppe des moments min et max sous charges maximale

III.4.3.5. Courbe enveloppe l'effort tranchant min et max sous charges maximale

Les résultats de calcul de l'effort tranchant max est également affecté d'un coefficient de répartition transversale le plus défavorable pour chaque travée. L'effort tranchant étant maximal aux appuis, il sera déterminé uniquement aux appuis. La figure ci-dessous présente la courbe approximative de l'effort tranchant max du tablier de l'OA13.

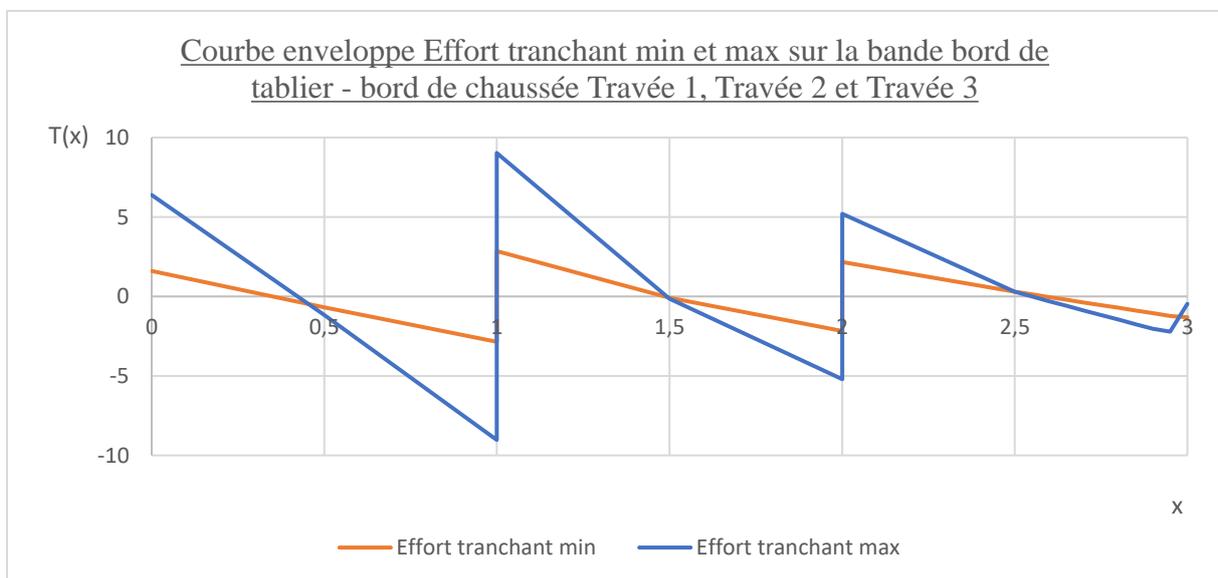


Figure III-6 : Courbe enveloppe de l'effort tranchant min et max

Les résultats du calcul de l'effort tranchant sur toutes les travées sont consignés dans le tableau de l'annexe 8, les valeurs à retenir pour l'effort tranchant max sont aux appuis.

III.4.3.6. Flexion en classe II du tablier précontraint

a. Caractéristiques géométriques de la section

Les caractéristiques de la section homogène sont les mêmes que celles calculées en annexe 3. Les résultats pour chaque section seront utilisés lors du calcul des éléments de réduction.

b. Contraintes limites dans le béton

Elles sont calculées à partir des indications de la Figure III-7 qui montre les limitations des contraintes du béton en classe II sous combinaison rare.

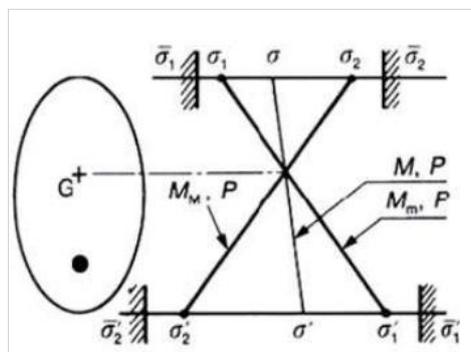


Figure III-7 : Contraintes limites dans la fibre supérieure et inférieure d'une section

- Contrainte limite de compression

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_c = 0,6 f_{ck}$$

$$\bar{\sigma}_2 = \bar{\sigma}_c = 0,6 \times 30 = 18 \text{ MPa}$$

- Compression limite de traction
 - Fibre supérieure

$$\bar{\sigma}'_1 = \bar{\sigma}_{ts} = -1,5 \times f_{ctm}$$

$$\bar{\sigma}'_1 = \bar{\sigma}_{ts} = -1,5 \times 2,9 = -4,35 \text{ MPa}$$

- Fibre inférieure

$$\bar{\sigma}'_2 = \bar{\sigma}_{ti} = -f_{ctm}$$

$$\bar{\sigma}'_2 = \bar{\sigma}_{ti} = -2,9 \text{ MPa}$$

c. Calcul de la précontrainte

- Cas d'une section sous-critique

La contrainte sur la fibre inférieure induit un effort de précontrainte $\Delta P_1 = \left(\overline{\sigma_{tl}} x \frac{v}{h} \right) x S$

La contrainte sur la fibre supérieure induit un effort de précontrainte $\Delta P_2 = \left(\overline{\sigma_{ts}} x \frac{v'}{h} \right) x S$

L'effort de précontrainte $P = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2$ Avec $P_1 = \frac{\Delta M}{\rho h}$

Soit $P = \frac{\Delta M}{\rho h} + \frac{s}{h} (v \overline{\sigma_{tl}} + v' \overline{\sigma_{ts}})$ Avec $\Delta M = M_M - M_m$

- Cas d'une section sur-critique

L'effort de précontrainte P est donné par :

$$P = \frac{M_{max} + \rho S v \overline{\sigma_{ts}}}{\rho v + v' - d'}$$

Les résultats du calcul de l'effort de précontrainte minimale Pmin (égale au maximum entre l'effort de précontrainte sous-critique et sur-critique), sont consignés dans le tableau ci-dessous.

La suite des résultats est présentée en annexe 9.

Tableau III-11 : Résultat du calcul de l'effort de précontrainte estimée de la section 0,05l du tablier 1

	Formule	Résultat de calcul	Unité
Section sous critique			
La contrainte sur la fibre inférieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_1 = \left(\overline{\sigma}_{ti} x \frac{v}{h} \right) x S$	-16,278	MN
La contrainte sur la fibre supérieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_2 = \left(\overline{\sigma}_{ts} x \frac{v'}{h} \right) x S$	-24,779	MN
L'effort de précontrainte	$P = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2$ $P = \frac{\Delta M}{\rho h} + \frac{s}{h} (v \overline{\sigma}_{ti} + v' \overline{\sigma}_{ts})$	-30,067	MN
Distance du centre de pression en fibre inférieure	$c = \rho v - (\rho * S * v * \overline{\sigma}_{ti} / P)$	-0,010	m
Distance du centre de pression au centre de gravité pour une contrainte nulle en fibre supérieure	$c' = \rho v' - (\rho * S * v' * \overline{\sigma}_{ts} / P)$	-0,070	m
Section sur-critique			
L'effort de précontrainte	$P = \frac{M_{max} + \rho S v \overline{\sigma}_{ts}}{\rho v + v' - d'}$	-0,096	MN
Valeur précontrainte			
L'effort de précontrainte P	P = Max (Psouscritique : Psurcritique)	-0,096	MN

L'effort de précontrainte minimale Pmin retenue pour le calcul du nombre de câble est 21,57 MN qui correspond à la valeur maximale de précontrainte pour toutes les sections de calcul.

d. Calcul de l'excentricité

L'excentricité du câble est son ordonnée par rapport à son centre de gravité qui est représenté dans la Figure III-8.

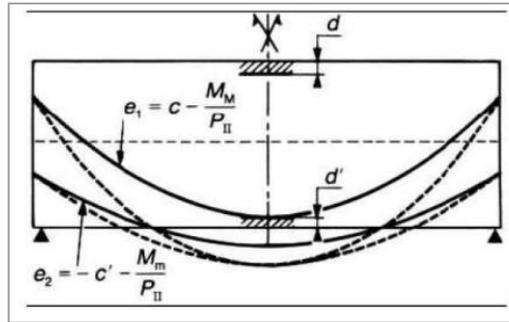


Figure III-8 : Excentricité du câble de précontrainte

- Sous-critique

L'excentricité sur la fibre inférieure $e_0 = \rho v - \left(\frac{M_{max} + \rho x v x S x \bar{\sigma}_{tl}}{P} \right)$

L'excentricité sur la fibre supérieure $e_0 = -\rho v' - \left(\frac{M_{min} - \rho x v' x S x \bar{\sigma}_{ts}}{P} \right)$

- Sur-critique

L'excentricité $e_0 = -(v' - d')$

Tableau III-12 : Résultat du calcul de l'excentricité de la section 0,05l de la travée 1

	Résultat de calcul	Unité
Section sous-critique		
L'excentricité sur la fibre inférieure	0,107	m
L'excentricité sur la fibre supérieure	0,107	m
Section sur-critique		
L'excentricité	-0,427	m
Valeur retenue		
L'excentricité retenue fibre inférieure	-0,427	m
L'excentricité retenue fibre supérieure	-0,427	m

e. Armatures de précontrainte

Le choix des câbles de précontrainte est fait suivant le tableau suivant. Le type d'armature choisi est un 7T15 ayant les caractéristiques décrites dans ce même tableau.

Tableau III-13 : Choix du type de câble

Type d'armatures	Nombre d'armatures constituant l'unité	Gaines enroulables		Gaines rigides cintrables à la main		Tubes rigides (acier)	
		\varnothing_i (mm)	e (mm)	\varnothing_i (mm)	e (mm)	\varnothing_e (mm)	e (mm)
Fils 7 mm	$n = 9$	35	0,3	40	0,4		
	$n = 14$	45	0,3	46	0,4		
	$n = 18$	50	0,4	50	0,4		
	$n = 22$	55	0,4	60	0,4		
	$n = 30$	60	0,4	65	0,4	76	2
	$n = 54$	80	0,4	90	0,6	89	2
	$n = 84$	100	0,4	110	0,6	108	2
Fils 8 mm	$n = 12$	45	0,3	50	0,4		
Torons T12,5 (T13) ou T12,9 (T13S)	$n = 7$	45	0,3	50	0,4	55	2
	$n = 12$	60	0,4	65	0,4	76	2
	$n = 19$	75	0,4	80	0,6	84	2
	$n = 31$			105	0,6	108	2
	$n = 55$			140	0,6	139,7	2
Torons T15,2 (T15) ou T15,7 (T15S)	$n = 4$	50	0,4	50	0,4	55	2
	$n = 7$	60	0,4	65	0,4	76	2
	$n = 12$	75	0,4	80	0,6	80	2
	$n = 19$			95	0,6	101,6	2
	$n = 37$			130	0,6	139,7	2

\varnothing_e diamètre extérieur
 \varnothing_i diamètre intérieur
 e épaisseur

Le tableau ci-dessous donne le nombre de câble de précontrainte. La valeur de précontrainte retenue pour le calcul du nombre de câble est la valeur maximale de l'effort de précontrainte calculé en sur-critique, qui est obtenu sur la section 0,4l de la travée 1.

Tableau III-14 : Calcul nombre de câble de précontrainte

Choix du câblage			
Valeur de la précontrainte retenue P_{min}	$P = \frac{P_{min}}{0,68}$	MN	21,57
Précontrainte estimée P		MN	31,72
Diamètre nominale choisi \varnothing		mm	T15
Section d'un câble A_p	Câbles de 7T15	m ²	0,000973
Contrainte de rupture garantie f_{prg}		MPa	1770
Limite conventionnelle d'élasticité à 0,1% f_{peg}	$\sigma_{P_0} = \text{Min} (0,80 f_{prg}; 0,90 f_{peg})$	MPa	1583
Tension à l'origine σ_{P_0}		MPa	1416
Précontrainte à l'origine p₀		MN	1,38
Nombre de câble n	$n = \frac{P}{p_0}$		23

f. Pertes de précontrainte

Tableau III-15 : Calcul des pertes par frottement section 0,05l de la travée 1

Calculs de la perte par frottement			
Désignation	Expression	Unité	Valeur
Ouverture angulaire du câble	α	Deg	0
Coefficient de frottement	f	rad ⁻¹	0,16
Coefficient de perte	φ	m ⁻¹	0,002
Contrainte de la rupture garantie	f_{prg}	MPa	1770
Limite conventionnelle d'élasticité à 0,1%	f_{peg}	MPa	1583
Longueur des travées	L	m	15,75
Tension au point p ₀ (à l'ancrage)	$\sigma_{p0} = \min(0,8f_{prg}; 0,9f_{peg})$	1416,0	MPa
			0,05L
x Longueur du câble entre l'origine à la section étudiée			0,8
Tension en tout point (MPa)	$\sigma_{p0}(x) = \sigma_{p0}e^{-f\alpha(x)-\varphi x}$		1409,8
Valeur de la perte par frottement	$\Delta\sigma_{\varphi} = \sigma_{p0}-\sigma_{p0}(x)$		6,2

La description des différentes méthodes de calculs des pertes de précontrainte est exprimée en annexe 10.

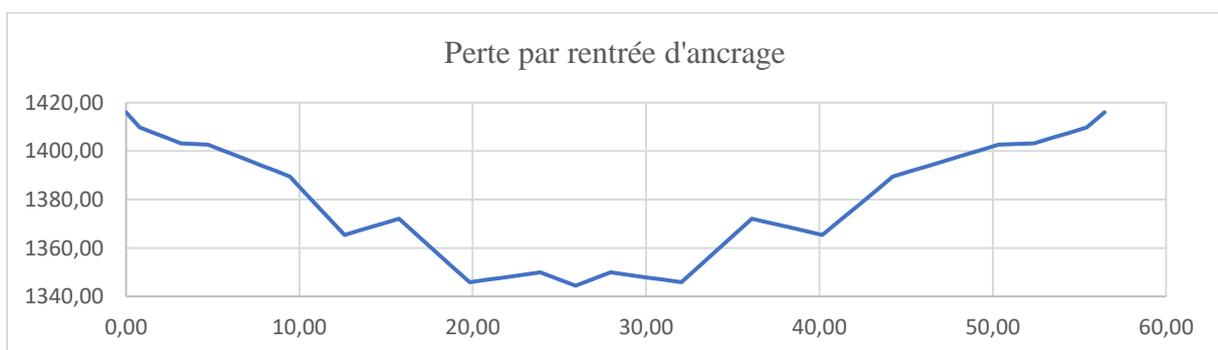


Figure III-9 : Evolution perte par rentrée d'ancrage

Les valeurs de calculs de la perte par rentrée sont obtenues pour une distance estimée graphiquement.[6]

Tableau III-16 : Calcul des pertes par rentrée d'ancrage

Calculs de la perte par recul d'ancrage		
		Appui 0
		0,05L
	$\Delta\sigma_g(x)$	MPa 20,78

Tableau III-17 : Pertes par raccourcissement instantané du béton section 0,05l de la travée 1

Calculs des pertes par raccourcissement instantané du béton (calculer au niveau du câble moyen)			
Désignation	Expression	Unité	Valeur
Nombre de câble de précontrainte	n		23
	$\frac{E_p}{E_{bi}}$	MPa	6
Excentrement de l'effort normale par rapport au centre de gravité de la section	e_p	m	-0,427
Section d'un câble de l'armature de précontrainte	A_p	m ²	0,000973
Aire de la section de béton	B	m ²	11,3095
Moment d'inertie	I	m ⁴	0,5844
Moment fléchissant due aux charges permanentes	$M_g(x)$	MNm	1,268
Rayon de giration	i		0,23
	$a = \frac{n-1}{2n} \cdot \frac{E_p}{E_{bi}}$		2,87
	$b = M_g(x) \cdot \frac{e_p}{I}$		-0,928
	$c = \frac{nA_p}{B} \left(1 + \frac{e_p^2}{i^2} \right)$		0,009
	$d = \sigma_{p0} - \Delta\sigma_\varphi(x) - \Delta\sigma_g(x)$		1394,413
	$\Delta\sigma_{pi}(x) = \frac{ab + acd}{1 + ac}$	MPa	32,454

Tableau III-18 : Calcul des pertes dues au retrait du béton

Calculs des pertes dues au retrait du béton			
Données			
Désignation	Expression	Unité	Valeur
Raccourcissement total	ϵ_r		0,0002
Age du béton	j		14
Aire de la section de béton	B	m ²	11,4055
Périmètre de la gaine	p	m	1,67
	E_p		200 000
Résultats			
	$r_m = \frac{B}{p}$ $r(t_0) = \frac{j}{j + 9r_m}$ $\Delta\sigma_r = \epsilon_r [1 - r(t_0)]E_p$	m	6,83
Loi d'évolution du raccourcissement			0,002
Variation de la tension dans les câbles		MPa	39,9

Tableau III-19 : Calcul des pertes dues à la relaxation des armatures

Calculs des pertes dues a la relaxation des armatures			
Désignation	Expression	Unité	Valeur
	ρ_{1000}		
	f_{prg}	MPa	
	$\sigma_{pi}(x)$	MPa	1362
	k_1		
	k_2		
	t	h	
	$\mu = \frac{\sigma_{pi}(x)}{f_{prg}}$		0,769
	$\Delta\sigma_p(x, t) = k_1 \rho_{1000} \left(\frac{t}{1000}\right)^{\frac{3}{4}(1-\mu)} e^{\frac{10\mu-7,5}{k_2}} \sigma_{pi}(x)$	MPa	57,13

Tableau III-20 : Calcul des pertes dues au fluage du béton

Calculs des pertes dues au fluage du béton			
Désignation	Expression	Unité	Valeur
Nombre de câble de précontrainte	n		23
Module de déformation de l'acier de précontrainte	E_p	MPa	200 000
Module de déformation instantané du béton	E_{cm}	MPa	32837
Excentrement de l'effort normale par rapport au centre de gravité de la section	e_p	m	-0,427
Section d'un câble de l'armature de précontrainte	A_p	m ²	0,000973
Aire de la section de béton	S	m ²	11,31
Moment d'inertie	I	m ⁴	0,5844
Moment fléchissant due aux charges permanentes	$M_g(x)$	MNm	1,268
Rayon de giration	i		0,23
Contrainte maximale de compression du béton	$\sigma_M = \frac{M_g e_p}{I} + \frac{\sigma_{pi}(x) n A_p}{B} \left(1 + \frac{e_p^2}{i^2}\right)$	MPa	11,3
	$a = \Delta\sigma_r + \frac{5}{6}\Delta\sigma_p$		87,28
	$b = \frac{n A_p}{B} \left(1 + \frac{e_p^2}{i^2}\right)$		0,01
	$c = \frac{E_p}{E_{ij}}$		6,090690
	$\Delta\sigma_{fl}(x) = \frac{2c\sigma_M - abc}{1 + bc}$	MPa	126,1

L'effort de précontrainte finale est obtenu pour chaque section après déduction des différentes pertes.

Tableau III-21 : Calcul de l'effort de précontrainte finale P_d

EFFORT DE PRECONTRAINTE FINALE DE CALCUL P_d			
Nombre totale de câble de précontrainte	n	-	23
Section d'un câble de l'armature de précontrainte	A_p	m ²	0,000973
Contrainte à l'origine	$\sigma_{p0} = \min (0,8f_{pgr}; 0,9f_{peg})$	MPa	1416,0
Précontrainte à l'origine	P_0	MN	31,7
Pertes totales de précontraintes instantanées plus différées	$\Delta\sigma_p(x)$	MPa	267
Pertes totales de précontraintes instantanées plus différées	$\Delta P_p(x)$	MN	6
Précontrainte maximale P_1	$P_1 = 1,02P_0 - 0,80\Delta P_p(x)$	MN	27,5
Précontrainte minimale P_2	$P_2 = 0,98P_0 - 1,20\Delta P_p(x)$	MN	23,9
Précontrainte de calcul à ELS P_d	Max ($P_1 ; P_2$)	MN	27,5
Précontrainte de calcul à ELU P_d	$P_0 - \Delta P_p(x)$	MN	25,7

g. Vérification des contraintes

La détermination des contraintes se fait à partir de la précontrainte de calcul P_d . Les résultats des vérifications se présentent pour le cas d'une section dans le tableau suivant. La suite des résultats est présentée en annexe 11.

Tableau III-22 : Vérification des contraintes section 0,05l de la travée 1

Désignation	Symboles	Valeurs	Unités
Moment maximum agissant sur la section	M_{max}	3,498	MN.m
Moment minimum agissant sur la section	M_{min}	1,102	MN.m
Valeur de la précontrainte	P	27,54	MN
Excentricité comptée positivement vers le haut	e_o	-0,02	m
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus comprimée	v	0,47	m
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v'	0,48	m
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	0,5844	m ⁴
L'aire de la section	S	11,3095	m ²
Contrainte de compression du béton sur la fibre supérieure	$\bar{\sigma}_{cs}$	18	MPa
Contrainte de compression du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ci}$	18	MPa
Contrainte de traction du béton sur la fibre supérieure	$\bar{\sigma}_{ts}$	-4,35	MPa
Contrainte de traction du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ti}$	-2,9	MPa
Vérification des contraintes			
Vérification des contraintes	$(P/S)+(Pe_o v/l)+(M_{min} v/l) \geq \bar{\sigma}_{ts}$	CV	
	$(P/S)-(Pe_o v'/l)-(M_{min} v'/l) \leq \bar{\sigma}_{ci}$	CV	
	$(P/S)+(Pe_o v/l)+(M_{max} v/l) \leq \bar{\sigma}_{cs}$	CV	
	$(P/S)-(Pe_o v'/l)-(M_{max} v'/l) \geq \bar{\sigma}_{ti}$	CV	

Pour les sections où les contraintes ne sont pas vérifiées, une solution est de modifier l'excentricité du câble dans son fuseau de passage pour chaque section de dalle non vérifiées.

h. Noyau limite et Fuseau de passage

Le noyau limite et fuseau de passage sont obtenus pour chaque section à l'aide des formules suivantes.

➤ Noyau central

$$c' = \frac{I}{Sv} \quad \text{et} \quad c = \frac{I}{Sv'}$$

➤ Noyau limite

$$a' = \text{Sup} \left(\frac{\bar{\sigma}_m I}{Pv} - c' ; - \frac{\bar{\sigma}_M I}{Pv'} + c \right) \quad \text{et} \quad a = \text{Inf} \left(\frac{\bar{\sigma}_M I}{Pv} - c' ; - \frac{\bar{\sigma}_m I}{Pv'} + c \right)$$

➤ Fuseau de passage

$$- a' - \frac{M_m}{P} \quad \text{et} \quad a - \frac{M_M}{P}$$

Les résultats obtenus des formules ci-dessus permettent le tracé de la figure ci-dessous.

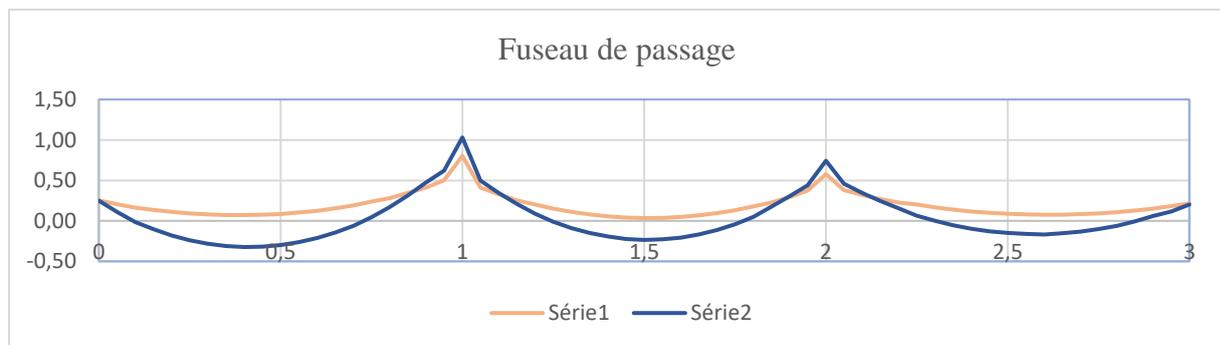


Figure III-10 : Fuseau de passage, cas où la section la plus sollicitée est sur-critique

Le tracé du câble étant croisé proches des appuis, un calcul itératif est préconisé en augmentant la section du tablier proche des appuis de 20 cm, et reprendre l'ensemble des calculs de sollicitations et vérification de contraintes, jusqu'à obtention d'un tracé de câble correct.

III.4.4. Armatures passives

III.4.4.1. Aciers transversaux

La procédure générale de vérification est la suivante :

- Lorsque $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$, aucune armature d'effort tranchant n'est requise par le calcul.
- Lorsque $V_{Ed} > V_{Rd,c}$, il convient de prévoir des armatures d'effort tranchant de telle sorte que $V_{Rd} \geq V_{Ed}$. [7]

III.4.4.2. Aciers longitudinaux

➤ En travée

Les aciers longitudinaux seront déterminés à partir de la formule de calcul des armatures minimales. La travée 1 et l'appui 1 étant les plus sollicités, le calcul sera fait pour ces deux, et uniformisé pour le reste des travées et appuis.

Tableau III-23 : Détermination des contraintes à 0,5l de la travée 1

Désignation	Formule	Valeur	Unité		
Données					
Géométrie					
Section S		10,2615	m ²		
Inertie I		0,5240	m ⁴		
v		0,46	m		
v'		0,47	m		
Excentricité ep		-0,42	m		
Précontrainte de calcul P		2,0	MN		
Moment charge permanente M _G		4,561	MNm		
Moment charge d'exploitation M _Q		5,093	MNm		
Diagramme des contraintes					
Charge permanente					
Fibre supérieure	$\sigma = \frac{M_G v}{I}$	4,01			
Fibre inférieure	$\sigma' = -\frac{M_G v'}{I}$	-4,10			
Précontrainte					

Désignation	Formule	Valeur	Unité		
i^2	$i^2 = \frac{I}{B}$	0,05			
Fibre supérieure	$\sigma = \frac{P}{S} + \frac{M_p v}{I}$ $= \frac{P}{S} \left(1 + \frac{ep x v}{i^2} \right)$	-0,55			
Fibre inférieure	$\sigma = \frac{P}{S} - \frac{M_p v'}{I}$ $= \frac{P}{S} \left(1 - \frac{ep x v'}{i^2} \right)$	0,96			
Charge d'exploitation					
Fibre supérieure	$\sigma = \frac{M_Q v}{I}$	4,48			
Fibre inférieure	$\sigma' = -\frac{M_Q v'}{I}$	-4,58			
Récapitulatif des contraintes					
Contraintes en MPa	G	P	à vide G+P	Q	en charge G+P+Q
Fibre supérieure	4,01	-0,55	3,46	4,48	7,94
Fibre inférieure	-4,10	0,96	-3,15	-4,58	-7,72

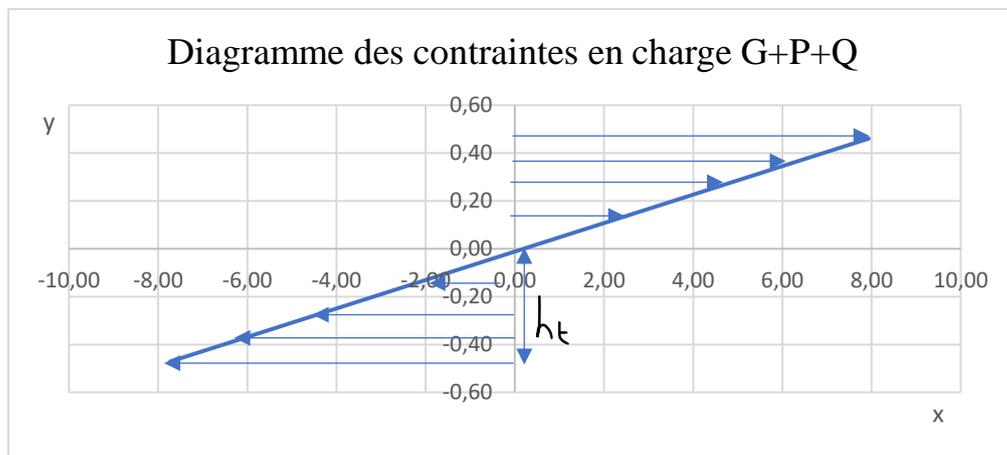


Figure III-11 : Diagramme des contraintes dans la section 0,5l de la travée 1

Le tableau ci-dessous donne la section d'armature longitudinale pour la travée la plus sollicitée, et cette section d'armature sera uniformisée sur l'ensemble du tablier.

Tableau III-24 : Détermination de la section d'armature longitudinale en travée

Désignation		Unité
Données		
Hauteur de traction dans la section en valeur absolue h_t	0,47	m
Largeur considérée de la section b	1	m
Contrainte maximale de traction en valeur absolue σ_{Bt}	7,72	MPa
f_e	500	MPa
f_{tj}	2,9	MPa
Calcul		
Acier minimales A_s	$A_s = \frac{B_t}{1000} + \frac{N_{Bt}}{f_e} \times \frac{f_{tk}}{\sigma_{Bt}}$	
B_t	0,47	m^2
N_{Bt}	1,82	MN
A_s	0,0018	m^2
A_s (cm^2) /ml transversalement	18,37	cm^2

➤ Sur appuis

Tableau III-25 : Détermination des contraintes en appui 1

Désignation	Formule	Valeur	Unité		
Données					
Géométrie					
Section S		8,9815	m ²		
Inertie I		0,4520	m ⁴		
v		0,46	m		
v'		0,45	m		
Excentricité ep		-0,31	m		
Précontrainte de calcul P		1,54	MN		
Moment charge permanente M _G		-8,933	MPa		
Moment charge d'exploitation M _Q		-5,621	MPa		
Diagramme des contraintes					
Charge permanente					
Fibre supérieure	$\sigma = \frac{M_G v}{I}$	-9,169	MPa		
Fibre inférieure	$\sigma' = -\frac{M_G v'}{I}$	8,849	MPa		
Précontrainte					
i ²	$i^2 = \frac{I}{B}$	0,050			
Fibre supérieure	$\sigma = \frac{P}{S} + \frac{M_p v}{I} = \frac{P}{S} \left(1 + \frac{ep x v}{i^2} \right)$	-0,320	MPa		
Fibre inférieure	$\sigma = \frac{P}{S} - \frac{M_p v'}{I} = \frac{P}{S} \left(1 - \frac{ep x v'}{i^2} \right)$	0,646	MPa		
Charge d'exploitation					
Fibre supérieure	$\sigma = \frac{M_Q v}{I}$	-5,770	MPa		

Désignation	Formule	Valeur	Unité		
Fibre inférieure	$\sigma' = -\frac{M_Q v'}{I}$	5,569	MPa		
Récapitulatif des contraintes					
Contraintes en MPa	G	P	à vide G+P	Q	en charge G+P+Q
Fibre supérieure	-9,17	-0,32	-9,49	-5,77	-15,26
Fibre inférieure	8,85	0,65	9,50	5,57	15,06



Figure III-12 : Diagramme des contraintes dans la section 1,0l de la travée 1 (Sur appui 1)

La figure ci-dessus, nous donne les données nécessaires au calcul de la section d'armature sur appui, dont le calcul est présenté dans le tableau suivant.

Tableau III-26 : Détermination de la section d'armature longitudinale sur appuis

Désignation	Valeur	Unité
Données		
Hauteur de traction dans la section en valeur absolue h_t	0,45	m
Largeur considérée de la section b	1	m
Contrainte maximale de traction en valeur absolue σ_{Bt}	15,06	MPa
f_e	500	MPa
f_{tj}	2,9	MPa
Calcul		
Acier minimales A_s	$A_s = \frac{B_t}{1000} + \frac{N_{Bt}}{f_e} \times \frac{f_{tk}}{\sigma_{Bt}}$	
B_t	0,45	m ²
N_{Bt}	3,37	MN
A_s	0,0017	m ²
A_s (cm ²) /ml transversalement	17,46	cm ²

Conclusion partielle

Le calcul des sollicitations sur le tablier a été fait pour des sections de 1/20^{ème} de la longueur de chaque travée. Les résultats de calculs du coefficient de répartition transversale, il est à noter que la partie transversale du tablier la plus sollicitée défavorablement est la bande entre le bord du tablier et le bord de chaussée, la suite des calculs, notamment l'effort de précontrainte sera calculé uniquement pour cette bande et adopté pour le reste du tablier. Dans le chapitre qui suit, il sera question de présenter une notice d'impact environnementale du projet.

Chapitre IV. Notice d'impact environnementale et sociale, et estimation du coût de l'étude

Il est important pour tout projet d'analyser l'impact qu'il aura sur son l'environnement. L'étude d'impact environnemental nécessite généralement une durée plus ou moins supérieure à 6 mois. Du fait d'une durée d'étude limitée la proposition d'une notice des potentiels impact du projet, ainsi que certaines mesures d'atténuations est plus judicieuse.

IV.1. Analyses des potentiels impacts

L'EIES permet de connaître les dangers du projet sur l'environnement et la population, ainsi procéder à la conservation, compensation et/ou reconstitution du site du projet après exécution.

Le tableau qui suit indique les sources de potentiels impacts, et donne quelques effets sur les composantes environnementales et sociales

Tableau IV-1 : Matrice d'analyse des sources d'impacts[8]

Phase du projet	Activité/Source d'impact	Composante environnementale (Sol, Eau, air, flore, faune)		Composante sociale (Santé, Emploi, Education, Infrastructure)	
Études préliminaires	<ul style="list-style-type: none"> • Levés topographiques • Sondage 	1. Déplacement des habitants sur le tracé du projet	-	A. Création d'emploi pour la population locale	+
		2. Erosion des surfaces du sol	-	B. Création temporaire de milieu propice au développement de moustiques, dues aux eaux stagnantes	-
Installation du chantier	<ul style="list-style-type: none"> • Débroussaillage • Décapage • Extraction de matériaux 	3. Destruction de la faune et flore naturel	-	C. Développement de maladie respiratoire, due à la poussière inhaler	-
				D. Risques d'accidents de travail	-
Construction	<ul style="list-style-type: none"> • Transport de matériaux • Réalisation de l'ouvrage 	4. Emission de bruits et polluant atmosphérique par les engins de chantier	-	E. Risques de conflits entre employés du projet et/ou la population locale	-
		5. Modification du système naturel de drainage	-		
		6. Contamination des sols par les hydrocarbures	-		
		7. Emission locale de poussière	-		

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Phase du projet	Activité/Source d'impact	Composante environnementale (Sol, Eau, air, flore, faune)		Composante sociale (Santé, Emploi, Education, Infrastructure)	
Exploitation / Entretien et maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Transport urbain • Mobilisation des matériaux et matériels 	8. Déchets le long des routes	-	F. Développement induit, création des zones commerciales, industrielles et résidentielles	+
		9. Emission de bruits par les usagers	-	G. Augmentation du trafic motorisé avec une augmentation de la dépendance énergétique dues aux importations H. Risques d'accidents de circulation	+ -
Fin de vie	<ul style="list-style-type: none"> • Déconstruction de l'ouvrage • Transport des matériaux démolis 	10. Déchets solides après destruction de l'ouvrage	-	I. Création d'emploi pour la main d'œuvre locale	+
		11. Pollution de l'air	-		

Légende

Impact positif +

Impact négatif –

Zéro Impact 0

IV.2. Mesures d'atténuations, compensation et/ou de bonification

Tableau IV-2 : Mesures d'atténuations, compensation et/ou de bonification

N° Id	Impacts		Mesure d'atténuation / compensation / bonification
1	Déplacement des habitants	-	Eviter au maximum lors de la conception, mettre en place des procédures de compensations et relocalisations des populations déplacées
2	Erosion	-	Aménager les ouvrages de réception des eaux, avec des pierres ou de béton
3	Destruction de la faune et flore naturel	-	Protection des surface décapée et reforestation dès que possible
4	Émission de bruits et polluant atmosphérique par les engins de chantier	-	Inclure des écrans antibruit lors de la conception, et installation et utilisations des filtres à airs pour les machines
5	Modification du système naturel de drainage	-	Concevoir et réaliser des systèmes de drainage de remplacement
6	Contamination des sols par les hydrocarbures	-	Récolte et recyclage des hydrocarbures
7	Emission locale de poussière	-	Arrosage et/ou lavage périodique de la voie
8	Déchets le long des routes	-	Installer les poubelles et mettre en place un système de gestion des ordures efficace
9	Emission de bruits par les usagers	-	Inclure des écrans antibruit sur la voie
10	Déchets solides après destruction de l'ouvrage	-	Recyclage des matériaux béton comme matière première pour d'autre projets

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

N° Id	Impacts		Mesure d'atténuation / compensation / bonification
A	Création d'emploi pour la population locale	+	Augmenter le pourcentage d'emploi pour la population locale lors des travaux de réalisation dans la mesure du possible
B	Création temporaire de milieu propice au développement de moustiques, dues aux eaux stagnantes	-	Informé le personnel sur l'importance d'éviter la création des lieux favorables au développement de ces vecteurs
C	Développement de maladie respiratoire, due à la poussière inhaler	-	Limitation de vitesse et développer un système d'arrosage périodique et automatique
D	Risques d'accidents de travail	-	Réduire les risques par un travail de qualité et s'assurer du respect des règles sur risques et sécurités sur le chantier
E	Risques de conflits	-	Sensibiliser les travailleurs sur la tolérance et les types de négociations pour limiter les conflits
F	Développement induit, création des zones commerciales, industrielles et résidentielles	+	Travailler avec les autorités locales et régionales pour mise sur pieds des plans et structures de contrôle du développement
G	Augmentation du trafic motorisé avec une augmentation de la dépendance énergétique dues aux importations	+	Travailler avec les autorités locales et régionales pour mise sur pieds des plans et structures de contrôle du développement
H	Risques d'accidents de circulation	-	Concevoir et appliquer des mesures de sécurités, notamment des indications de signalisation visible

Remarque

Le signe – implique des mesures d'atténuations ou compensation

Le signe + correspond aux mesures de bonifications

IV.3. Plan de gestion environnementale et sociale

Tableau IV-3 : Plan de gestion environnementale et sociale

N° Id	Mesures	Exécution	Responsable		Période
			Contrôle	Suivi	
1	Compensations et relocalisations des populations déplacées	Entreprise	Maitre d'œuvre	Entreprise, chefs coutumiers, préfet et maitre d'œuvre	Pendant les travaux
2	Aménagement des ouvrages de drainage avec des pierres ou de béton	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Pendant les travaux
3	Reforestation des surfaces décapée non protégées	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Fin des travaux
4	Inclusion des écrans antibruit, iinstallation des filtres à airs	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Pendant les travaux
5	Réalisation des systèmes de drainage de remplacement	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Début des travaux
6	Récolte et recyclage des hydrocarbures	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Pendant les travaux
7	Arrosage et/ou lavage périodique de la voie	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Pendant les travaux + Fin des travaux
8	Installation des poubelles et gestion du recyclage / élimination des ordures	Entreprise / QHSE	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Fin des travaux
9	Inclusion des écrans antibruit sur la voie	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Pendant les travaux

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

N° Id	Mesures	Exécution	Responsable		Période
			Contrôle	Suivi	
10	Recyclage des matériaux béton	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Fin de vie de l'ouvrage
A	Augmentation du pourcentage d'emploi pour la population locale	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Début des travaux
B	Informier le personnel sur l'importance d'éviter la création des eux stagnantes	Entreprise / QHSE	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Début des travaux
C	Développer un système d'arrosage périodique et automatique	Entreprise	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Fin des travaux
D	S'assurer du respect des règles sur risques et sécurités sur le chantier	Entreprise / QHSE	Maitre d'œuvre	Mission de contrôle	Début des travaux
E	Sensibiliser les travailleurs sur comment régler les conflits	Entreprise / QHSE	Maitre d'œuvre	Entreprise, chefs coutumiers, préfet et maitre d'œuvre	Pendant les travaux
F	Mise sur pieds des plans et structures de contrôle du développement	Services régionaux	Maitre d'œuvre	Entreprise, chefs coutumiers, préfet et maitre d'œuvre	Pendant les travaux
H	Concevoir et appliquer des mesures de sécurités visible	Entreprise / QHSE	Maitre d'œuvre, Ministère de la Santé	Mission de contrôle	Début des travaux

IV.4. Estimation du coût de l'étude

L'estimation du coût d'un projet permet au M.O de connaître les fonds nécessaires à levés pour la réalisation de son projet. Notre étude se portant sur une partie et non l'ensemble de l'ouvrage, l'évaluation des coûts a été fait uniquement pour le tablier dalle en béton précontraint, ses superstructures.

Tableau IV-4 : Devis estimatif de l'étude

N°	Désignation	Prix
A	Installation de chantier	-
B	Travaux préparatoires	-
C	Ouvrages provisoires	83 507 292
D	Fondations	-
E	Coffrages	4 937 459
F	Bétons	54 679 434
G	Armatures	107 426 305
H	Équipements et superstructures	26 136 064
I	Hydraulique	485 842
J	Bordures	156 968
K	Ouvrage de traitement	-
L	Signalisation et Équipements de la route	1 054 336
M	Éclairage public	-
N	Protection de l'environnement	230 646
	Montant H.T. y compris Aléas	278 614 345
	Montant T.V.A (18%)	50 150 582
	Montant T.T.C (F CFA)	328 764 928

Conclusion partielle

Le coût final toutes taxes comprises pour la réalisation du tablier allant de la Pile-Culée 69 à la Pile-Culée 72 est de 328 764 928 F CFA. Les coûts non considérés sur cette étude sont considérés sur l'étude générale du projet.

Conclusion générale et recommandations

Les résolutions des ponts hyperstatiques en béton précontraint s'effectuent généralement à l'aide de logiciels définis pour les éléments finis, qui donnent des résultats tabulés et des graphiques, cependant il ne donne pas la formulation analytique et la méthodologie des étapes intermédiaires de calcul très utiles dans un contexte afin de pouvoir évaluer les possibilités d'optimisation.

La démarche proposée dans ce travail pour la résolution analytique du tablier de l'OA13 a consisté à, diviser en 20 segments transversalement le long de chaque travée et calculer les propriétés géométriques de la section transversale de forme quelconque du pont. La méthode des foyers a été ensuite employée pour le calcul des moments hyperstatiques. Les expressions analytiques des lignes d'influence du moment fléchissant et de l'effort tranchant sont déterminées par intégration des courbes enveloppes des sollicitations. L'analyse complète a été faite à l'aide des feuilles de calcul Excel, et les résultats ont été obtenus pour chaque 20^{ème} de section par travée.

Comme recommandation il faut noter qu'il est important de faire le choix de classe du béton en fonction de la classe d'exposition de l'ouvrage afin de s'assurer que la résistance minimale du béton respecte les règlements. Également, pour s'assurer la pérennité du projet il est préconisé de faire un entretien régulier du tablier et ainsi que ses ouvrages et équipements annexe. Il est également important que les ingénieur(e)s développent la pratique de vérifier tout calcul numérique par un calcul analytique.

Bibliographie

- [1] « Climat Abidjan: température, pluie, quand partir - Climats et Voyages ». Consulté le: 4 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.climatsetvoyages.com/climat/cote-d-ivoire/abidjan>
- [2] France, Éd., Guide du projeteur ouvrages d'art : ponts courants. Bagnaux: SETRA, 1999.
- [3] Ponts-dalles Guide de conception. SETRA, 1989.
- [4] Barrières de sécurité pour la retenue des poids lourds: barrières de niveau H2 ou H3. Bagnaux: SETRA, 1999.
- [5] N. ABDEL NOUR, « Optimisation du dimensionnement des ponts en béton précontraint », Centre des Hautes Etudes de la Construction, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03705688>
- [6] P. Le Delliou, Béton précontraint aux Eurocodes. in ENTPE collection. [Vaulx-en-Velin] Lyon: ENTPE Presses universitaires de Lyon, 2003.
- [7] P. Guillemont, Ouvrages en béton armé, 4e éd. in Aide-mémoire. Paris: Éd. « Le Moniteur » Dunod, 2013.
- [8] J.-A. Hertig, Études d'impact sur l'environnement, 2e éd. revue et Augmentée. in Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, no. 23. Lausanne [Paris]: Presses polytechniques et universitaires romandes [diff. Géodif], 2006.
- [9] H. Thonier, Le Béton précontraint aux états-limites. in Cours de l'École nationale des ponts et chaussées. Paris: Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 1985.

Annexes

Annexe 1 : Bases de calculs	II
Annexe 2 : Résultats caractéristiques géométriques des sections définies par leurs contours	III
Annexe 3 : Rappel méthodes de calculs des lignes d'influences (Méthodes des Foyers)	VII
Annexe 4 : Résultats calculs des constantes mécaniques par intégration numérique	XIV
Annexe 5 : Calculs des coefficients de majoration des efforts	XX
Annexe 6 : Présentation actions de surcharges selon l'Eurocode	XXIX
Annexe 7 : Résultats du calcul des moments Min et Max	XXXIII
Annexe 8 : Résultats des calculs des efforts tranchant sur les travées	XL
Annexe 9 : Résultats calcul de la précontrainte estimée sur l'ensemble des travées	XLIV
Annexe 10 : Méthodologie d'évaluation de pertes de précontraintes[9]	LVI
Annexe 11 : Récapitulatif résultats des vérifications des contraintes sur l'ensemble des travées	LXI
Annexe 12 : Méthodologie d'estimation des armatures transversales[7]	LXVIII
Annexe 13 : Résultats du calcul des armatures transversales sur Appui	LXXI
Annexe 14 : Devis estimatif détaillé du tablier	LXXX
Annexe 15 : Divers plans du tablier	LXXXIII

Annexe 1 : Bases de calculs

1.I Règlements

- Eurocode 1 et 2 ;
- Circulaire n° 44 du 12 Août 1965 portant approbation d'une instruction provisoire relative à l'emploi du béton précontraint, dans les ouvrages dépendant du Ministère des Travaux Public et des Transports.

1.II Principes généraux et références

1.II.1 Calcul des efforts

- Efforts longitudinaux

La méthode de Foyers est celle étudié pour le calcul des lignes d'influences. Les efforts longitudinaux (moments fléchissant et efforts tranchants) sont calculés en tenant compte d'un coefficient correctif de répartition transversale établi suivant la méthode de M.M GUYON ET MASSONNET.

- Efforts transversaux

Les moments fléchissant transversaux sont calculés à partir du terme de flexion transversale selon M.M GUYON ET MASSONNET en supposant la dalle isotrope rectangulaire reposant sur appuis simples et l'influence du coefficient de poisson.

1.II.2 Calcul de la précontrainte

L'ouvrage est précontraint par des câbles filants régnant sur toute la longueur et tendus par leurs extrémités. La recherche du câblage dans ces conditions, repose essentiellement sur le respect des contraintes résiduelles admissible, non dépassement de la traction autorisée sous les charges variables. L'utilisateur peut également choisir la traction du béton à ne pas dépasser.

1.II est à noter que la dalle trop faible n'est pas économique et qu'elle peut conduire à des compressions excessives en phase provisoire et (ou) en service.

1.II.3 Unités

Les unités utilisées sont le mètre, la tonne et le grade, et leurs dérivées.

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Annexe 2 : Résultats caractéristiques géométriques des sections définies par leurs contours

Tableau 0-1 : Résultats caractéristiques géométriques des sections des travées

Travée 1																							
Portée travée / Section du Profil	15,75	PC6 9-0	PC6 9-1	PC6 9-2	PC6 9-3	PC6 9-4	PC6 9-5	PC6 9-6	PC6 9-7	PC6 9-8	PC6 9-9	PC6 9-10	PC6 9-11	PC69 -12	PC69 -13	PC69 -14	PC69 -15	PC69 -16	PC69 -17	PC69 -18	PC6 9-19	PC6 9-20	
Largeur de la section du Profil		15,46	15,34	15,22	15,09	14,95	14,81	14,66	14,51	14,35	14,19	14,03	13,87	13,71	13,55	13,39	13,23	13,07	12,91	12,74	12,58	12,43	
Division des sections		0l	0,05l	0,1l	0,15l	0,2l	0,25l	0,3l	0,35l	0,4l	0,45l	0,5l	0,55l	0,6l	0,65l	0,7l	0,75l	0,8l	0,85l	0,9l	0,95l	1,0l	
Caractéristiques	Unités	0	0,7875	1,5750	2,3625	3,1500	3,9375	4,7250	5,5125	6,3000	7,0875	7,8750	8,6625	9,4500	10,2375	11,0250	11,8125	12,6000	13,3875	14,1750	14,9625	15,7500	
Min abscisse	m	-7,730	-7,670	-7,61	-7,545	-7,475	-7,405	-7,33	-7,255	-7,175	-7,095	-7,015	-6,935	-6,855	-6,775	-6,695	-6,615	-6,535	-6,455	-6,37	-6,29	-6,215	
Max abscisse	m	7,730	7,670	7,61	7,545	7,475	7,405	7,33	7,255	7,175	7,095	7,015	6,935	6,855	6,775	6,695	6,615	6,535	6,455	6,37	6,29	6,215	
Min ordonnée	m	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	
Max ordonnée	m	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	
Section A	m ²	11,4055	11,3095	11,2135	11,1095	10,9975	10,8855	10,7655	10,6455	10,5175	10,3895	10,2615	10,1335	10,0055	9,8775	9,7495	9,6215	9,4935	9,3655	9,2295	9,1015	8,9815	
X _G	m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0	
Y _G	m	0,478	0,477	0,477	0,476	0,476	0,475	0,474	0,473	0,473	0,472	0,471	0,470	0,470	0,469	0,468	0,467	0,467	0,466	0,465	0,465	0,465	0,463919
Largeur	m	15,460	15,340	15,220	15,090	14,950	14,810	14,660	14,510	14,350	14,190	14,030	13,870	13,710	13,550	13,390	13,230	13,070	12,910	12,740	12,580	12,430	
v _x	m	7,730	7,670	7,610	7,545	7,475	7,405	7,330	7,255	7,175	7,095	7,015	6,935	6,855	6,775	6,695	6,615	6,535	6,455	6,370	6,290	6,215	
v' _x	m	-7,730	-7,670	-7,610	-7,545	-7,475	-7,405	-7,330	-7,255	-7,175	-7,095	-7,015	-6,935	-6,855	-6,775	-6,695	-6,615	-6,535	-6,455	-6,370	-6,290	-6,215	

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Travée 1																							
Portée travée / Section du Profil	15,75	PC6 9-0	PC6 9-1	PC6 9-2	PC6 9-3	PC6 9-4	PC6 9-5	PC6 9-6	PC6 9-7	PC6 9-8	PC6 9-9	PC6 9-10	PC6 9-11	PC69 -12	PC69 -13	PC69 -14	PC69 -15	PC69 -16	PC69 -17	PC69 -18	PC6 9-19	PC6 9-20	
I _y	m	197,018	192,148	187,360	182,2632	176,8797	171,604	166,07	160,657	155,0147	149,507	144,133	138,89	133,77664	128,79139	123,93257	119,19854	114,58767	110,09832	105,45969	101,2158	97,34297	
Hauteur	m	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	
v _y	m	0,471	0,471	0,470	0,469	0,468	0,467	0,466	0,465	0,464	0,463	0,462	0,461	0,459	0,458	0,457	0,455	0,454	0,453	0,452	0,450	0,449	0,447706
v' _y	m	0,478	0,477	0,477	0,476	0,476	0,475	0,474	0,473	0,473	0,472	0,471	0,470	0,470	0,469	0,468	0,467	0,467	0,466	0,465	0,465	0,465	0,463919
I _x	m ⁴	3,1969	3,1628	3,1290	3,0925	3,0533	3,0144	2,9730	2,9318	2,8881	2,8447	2,8015	2,7587	2,7161	2,6738	2,6317	2,5899	2,5484	2,5071	2,4636	2,4229	2,384957	
I _o	m ⁴	0,589998	0,5844	0,5788	0,5728	0,5663	0,5598	0,5529	0,5460	0,5386	0,5313	0,5240	0,5167	0,5094	0,5022	0,4950	0,4877	0,4806	0,4734	0,4658	0,4586	0,451951	
Travée 2																							
Portée travée / Section du Profil	20,35	PC7 0-0	PC7 0-1	PC7 0-2	PC7 0-3	PC7 0-4	PC7 0-5	PC7 0-6	PC7 0-7	PC7 0-8	PC7 0-9	PC7 0-10	PC7 0-11	PC70 -12	PC70 -13	PC70 -14	PC70 -15	PC70 -16	PC70 -17	PC70 -18	PC7 0-19	PC7 0-20	
Largeur de la section du Profil		12,42	12,23	12,04	11,87	11,70	11,55	11,40	11,26	11,14	11,02	10,92	10,82	10,74	10,66	10,59	10,54	10,49	10,46	10,43	10,41	10,41	
Division des sections		0l	0,05l	0,11	0,15l	0,2l	0,25l	0,3l	0,35l	0,4l	0,45l	0,5l	0,55l	0,6l	0,65l	0,7l	0,75l	0,8l	0,85l	0,9l	0,95l	1,0l	
Caractéristiques	Unités	0	1,0175	2,0350	3,0525	4,0700	5,0875	6,1050	7,1225	8,1400	9,1575	10,1750	11,1925	12,2100	13,2275	14,2450	15,2625	16,2800	17,2975	18,3150	19,3325	20,3500	
Min abscisse	m	-6,21	6,115	-6,02	5,935	-5,85	5,775	-5,7	5,63	-5,57	5,51	-5,46	-5,41	-5,37	-5,33	5,295	-5,27	5,245	-5,23	5,215	5,205	5,205	
Max abscisse	m	6,21	6,115	6,02	5,935	5,85	5,775	5,7	5,63	5,57	5,51	5,46	5,41	5,37	5,33	5,295	5,27	5,245	5,23	5,215	5,205	5,205	
Min ordonnée	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Travée 2																						
Portée travée / Section du Profil	20,35	PC7 0-0	PC7 0-1	PC7 0-2	PC7 0-3	PC7 0-4	PC7 0-5	PC7 0-6	PC7 0-7	PC7 0-8	PC7 0-9	PC7 0-10	PC7 0-11	PC70 -12	PC70 -13	PC70 -14	PC70 -15	PC70 -16	PC70 -17	PC70 -18	PC7 0-19	PC7 0-20
Max ordonnée	m	0,91 15	0,90 9125	0,90 675	0,90 4625	0,90 25	0,90 0625	0,89 875	0,89 7	0,89 55	0,89 4	0,89 275	0,89 15	0,890 5	0,889 5	0,888 625	0,888	0,887 375	0,887	0,886 625	0,88 6375	0,88 6375
Section A	m ²	8,97 35	8,82 15	8,66 95	8,53 35	8,39 75	8,27 75	8,15 75	8,04 55	7,94 95	7,85 35	7,77 35	7,69 35	7,629 5	7,565 5	7,509 5	7,469 5	7,429 5	7,405 5	7,381 5	7,36 55	7,36 55
X _G	m	- 1,4E-16	0	0	0	1,85 E-16	1,34 E-16	1,1E -16	0	1,1E- 16	2E- 16	0	0	1,746 E-16	0	1,33E -16	0	1,49E -16	0	0	0	0
Y _G	m	0,46 3877	0,46 3076	0,46 229	0,46 1598	0,46 0919	0,46 0329	0,45 975	0,45 922	0,45 8773	0,45 833	0,45 7972	0,45 7617	0,457 337	0,457 0607	0,456 822	0,456 6534	0,456 4863	0,456 3868	0,456 288	0,45 6222	0,45 6222
Largeur	m	12,4 2	12,2 3	12,0 4	11,8 7	11,7	11,5 5	11,4	11,2 6	11,1 4	11,0 2	10,9 2	10,8 2	10,74	10,66	10,59	10,54	10,49	10,46	10,43	10,4 1	10,4 1
v _x	m	6,21	6,11 5	6,02	5,93 5	5,85	5,77 5	5,7	5,63	5,57	5,51	5,46	5,41	5,37	5,33	5,295	5,27	5,245	5,23	5,215	5,20 5	5,20 5
v' _x	m	-6,21	6,11 5	-6,02	5,93 5	-5,85	5,77 5	-5,7	5,63	-5,57	5,51	-5,46	-5,41	-5,37	-5,33	5,295	-5,27	5,245	-5,23	5,215	5,20 5	5,20 5
I _y	m	97,0 8839	92,3 3615	87,7 4314	83,7 6633	79,9 1283	76,6 1352	73,4 073	70,4 977	68,0 6654	65,6 926	63,7 5756	61,8 6138	60,37 2152	58,90 7337	57,64 549	56,75 5443	55,87 4733	55,35 0768	54,83 0135	54,4 849	54,4 849
Hauteur	m	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
v _y	m	0,44 7623	0,44 6049	0,44 446	0,44 3027	0,44 1581	0,44 0296	0,43 9	0,43 778	0,43 6727	0,43 567	0,43 4778	0,43 3883	0,433 163	0,432 4393	0,431 803	0,431 3466	0,430 8887	0,430 6132	0,430 3371	0,43 0153	0,43 0153
v' _y	m	0,46 388	0,46 308	0,46 229	0,46 16	0,46 0919	0,46 033	0,45 975	0,45 92	0,45 877	0,45 83	0,45 797	0,45 7617	0,457 337	0,457 061	0,456 822	0,456 653	0,456 486	0,456 387	0,456 288	0,45 622	0,45 6222
I _x	m ⁴	2,38 2437	2,33 4747	2,28 7424	2,24 5393	2,20 3653	2,16 7065	2,13 07	2,09 697	2,06 8205	2,03 959	2,01 5847	1,99 2205	1,973 3624	1,954 5827	1,938 2018	1,926 5305	1,914 8836	1,907 9071	1,900 9395	1,89 6299	1,89 6299
I _o	m ⁴	0,45 1506	0,44 3066	0,43 4648	0,42 7134	0,41 9638	0,41 3036	0,40 645	0,40 031	0,39 5056	0,38 981	0,38 5444	0,38 1083	0,377 5981	0,374 1159	0,371 0715	0,368 8983	0,366 7262	0,365 4235	0,364 1212	0,36 3253	0,36 3253

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Travée 3		
Portée travée / Section du Profil	15,75	PC72 -0
Largeur de la section du Profil		10,4
Division des sections		01
Caractéristiques	Unités	0
Min abscisse	m	-5,2
Max abscisse	m	5,2
Min ordonnée	m	0
Max ordonnée	m	0,88 625
Section A	m ²	7,35 75
X _G	m	0
Y _G	m	0,45 6
Largeur	m	10,4
v _x	m	5,2
v' _x	m	-5,2
I _y	m	54,3 1282
Hauteur	m	0,89
v _y	m	0,43 006
v' _y	m	- 0,45 619
I _o	m ⁴	0,36 2819

Annexe 3 : Rappel méthodes de calculs des lignes d'influences (Méthodes des Foyers)

La ligne d'influence est, par définition, la représentation graphique de l'effet (Moments, Réactions d'appuis, efforts tranchants) de l'évolution d'un effort à un emplacement donné, due à une force unitaire mobile parcourant la structure

Résumé des opérations à effectuer

- Evaluation des constantes mécaniques a, b, c, pour chaque travée ;
- Recherche de la position des foyers gauche et de droite en évaluant successivement les φ_i et φ'_i ;
- Evaluation des moments fléchissant $\frac{d\mu_i}{dx}$ et des efforts tranchants pour chaque travée reposant sur 2 appuis simple ;
- Détermination des rotations ω' et ω'' correspondantes ;
- Recherche des moments M_i et M_{i+1} résultant des charges dans la seule travée i et évaluation des moments sur les appuis situés à gauche de A_{i-1} et à droite de A_i (cf. 3.5) ;
- Détermination par superposition des moments des moments sur appui dû à l'ensemble du chargement ;
- Evaluation des efforts tranchants et des moments fléchissant en travée.

3.1 Notations

i indice repérant le numéro de la travée i , cette travée est encadrée par les appuis i à gauche et $i+1$ à droite.

l_i portée biaise de la travée i

I inertie de la section droite

3.2 Calcul des constantes géométriques et des foyers

En négligeant la déformation due à l'effort tranchant

$$a_i = \int_0^{l_i} \left(1 - \frac{x}{l_i}\right)^2 \frac{dx}{EI}$$

$$b_i = \int_0^{l_i} \left(1 - \frac{x}{l_i}\right) \frac{x}{l_i} \cdot \frac{dx}{EI}$$

$$c_i = \int_0^{l_i} \left(\frac{x}{l_i}\right)^2 \frac{dx}{EI}$$

Soit si EI est constant :

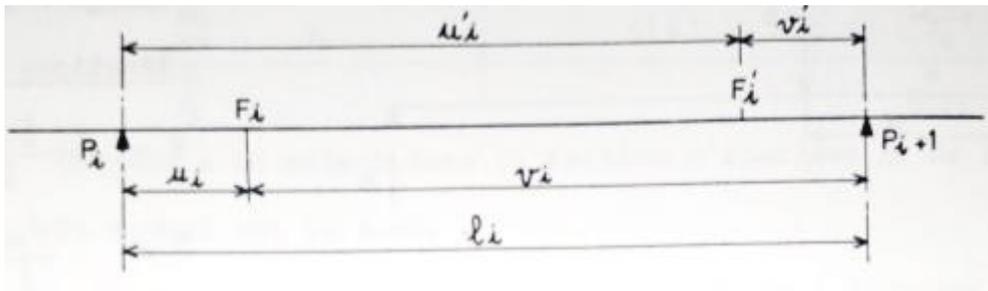
$$a_i = \frac{l_i}{3EI} \quad b_i = \frac{l_i}{6EI} \quad c_i = a_i$$

(1)

Les constantes mécaniques sont calculées par intégration numérique, utilisant les formules de Trapèze et Simpson.

3.3 Calcul des foyers de gauche et droite

Définition des foyers – Calcul des rapports focaux



Par définition on écrira :

$$\text{Rapport focal relatif au foyer de gauche } F_i : \varphi_i = \frac{u_i}{v_i}$$

$$\text{Rapport focal relatif au foyer de droite } F_i' : \varphi_i' = \frac{v_i'}{u_i'}$$

L'équation focale de gauche s'écrit :

$$\frac{b_i}{\varphi_i} = a_i + c_{i-1} - b_{i-1} \varphi_{i-1}$$

Soit avec (1)

$$\varphi_i = \frac{l_i}{2(l_i + l_{i-1}) - l_{i-1} \varphi_{i-1}}$$

(2)

Avec $\varphi_i = 0$

L'équation focale de droite s'écrit :

$$\frac{b_i}{\varphi_i} = c_i + a_{i+1} - b_{i+1} \varphi_{i+1}$$

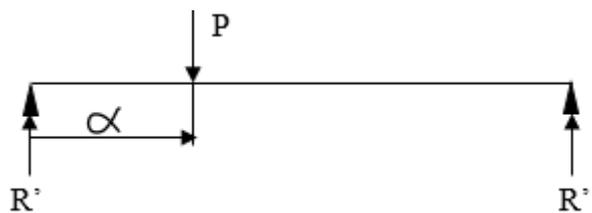
Soit avec (1)

$$\varphi'_i = \frac{l_i}{2(l_i + l_{i+1}) - l_{i+1} \varphi'_{i+1}}$$

(2')

Avec $\varphi'_n = 0$

3.4 Rappel des formules relatives à la poutre sur appuis simples d'inertie constante



Charge P à l'abscisse α

Réactions d'appuis

$$R' = \frac{P(l - \alpha)}{l} \text{ et } R'' = \frac{P\alpha}{l}$$

Moments

$$x < \alpha \quad \mu(x) = \frac{Px(l - \alpha)}{l} = R' \cdot x$$

$$x > \alpha \quad \mu(x) = \frac{P\alpha(l - x)}{l} = R''(l - x)^2 \left[\text{ou} \frac{Px(l - \alpha)}{l} - P(x - \alpha) \right]$$

Rotation

$$\omega(x) = \int_0^x \frac{\mu(x)dx}{EI}$$

En passant par la déformation et en écrivant que les déformée aux extrémités sont nulles, on obtient les rotations à gauche et droite.

$$\omega' = - \int_0^l \frac{\mu(x)}{EI} \left(1 - \frac{x}{l}\right) dx$$

$$\omega' = - \frac{P}{l^2} \left[\int_0^\alpha x(l - \alpha)(l - x)dx + \int_\alpha^l \alpha(l - x)^2 dx \right] \frac{1}{EI}$$

$$\omega'' = \int_0^l \frac{\mu(x)}{EI} \cdot \frac{x}{l} dx$$

$$\omega'' = + \frac{P}{l^2} \left[\int_0^\alpha x^2 (l - \alpha)dx + \int_\alpha^l x\alpha(l - \alpha)dx \right] \frac{1}{EI}$$

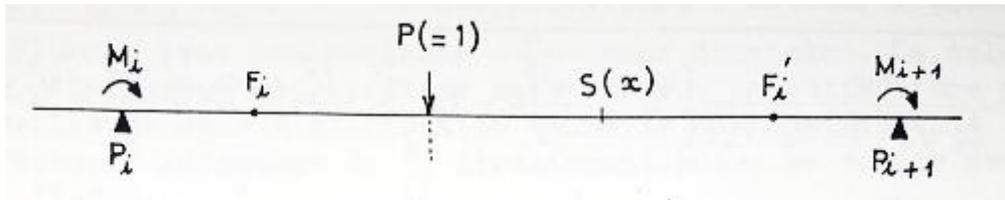
Soit :

$$\omega'(\alpha) = - \frac{P\alpha}{l} \left[-\frac{\alpha l}{2} + \frac{l^2}{3} + \frac{\alpha^2}{6} \right] \frac{1}{EI}$$

$$\omega''(\alpha) = + \frac{P\alpha}{l} \left[-\frac{\alpha^2}{6} + \frac{l^2}{6} \right] \frac{1}{EI}$$

(3)

3.5 Formules relatives à la poutre continue



Cherchons le moment dans la section d'abscisse x de la travée i.

Ce moment est la somme :

- du moment dans la section pour la travée i supposée indépendante ;
- de la combinaison linéaire des moments sur appuis i et i+1.

On obtient la formule :

$$M_i \left(1 - \frac{x}{l_i}\right) + M_{i+1} \frac{x}{l_i} + \mu$$

(4)

μ a été vu au paragraphe 2.3 , il reste à étudier M_i et M_{i+1}

3.5.1 Calcul des moments sur appuis dans la travée chargée

La travée i contient la force unité P à l'abscisse α dans cette travée.

Les moments sur appuis s'expriment :

$$M_i(\alpha) = \frac{1}{b_i} \frac{\varphi_i \omega_i' + \varphi_i \varphi_i' \omega_i''}{1 - \varphi_i \varphi_i'}$$

$$M_{i+1}(\alpha) = -\frac{1}{b_i} \frac{\varphi_i' \varphi_i \omega_i' + \varphi_i' \omega_i''}{1 - \varphi_i \varphi_i'}$$

(5)

3.5.2 Calcul des moments sur les autres appuis

La méthode de foyer permet de trouver les autres moments sur appuis de proche en proche par :

$$\begin{array}{ll}
 M_{i-1} = -\varphi_{i-1} M_i & M_{i-2} = -\varphi_{i-2} M_{i-1} \dots \\
 M_{i+2} = -\varphi'_{i+1} M_{i+1} & M_{i+3} = -\varphi'_{i+2} M_{i+2} \dots
 \end{array}$$

(6)

D'où les coefficients :

A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} pour $j=1$ à $i-1$ et $j=i+2$ à $n+1$ (n : nombre de travée)

En réalité on imprime dans la note des coefficients de la forme : $A_{ij}l_i^3, B_{ij}l_i^2, C_{ij}l_i$ qui permettent d'obtenir l'équation des lignes d'influences avec une variable $\frac{\alpha}{l_i}$ sans dimension. Le calcul éventuel d'une ligne d'influence est facilité, mais surtout on obtient une précision nettement meilleure dans l'utilisation manuelle des coefficients (par l'importance des facteurs puissance de l_i directement prise en compte dans les coefficients utilisés).

3.5.1 Ligne d'influence des moments en travées

Elle est de la forme :

$$M_i \left(1 - \frac{x}{l_i}\right) + M_{i+1} \frac{x}{l_i} + \mu$$

α) La force n'est pas dans la travée :

Le moment en x exprime, pour une force en α , par l'équation :

$$M_x(\alpha) = M_i(\alpha) \left(1 - \frac{x}{l_i}\right) + M_{i+1}(\alpha) \frac{x}{l_i}$$

(7)

$M_x(\alpha)$ est de la forme $A \alpha^3$ en fonction des A_{ij}, B_{ij}, C_{ij} sur appuis.

β) La force est dans la travée :

Le calcul de $M_x(\alpha)$ est identique puis il faut ajouter l'effet de la travée indépendante.

Cet effet μ a pour valeur :

$$\text{pour } x > \alpha : \frac{P\alpha}{l_i}(l_i - x) ; \text{pour } x < \alpha : \frac{Px}{l_i}(l_i - \alpha)$$

(8)

On obtient encore une cubique.

Pour les sorties éventuellement demandées (sorties au 1/10) :

A, B, C pour les travées différentes de celle où se trouve la section

A, B, C, D pour la droite de la travée où se trouve la section

A, B, C pour la gauche de la travée où se trouve la section

3.6 Lignes d'influence des efforts tranchants

On peut calculer directement en dérivant par rapport à x les formules des moments :

$$t_i = \frac{d\mu_i}{dx} + \frac{M_{i+1} - M_i}{l_i}$$

(8')

3.7 Aires des lignes d'influence

On intègre les différentes formules donnant les lignes d'influence.

3.8 Densité de charge permanente – poids au mètre

La charge permanente est supposée centrée et répartie, en conséquence aucun coefficient de répartition transversale n'est considéré. La masse volumique étant $2,5 \text{ T/m}^3$ et S désignant l'aire de la section brute, la charge permanente au mètre linéaire est :

$$G = 2,5 S + QSUP$$

L'effort correspondant est : $M_G = G \times \text{Aire de } L_i \text{ (} L_i \text{ ligne d'influence)}$

L'aire de la ligne d'influence étant relatif à tout l'ouvrage.

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Annexe 4 : Résultats calculs des constantes mécaniques par intégration numérique

Calcul des constantes mécaniques travée 1										
		a _i			b _i			c _i		
indice i i ∈ [0; 20]	X _i X ₀ + i*	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson
0	0	0,0000516168	0,0000516168	0,0000516168	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
0,79	0,83	0,0000467707	0,0000935413	0,0001870827	0,0000025984	0,0000051967	0,0000103935	0,0000001444	0,0000002887	0,0000005774
1,58	1,66	0,0000421213	0,0000842426	0,0000842426	0,0000049554	0,0000099109	0,0000099109	0,0000005830	0,0000011660	0,0000011660
2,36	2,49	0,0000377053	0,0000754106	0,0001508212	0,0000070697	0,0000141395	0,0000282790	0,0000013256	0,0000026512	0,0000053023
3,15	3,32	0,0000335194	0,0000670388	0,0000670388	0,0000089385	0,0000178770	0,0000178770	0,0000023836	0,0000047672	0,0000047672
3,94	4,14	0,0000295369	0,0000590739	0,0001181478	0,0000105489	0,0000210978	0,0000421956	0,0000037675	0,0000075349	0,0000150699
4,73	4,97	0,0000257869	0,0000515739	0,0000515739	0,0000119017	0,0000238033	0,0000238033	0,0000054931	0,0000109862	0,0000109862
5,51	5,80	0,0000222501	0,0000445003	0,0000890006	0,0000129792	0,0000259585	0,0000519170	0,0000075712	0,0000151425	0,0000302849
6,30	6,63	0,0000189512	0,0000379025	0,0000379025	0,0000137827	0,0000275654	0,0000275654	0,0000100238	0,0000200476	0,0000200476
7,09	7,46	0,0000158781	0,0000317562	0,0000635124	0,0000142903	0,0000285806	0,0000571612	0,0000128613	0,0000257225	0,0000514451
7,88	8,29	0,0000130406	0,0000260811	0,0000260811	0,0000144895	0,0000289790	0,0000289790	0,0000160995	0,0000321989	0,0000321989
8,66	9,12	0,0000104489	0,0000208979	0,0000417958	0,0000143673	0,0000287346	0,0000574692	0,0000197550	0,0000395101	0,0000790201
9,45	9,95	0,0000081141	0,0000162282	0,0000162282	0,0000139099	0,0000278197	0,0000278197	0,0000238455	0,0000476909	0,0000476909

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Calcul des constantes mécaniques travée 1											
		a _i			b _i			c _i			
indice i i ∈ [0; 20]	x _i x ₀ + i*	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	
10,24	10,78	0,0000060474	0,0000120948	0,0000241896	0,0000131027	0,0000262054	0,0000524109	0,0000283892	0,0000567784	0,0001135568	
11,03	11,61	0,0000042609	0,0000085219	0,0000085219	0,0000119306	0,0000238612	0,0000238612	0,0000334057	0,0000668114	0,0000668114	
11,81	12,43	0,0000027673	0,0000055346	0,0000110693	0,0000103774	0,0000207549	0,0000415097	0,0000389154	0,0000778307	0,0001556614	
12,60	13,26	0,0000015799	0,0000031598	0,0000031598	0,0000084262	0,0000168524	0,0000168524	0,0000449399	0,0000898797	0,0000898797	
13,39	14,09	0,0000007128	0,0000014257	0,0000028513	0,0000060591	0,0000121181	0,0000242362	0,0000515020	0,0001030040	0,0002060080	
14,18	14,92	0,0000001811	0,0000003622	0,0000003622	0,0000032601	0,0000065202	0,0000065202	0,0000586822	0,0001173643	0,0001173643	
14,96	15,75	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000664016	0,0001328033	0,0002656065	
15,75	16,58	0,0000001867	0,0000001867	0,0000001867	0,0000037331	0,0000037331	0,0000037331	0,0000746627	0,0000746627	0,0000746627	
a _i =			0,0003638	0,0003633	b _i =			0,0001907	0,0001912	c _i =	
								0,0004878	0,0004871		

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Calcul des constantes mécaniques travée 2										
		a _i			b _i			c _i		
indice i i ∈ [0; 20]	x _i x ₀ + i*h	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson
0	0,00	0,0000674495	0,0000674495	0,0000674495	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
1,02	1,07	0,0000616896	0,0001233791	0,0002467583	0,0000034272	0,0000068544	0,0000137088	0,0000001904	0,0000003808	0,0000007616
2,04	2,14	0,0000560913	0,0001121826	0,0001121826	0,0000065990	0,0000131979	0,0000131979	0,0000007763	0,0000015527	0,0000015527
3,05	3,21	0,0000505604	0,0001011208	0,0002022416	0,0000094801	0,0000189602	0,0000379203	0,0000017775	0,0000035550	0,0000071101
4,07	4,28	0,0000452317	0,0000904635	0,0000904635	0,0000120618	0,0000241236	0,0000241236	0,0000032165	0,0000064330	0,0000064330
5,09	5,36	0,0000400316	0,0000800632	0,0001601263	0,0000142970	0,0000285940	0,0000571880	0,0000051061	0,0000102121	0,0000204243
6,11	6,43	0,0000350766	0,0000701531	0,0000701531	0,0000161892	0,0000323784	0,0000323784	0,0000074719	0,0000149439	0,0000149439
7,12	7,50	0,0000303460	0,0000606921	0,0001213841	0,0000177018	0,0000354037	0,0000708074	0,0000103261	0,0000206522	0,0000413043
8,14	8,57	0,0000258382	0,0000516763	0,0000516763	0,0000187914	0,0000375828	0,0000375828	0,0000136665	0,0000273329	0,0000273329
9,16	9,64	0,0000216412	0,0000432824	0,0000865649	0,0000194771	0,0000389542	0,0000779084	0,0000175294	0,0000350588	0,0000701176
10,18	10,71	0,0000177279	0,0000354559	0,0000354559	0,0000196977	0,0000393954	0,0000393954	0,0000218864	0,0000437727	0,0000437727
11,19	11,78	0,0000141676	0,0000283351	0,0000566702	0,0000194804	0,0000389608	0,0000779216	0,0000267855	0,0000535711	0,0001071422
12,21	12,85	0,0000109472	0,0000218943	0,0000218943	0,0000187666	0,0000375331	0,0000375331	0,0000321712	0,0000643425	0,0000643425
13,23	13,92	0,0000081177	0,0000162353	0,0000324707	0,0000175883	0,0000351766	0,0000703531	0,0000381079	0,0000762159	0,0001524318

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
 précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
 d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Calcul des constantes mécaniques travée 2											
		a_i			b_i			c_i			
indice i <i>i</i> ∈ [0; 20]	x_i x₀ + i*h	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	
14,25	14,99	0,0000056835	0,0000113670	0,0000113670	0,0000159139	0,0000318277	0,0000318277	0,0000445588	0,0000891176	0,0000891176	
15,26	16,07	0,0000036589	0,0000073178	0,0000146355	0,0000137208	0,0000274416	0,0000548832	0,0000514530	0,0001029061	0,0002058121	
16,28	17,14	0,0000020703	0,0000041406	0,0000041406	0,0000110417	0,0000220833	0,0000220833	0,0000588889	0,0001177777	0,0001177777	
17,30	18,21	0,0000009234	0,0000018468	0,0000036937	0,0000078491	0,0000156981	0,0000313962	0,0000667170	0,0001334340	0,0002668679	
18,32	19,28	0,0000002317	0,0000004634	0,0000004634	0,0000041702	0,0000083405	0,0000083405	0,0000750644	0,0001501288	0,0001501288	
19,33	20,35	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000838364	0,0001676728	0,0003353457	
20,35	21,42	0,0000002322	0,0000002322	0,0000002322	0,0000046447	0,0000046447	0,0000046447	0,0000928935	0,0000928935	0,0000928935	
a_i =			0,0004883	0,0004877	b_i =			0,0002568	0,0002575	c_i =	
			0,0006379	0,0006371							

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Calcul des constantes mécaniques travée 3										
		a _i			b _i			c _i		
indice i i ∈ [0; 20]	X _i X ₀ + i*h	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson
0	0,00	0,0000839367	0,0000839367	0,0000839367	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
0,79	0,83	0,0000753338	0,0001506675	0,0003013350	0,0000041852	0,0000083704	0,0000167408	0,0000002325	0,0000004650	0,0000009300
1,58	1,66	0,0000671959	0,0001343917	0,0001343917	0,0000079054	0,0000158108	0,0000158108	0,0000009300	0,0000018601	0,0000018601
2,36	2,49	0,0000595230	0,0001190459	0,0002380919	0,0000111606	0,0000223211	0,0000446422	0,0000020926	0,0000041852	0,0000083704
3,15	3,32	0,0000523151	0,0001046302	0,0001046302	0,0000139507	0,0000279014	0,0000279014	0,0000037202	0,0000074404	0,0000074404
3,94	4,14	0,0000455723	0,0000911445	0,0001822891	0,0000162758	0,0000325516	0,0000651032	0,0000058128	0,0000116256	0,0000232512
4,73	4,97	0,0000392945	0,0000785889	0,0000785889	0,0000181359	0,0000362718	0,0000362718	0,0000083704	0,0000167408	0,0000167408
5,51	5,80	0,0000334817	0,0000669633	0,0001339267	0,0000195310	0,0000390619	0,0000781239	0,0000113931	0,0000227861	0,0000455723
6,30	6,63	0,0000281339	0,0000562678	0,0000562678	0,0000204610	0,0000409220	0,0000409220	0,0000148807	0,0000297615	0,0000297615
7,09	7,46	0,0000232512	0,0000465023	0,0000930046	0,0000209260	0,0000418521	0,0000837042	0,0000188334	0,0000376669	0,0000753338
7,88	8,29	0,0000188334	0,0000376669	0,0000376669	0,0000209260	0,0000418521	0,0000418521	0,0000232512	0,0000465023	0,0000465023
8,66	9,12	0,0000148807	0,0000297615	0,0000595230	0,0000204610	0,0000409220	0,0000818441	0,0000281339	0,0000562678	0,0001125356
9,45	9,95	0,0000113931	0,0000227861	0,0000227861	0,0000195310	0,0000390619	0,0000390619	0,0000334817	0,0000669633	0,0000669633
10,24	10,78	0,0000083704	0,0000167408	0,0000334817	0,0000181359	0,0000362718	0,0000725436	0,0000392945	0,0000785889	0,0001571778

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Calcul des constantes mécaniques travée 3											
		a _i			b _i			c _i			
indice i i ∈ [0; 20]	X _i X ₀ + i*h	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	f(x)	Trapèze	Simpson	
11,03	11,61	0,0000058128	0,0000116256	0,0000116256	0,0000162758	0,0000325516	0,0000325516	0,0000455723	0,0000911445	0,0000911445	
11,81	12,43	0,0000037202	0,0000074404	0,0000148807	0,0000139507	0,0000279014	0,0000558028	0,0000523151	0,0001046302	0,0002092604	
12,60	13,26	0,0000020926	0,0000041852	0,0000041852	0,0000111606	0,0000223211	0,0000223211	0,0000595230	0,0001190459	0,0001190459	
13,39	14,09	0,0000009300	0,0000018601	0,0000037202	0,0000079054	0,0000158108	0,0000316216	0,0000671959	0,0001343917	0,0002687834	
14,18	14,92	0,0000002325	0,0000004650	0,0000004650	0,0000041852	0,0000083704	0,0000083704	0,0000753338	0,0001506675	0,0001506675	
14,96	15,75	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000839367	0,0001678734	0,0003357468	
15,75	16,58	0,0000002325	0,0000002325	0,0000002325	0,0000046502	0,0000046502	0,0000046502	0,0000930046	0,0000930046	0,0000930046	
a _i =			0,0005605	0,0005597	b _i =			0,0002766	0,0002774	c _i =	
								0,0006535	0,0006527		

Annexe 5 : Calculs des coefficients de majoration des efforts

5.1 Coefficient de majoration dynamique

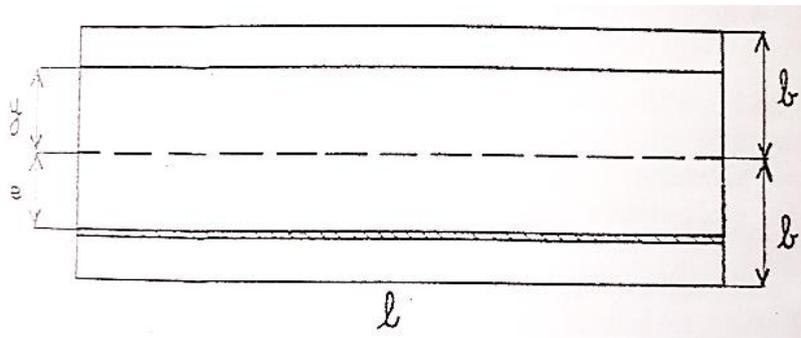
Le coefficient de majoration dynamique est intégré dans l'évaluation des calculs des surcharges selon l'Eurocode d'après le guide du SETRA.

5.2 Coefficients correctifs de répartition transversale (Méthode de M. GUYON)

Le présent paragraphe suppose dans tous les cas de charge permanente centrée par rapport à l'axe de la dalle, et uniformément répartie. Les coefficients de répartition transversale ne concernent donc que les surcharges.

Il est à noter que le moment fléchissant sous un cas de surcharge déterminé est calculé pour la largeur totale de la dalle. Également les formules de GUYON-MASSONNET donnent les lignes d'influences de répartition transversale sur la largeur utile pour une fibre donnée.

5.2.1 Travée indépendante



Le paramètre d'entretoisement en supposant la dalle pleine et rectangulaire s'écrit :

$$\theta = \frac{b}{l}$$

Les inerties de torsion et de flexion au mètre linéaire sont égales dans deux sens perpendiculaires et le paramètre de torsion est égal à 1.

Equation de la ligne d'influence :

$$k = \frac{\sigma}{2sh^2\sigma} \left[(\sigma ch\sigma + sh\sigma)ch\theta X - \theta X sh\sigma sh\theta X + \frac{P_\beta P_\psi}{3sh\sigma ch\sigma - \sigma} + \frac{Q_\beta Q_\psi}{3sh\sigma ch\sigma + \sigma} \right]$$

En posant :
$$\begin{cases} P_{\mu} = (\sigma ch - sh \sigma) ch \theta \mu - \theta \mu sh \sigma sh \theta \mu \\ Q_{\mu} = (2sh \sigma + \sigma ch \sigma) sh \theta \mu - \theta \mu sh \sigma ch \theta \mu \end{cases} \quad \mu \begin{cases} = \beta \\ = \psi \end{cases}$$

$$\psi = \frac{\pi e}{b} \quad \beta = \frac{\pi y}{b} \quad \sigma = \pi \theta \quad X = \pi - |(\beta - \psi)|$$

Pi ayant la valeur habituelle de 3,15.

e : excentricité de la fibre chargée (distance à l'axe longitudinal mécanique)

y : excentricité de la fibre étudiée (distance à l'axe longitudinal mécanique)

5.2.2 Assimilation des travées continues biaises à des travée indépendantes droites

b demi-largeur droite équivalente

λ_i Portée biaise équivalente

Si la portée biaise (lue) est l_i , la portée biaise indépendante équivalente sera :

$$\lambda_i = l_i \sqrt[4]{1 - 4,8 \frac{(M_{i,i} + M_{i,i+1})}{l_i^2}}$$

C'est la longueur de la travée indépendante fictive présentant la même flèche que la travée l_i envisagée sous une charge uniforme de densité 1, couvrant toute la travée.

$M_{i,j}$: valeur absolue de l'aire de la ligne d'influence du moment fléchissant sur l'appui j en travée i.

Pour calculer les lignes d'influence du coefficient de répartition transversal tous les 0,125 cm sur la largeur utile de la dalle on définit la travée droite équivalente ayant pour largeur droite, la largeur équivalente et portée droite la longueur biaise équivalente.

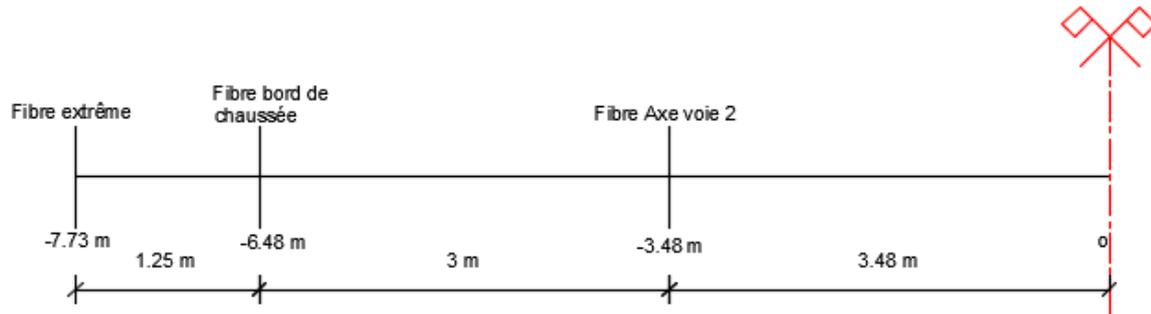
$$\theta = \frac{b}{\lambda_i}$$

Les lignes d'influence des coefficients correctifs sont toujours positives sur toute la largeur du tablier en l'absence d'anisotropie. Les efforts longitudinaux en surchargeant toutes les voies et les deux trottoirs simultanément.

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

Pour la recherche des moments fléchissant et efforts tranchants sous les surcharges, le calcul se fait en utilisant les lignes d'influence dont les ordonnées sont multipliées par le coefficient de répartition transversale relatif à la surcharge considérée et pour les surcharges roulantes.

Le figure ci-dessous présente les bandes des coefficients de répartition transversale, et leurs valeurs retenues sont les plus défavorables pour la travée 1.



*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-2 : Données pour le calcul du coefficient de répartition transversale k

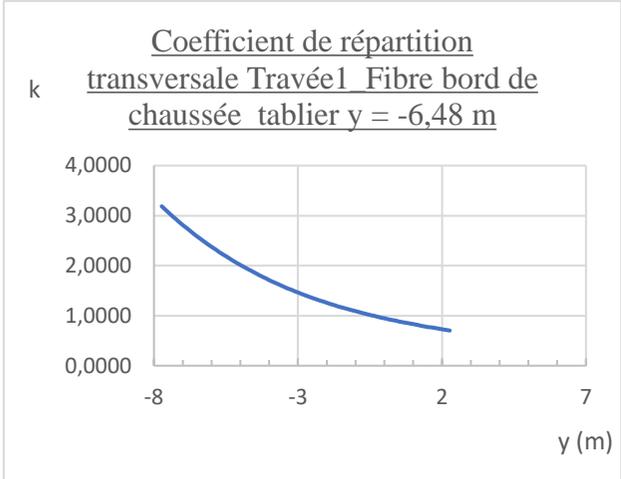
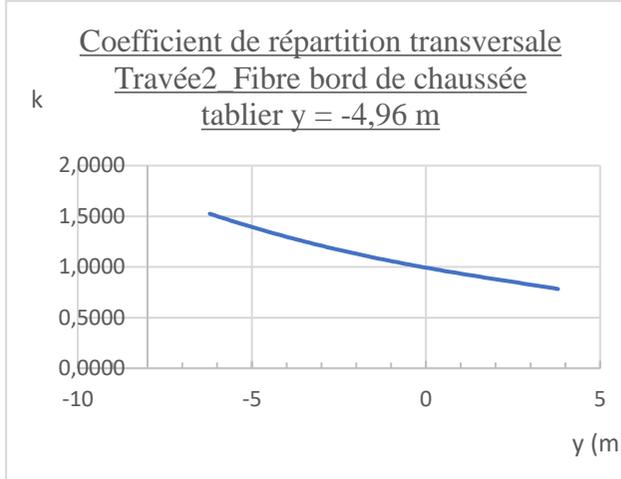
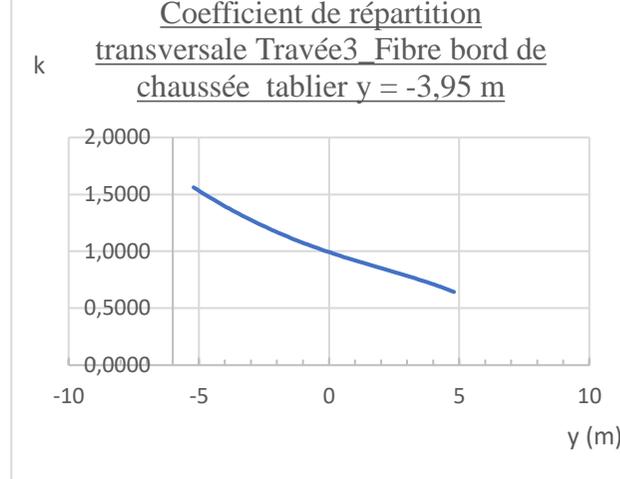
Coefficient correctif de répartition transversale Travée1_Fibre extrême tablier y = -7,73 m																					
y =	-7,73	$\theta = \frac{b}{l_i}$	0,23	b =	3,46	$B = \frac{\pi y}{b}$	-7,02	$B = \pi \theta$	0,73	$P_\beta =$	-2,82	$Q_\beta =$	-2,75	$\frac{B/2sh}{^2B} =$	0,58	$\frac{Bch}{B + shB} =$	1,73	$\frac{3shBc}{hB-B} =$	2,32	$\frac{3shBchB}{+B} =$	3,78
e =																					
7,73	7,48	7,23	7,10	6,98	6,85	6,73	6,60	6,48	6,35	6,23	6,10	5,98	5,85	5,730	5,60	5,48	5,35	-5,230	5,10	-4,980	4,85
0	0	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5		5	0	5		5		5
$\Psi = \frac{\pi e}{b}$																					
-7,02	-6,80	-6,57	-6,46	-6,34	-6,23	-6,12	-6,00	-5,89	-5,78	-5,66	-5,55	-5,43	-5,32	-5,21	-5,09	-4,98	-4,87	-4,75	-4,64	-4,53	-4,41
$X = \pi - (\beta - \psi) $																					
3,14	2,91	2,69	2,57	2,46	2,35	2,23	2,12	2,01	1,89	1,78	1,66	1,55	1,44	1,32	1,21	1,10	0,98	0,87	0,76	0,64	0,53
θX																					
0,73	0,68	0,62	0,60	0,57	0,54	0,52	0,49	0,47	0,44	0,41	0,39	0,36	0,33	0,31	0,28	0,25	0,23	0,20	0,18	0,15	0,12
ch(θX)																					
1,28	1,24	1,20	1,18	1,17	1,15	1,14	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01
sh(θX)																					
0,80	0,73	0,66	0,63	0,60	0,57	0,54	0,51	0,48	0,45	0,42	0,40	0,37	0,34	0,31	0,28	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	0,12
$P_\Psi = (\sigma ch \sigma - sh \sigma) ch \theta \psi - \theta \psi sh \sigma sh \theta \psi$																					
-2,82	-2,56	-2,32	-2,21	-2,10	-2,00	-1,90	-1,80	-1,71	-1,62	-1,53	-1,45	-1,37	-1,29	-1,22	-1,15	-1,08	-1,01	-0,95	-0,89	-0,83	-0,77
$Q_\Psi = (2 sh \sigma + \sigma ch \sigma) sh \theta \psi - \theta \psi sh \sigma ch \theta \psi$																					
-2,75	-2,68	-2,60	-2,56	-2,52	-2,48	-2,44	-2,40	-2,35	-2,31	-2,27	-2,22	-2,18	-2,14	-2,09	-2,05	-2,00	-1,96	-1,91	-1,87	-1,82	-1,78
k																					
4,13	3,92	3,72	3,62	3,53	3,44	3,35	3,27	3,18	3,10	3,02	2,94	2,87	2,80	2,729	2,66	2,59	2,52	2,4645	2,40	2,3424	2,28
80	64	61	99	64	54	69	08	70	54	61	90	39	09	8	07	35	81		26		39

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

Tableau 0-3 : Récapitulatif des résultats du coefficient répartition transversale pour chaque bande

Tableau coefficient répartition transversale											
Travée 1				Travée 2				Travée 3			
Fibre extrême tablier y = -7,73 m				Fibre extrême tablier y = -6,21 m				Fibre extrême tablier y = -5,20 m			
<p align="center">Coefficient de répartition transversale Travée1_Fibre extrême tablier y = -7,73 m</p>				<p align="center">Coefficient de répartition transversale Travée2_Fibre extrême tablier y = -6,21 m</p>				<p align="center">Coefficient de répartition transversale Travée3_Fibre extrême tablier y = -5,20 m</p>			
Voie 1		Voie 2		Voie 1		Voie 2		Voie 1		Voie 2	
Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient	Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient	Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient
y=-4,98 m	2,34	y=-3,48 m	1,74	y=-3,46 m	1,33	y=-1,96	1,16	y=-2,45 m	1,30	y=-0,95	1,09
Coefficient max Travée 1 Fibre extrême	2,34			Coefficient max Travée 2 Fibre extrême	1,33			Coefficient max Travée 3 Fibre extrême	1,30		

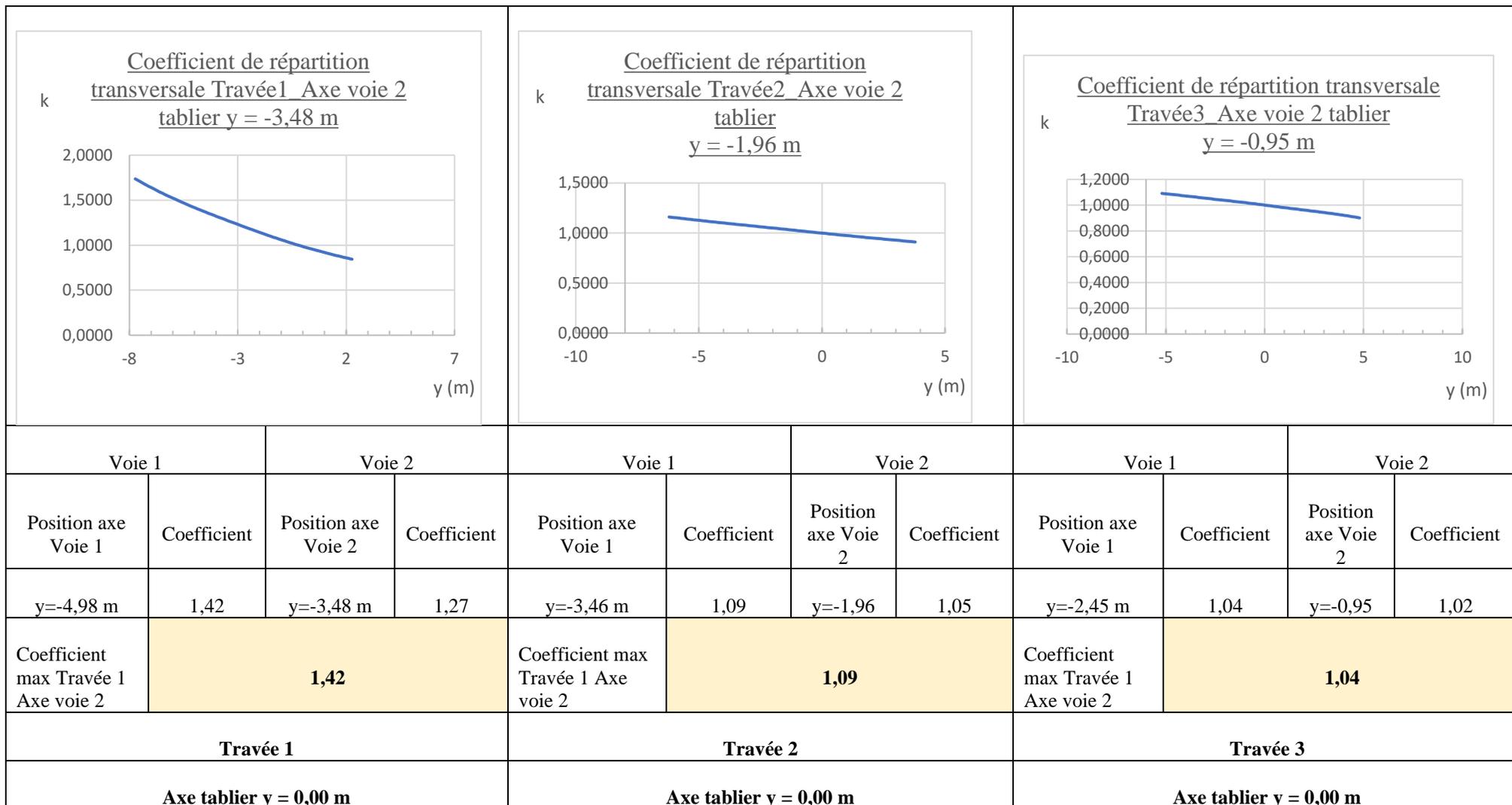
*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Travée 1				Travée 2				Travée 3			
Fibre bord de chaussée tablier y = -6,48 m				Fibre bord de chaussée tablier y = -4,96 m				Fibre bord de chaussée tablier y = -3,95 m			
<p><u>Coefficient de répartition transversale Travée1 Fibre bord de chaussée tablier y = -6,48 m</u></p> 				<p><u>Coefficient de répartition transversale Travée2 Fibre bord de chaussée tablier y = -4,96 m</u></p> 				<p><u>Coefficient de répartition transversale Travée3 Fibre bord de chaussée tablier y = -3,95 m</u></p> 			
Voie 1		Voie 2		Voie 1		Voie 2		Voie 1		Voie 2	
Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient	Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient	Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient
y=-4,98 m	2,01	y=-3,48 m	1,58	y=-3,46 m	1,25	y=-1,96	1,13	y=-2,45 m	1,21	y=-0,95	1,07
Coefficient max Travée 1 Fibre bord de chaussée	2,01		Coefficient max Travée 2 Fibre bord de chaussée		1,25		Coefficient max Travée 3 Fibre bord de chaussée		1,21		
Travée 1				Travée 2				Travée 3			

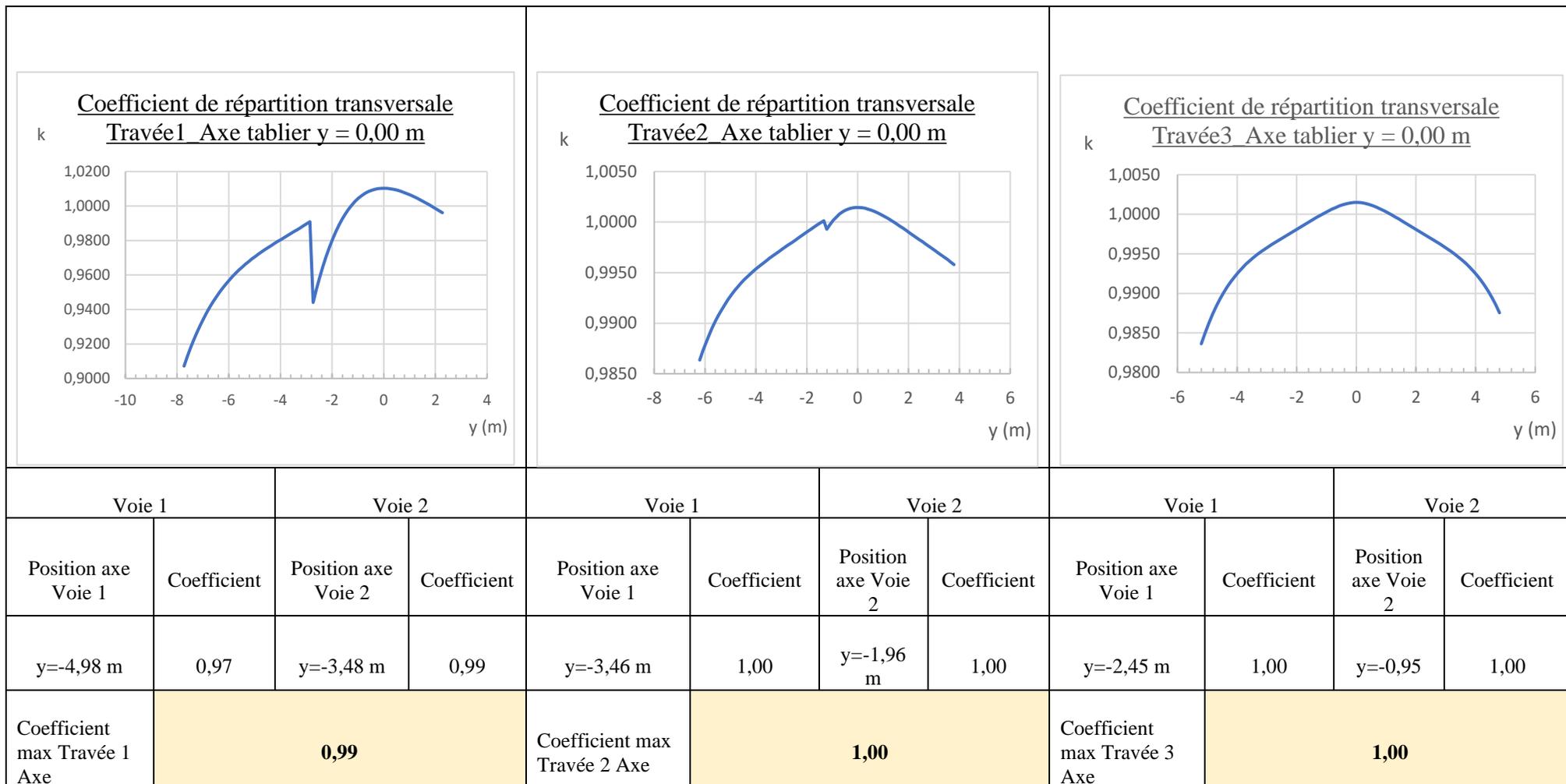
*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Axe voie 1 tablier y = -4,98 m				Axe voie 1 tablier y = -3,46 m				Axe voie 1 tablier y = -2,45 m			
<p align="center">Coefficient de répartition k transversale Travée1 Axe voie 1 de chaussée tablier y = -4,98 m</p>				<p align="center">Coefficient de répartition k transversale Travée2 Axe voie 1 tablier y = -3,46 m</p>				<p align="center">Coefficient de répartition k transversale Travée3 Axe voie 1 tablier y = -2,45 m</p>			
Voie 1		Voie 2		Voie 1		Voie 2		Voie 1		Voie 2	
Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient	Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient	Position axe Voie 1	Coefficient	Position axe Voie 2	Coefficient
y=-4,98 m	1,68	y=-3,48 m	1,42	y=-3,46 m	1,16	y=-1,96	1,09	y=-2,45 m	1,13	y=-0,95	1,04
Coefficient max Travée 1 Axe voie 1	1,68		Coefficient max Travée 2 Axe voie 1	1,16		Coefficient max Travée 2 Axe voie 1	1,13				
Travée 1				Travée 2				Travée 3			
Axe voie 2 tablier y = -3,48 m				Axe voie 2 tablier y = -1,96 m				Axe voie 2 tablier y = -0,95 m			

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)



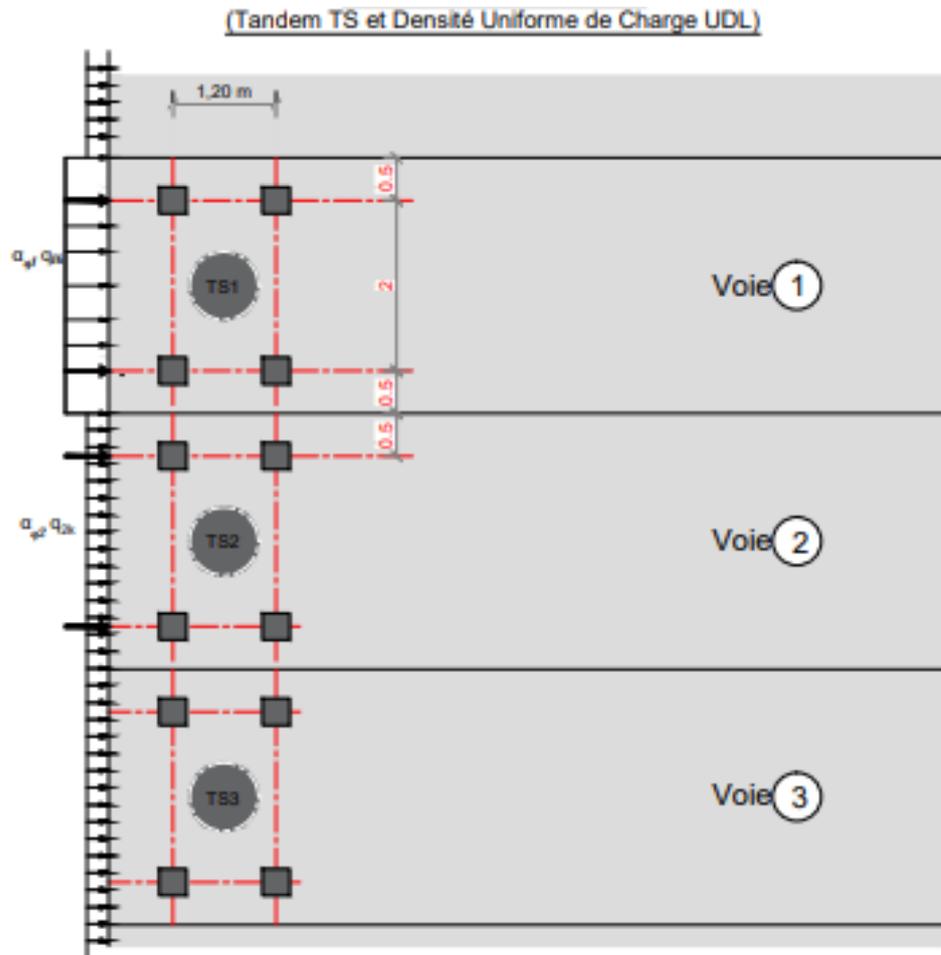
*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*



Annexe 6 : Présentation actions de surcharges selon l'Eurocode

Charges sur les ponts dues au trafic

Modèle de charge LM1



VUE EN PLAN

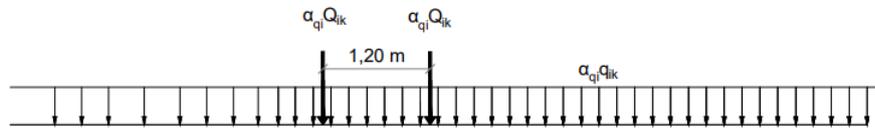
Classe	α_{ef}	$\alpha_{el} l \geq 2$	α_{qr}	$\alpha_{qr} l \geq 2$	α_{ps}
1 ^{re}	1	1	1	1	1
2 ^e	0.9	0.8	0.7	1	1
3 ^e	0.8	0.5	0.5	1	1

Classes de chargement pour les ponts routiers

Emplacement	Tandem TS	Système UDL
	Charges d'essieu Q_k (kN)	q_k (ou q_{rk}) (kN/m ²)
Voie n°1	300	9
Voie n°2	200	2,5
Voie n°3	100	2,5
Autres voies	0	2,5
Aire résiduelle (q_k)	0	2,5

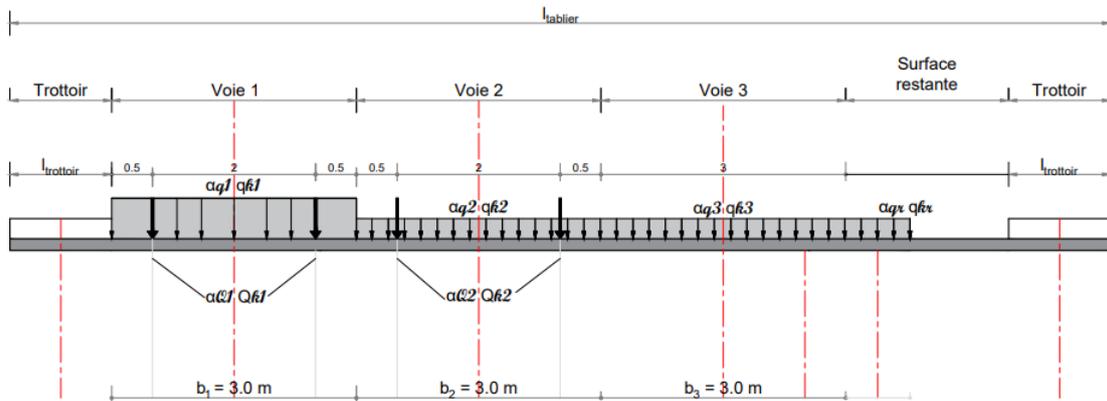
Valeurs caractéristiques de référence pour le modèle de charges n°1

MODELE DE CHARGE LM1
(Tandem TS et Densité Uniforme de Charge UDL)
SENS LONGITUDINAL



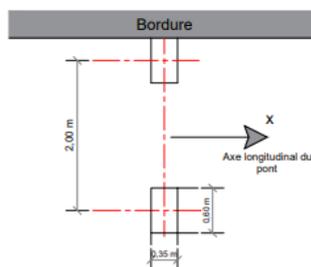
Sens longitudinal

MODELE DE CHARGE LM1
(Tandem TS et Densité Uniforme de Charge UDL)
SENS TRANSVERSAL



Positionnement des actions de trafic (Sens transversal)

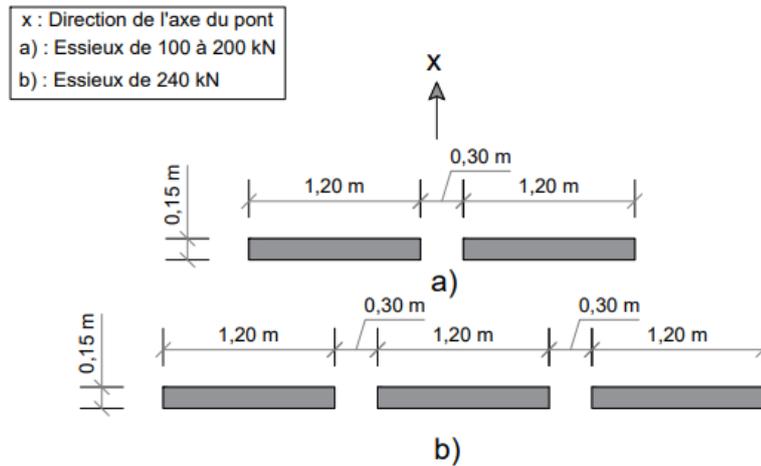
Modèle de charge LM2 (Essieu unique)



Classe	α_{q1}	$\alpha_{qi} \ i > 2$	α_{qj}	$\alpha_{qi} \ i > 2$	α_{qr}
1 ^{re}	1	1	1	1	1
2 ^e	0.9	0.8	0.7	1	1
3 ^e	0.8	0.5	0.5	1	1

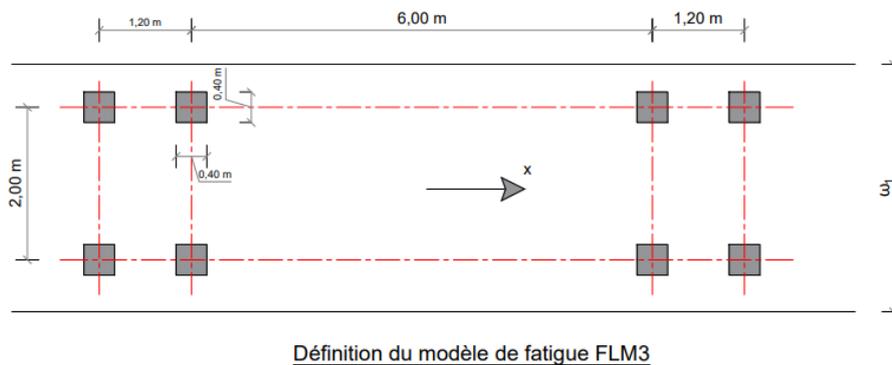
Classes de chargement pour les ponts routiers

Modele de charge LM3 (Véhicules spéciaux)



Disposition des essieux et définition des aires de contact des roues pour les véhicules spéciaux

Modèle de charge LM4 (Chargement de foule)



Charge de foule (Valeur caractéristique recommandées 5 kN/m²)

Modèle de charges horizontales

$$Q_{ik} = 0,6\alpha_{Q1} (2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{Q1}q_{1k}w_1L$$

$$180\alpha_{Q1} \text{ (kN)} \leq Q_{ik} \leq 900 \text{ (kN)}$$

où

L : longueur du tablier ou de la partie de tablier considérée;

2Q_{1k} : poids des deux essieux du tandem situé sur la voie n°1 (Q_{1k} si L < 1,2 m) ;

q_{1k} : valeur caractéristique de la densité de charge répartie sur voie n°1;

α_{Q1} : facteur d'ajustement dépendant de la classe de chargement.

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

La force de freinage ou d'accélération est représentée par une force longitudinale appliquée au niveau de la chaussée. Elle est calculée comme une fraction de la charge verticale totale du modèle LM1 relative à la voie conventionnelle n°1, selon l'expression :

Expression de la valeur caractéristique de la force centrifuge

$Q_{tk} = 0,2Q_v$ (kN)	Si $r < 200$ m
$Q_{tk} = 400Q_v/r$ (kN)	Si $200 \leq r \leq 1500$ m
$Q_{tk} = 0$	Si $r > 1500$ m

où r est le rayon (en mètre) de courbure en plan de l'axe de la chaussée et Q_v est le poids total maximal des charges concentrées verticales des tandems du modèle de charge n°1, soit $\sum \alpha_{Qi}$ ($2Q_{ik}$)

**Détermination des groupes de charges de trafic
(valeur caractéristiques de l'action à composantes multiples)**

		CHAUSSEE					TROTTOIRS ET PISTES CYCLABLES	
Type de charge		Forces verticales			Forces horizontales		Forces verticales seulement	
Référence		4.3.2	4.3.3	4.3.4	4.3.5	4.4.1	4.4.2	5.3.2-(1)
Système de chargement		LM1 (TS et UDL)	LM2 (Essieu unique)	LM3 (Véhicules spéciaux)	LM4 (Chargement de foule)	Forces de freinage et d'accélération ^a	Forces centrifuges et forces transversales ^a	Charges uniformément répartie Valeurs de combinaison ^b
Groupes de charges	gr1a	Valeurs caractéristiques						
	gr1b		Valeur caractéristique					
	gr2	Valeurs fréquentes				Valeur caractéristique	Valeur caractéristique	
	gr3 ^d							Valeur caractéristique ^c
	gr4				Valeur caractéristique			Valeur caractéristique
	gr5	Voir Annexes A		Valeur caractéristique				
Action composante dominante (appelée composante associée au groupe)								
^a Peuvent être définies dans l'annexe Nationale. ^b Peut être définie dans l'Annexe Nationale. La valeur recommandée est de 3 kN/m ² . ^c Voir 5.3.2.1-(2). Il convient de considérer qu'un seul trottoir est chargé si l'effet est plus défavorable que celui de deux trottoirs chargés. ^d Ce groupe est sans objet si gr4 est pris en compte.								

Annexe 7 : Résultats du calcul des moments Min et Max

Tableau 0-4 : Tableau des données nécessaires au calculs des moments et des efforts tranchants

Données				
Désignation	Unité	Valeur		
Poids volumique du béton	MN/m ³	0,025		
Poids volumique de la couche de roulement	MN/m ³	0,024		
Poids volumique de l'étanchéité	MN/m ³	0,020		
Largeur du tablier à PC69	m	15,46		
Largeur du tablier à P70	m	12,42		
Largeur du tablier à P71	m	10,40		
Largeur d'une voie cas de charge LM1 (Système UDL)	m	3,00		
Épaisseur de la couche de roulement	m	0,07		
Épaisseur étanchéité	m	0,03		
Aire de section à PC69	m ²	11,4055		
Aire de section à PC70	m ²	8,8215		
Aire de section à PC71	m ²	7,3575		
Aire de section de Corniche	m ²	0,09		
Poids linéaire d'une BN4	MN/ml	0,001		
Charge de Foule	MN/m ²	0,005		
Charge LM1 (Système UDL) Voie 1	MN/m ²	0,009		
Charge LM1 (Système UDL) Voie 2	MN/m ²	0,0025		
Charge LM1 (Système UDL) Aire résiduelle	MN/m ²	0,0025		
		Travée 1	Travée 2	Travée 3
Coefficient de répartition transversale		k ₁	k ₂	k ₃
Fibre bord de tablier - bord de chaussée	-	2,34	1,33	1,33
Fibre bord de chaussée - Axe voie 2	-	2,01	1,33	1,33
Axe voie 2 - Axe tablier (bande centrale entre l'axe de la voie 2 sens 1 et l'axe de la voie 2 sens opposé)	-	1,42	1,33	1,33

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
 précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
 d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

Tableau 0-5 : Résultats du calcul des moments de l'appui 0 à l'appuis 1

Section		Appui	Moments en Travée 1 (CC en Travée 1 + CC en Travée 2 + CC en Travée 3)																			Appui
		0	0,00L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L
Somme des Surfaces d'influence	m ²	0,00	4,36	8,61	11,21	13,71	15,58	16,84	17,48	17,49	16,89	15,67	13,82	11,36	8,27	4,57	0,24	-4,70	10,27	16,45	23,26	-30,68
Actions permanentes																						
Poids propre																						
Section moyenne de chaque travée	m ²	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11
Poids propre au mètre linéaire	MN/ml	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Moment min	MNm	0,00	1,10	2,18	2,83	3,47	3,94	4,26	4,42	4,42	4,27	3,96	3,49	2,87	2,09	1,15	0,06	-1,19	-2,60	-4,16	-5,88	-7,76
Superstructure																						
Couche de roulement au mètre linéaire																						
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Poids propre de la couche de roulement au mètre linéaire	MN/ml	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Couche d'étanchéité au mètre linéaire																						
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418
Poids propre de la couche d'étanchéité au mètre linéaire	MN/ml	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Corniche																						
Poids propre des Corniches au mètre linéaire	MN/ml	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
BN4																						
Poids propre des BN4 au mètre linéaire	MN/ml	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Poids de superstructure	MN/ml	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038
Moment superstructure	MNm	0,00	0,167	0,329	0,429	0,525	0,597	0,645	0,669	0,670	0,647	0,600	0,529	0,435	0,317	0,175	0,009	-	-	-	-	-1,175
Moment dû aux charges permanentes	MNm	0,00	1,268	2,506	3,264	3,991	4,537	4,903	5,088	5,093	4,917	4,561	4,024	3,306	2,408	1,330	0,071	-	-	-	-	-8,933

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

		Appui 0	Moments en Travée 1 (CC en Travée 1 + CC en Travée 2 + CC en Travée 3)																		Appui 1	
Section		0,00L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Actions variables																						
Charge LM1 (Système UDL)																						
Voie 1 de 3m	MN/ml	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Voie 2 de 3m	MN/ml	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Aire résiduelle	MN/ml	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Poids Charge LM1 (Système UDL)	MN/ml	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054
Moment LM1 (Système UDL)	MNm	0,000	0,237	0,468	0,609	0,745	0,847	0,915	0,950	0,951	0,918	0,851	0,751	0,617	0,450	0,248	0,013	-	-	-	-	-1,668
Charge LM1 (Tandem TS)																						
Voie 1 de 3m	MNm	0,000	0,429	0,801	1,110	1,371	1,581	1,737	1,845	1,905	1,920	1,890	1,815	1,704	1,554	1,374	1,158	0,921	0,660	0,381	0,210	-1,089
Voie 2 de 3m	MNm	0,000	0,286	0,534	0,740	0,914	1,054	1,158	1,230	1,270	1,280	1,260	1,210	1,136	1,036	0,916	0,772	0,614	0,440	0,254	0,140	-0,726
Moment LM1 (Tandem TS)	MNm	0	0,715	1,335	1,850	2,285	2,635	2,895	3,075	3,175	3,200	3,150	3,025	2,840	2,590	2,290	1,930	1,535	1,100	0,635	0,350	-1,815
Moment LM1 (UDL+TS)	MNm	0,000	0,952	1,803	2,459	3,030	3,482	3,810	4,025	4,126	4,118	4,001	3,776	3,457	3,040	2,538	1,943	1,279	0,542	-	-	-3,483
Charge de Foule																						
Charge de Foule	MN/ml	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070
Moment Charge de Foule	MNm	0,000	0,304	0,600	0,781	0,955	1,086	1,174	1,218	1,219	1,177	1,092	0,963	0,792	0,577	0,318	0,017	-	-	-	-	-2,139
Moment dû aux charges d'exploitation	MNm	0,000	1,256	2,403	3,241	3,985	4,568	4,984	5,243	5,345	5,295	5,093	4,740	4,249	3,616	2,857	1,960	0,952	-	-	-	-5,621
Moment max fibre bord de tablier = (Mmin + Msuperstructure + Max (kiLM1 ; Mfoule))	MNm	0,000	3,498	6,728	9,025	11,088	12,693	13,828	14,516	14,757	14,563	13,934	12,869	11,405	9,528	7,275	4,622	1,628	-	-	-	-

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-6 : Résultats du calcul des moments de la section 0,05l à 0,95l de la travée 2

		Moments en Travée 2 (CC en Travée 1 + CC en Travée 2 + CC en Travée 3)																		
Section		0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L
Somme des Surfaces d'influence	m ²	-20,71	-11,77	-3,87	3,00	8,84	13,64	17,40	20,13	21,82	22,48	22,10	20,68	18,24	14,75	10,23	4,68	-1,91	-9,54	-18,20
Actions permanentes																				
Poids propre																				
Section moyenne de chaque travée	m ²	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09	8,09
Poids propre au mètre linéaire	MN/ml	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Moment min	MNm	-4,19	-2,38	-0,78	0,61	1,79	2,76	3,52	4,07	4,41	4,55	4,47	4,18	3,69	2,98	2,07	0,95	-0,39	-1,93	-3,68
Superstructure																				
Couche de roulement au mètre linéaire																				
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Poids propre de la couche de roulement au mètre linéaire	MN/ml	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
Couche d'étanchéité au mètre linéaire																				
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342	0,342
Poids propre de la couche d'étanchéité au mètre linéaire	MN/ml	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Corniche																				
Poids propre des Corniches au mètre linéaire	MN/ml	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
BN4																				
Poids propre des BN4 au mètre linéaire	MN/ml	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Poids de superstructure	MN/ml	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Moments en Travée 2 (CC en Travée 1 + CC en Travée 2 + CC en Travée 3)																				
Section		0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L
Moment superstructure	MNm	-0,673	-0,383	-0,126	0,098	0,287	0,443	0,566	0,654	0,709	0,731	0,719	0,673	0,593	0,480	0,333	0,152	-0,062	-0,310	-0,592

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Moment due aux charges permanentes	MNm	-4,862	-2,763	-0,907	0,705	2,075	3,201	4,084	4,725	5,122	5,276	5,188	4,856	4,281	3,463	2,402	1,098	-0,449	-2,239	-4,272
Actions variables																				
Charge LM1 (Système UDL)																				
Voie 1 de 3m	MN/ml	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Voie 2 de 3m	MN/ml	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Aire résiduelle	MN/ml	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Poids Charge LM1 (Système UDL)	MN/ml	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
Moment LM1 (Système UDL)	MNm	-0,995	-0,565	-0,186	0,144	0,424	0,655	0,836	0,967	1,048	1,079	1,061	0,993	0,876	0,708	0,491	0,225	-0,092	-0,458	-0,874
Charge LM1 (Tandem TS)																				
Voie 1 de 3m	MNm	0,114	0,432	0,735	1,020	1,275	1,497	1,674	1,803	1,887	1,914	1,890	1,818	1,692	1,515	1,299	1,041	0,750	0,435	0,300
Voie 2 de 3m	MNm	0,076	0,288	0,490	0,680	0,850	0,998	1,116	1,202	1,258	1,276	1,260	1,212	1,128	1,010	0,866	0,694	0,500	0,290	0,200
Moment LM1 (Tandem TS)	MNm	0,190	0,720	1,225	1,700	2,125	2,495	2,790	3,005	3,145	3,190	3,150	3,030	2,820	2,525	2,165	1,735	1,250	0,725	0,500
Moment LM1 (UDL+TS)	MNm	-0,805	0,155	1,039	1,844	2,549	3,150	3,626	3,972	4,193	4,269	4,211	4,023	3,696	3,233	2,656	1,960	1,158	0,267	-0,374
Charge de Foule																				
Charge de Foule	MN/ml	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
Moment Charge de Foule	MNm	-1,181	-0,671	-0,221	0,171	0,504	0,778	0,993	1,148	1,245	1,282	1,261	1,180	1,040	0,842	0,584	0,267	-0,109	-0,544	-1,038
Moment dû aux charges d'exploitation	MNm	-1,986	-0,517	0,819	2,016	3,054	3,928	4,618	5,120	5,438	5,552	5,472	5,203	4,736	4,075	3,240	2,227	1,049	-0,277	-1,412
Moment max fibre bord de tablier = (Mmin + Msuperstructure + Max (kiLM1 ; Mfoule))	MNm	-5,928	-2,558	0,470	3,149	5,453	7,375	8,889	9,987	10,678	10,934	10,768	10,187	9,178	7,748	5,922	3,695	1,086	-1,885	-4,767

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-7 : Résultats du calcul des moments de l'appui 2 à l'appui 3

		Appui 2	Moments en Travée 3 (CC en Travée 1 + CC en Travée 2 + CC en Travée 3)																			A ₃
Section		1L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Somme des Surfaces d'influence	m ²	-27,89	-20,61	-13,94	-7,90	-2,47	2,34	6,52	10,09	13,03	15,36	17,06	18,15	18,61	18,45	17,68	16,28	14,27	11,63	8,37	4,50	0,00
Actions permanentes																						
Poids propre																						
Section moyenne de chaque travée	m ²	8,09	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36
Poids propre au mètre linéaire	MN/ml	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Moment min	MNm	-5,64	-3,79	-2,56	-1,45	-0,45	0,43	1,20	1,86	2,40	2,82	3,14	3,34	3,42	3,39	3,25	2,99	2,62	2,14	1,54	0,83	0,00
Superstructure																						
Couche de roulement au mètre linéaire																						
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,80	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728
Poids propre de la couche de roulement au mètre linéaire	MN/ml	0,019	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
Couche d'étanchéité au mètre linéaire																						
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,342	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312
Poids propre de la couche d'étanchéité au mètre linéaire	MN/ml	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Corniche																						
Poids propre des Corniches au mètre linéaire	MN/ml	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
BN4																						
Poids propre des BN4 au mètre linéaire	MN/ml	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Poids de superstructure	MN/ml	0,033	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Moment superstructure	MNm	-0,907	-0,623	-0,421	-0,239	-0,075	0,071	0,197	0,305	0,394	0,464	0,515	0,548	0,562	0,558	0,534	0,492	0,431	0,351	0,253	0,136	0,000

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

		Appui 2	Moments en Travée 3 (CC en Travée 1 + CC en Travée 2 + CC en Travée 3)																			A ₃
Section		1L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Moment due aux charges permanentes	MNm	-6,548	-4,413	-2,986	-1,691	-0,529	0,500	1,396	2,160	2,791	3,289	3,654	3,886	3,985	3,952	3,786	3,487	3,055	2,491	1,793	0,963	0,000
Actions variables																						
Charge LM1 (Système UDL)																						
Voie 1 de 3m	MN/ml	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Voie 2 de 3m	MN/ml	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Aire résiduelle	MN/ml	0,014	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Poids Charge LM1 (Système UDL)	MN/ml	0,048	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
Moment LM1 (Système UDL)	MNm	-1,340	-0,938	-0,634	-0,359	-0,112	0,106	0,297	0,459	0,593	0,699	0,776	0,826	0,847	0,840	0,804	0,741	0,649	0,529	0,381	0,205	0,000
Charge LM1 (Tandem TS)																						
Voie 1 de 3m	MNm	-0,837	0,174	0,459	0,726	0,975	1,203	1,404	1,569	1,704	1,800	1,851	1,860	1,869	1,737	1,602	1,413	1,170	0,873	0,522	0,423	0,000
Voie 2 de 3m	MNm	-0,558	0,116	0,306	0,484	0,650	0,802	0,936	1,046	1,136	1,200	1,234	1,240	1,246	1,158	1,068	0,942	0,780	0,582	0,348	0,282	0,000
Moment LM1 (Tandem TS)	MNm	-1,395	0,290	0,765	1,210	1,625	2,005	2,340	2,615	2,840	3,000	3,085	3,100	3,115	2,895	2,670	2,355	1,950	1,455	0,870	0,705	0,000
Moment LM1 (UDL+TS)	MNm	-2,735	-0,648	0,131	0,851	1,513	2,111	2,637	3,074	3,433	3,699	3,861	3,926	3,962	3,735	3,474	3,096	2,599	1,984	1,251	0,910	0,000
Charge de Foule																						
Charge de Foule	MN/ml	0,057	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
Moment Charge de Foule	MNm	-1,591	-1,072	-0,725	-0,411	-0,128	0,121	0,339	0,524	0,678	0,799	0,887	0,944	0,968	0,960	0,919	0,847	0,742	0,605	0,435	0,234	0,000
Moment dû aux charges d'exploitation	MNm	-4,326	-1,719	-0,594	0,440	1,384	2,233	2,976	3,598	4,111	4,497	4,748	4,869	4,929	4,694	4,394	3,943	3,341	2,589	1,686	1,143	0,000
Moment max fibre bord de tablier = (Mmin + Msuperstructure + Max (kiLM1 ; Mfoule))	MNm	-8,139	-5,271	-2,812	-0,564	1,475	3,298	4,890	6,233	7,340	8,190	8,770	9,088	9,235	8,901	8,390	7,589	6,499	5,120	3,451	2,168	0,000

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Annexe 8 : Résultats des calculs des efforts tranchant sur les travées

Tableau 0-8 : Résultats du calcul des efforts tranchant de l'appui 0 à l'appuis 1

		Appui 0	Mi- travée 1	Appui 1	Mi- travée 2	Appui 2	Travée 3										Appui 3
Section		0,00L	0,5L	1L	0,5L	1L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Somme des Surfaces d'influence	-	5,53	-2,34	9,80	-0,37	9,25	1,38	0,59	-0,20	-0,99	-1,77	-2,56	-3,35	-4,14	-4,92	-5,71	-6,10
Actions permanentes																	
Poids propre																	
Section moyenne de chaque travée	m ²	10,11	10,11	10,11	8,09	8,09	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36	7,36
Poids propre au mètre linéaire	MN/ml	0,25	0,25	0,25	0,20	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Effort tranchant min	MN	1,40	-0,59	2,48	-0,08	1,87	0,25	0,11	-0,04	-0,18	-0,33	-0,47	-0,62	-0,76	-0,91	-1,05	-1,12
Superstructure																	
Couche de roulement au mètre linéaire																	
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,98	0,98	0,98	0,80	0,80	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728	0,728
Poids propre de la couche de roulement au mètre linéaire	MN/ml	0,023	0,023	0,023	0,019	0,019	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

		Appui 0	Mi- travée 1	Appui 1	Mi- travée 2	Appui 2	Travée 3										Appui 3
Section		0,00L	0,5L	1L	0,5L	1L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Couche d'étanchéité au mètre linéaire																	
Section moyenne de chaque travée	m ²	0,418	0,418	0,418	0,342	0,342	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312
Poids propre de la couche d'étanchéité au mètre linéaire	MN/ml	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Corniche																	
Poids propre des Corniches au mètre linéaire	MN/ml	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
BN4																	
Poids propre des BN4 au mètre linéaire	MN/ml	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Poids de superstructure	MN/ml	0,038	0,038	0,038	0,033	0,033	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Effort tranchant superstructure	MN/ml	0,21	- 0,090	0,375	- 0,012	0,301	0,042	0,018	- 0,006	- 0,030	- 0,054	- 0,077	- 0,101	- 0,125	- 0,149	- 0,173	- 0,184
Effort tranchant du aux charges permanentes	MN	1,61	- 0,682	2,854	- 0,087	2,172	0,295	0,126	- 0,042	- 0,211	- 0,380	- 0,548	- 0,717	- 0,886	- 1,054	- 1,223	- 1,307

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

		Appui 0	Mi- travée 1	Appui 1	Mi- travée 2	Appui 2	Travée 3										Appui 3
Section		0,00L	0,5L	1L	0,5L	1L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Actions variables																	
Charge LM1 (Système UDL)																	
Voie 1 de 3m	MN/ml	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Voie 2 de 3m	MN/ml	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Aire résiduelle	MN/ml	0,020	0,020	0,020	0,014	0,014	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Poids Charge LM1 (Système UDL)	MN/ml	0,054	0,054	0,054	0,048	0,048	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046
Effort tranchant LM1 (Système UDL)	MN	0,301	- 0,127	0,533	- 0,018	0,444	0,063	0,027	- 0,009	- 0,045	- 0,081	- 0,116	- 0,152	- 0,188	- 0,224	- 0,260	- 0,278
Charge LM1 (Tandem TS)																	
Voie 1 de 3m	MNm	0,537		0,564		0,564											- 0,537
Voie 2 de 3m	MNm	0,358		0,376		0,376											- 0,358
Effort tranchant LM1 (Tandem TS)	MN	0,895	0,000	0,940	0,000	0,940	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	- 0,895
Effort tranchant LM1 (UDL+TS)	MN	1,196	- 0,127	1,473	- 0,018	1,384	0,063	0,027	- 0,009	- 0,045	- 0,081	- 0,116	- 0,152	- 0,188	- 0,224	- 0,260	- 1,173
Charge de Foule	MN/ml	0,070	0,070	0,070	0,057	0,057	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

		Appui 0	Mi- travée 1	Appui 1	Mi- travée 2	Appui 2	Travée 3										Appui 3
Section		0,00L	0,5L	1L	0,5L	1L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Effort tranchant Charge de Foule	MN	0,386	- 0,163	0,683	- 0,021	0,528	0,072	0,031	- 0,010	- 0,051	- 0,092	- 0,133	- 0,174	- 0,215	- 0,256	- 0,297	- 0,317
Effort tranchant max fibre bord de tablier = (1,35Tcharge permanente + 1,5Max (kiTLM1 ; Tfoule)	MN/ml	6,376	- 1,165	9,028	- 0,150	5,199	0,295	- 0,004	- 0,300	- 0,589	- 0,878	- 1,168	- 1,457	- 1,746	- 2,035	- 2,210	- 0,476

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Annexe 9 : Résultats calcul de la précontrainte estimée sur l'ensemble des travées

Tableau 0-9 : Données d'entrées pour le calcul de la précontrainte estimée de l'appui 1 à l'appui 2

			Appui 0	Travée 1																			Appui 1
SECTION			0,00L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Moment maximum agissant sur la section	M _{max}	MN. m	0,000	3,50	6,73	9,02	11,09	12,69	13,83	14,52	14,76	14,56	13,93	12,87	11,40	9,53	7,28	4,62	1,63	-1,72	-5,40	-8,39	-11,07
Moment minimum agissant sur la section	M _{min}	MN. m	0,000	1,10	2,18	2,83	3,47	3,94	4,26	4,42	4,42	4,27	3,96	3,49	2,87	2,09	1,15	0,06	-1,19	-2,60	-4,16	-5,88	-7,76
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus comprimée	v _y	m	0,471	0,471	0,470	0,469	0,468	0,467	0,465	0,464	0,463	0,462	0,461	0,459	0,458	0,457	0,455	0,454	0,467	0,466	0,465	0,465	0,464
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v' _y	m	0,478	0,477	0,477	0,476	0,476	0,475	0,474	0,473	0,473	0,472	0,471	0,470	0,470	0,469	0,468	0,467	0,453	0,452	0,450	0,449	0,448
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	m ⁴	0,5900	0,5844	0,5788	0,5728	0,5663	0,5598	0,5529	0,5460	0,5386	0,5313	0,5240	0,5167	0,5094	0,5022	0,4950	0,4877	0,4806	0,4734	0,4658	0,4586	0,4520
L'aire de la section	S	m ²	11,4055	11,3095	11,2135	11,1095	10,9975	10,8855	10,7655	10,6455	10,5175	10,3895	10,2615	10,1335	10,0055	9,8775	9,7495	9,6215	9,4935	9,3655	9,2295	9,1015	8,9815

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Contrainte admissible de traction du béton sur la fibre inférieure égale à	$\bar{\sigma}_{ti}$	MPa	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
Contrainte admissible de traction du béton sur la fibre supérieure égale à	$\bar{\sigma}_{ts}$	MPa	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35
Hauteur	h	m	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91
Largeur	b	m	15,46	15,34	15,22	15,09	14,95	14,81	14,66	14,51	14,35	14,19	14,03	13,87	13,71	13,55	13,39	13,23	13,07	12,91	12,74	12,58	12,43
L'enrobage	d'	m	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Rendement géométrique de la section	$\rho = I/(Sv^3)$	-	0,230	0,230	0,230	0,231	0,232	0,232	0,233	0,233	0,233	0,234	0,235	0,235	0,236	0,237	0,237	0,238	0,239	0,239	0,240	0,241	0,242
Variation du Moment	$ \Delta M $	MN.m	0,000	2,396	4,552	6,190	7,622	8,753	9,570	10,097	10,334	10,293	9,973	9,375	8,533	7,437	6,121	4,561	2,817	0,876	1,237	2,512	3,313

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-10 : Données d'entrées pour le calcul de la précontrainte estimée de la travée 2

SECTION	Symbol es	Unités	Travée 2																		
			0,05 L	0,1L	0,15 L	0,2L	0,25 L	0,3L	0,35 L	0,4L	0,45 L	0,5L	0,55 L	0,6L	0,65 L	0,7L	0,75 L	0,8L	0,85 L	0,9L	0,95 L
Moment maximum agissant sur la section	M _{max}	MN.m	-5,93	-2,56	0,47	3,15	5,45	7,37	8,89	9,99	10,68	10,93	10,77	10,19	9,18	7,75	5,92	3,69	1,09	-1,89	-4,77
Moment minimum agissant sur la section	M _{min}	MN.m	-4,19	-2,38	-0,78	0,61	1,79	2,76	3,52	4,07	4,41	4,55	4,47	4,18	3,69	2,98	2,07	0,95	-0,39	-1,93	-3,68
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus comprimée	v _y	m	0,463	0,462	0,462	0,442	0,440	0,439	0,438	0,437	0,436	0,435	0,434	0,433	0,432	0,432	0,431	0,431	0,456	0,456	0,456
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v' _y	m	0,446	0,444	0,443	0,461	0,460	0,460	0,459	0,459	0,458	0,458	0,458	0,457	0,457	0,457	0,457	0,456	0,431	0,430	0,430
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	m ⁴	0,443 1	0,434 6	0,427 1	0,419 6	0,413 0	0,406 4	0,400 3	0,395 1	0,389 8	0,385 4	0,381 1	0,377 6	0,374 1	0,371 1	0,368 9	0,366 7	0,365 4	0,364 1	0,363 3
L'aire de la section	S	m ²	8,821 5	8,669 5	8,533 5	8,397 5	8,277 5	8,157 5	8,045 5	7,949 5	7,853 5	7,773 5	7,693 5	7,629 5	7,565 5	7,509 5	7,469 5	7,429 5	7,405 5	7,381 5	7,365 5
Contrainte admissible de traction du béton sur la fibre inférieure égale à	$\bar{\sigma}_{ti}$	MPa	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
Contrainte admissible de traction du béton sur la fibre supérieure égale à	$\bar{\sigma}_{ts}$	MPa	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35
Hauteur	h	m	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Largeur	b	m	12,23	12,04	11,87	11,7	11,55	11,4	11,26	11,14	11,02	10,92	10,82	10,74	10,66	10,59	10,54	10,49	10,46	10,43	10,41
L'enrobage	d'	m	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Rendement géométrique de la section	$\rho = I/(Sv_v')$	-	0,243	0,244	0,245	0,246	0,246	0,247	0,247	0,248	0,249	0,249	0,249	0,250	0,250	0,251	0,251	0,251	0,251	0,251	0,251
Variation du Moment	/ΔM/	MN.m	1,740	0,178	1,252	2,541	3,665	4,617	5,370	5,917	6,265	6,388	6,299	6,004	5,490	4,764	3,853	2,749	1,473	0,044	1,087

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-11 : Données d'entrées pour le calcul de la précontrainte estimée de l'appui 2 à l'appui 3

SECTION	Symboles	Unités	Appui 2	Travée 3																		Appui 3	
			1L	0,05 L	0,1L	0,15 L	0,2L	0,25 L	0,3L	0,35 L	0,4L	0,45 L	0,5L	0,55 L	0,6L	0,65 L	0,7L	0,75 L	0,8L	0,85 L	0,9L	0,95 L	1L
Moment maximum agissant sur la section	M_{max}	MN. m	-8,14	-5,27	-2,81	-0,56	1,48	3,30	4,89	6,23	7,34	8,19	8,77	9,09	9,23	8,90	8,39	7,59	6,50	5,12	3,45	2,17	0,00
Moment minimum agissant sur la section	M_{min}	MN. m	-5,64	-3,79	-2,56	-1,45	-0,45	0,43	1,20	1,86	2,40	2,82	3,14	3,34	3,42	3,39	3,25	2,99	2,62	2,14	1,54	0,83	0,00
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus comprimée	v_y	m	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v'_y	m	0,430	0,430	0,430	0,430	0,430	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456	0,456
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	m ⁴	0,3633	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628	0,3628
L'aire de la section	S	m ²	7,3655	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575	7,3575
Contrainte admissible de traction du béton sur la fibre inférieure égale à	$\bar{\sigma}_{ti}$	MPa	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
Contrainte admissible de traction du béton sur la fibre supérieure égale à	$\bar{\sigma}_{ts}$	MPa	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35
Hauteur	h	m	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Largeur	b	m	10,41	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40	10,40

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

L'enrobage	d'	m	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Rendement géométrique de la section	$\rho = \frac{I}{(Sv^2)}$	-	0,25 1	0,251																			
Variation du Moment	/ΔM/	MN. m	2,49 8	1,48 1	0,24 8	0,88 9	1,93 0	2,86 8	3,69 1	4,37 8	4,94 3	5,36 5	5,63 2	5,75 0	5,81 2	5,50 6	5,13 8	4,59 4	3,87 5	2,98 1	1,91 1	1,34 1	0,000

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-12 : Précontrainte estimée et son excentricité de l'appui 0 à l'appui 1

		Appui 0	Travée 1																			Appui 1	
		0,00L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L	
I. Section sous critique																							
La contrainte sur la fibre inférieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_1 = (\bar{\sigma}_{ti} * v/h)*S$	M N	-16,42 2	-16,2 78	-16,13 5	-15,97 9	-15,81 1	-15,6 44	-15,464	-15,2 85	-15,09 3	-14,9 01	-14,71 0	-14,51 8	-14,32 6	-14,13 5	-13,94 3	-13,75 1	-13,97 2	-13,79 3	-13,60 2	-13,42 3	-13,2 55
La contrainte sur la fibre supérieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_2 = (\bar{\sigma}_{ts} * v'/h)*S$	M N	-24,98 1	-24,7 79	-24,57 7	-24,35 8	-24,12 2	-23,8 86	-23,633	-23,3 81	-23,11 2	-22,8 42	-22,57 3	-22,30 4	-22,03 4	-21,76 5	-21,49 6	-21,22 7	-20,33 9	-20,05 1	-19,74 5	-19,45 7	-19,1 87
L'effort de précontrainte	$P = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2 = ((\Delta M/\rho h) + ((S/h)*(v\bar{\sigma}_{ti} + v'\bar{\sigma}_{ts})))$	M N	-41,40 3	-30,0 67	-19,84 3	-11,97 7	-5,032	0,52 5	4,668	7,48 0	8,991	9,22 9	8,198	5,901	2,499	-2,057	-7,606	-14,25 2	-21,52 0	-29,86 7	-27,73 8	-21,50 1	-17,4 40
Distance du centre de pression en fibre inférieure	$c = \rho v - (\rho * S * v * \bar{\sigma}_{ti} / P)$	m	0,022	-0,01 0	-0,069	-0,183	-0,578	6,62 4	0,833	0,55 5	0,476	0,46 2	0,502	0,648	1,367	-1,401	-0,295	-0,104	-0,031	0,010	0,004	-0,026	-0,05 5

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Distance du centre de pression au centre de gravité pour une contrainte nulle en fibre supérieure	$c' = \rho v' - (\rho * S * v' * \bar{\sigma}_{ts} / P)$	m	-0,022	-0,070	-0,160	-0,334	-0,937	10,059	1,218	0,794	0,673	0,653	0,715	0,940	2,047	2,213	0,510	0,216	0,100	0,039	0,049	-0,091	-0,135
L'excentricité sur la fibre inférieure	$e_o = \rho v - ((M_{max} + \rho * v' * S * \bar{\sigma}_{ti}) / P)$	m	0,022	0,107	0,270	0,571	1,626	17,570	-2,130	1,385	1,165	1,116	-1,198	1,533	3,196	3,230	0,662	0,220	0,044	0,047	0,191	-0,416	0,690
L'excentricité sur la fibre supérieure	$e_o = -\rho v' - ((M_{min} - \rho * v' * S * \bar{\sigma}_{ts}) / P)$	m	0,022	0,107	0,270	0,571	1,626	17,570	-2,130	1,385	1,165	1,116	-1,198	1,533	3,196	3,230	0,662	0,220	0,044	0,047	0,101	-0,182	0,310
2. Section sur-critique																							
L'effort de précontrainte	$P = (M_{max} + \rho * S * v' * \bar{\sigma}_{ti}) / (\rho v + v' - d)$	M N	-6,673	-0,096	5,996	10,359	14,303	17,396	19,620	21,010	21,568	21,307	20,223	18,313	15,640	12,179	7,993	3,035	-2,815	-9,268	-16,390	-22,213	-27,444
L'excentricité	$e_o = -(v' - d)$	m	-0,428	-0,427	-0,427	-0,426	-0,426	-0,425	-0,424	-0,423	-0,423	-0,422	-0,421	-0,420	-0,420	-0,419	-0,418	-0,417	-0,403	-0,402	-0,400	-0,399	-0,398

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

3. Valeurs retenues																							
L'effort de précontrainte retenue	P = Max (Psouscritique : Psurcritique)	M N	- 6,673	- 0,096	5,996	10,359	14,303	17,396	19,620	21,010	21,568	21,307	20,223	18,313	15,640	12,179	7,993	3,035	- 2,815	- 9,268	- 16,390	- 21,501	- 17,440
Section sur-critique																							
L'excentricité retenue fibre inférieure	e _o	m	- 0,428	- 0,427	- 0,427	- 0,426	-0,426	- 0,425	-0,424	- 0,423	- 0,423	- 0,422	-0,421	- 0,420	- 0,420	- 0,419	- 0,418	- 0,417	0,403	0,402	0,400	-0,416	- 0,690
L'excentricité retenue fibre supérieure	e _o	m	- 0,428	- 0,427	- 0,427	- 0,426	-0,426	- 0,425	-0,424	- 0,423	- 0,423	- 0,422	-0,421	- 0,420	- 0,420	- 0,419	- 0,418	- 0,417	0,403	0,402	0,400	-0,182	- 0,310

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-13 : Précontrainte estimée et son excentricité travée 2

		Travée 2																							
		0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L					
1. Section sous critique																									
La contrainte sur la fibre inférieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_1 = (\bar{\sigma}_{ti} * v/h) * S$	M N	- 13,03 1	- 12,81 8	- 12,62 8	- 11,91 5	- 11,73 5	- 11,55 5	- 11,38 7	- 11,24 3	- 11,09 9	- 10,97 9	- 10,85 9	- 10,76 2	- 10,66 6	- 10,58 2	- 10,52 2	- 10,46 2	- 11,05 0	- 11,01 6	- 10,99 4				
La contrainte sur la fibre supérieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_2 = (\bar{\sigma}_{ts} * v/h) * S$	M N	- 18,82 7	- 18,48 5	- 18,17 9	- 18,65 6	- 18,40 4	- 18,15 2	- 17,91 7	- 17,71 6	- 17,51 4	- 17,34 7	- 17,17 9	- 17,04 5	- 16,91 0	- 16,79 3	- 16,70 9	- 16,62 5	- 15,63 9	- 15,58 5	- 15,54 9				
L'effort de précontrainte	$P = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2 = (\Delta M / \rho h) + ((S/h) * (v \bar{\sigma}_{ti} + v' \bar{\sigma}_{ts}))$	M N	- 23,98 9	- 30,50 0	- 25,15 5	- 19,10 2	- 13,60 8	-8,897	-5,116	-2,319	-0,420	0,409	0,284	-0,820	-2,907	-5,973	-9,927	-	14,74 4	-	20,07 7	-	26,40 5	-	21,66 2
Distance du centre de pression en fibre inférieure	$c = \rho v - (\rho * S * v' * \bar{\sigma}_{ti} / P)$	m	-0,007	0,020	0,002	-0,030	-0,083	-0,180	-0,386	-0,968	-5,768	6,073	8,618	-2,810	-0,708	-0,286	-0,128	-0,050	-0,008	0,022	0,002				
Distance du centre de pression au centre de gravité pour une contrainte nulle en fibre supérieure	$c' = \rho v' - (\rho * S * v' * \bar{\sigma}_{ts} / P)$	m	-0,065	-0,026	-0,052	-0,103	-0,187	-0,339	-0,664	-1,583	-9,159	9,539	13,57 7	-4,508	-1,180	-0,511	-0,260	-0,137	-0,065	-0,023	-0,052				

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

L'excentricité sur la fibre inférieure	$eo = pv - ((M_{max} + \rho * v * S * \sigma_{ti}) / P)$	m	-0,255	-0,064	0,021	0,135	0,318	0,649	1,352	3,338	19,671	-20,648	-29,324	9,607	2,449	1,011	0,469	0,201	0,046	-0,050	-0,218
L'excentricité sur la fibre supérieure	$eo = -pv' - ((M_{min} - \rho * v' * S * \sigma_{ts}) / P)$	m	-0,110	-0,052	0,021	0,135	0,318	0,649	1,352	3,338	19,671	-20,648	-29,324	9,607	2,449	1,011	0,469	0,201	0,046	-0,050	-0,118
2. Section sur-critique																					
L'effort de précontrainte	$P = (M_{max} + \rho * S * v * \sigma_{ti}) / (\rho * v + v' - d)$	M N	-17,317	-10,634	-4,597	0,979	5,495	9,285	12,289	14,485	15,894	16,451	16,192	15,115	13,206	10,470	6,953	2,653	-2,777	-8,766	-14,584
L'excentricité é	$eo = - (v' - d)$	m	0,396	0,394	0,393	-0,411	-0,410	-0,410	-0,409	-0,409	-0,408	-0,408	-0,408	-0,407	-0,407	-0,407	-0,407	-0,406	0,381	0,380	0,380
3. Valeurs retenues																					
L'effort de précontrainte retenue	$P = \text{Max} (P_{\text{souscritique}} : P_{\text{surcritique}})$	M N	-17,317	-10,634	-4,597	0,979	5,495	9,285	12,289	14,485	15,894	16,451	16,192	15,115	13,206	10,470	6,953	2,653	-2,777	-8,766	-14,584
Section sur-critique																					
L'excentricité retenue fibre inférieure	eo	m	0,396	0,394	0,393	-0,411	-0,410	-0,410	-0,409	-0,409	-0,408	-0,408	-0,408	-0,407	-0,407	-0,407	-0,407	-0,406	0,381	0,380	0,380
L'excentricité retenue fibre supérieure	eo	m	0,396	0,394	0,393	-0,411	-0,410	-0,410	-0,409	-0,409	-0,408	-0,408	-0,408	-0,407	-0,407	-0,407	-0,407	-0,406	0,381	0,380	0,380

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

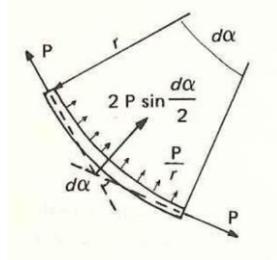
Tableau 0-14 : Précontrainte estimée et son excentricité de l'appui 2 à l'appui 3

			A 2	Travée 3																		A3	
			1L	0,05 L	0,1L	0,15 L	0,2L	0,25 L	0,3L	0,35 L	0,4L	0,45 L	0,5L	0,55 L	0,6L	0,65 L	0,7L	0,75 L	0,8L	0,85 L	0,9L	0,95 L	1L
1. Section sous critique																							
La contrainte sur la fibre inférieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_1 = (\bar{\sigma}_{ti} * v/h) * S$	M N	- 10,99 4	- 10,98 3	- 10,98 3	- 10,98 3	- 10,98 3	- 10,35 4															
La contrainte sur la fibre supérieure induit un effort de précontrainte	$\Delta P_2 = (\bar{\sigma}_{ts} * v/h) * S$	M N	- 15,54 9	- 15,53 1	- 15,53 1	- 15,53 1	- 15,53 1	- 16,47 4															
L'effort de précontrainte	$P = P_1 + \Delta P_1 + \Delta P_2 = (\Delta M/ph) + ((S/h)*(v(\bar{\sigma}_{ti} + v(\bar{\sigma}_{ts})))$	M N	- 15,32 7	- 19,86 6	- 25,40 0	- 22,52 4	- 17,85 1	- 13,95 3	- 10,26 0	- 7,175	- 4,640	- 2,744	- 1,546	- 1,016	- 0,738	- 2,110	- 3,764	- 6,205	- 9,433	- 13,44 8	- 18,25 1	- 20,80 8	- 26,82 8
Distance du centre de pression en fibre inférieure	$c = \rho v - (\rho * S * v * \bar{\sigma}_{ti} / P)$	m	- 0,045	- 0,008	- 0,018	- 0,006	- 0,022	- 0,057	- 0,117	- 0,213	- 0,389	- 0,732	- 1,384	- 2,162	- 3,017	- 0,985	- 0,505	- 0,264	- 0,136	- 0,063	- 0,018	- 0,003	- 0,022
Distance du centre de pression au centre de gravité pour une contrainte nulle en fibre supérieure	$c' = \rho v' - (\rho * S * v' * \bar{\sigma}_{ts} / P)$	m	- 0,118	- 0,066	- 0,028	- 0,046	- 0,086	- 0,148	- 0,243	- 0,397	- 0,676	- 1,223	- 2,259	- 3,497	- 4,857	- 1,625	- 0,860	- 0,477	- 0,274	- 0,158	- 0,086	- 0,062	- 0,022
L'excentricité sur la	$e_0 = \rho v - (M_{max} +$	m	- 0,576	- 0,274	- 0,092	- 0,019	- 0,060	- 0,179	- 0,360	- 0,655	- 1,193	- 2,252	- 4,289	- 6,782	- 9,494	- 3,233	- 1,724	- 0,960	- 0,553	- 0,317	- 0,171	- 0,101	- 0,022

10.1 Pertes instantanées de précontrainte en post-tension

10.1.1 Perte par frottement

-Effet de courbure

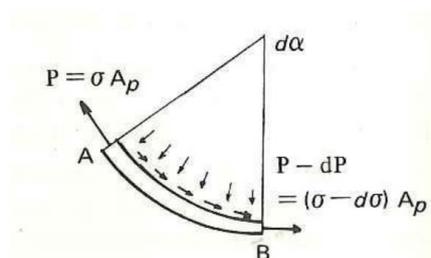


Considérons un tronçon AB de câble de rayon r et d'ouverture angulaire $d\alpha$. Le câble exerce sur le béton une force centripète égale à $2P \sin \frac{d\alpha}{2}$; $d\alpha$ étant petit, $2 \sin \frac{d\alpha}{2} \approx d\alpha$

Donc $2P \sin \frac{d\alpha}{2} \approx Pd\alpha$

La force répartie a une densité de $\frac{Pd\alpha}{rd\alpha} = \frac{P}{r}$. Elle est appelée *poussée au vide* du câble. Le béton exerce une force égale et opposée.

-Frottement



Considérons le même tronçon de câble AB mis en tension en A avec une force P . Soit f le frottement (supposé uniforme et constant quel que soit P). Le béton exerce sur le câble une force centrifuge $\frac{P}{r}$ et une réaction tangente $f \frac{P}{r}$.

En B la force dans le câble a diminué de $dP = f \frac{P}{r} r d\alpha$

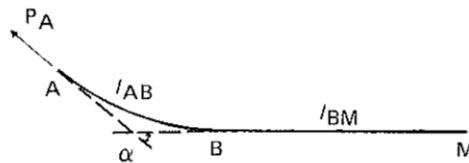
Soit $dP = fP d\alpha$, de même la contrainte diminue de $d\sigma = f\sigma d\alpha$

La solution de $d\sigma - f\sigma d\alpha = 0$ est $\sigma = \sigma_0 e^{-f d\alpha}$

-Déviation parasite

Le tracé réel d'un câble présent des déviations parasites, qui sont équivalentes à une ondulation régulière $\alpha_d = 3/4$ de degré par mètre.

On pose $\varphi = f x \alpha_d$, φ est alors le coefficient de perte au mètre linéaire.



-Expression de la tension le long du câble

$$\sigma_B = \sigma_A e^{-f\alpha - \varphi l_{AB}}$$

$$\sigma_M = \sigma_A e^{-f\alpha - \varphi l_{AM}}$$

La tension en tout point est donnée par : $\sigma_{p0}(x) = \sigma_{p0} e^{-f\alpha(x) - \varphi x}$

Avec :

$\alpha(x)$ Somme vectorielle des déviations verticales et horizontales comptées en valeur absolue entre l'origine et la section étudiée

f Coefficient de frottement en courbe (en rd^{-1})

x Longueur du câble entre l'origine et la section étudiée

φ Coefficient de frottement par unité de longueur (en m^{-1})

$\sigma_{p0} = \sigma_{p0}(0)$ Tension à l'encrage

La perte par frottement est : $\Delta\sigma_\varphi(x) = \sigma_{p0} - \sigma_{p0}(x)$

10.1.2 Perte par rentrée d'ancrage

-Expression théorique

Le léger glissement après blocage définitif de l'ancrage entraîne un raccourcissement du câble lorsque l'effort est appliqué par le vérin.

Soit C le point jusqu'où se fait sentir cette rentrée d'ancrage. Considérons un élément de câble de longueur dx , il a subi une variation de contrainte $\delta \sigma_p(x)$, donc un raccourcissement δdx . La contrainte appliquée est dans le domaine élastique du câble et on peut écrire :

$$\frac{\delta dx}{dx} = \frac{\delta \sigma_p(x)}{E_p}$$

Ce raccourcissement du câble est égal à :

$$\sigma_{pC} = \sigma_{pA} - \frac{d}{l_{AB}} (\sigma_{pA} - \sigma_{pB})$$

10.1.3 Les déformations instantanées du béton

L'application d'une contrainte sur le béton entraîne une déformation instantanée de celui-ci. En conséquence, les armatures de précontrainte vont aussi subir une déformation, donc une variation de contrainte.

-Par raccourcissement instantané du béton lors de la mise en tension

Lorsque l'on met en tension le premier câble, jusqu'à la valeur de la pression requise au vérin, le béton se raccourcit. Il n'y a pas de pertes mais simplement un sur allongement du câble égal au raccourcissement du béton. Lorsqu'on met en tension le second câble, le premier ayant été bloqué dans son encrage, il se produit un nouveau raccourcissement du béton qui entraîne une perte de tension dans le premier câble

La perte moyenne par câble est : $\Delta\sigma_{pi}(x) = \frac{n-1}{2n} E_p \frac{\sigma_b(x)}{E_{bi}}$

-Sous l'effet d'une action permanente

Si l'action permanente n'est pas une précontrainte les câbles tendus avant l'application de cette action subissent la totalité de la déformation, donc par égalité des déformations acier-béton on a :

$$\Delta\sigma_{pi}(x) = E_p \frac{\Delta\sigma_b(x)}{E_{bi}}$$

10.1.4 Perte instantanée totale

La perte instantanée totale, désignée aussi par perte à la mise en œuvre par le BPEL se note ...

$$\Delta\sigma_i(x) = \Delta\sigma_\varphi(x) + \Delta\sigma_g(x) + \Delta\sigma_{pi}(x)$$

10.2 Pertes différées de précontrainte en post-tension

10.2.1 Perte de tension due au retrait du béton

Les câbles ancrés sur le béton ne subissent que la part de raccourcissement due au retrait du retrait effectué après leur mise en tension. La perte totale due au retrait est :

$$\Delta\sigma_r = \epsilon_r [1 - r(t_0)] E_p$$

10.2.2 Perte de tension due au fluage du béton

-Expression générale

Le raccourcissement du câble est égal à celui du béton. On peut écrire $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_p = \epsilon_{fl}$

Les câbles étant dans leurs domaines élastique on a $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_p = \frac{\Delta\sigma_{fl}}{E_p}$

La perte de tension due au fluage sera : $\Delta\sigma_{fl} = E_p \times \epsilon_{fl}$.

-Expression simplifiée

L'expression générale conduisant à des calculs importants dans son application, le BPEL propose pour les cas courants ouvrages et bétons), une formule simplifiée qui est :

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

Avec σ_b = contrainte finale

σ_M = contrainte maximale

j = âge du béton à la mise en précontrainte

La contrainte σ_M est généralement obtenue à la mise en précontrainte. La contrainte ... qui est la contrainte finale est fonction des charges permanentes et de la précontrainte finale.

Lorsque $\sigma_M \leq \sigma_b$ l'utilisation de la formule : $\Delta\sigma_{fl}(x, t) = 2,5\sigma_b \frac{E_p}{E_{ij}}$ est permise.

10.2.3 Perte de tension due à la relaxation des armatures

La perte de tension due à la relaxation des armatures est donnée par la formule simplifiée suivante :

$$\Delta\sigma_p(x) = \frac{6}{100} \rho_{1000} (\mu - \mu_0) \sigma_{pi}(x)$$

Avec $\mu_0 = 0,43$ pour les armatures TBR

10.2.4 Pertes différées totales

Les différentes pertes différées ont été formulés comme indépendantes or ils se produisent simultanément et ont donc un effet les uns sur les autres. Le calcul final en tient compte en affectant un abattement forfaitaire de la relaxation. L'expression de la perte différée finale est :

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

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Annexe 11 : Récapitulatif résultats des vérifications des contraintes sur l'ensemble des travées

Tableau 0-15 : Vérification des contraintes de l'appui 1 à l'appui 2

		Appui 0	Travée 1																			Appui 1	
SECTION		0,00L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L	
Définitions	Symboles	Unités	Valeurs																				
Moment maxagissant sur la section	M_{max}	MN.m	0,000	3,498	6,728	9,025	11,088	12,693	13,828	14,516	14,757	14,563	13,934	12,869	11,405	9,528	7,275	4,622	1,628	-1,720	-5,397	-8,392	-11,072
Moment minagissant sur la section	M_{min}	MN.m	0,000	1,102	2,176	2,835	3,466	3,940	4,258	4,419	4,423	4,270	3,961	3,495	2,871	2,091	1,155	0,061	-1,189	-2,596	-4,160	-5,881	-7,758
Valeur de la précontrainte max / travée	P	MN	27,33	27,54	27,79	27,97	28,12	28,20	28,25	28,23	28,18	28,09	27,96	27,80	27,59	27,28	26,93	26,54	26,27	25,92	25,52	24,81	19,16
Excentricité comptée positivement vers le haut	e_o	m	0,00	-0,02	-0,07	-0,15	-0,27	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,42	-0,40	-0,38	-0,31	-0,24	-0,22	-0,20	-0,16	0,10	0,18	0,31
Distance du centre de gravité de la	v_y	m	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

section de la fibre la plus comprimée																								
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v'_y	m	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	m ⁴	0,5900	0,5844	0,5788	0,5728	0,5663	0,5598	0,5529	0,5460	0,5386	0,5313	0,5240	0,5167	0,5094	0,5022	0,4950	0,4877	0,4806	0,4734	0,4658	0,4586	0,4520	
L'aire de la section	S	m ²	11,4055	11,3095	11,2135	11,1095	10,9975	10,8855	10,7655	10,6455	10,5175	10,3895	10,2615	10,1335	10,0055	9,8775	9,7495	9,6215	9,4935	9,3655	9,2295	9,1015	8,9815	
Contrainte de compression du béton sur la fibre sup	$\bar{\sigma}_{cs}$	MPa	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
Contrainte de compression du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ci}$	MPa	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Contrainte de traction du béton sur la fibre supérieure	$\bar{\sigma}_{ts}$	MPa	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35
	$\bar{\sigma}_{ti}$	MPa	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9
RESULTATS																							
Vérification des contraintes	$(P/S)+(Peov/I)+(Mminv/I) \geq \bar{\sigma}_{ts}$		CV																				
	$(P/S)-(Peov/I)-(Mminv/I) \leq \bar{\sigma}_{ci}$		CV																				
	$(P/S)+(Peov/I)+(Mmaxv/I) \leq \bar{\sigma}_{cs}$		CV																				
	$(P/S)-(Peov/I)-(Mmaxv/I) \geq \bar{\sigma}_{ti}$		CV																				

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-16 : Vérification des contraintes sur la travée 2

SECTION	Symb oles	Unités	Travée 2																		
			0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L
Définitions			Valeurs																		
Moment maximum agissant sur la section	M _{max}	MN.m	-5,928	-2,558	0,470	3,149	5,453	7,375	8,889	9,987	10,678	10,934	10,768	10,187	9,178	7,748	5,922	3,695	1,086	-1,885	-4,767
Moment minimum agissant sur la section	M _{min}	MN.m	-4,188	-2,380	-0,782	0,607	1,787	2,758	3,519	4,070	4,413	4,546	4,469	4,183	3,688	2,983	2,069	0,946	-0,387	-1,929	-3,680
Valeur de la précontrainte max / travée	P	MN	25,31	25,63	25,91	25,90	26,21	26,46	26,66	26,81	26,85	26,82	26,82	26,75	26,56	26,31	25,99	25,61	25,65	25,28	24,84
Excentricité comptée positivement vers le haut	e _o	m	0,40	0,30	0,20	-0,10	-0,15	-0,20	-0,25	-0,41	-0,41	-0,41	-0,41	-0,38	-0,36	-0,34	-0,32	-0,25	-0,20	-0,15	0,38
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus comprimée	v _y	m	0,46	0,46	0,46	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,46	0,46	0,46
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v' _y	m	0,45	0,44	0,44	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,43	0,43	0,43
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	m ⁴	0,4431	0,4346	0,4271	0,4196	0,4130	0,4064	0,4003	0,3951	0,3898	0,3854	0,3811	0,3776	0,3741	0,3711	0,3689	0,3667	0,3654	0,3641	0,3633
L'aire de la section	S	m ²	8,8215	8,6695	8,5335	8,3975	8,2775	8,1575	8,0455	7,9495	7,8535	7,7735	7,6935	7,6295	7,5655	7,5095	7,4695	7,4295	7,4055	7,3815	7,3655
Contrainte de compression du béton sur	$\bar{\sigma}_{cs}$	MPa	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

la fibre supérieure																						
Contrainte de compression du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ci}$	MPa	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
Contrainte de traction du béton sur la fibre supérieure	$\bar{\sigma}_{is}$	MPa	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	
Contrainte de traction du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ii}$	MPa	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	
RESULTATS																						
Vérification des contraintes	$\frac{(P/S)+(Peov/I)+(Mminv/I)}{\bar{\sigma}_{is}} \geq$		CV																			
	$\frac{(P/S)-(Peov/I)-(Mminv/I)}{\bar{\sigma}_{ci}} \leq$		CV																			
	$\frac{(P/S)+(Peov/I)+(Mmaxv/I)}{\bar{\sigma}_{cs}} \leq$		CV	CV																		
	$\frac{(P/S)-(Peov/I)-(Mmaxv/I)}{\bar{\sigma}_{ii}} \geq$		CV	CV																		

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

Tableau 0-17 : Vérification des contraintes de l'appui 2 à l'appui 3

SECTION			Appui	Travée 3																				A ₃
			2	1L	0,05L	0,1L	0,15L	0,2L	0,25L	0,3L	0,35L	0,4L	0,45L	0,5L	0,55L	0,6L	0,65L	0,7L	0,75L	0,8L	0,85L	0,9L	0,95L	1L
Moment maximum agissant sur la section	M ma x	MN. m	- 8,139	- 5,271	- 2,812	- 0,564	1,475	3,298	4,890	6,233	7,340	8,190	8,770	9,088	9,235	8,901	8,390	7,589	6,499	5,120	3,451	2,168	0,000	
Moment minimum agissant sur la section	M mi n	MN. m	- 5,641	- 3,790	- 2,564	- 1,452	0,454	0,430	1,199	1,855	2,397	2,825	3,138	3,338	3,423	3,394	3,252	2,995	2,624	2,139	1,540	0,827	0,000	
Valeur de la précontrainte max / travée	P	MN	20,50	24,88	25,22	25,53	25,80	25,79	26,12	26,42	26,68	26,85	26,98	27,08	27,14	27,16	27,15	27,00	26,81	26,61	26,37	26,10	26,31	
Excentricité comptée positivement vers le haut	eo	m	0,40	0,42	0,32	0,20	0,15	0,05	-0,10	-0,15	-0,20	-0,25	-0,30	-0,35	-0,30	-0,25	-0,20	-0,15	-0,10	-0,08	-0,05	0,10	0,15	
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus comprimée	vy	m	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	
Distance du centre de gravité de la section de la fibre la plus tendue	v'y	m	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	
Moment d'inertie de la section par rapport à son centre de gravité	I	m ⁴	0,363 3	0,362 8	0,3628																			
L'aire de la section	S	m ²	7,365 5	7,357 5	7,3575																			
Contrainte de compression du béton sur	σ_c s	MPa	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

*Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton
précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont
d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)*

la fibre supérieure																								
Contrainte de compression du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ci}$	MPa	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
Contrainte de traction du béton sur la fibre supérieure	$\bar{\sigma}_{ts}$	MPa	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	-4,35	
Contrainte de traction du béton sur la fibre inférieure	$\bar{\sigma}_{ti}$	MPa	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	-2,9	
RESULTATS																								
Vérification des contraintes	$(P/S)+(Peov/I)+(Mminv/I) \geq \bar{\sigma}_{ts}$		CV																					
	$(P/S)-(Peov/I)-(Mminv/I) \leq \bar{\sigma}_{ci}$		CV																					
	$(P/S)+(Peov/I)+(Mmaxv/I) \leq \bar{\sigma}_{cs}$		CV	CV																				
	$(P/S)-(Peov/I)-(Mmaxv/I) \geq \bar{\sigma}_{ti}$		CV	CV																				

Les aciers transversaux sont calculés à partir des valeurs de l'effort tranchant maximal. Les calculs et vérifications sont faits selon l'Eurocode.

Définitions

On désigne par :

- V_{Ed} , l'effort tranchant agissant de calcul ;
- $V_{Rd,c}$, l'effort tranchant résistant de calcul en l'absence de l'armatures d'effort tranchant ;
- V_{Rd} , l'effort tranchant résistant avec des armatures d'effort tranchant ;
- $V_{Rd,s}$ l'effort tranchant de calcul repris par les armatures d'effort tranchant sollicitées à la limite élastique ;
- $V_{Rd,max}$, l'effort tranchant maximal de calcul avant écrasement des bielles de compression.

Eléments sans armature d'effort tranchant

Lorsque $V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$, aucune armature d'effort tranchant n'est requise par le calcul. Néanmoins il convient de disposer un ferrailage transversale minimale pour les poutres. Ce ferrailage minimal peut être omis dans les éléments de dalles pleines.

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k^3 \sqrt{100(\rho_l f_{ck})} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d$$

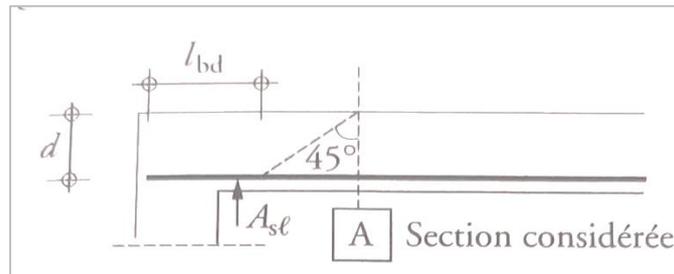
Avec :

- f_{ck} en MPa et $V_{Rd,c}$ en N ;
- $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$

Où d est la hauteur utile de la section, en mm ;

- b_w est la plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue, en mm ;
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02$

Où A_{sl} est l'aire de la section des armatures tendues, prolongées sur une longueur au moins égale à $l_{bd} + d$ au-delà de la section considérée.



- $\sigma_{sp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2f_{cd}$ en MPa, avec N_{Ed} l'effort normal agissant dans la section droite, dû aux charges extérieures appliquées, en N ($N_{Ed} > 0$ pour la compression), et A_c l'aire de la section droite du béton, en mm^2 ;
- Le terme $C_{Rd,c} k^3 \sqrt{(100\rho_1 f_{ck})}$ a pour valeur minimale v_{min}

Les valeurs de $C_{Rd,c}$, v_{min} et k_1 à utiliser sont :

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

- $v_{min} = \frac{0,34}{\gamma_c} f_{ck}^{1/2}$ pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de la charge considéré ;
- $k_1 = 0,15$.

Armatures d'efforts tranchant verticales

Dans le cas de éléments comportant des armatures d'effort tranchant verticales, la résistance à l'effort tranchant est calculée par :

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta$$

Et limitée à :

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

Où :

- A_{sw} est la section des armatures d'effort tranchant ;
- S est l'espacement des armatures d'effort tranchant ;
- F_{ywd} est la limite d'élasticité de calcul des armatures d'effort tranchant ;
- α_{cw} coefficient tenant compte de l'état de contrainte de la membrure, dans le cas de la flexion composée avec traction, et une membrure comprimée, il convient de remplacer α_{cw} par $\alpha_{cw,t} = 1 + \frac{\sigma_{ct}}{f_{ctm}}$
- ν_1 coefficient de réduction de la résistance à l'effort tranchant du béton fissuré, pris égale à $\nu = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$. Si la contrainte de calcul f_{ywd} est inférieure à 80 % de f_{yk} , on peut adopter $\nu_1 = 0,6$.

Annexe 13 : Résultats du calcul des armatures transversales sur Appui

Tableau 0-18 : Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 0

A- ELEMENTS POUR LESQUELS AUCUNE ARMATURE D'EFFORT TRANCHANT N'EST REQUISE							
	Modèle de treillis d'effort tranchant						
	Définitions des grandeurs utilisées ci-dessous						
DONNEES							
	DEFINITION	REFERENCE	EXPRESSION		VALEUR	UNITE	
V_{Ed}	L'effort tranchant agissant de calcul				0,41	MN	
N_{Ed}	L'effort normal agissant dans la section droite dû aux charges extérieures appliquées (N _{Ed} > 0 pour la compression)				1,6	MN	
b_w	La plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue ou dans la zone comprise entre la membrure tendue et la membrure comprimée				1	m	
d	Le bras de levier (distance de la fibre supérieure au lit inférieure des aciers tendues)				0,72	m	
A_{st}	L'aire de la section des armatures tendues, prolongées sur une longueur au moins égale à l _{bd} + d au-delà de la section considérée				0,00402	m ²	
γ_c	Coefficient partiel relative au béton				1,5		
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton en compression				30	MPa	
σ_{cp}	Contrainte de compression				18	MPa	
k₁	Coefficient				0,15		
TYPE DE STRUCTURE CALCULEE A L'EFFORT TRANCHANT :					1		

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

1- Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré							
CALCULS INTERMEDIAIRES							
Il convient de vérifier :							
$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$							
$V_{Rd,c}$	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.a)	$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_1 * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$	2,28	MN		
avec une valeur minimale							
$V_{Rd,c}$	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.b)	$V_{Rd,c \text{ min}} = (v_{\text{min}} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$	2,84	MN		
où							
k				$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$	1,5270		
ρ_1				$\rho_1 = A_{sl} / (b_w * d) \leq 0,02$	0,0056		
Les valeurs adoptées sont les suivantes :							
$C_{Rd,c}$				$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$	0,12		
$v_{\text{min 1}}$	Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré			$v_{\text{min}} = (0,34 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$	1,24	MN	
$v_{\text{min 2}}$	Pour les dalles et poutres autres que celles ci-dessus			$v_{\text{min}} = (0,053 / \gamma_c) * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$	0,37	MN	
$v_{\text{min 3}}$	Pour les voiles			$v_{\text{min}} = (0,35 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$	1,28	MN	
v_{min}					1,24	MN	
RESULTATS							
$V_{Rd,c}$	L'effort tranchant résistant ultime de la section considérée			$V_{Rd,c} = \text{Max}(V_{Rd,c,\text{min}} ; C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_1 * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$	2,84	MN	
				Armatures E.T. non nécessaires			
A-1 Calcul de l'armature transversale minimale							
Données							

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

Nombre de câbles							23	
Diamètre d'une gaine de câble							0,0608	m
bn							0,30	
fe							500	
γs							1,15	
St							0,15	m
Résultats								
Pourcentage d'Armatures minimum						$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e}$	0,0004	
Armatures minimum /ml At						$A_t \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e} S_t$	6,22656E-05	m ²
Armatures minimum /ml At en cm ²							6,23E-01	cm ²

Tableau 0-19 : Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 1

A- ELEMENTS POUR LESQUELS AUCUNE ARMATURE D'EFFORT TRANCHANT N'EST REQUISE						
DONNEES	DEFINITION	REFERENCE	EXPRESSION	VALEUR	UNITE	
V_{Ed}	L'effort tranchant agissant de calcul			0,73	MN	
N_{Ed}	L'effort normal agissant dans la section droite dû aux charges extérieures appliquées (N _{Ed} > 0 pour la compression)			1,2	MN	
b_w	La plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue ou dans la zone comprise entre la membrure tendue et la membrure comprimée			1	m	
d	Le bras de levier (distance de la fibre supérieure au lit inférieure des aciers tendues)			0,72	m	
A_{st}	L'aire de la section des armatures tendues, prolongées sur une longueur au moins égale à l _{bd} + d au-delà de la section considérée			0,00402	m ²	

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

γ_c	Coefficient partiel relative au béton				1,5	
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton en compression				30	MPa
σ_{cp}	Contrainte de compression				18	MPa
k_1	Coefficient				0,15	
TYPE DE STRUCTURE CALCULEE A L'EFFORT TRANCHANT :					1	
1- Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré						
Il convient de vérifier :						
$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$						
$V_{Rd,c}$	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.a)		$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$	2,28	MN
avec une valeur minimale						
$V_{Rd,c}$	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.b)		$V_{Rd,c \min} = (v_{\min} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$	2,84	MN
où						
k				$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$	1,5270	
ρ_l				$\rho_l = A_{sl} / (b_w * d) \leq 0,02$	0,0056	
Les valeurs adoptées sont les suivantes :						
$C_{Rd,c}$				$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$	0,12	
$v_{\min 1}$	Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré			$v_{\min} = (0,34 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$	1,24	MN
$v_{\min 2}$	Pour les dalles et poutres autres que celles ci-dessus			$v_{\min} = (0,053 / \gamma_c) * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$	0,37	MN
$v_{\min 3}$	Pour les voiles			$v_{\min} = (0,35 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$	1,28	MN
v_{\min}					1,24	MN
$V_{Rd,c}$	L'effort tranchant résistant ultime de la section considérée			$V_{Rd,c} = \text{Max}(V_{Rd,c,\min} ; C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$	2,84	MN
					Armatures E.T. non nécessaires	
Données						

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

Nombre de câbles							23	
Diamètre d'une gaine de câble							0,0608	m
b_n							0,30	
f_e							500	
γ_s							1,15	
St							0,15	m
Pourcentage d'Armatures minimum						$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e}$	0,0004	
Armatures minimum /ml A_t						$A_t \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e} S_t$	6,22656E-05	m ²
Armatures minimum /ml A_t en cm²							6,23E-01	cm ²

Tableau 0-20 Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 2

A- ELEMENTS POUR LESQUELS AUCUNE ARMATURE D'EFFORT TRANCHANT N'EST REQUISE							
DONNEES							
	DEFINITION	REFERENCE	EXPRESSION		VALEUR	UNITE	
V_{Ed}	L'effort tranchant agissant de calcul				0,50	MN	
N_{Ed}	L'effort normal agissant dans la section droite dû aux charges extérieures appliquées (N _{Ed} > 0 pour la compression)				1,6	MN	
b_w	La plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue ou dans la zone comprise entre la membrure tendue et la membrure comprimée				1	m	
d	Le bras de levier (distance de la fibre supérieure au lit inférieure des aciers tendues)				0,72	m	
A_{st}	L'aire de la section des armatures tendues, prolongées sur une longueur au moins égale à l _{bd} + d au-delà de la section considérée				0,00402	m ²	
γ_c	Coefficient partiel relative au béton				1,5		

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

f_{ck}	Résistance caractéristique du béton en compression				30	MPa
σ_{cp}	Contrainte de compression				18	MPa
k₁	Coefficient				0,15	
TYPE DE STRUCTURE CALCULEE A L'EFFORT TRANCHANT :					1	
1- Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré						
2- Pour les dalles et poutres autres que celles ci-dessus						
3- Pour les voiles						
Il convient de vérifier :						
V_{Ed} ≤ V_{Rd,c}						
V_{Rd,c}	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.a)	$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$		2,28	MN
avec une valeur minimale						
V_{Rd,c}	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.b)	$V_{Rd,c \text{ min}} = (v_{\text{min}} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$		2,84	MN
où						
k			$k = 1 + \frac{(200/d)^{1/2}}{2} \leq 2$		1,5270	
ρ_l			$\rho_l = A_{sl} / (b_w * d) \leq 0,02$		0,0056	
Les valeurs adoptées sont les suivantes :						
C_{Rd,c}			$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$		0,12	
v_{min 1}	Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré		$v_{\text{min}} = (0,34 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$		1,24	MN
v_{min 2}	Pour les dalles et poutres autres que celles ci-dessus		$v_{\text{min}} = (0,053 / \gamma_c) * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$		0,37	MN
v_{min 3}	Pour les voiles		$v_{\text{min}} = (0,35 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$		1,28	MN
v_{min}					1,24	MN
V_{Rd,c}	L'effort tranchant résistant ultime de la section considérée		$V_{Rd,c} = \text{Max}(V_{Rd,c,\text{min}} ; C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$		2,84	MN
					Armatures E.T. non nécessaires	
Données						

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

Nombre de câbles							23	
Diamètre d'une gaine de câble							0,0608	m
bn							0,30	
fe							500	
γs							1,15	
St							0,15	m
Pourcentage d'Armatures minimum						$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e}$	0,0004	
Armatures minimum /ml At						$A_t \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e} S_t$	6,22656E-05	m ²
Armatures minimum /ml At en cm ²							6,23E-01	cm ²

Tableau 0-21 : Résultat du calcul des armatures transversales sur Appui 3

A- ELEMENTS POUR LESQUELS AUCUNE ARMATURE D'EFFORT TRANCHANT N'EST REQUISE							
DONNEES							
	DEFINITION	REFERENCE	EXPRESSION		VALEUR	UNITE	
V _{Ed}	L'effort tranchant agissant de calcul				-0,05	MN	
N _{Ed}	L'effort normal agissant dans la section droite dû aux charges extérieures appliquées (N _{Ed} > 0 pour la compression)				2,3	MN	
b _w	La plus petite largeur de la section droite dans la zone tendue ou dans la zone comprise entre la membrure tendue et la membrure comprimée				1	m	
d	Le bras de levier (distance de la fibre supérieure au lit inférieure des aciers tendues)				0,72	m	
A _{st}	L'aire de la section des armatures tendues, prolongées sur une longueur au moins égale à l _{bd} + d au-delà de la section considérée				0,00402	m ²	
γ _c	Coefficient partiel relative au béton				1,5		

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

f_{ck}	Résistance caractéristique du béton en compression					30	MPa
σ_{cp}	Contrainte de compression					18	MPa
k₁	Coefficient					0,15	
TYPE DE STRUCTURE CALCULEE A L'EFFORT TRANCHANT :						1	
1- Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré							
Il convient de vérifier :							
V_{Ed} ≤ V_{Rd,c}							
V_{Rd,c}	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.a)	$V_{Rd,c} = (C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_l * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$			2,28	MN
avec une valeur minimale							
V_{Rd,c}	L'effort tranchant résistant de calcul de l'élément en l'absence d'armature transversale	EC2-1-1 6.2.2 Expr.(6.2.b)	$V_{Rd,c \text{ min}} = (v_{\text{min}} + k_1 * \sigma_{cp}) * b_w * d$			2,84	MN
où							
k			$k = 1 + \frac{(200/d)^{1/2}}{2} \leq 2$			1,5270	
ρ_l			$\rho_l = A_{sl} / (b_w * d) \leq 0,02$			0,0056	
Les valeurs adoptées sont les suivantes :							
C_{Rd,c}			$C_{Rd,c} = 0,18 / \gamma_c$			0,12	
v_{min 1}	Pour les dalles bénéficiant d'un effet de redistribution transversale sous le cas de charge considéré		$v_{\text{min}} = (0,34 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$			1,24	MN
v_{min 2}	Pour les dalles et poutres autres que celles ci-dessus		$v_{\text{min}} = (0,053 / \gamma_c) * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$			0,37	MN
v_{min 3}	Pour les voiles		$v_{\text{min}} = (0,35 / \gamma_c) * f_{ck}^{1/2}$			1,28	MN

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

v_{min}							1,24	MN
V_{Rd,c}	L'effort tranchant résistant ultime de la section considérée					$V_{Rd,c} = \text{Max}(V_{Rd,c,min} ; C_{Rd,c} * k * (100 * \rho_1 * f_{ck})^{1/3} + k_1 * \sigma_{cp} * b_w * d)$	2,84	MN
							Armatures E.T. non nécessaires	
Données								
Nombre de câbles					n		23	
Diamètre d'une gaine de câble							0,0608	m
bn						$b_n = b_o - \frac{n\phi}{2}$	0,30	
f_e							500	
γ_s							1,15	
St							0,15	m
Pourcentage d'Armatures minimum						$\frac{A_t}{S_t} \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e}$	0,0004	
Armatures minimum /ml At						$A_t \geq \frac{0,6b_n\gamma_s}{f_e} S_t$	6,22656E-05	m ²
Armatures minimum /ml At en cm²							6,23E-01	cm ²

Annexe 14 : Devis estimatif détaillé du tablier

Tableau 0-22 : DQE du tablier de l'OA13

N°	Désignation	Unité	DETAIL ESTIMATIF		
			Quantité	Prix unit :HT FCFA	Montant HT FCFA
A	INSTALLATION DE CHANTIER		-		
B	TRAVAUX PRÉPARATOIRES		-		
C	OUVRAGES PROVISOIRES				
C1	Cintres / échafaudages ponts dalle	m ²	610,00	136 897	83 507 292
	TOTAL C1 Ouvrages provisoires				83 507 292
D	FONDACTIONS				
E	COFFRAGES				
E1	Coffrages soignés tabliers	m ²	623,70	7 916	4 937 459
	TOTAL E1 Coffrages				4 937 459
F	BÉTONS				
F1	Béton B30 tabliers	m ³	512,40	106 712	54 679 434
	TOTAL F1 Bétons				54 679 434
G	ARMATURES				
G1	Armatures passives tabliers	kg	56 364,00	1 325	74 671 027
G2	Armatures de précontrainte intérieure unité 7T15 y compris gaines, ancrages, injection, mesure des coefficients de transmission	kg	14 228,00	2 174	30 937 363
G3	Gaines pour précontrainte intérieure unité 7T15	ml	863,40	1 009	871 339

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

N°	Désignation	Unité	DETAIL ESTIMATIF		
			Quantité	Prix unit :HT FCFA	Montant HT FCFA
G4	Ancrages de précontrainte intérieure unité 7T15	U	12	40 387	485 589
G5	Injection de la précontrainte intérieure unité Tt15	ml	14 228,00	32	460 987
	TOTAL G Armatures				107 426 305
H	ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES				
H1	Regard de visite 1500 x 1500 a tampon	U	-	1 541 064	-
H2	Descente d'eau φ 200	ml	4,12	18 794	77 526
H3	Corniches	ml	39,78	55 662	2 214 352
H4	Préparation support de chape	m ²	610,00	2 027	1 236 348
H5	Complexe étanchéité	m ²	619,09	3 377	2 090 554
H6	Revêtement	m ³	43,34	161 450	6 996 700
H7	Joints de dilatation	ml	8,96	669 367	6 000 431
H8	Candélabres	U	4	899 502	3 726 570
H9	Barrières de sécurité type BN4	ml	46,99	80 736	3 793 583
	TOTAL H Équipements et superstructures				26 136 064
I	HYDRAULIQUE				
I1	DRAIN D300 + MASSIF DRAINANT	ml	18,94	25 646	485 842
	TOTAL I Hydraulique				485 842
J	BORDURES				
J1	BORD ILOT DIRECT I2 CL A	ML	22,46	6 990	156 968
	TOTAL K Bordures				156 968
K	OUVRAGE DE TRAITEMENT				

Calcul analytique d'un Tablier à travées continues de pont dalle à inertie variable en béton précontraint : Cas de l'Ouvrage d'art 13 de l'étude avant-projet détaillé du 4^{ème} pont d'Abidjan situé entre la Pile-Culée 23 et la fin du projet (Côte d'Ivoire)

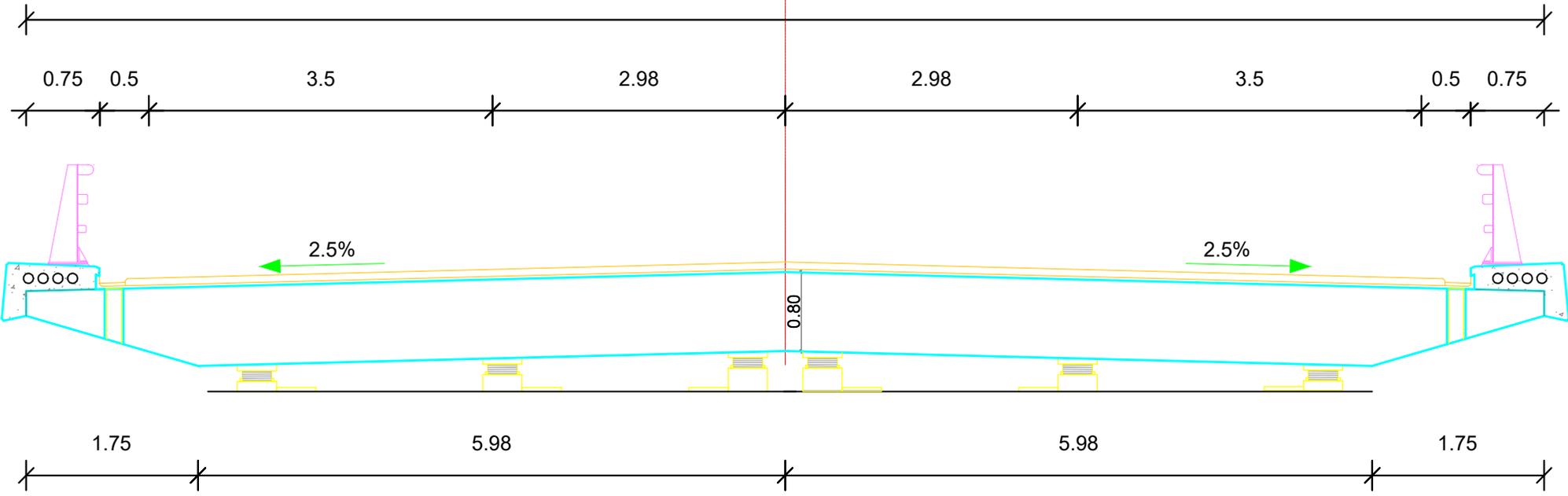
N°	Désignation	Unité	DETAIL ESTIMATIF		
			Quantité	Prix unit :HT FCFA	Montant HT FCFA
L	SIGNALISATION ET ÉQUIPEMENTS DE LA ROUTE				
L1	Lignes longitudinales				
L2	Ligne blanche lc-3u u = 7,5 cm	ml	33,84	980	33 175
L3	Ligne blanche lc-3u u = 5 cm	ml	20,52	653	13 394
L4	Ligne blanche t'2-0,50 clp	ml	206,54	2 178	449 847
L5	Ligne blanche t2-5u stock.tag	ml	14,47	1 307	18 915
L6	Fleche directionnelle	U	5	8 124	40 620
L7	Fleche rabattement	U	1	8 129	8 129
L8	Indication type C	U	1	317 740	317 740
L9	Raccordement BN4	U	1	172 516	172 516
	TOTAL M Signalisation et Équipements de la route				1 054 336
M	ÉCLAIRAGE PUBLIC		-		-
N	PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT				
N1	Coupleur	U	6	38 366	230 646
	TOTAL P protection de l'environnement				230 646
		Montant H.T. y compris Aléas			278 614 345
		Montant T.V.A 18%			50 150 582
		Montant T.T.C			328 764 928

Annexe 15 : Divers plans du tablier

Coupe PC69

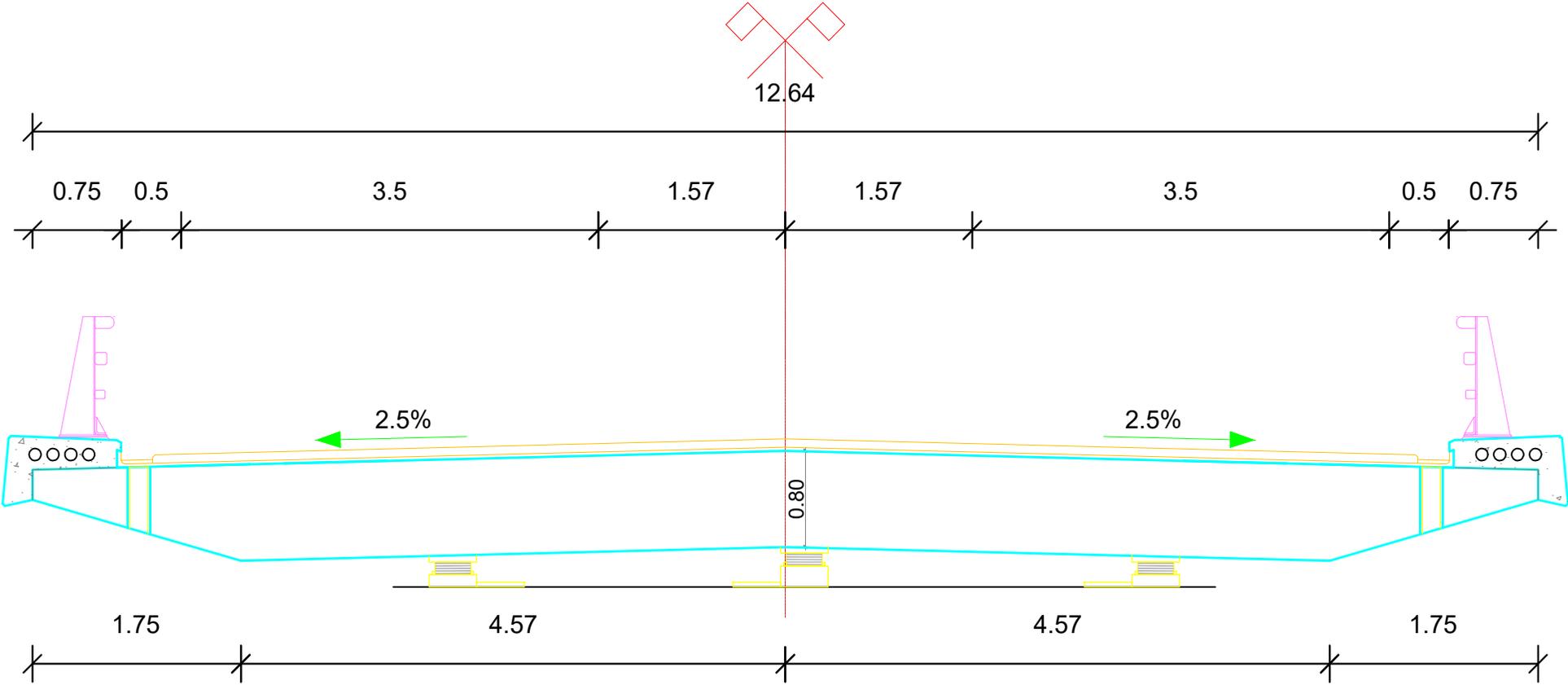


15.46



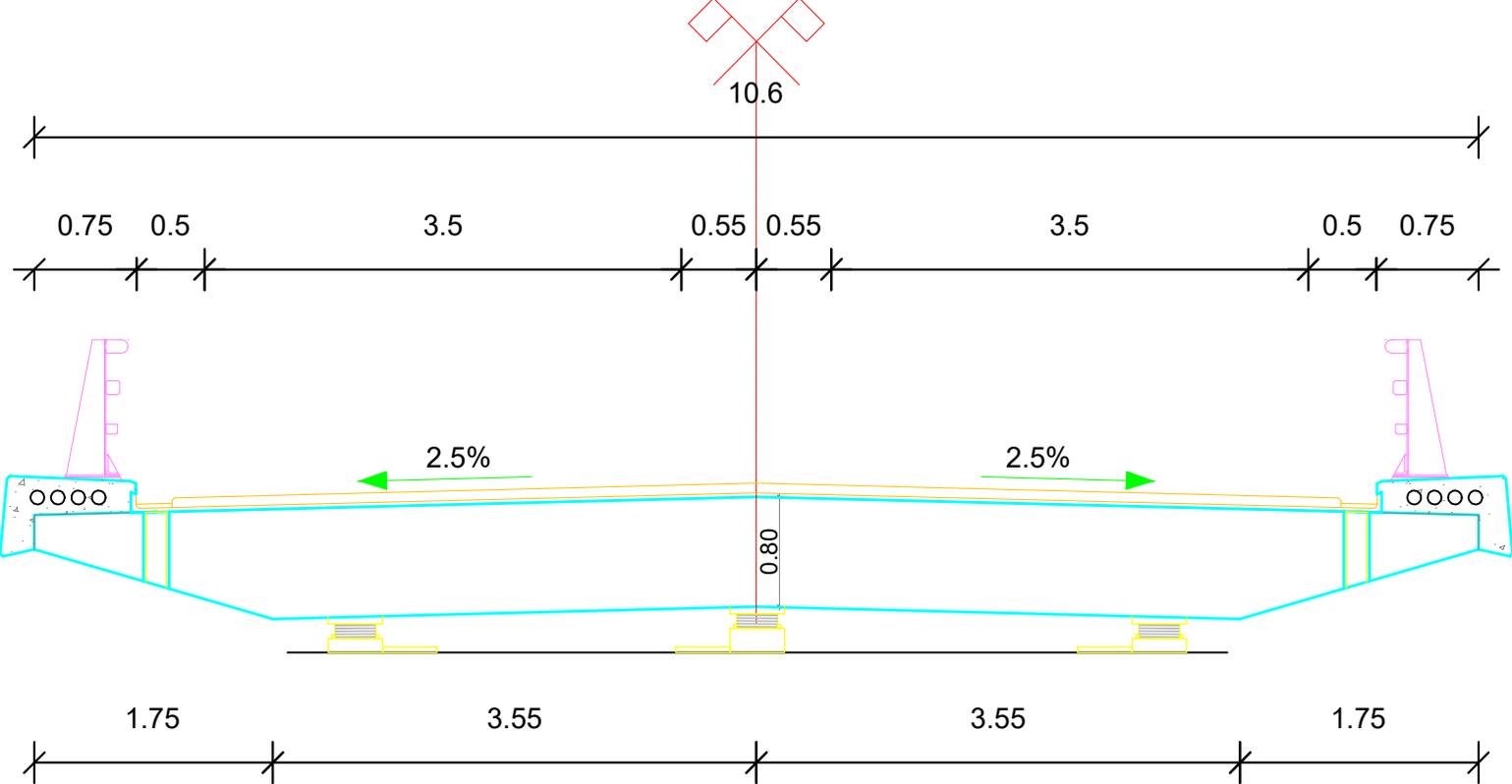
COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER

Coupe P70



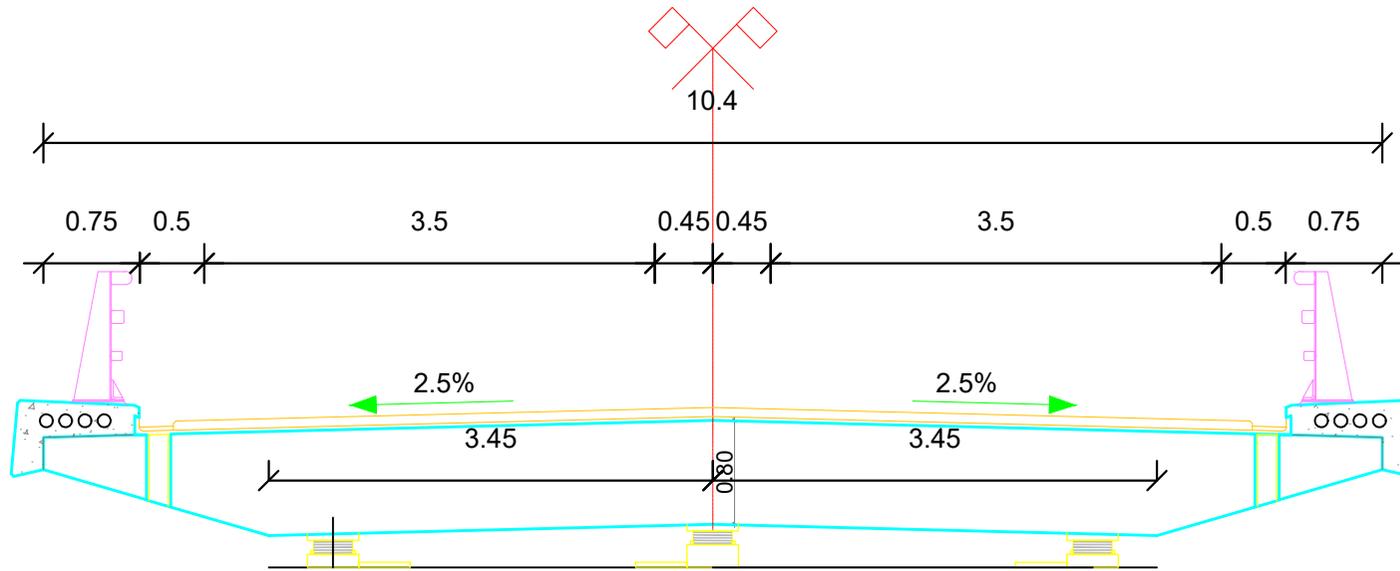
**COUPE TRANSVERSALE DU
TABLIER**

Coupe P71



**COUPE TRANSVERSALE DU
TABLIER**

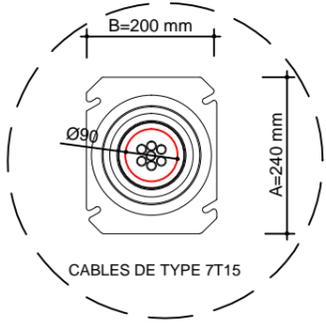
Coupe PC72



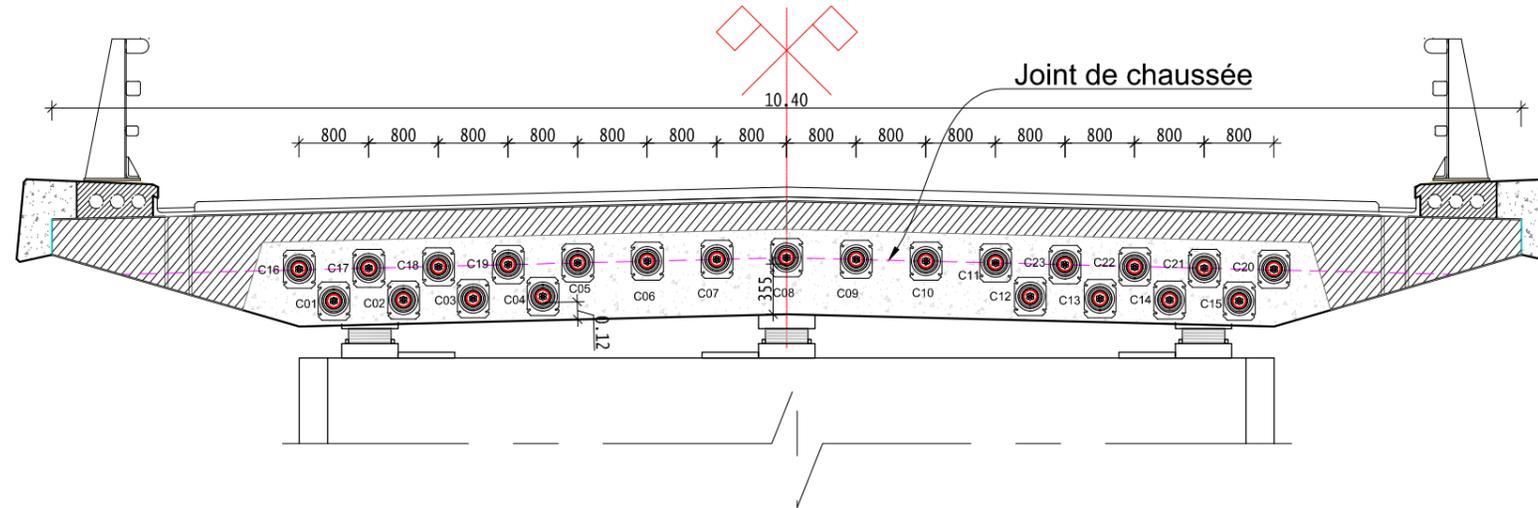
**COUPE TRANSVERSALE DU
TABLIER**

COUPES TRANSVERSALES

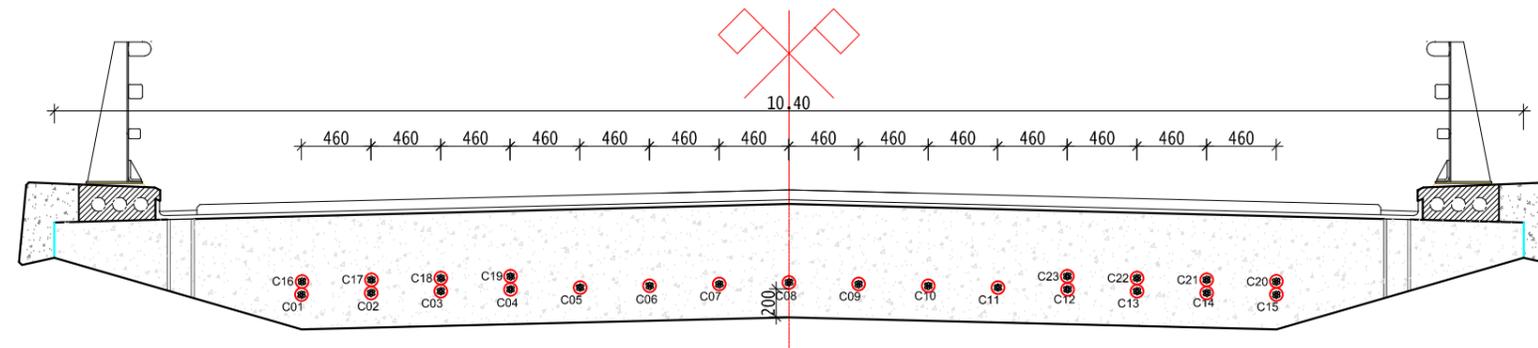
CARACTERISTIQUES DES CABLES DE PRECONTRAINTES



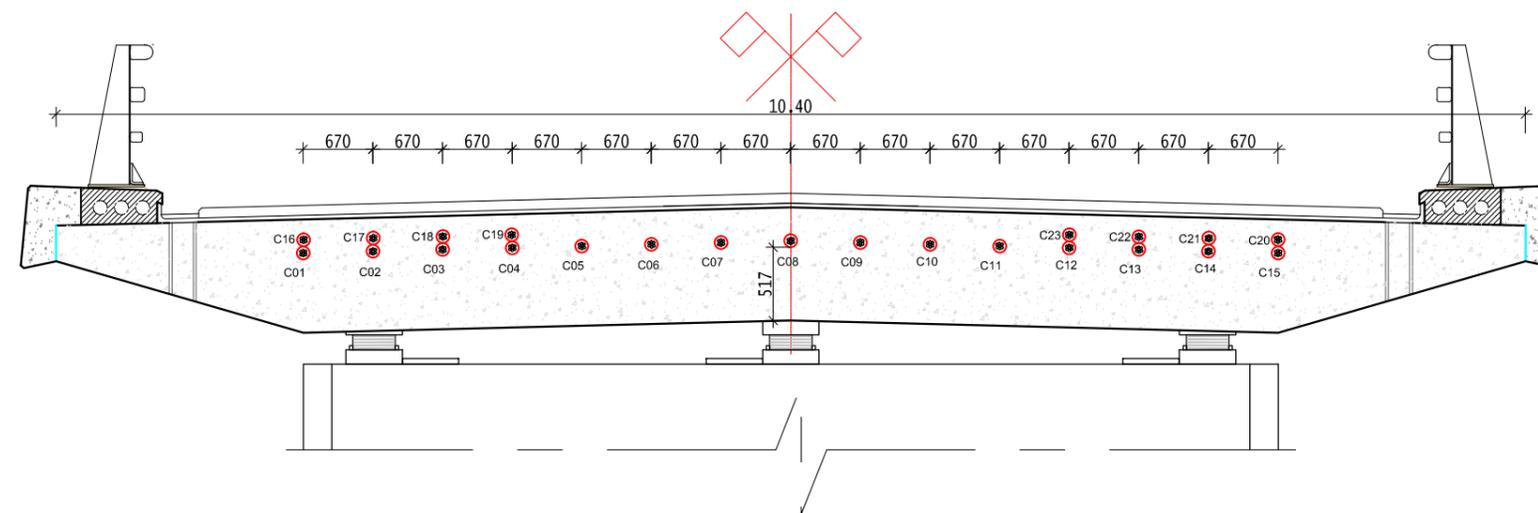
Coupe 01 sur appui C0



Coupe 02 sur Tr P2-C3 (x=4400 cm)



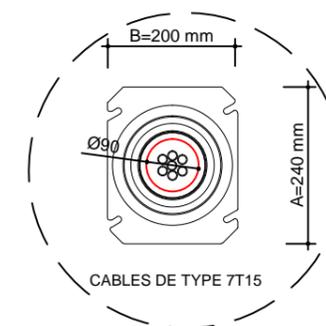
Coupe 03 sur appui P1



ECHELLE : 1/50

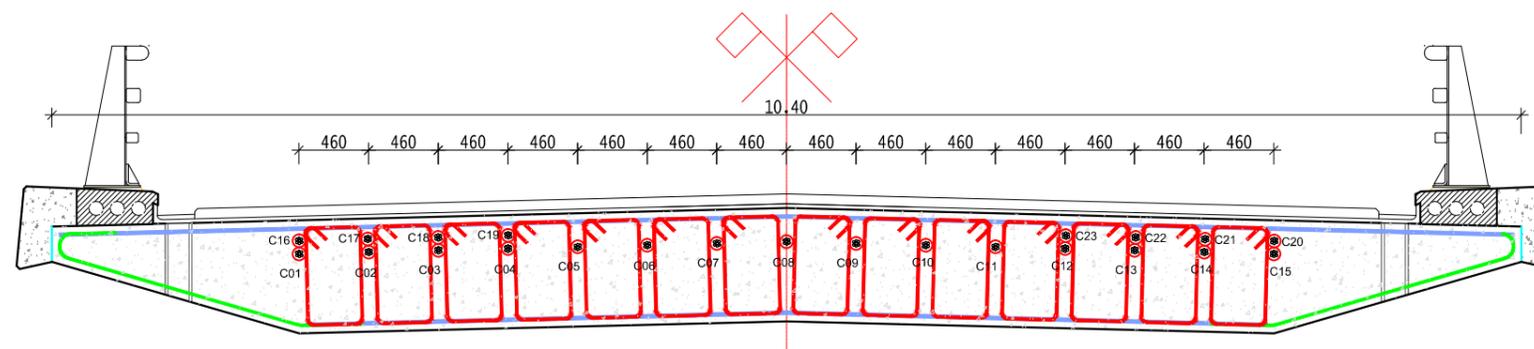
**PLAN DE LA PRECONTRAINTE
COUPES TRANSVERSALES**

COUPE DE PRINCIPE DES CHAISES D'IMPLANTATION

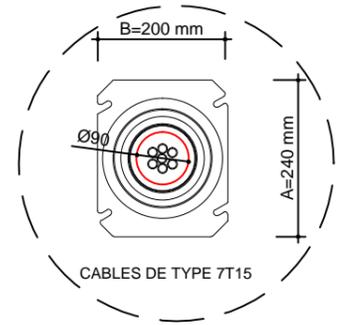


Principe des chaises d'implantation

Coupe 02 sur Tr P2-C3 (x=4400 cm)

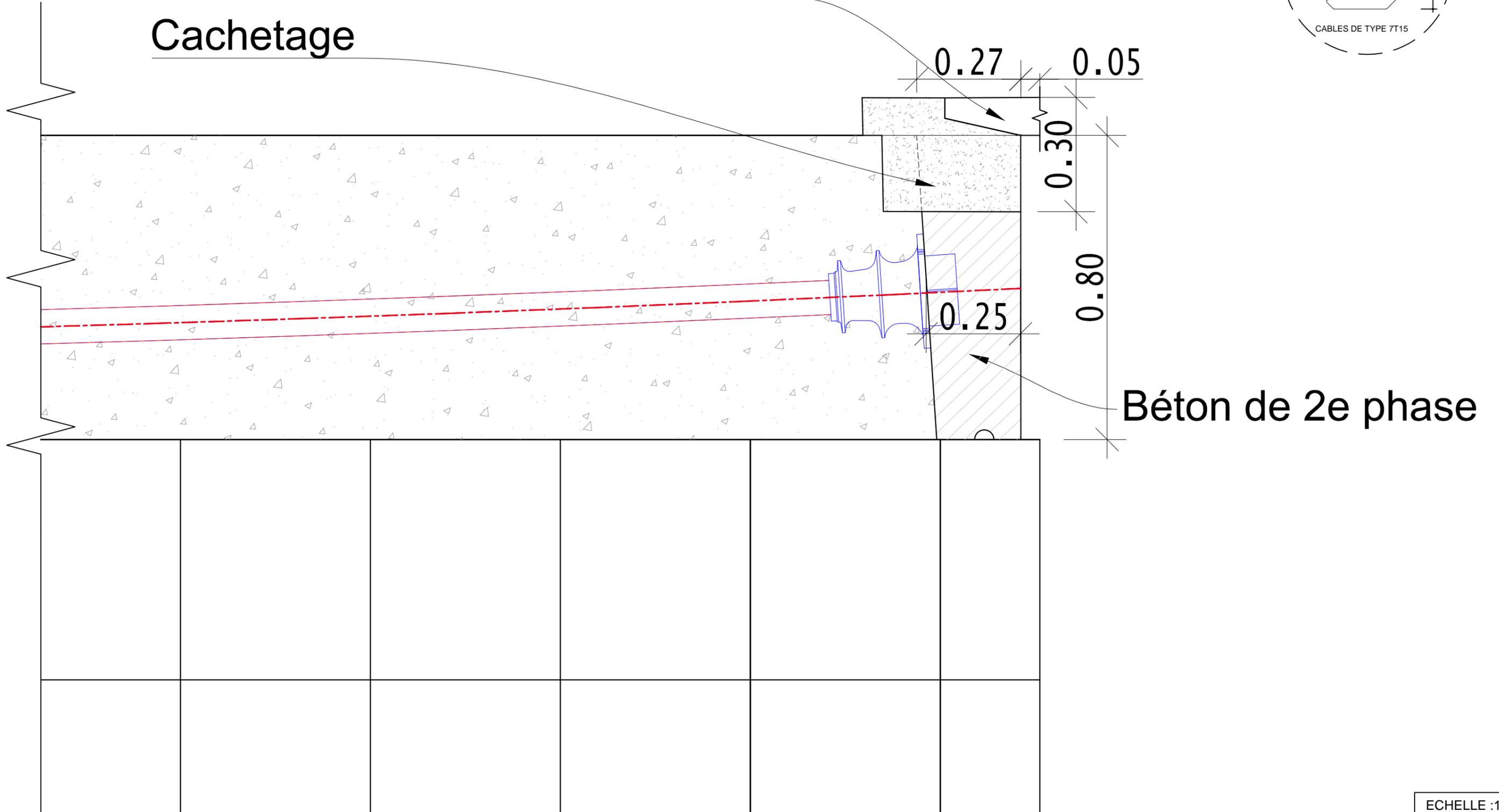


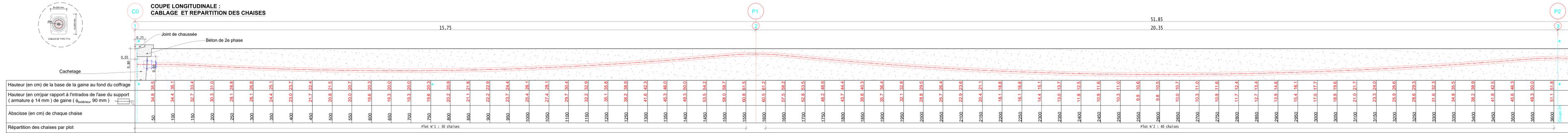
DETAILS D'ABOUT



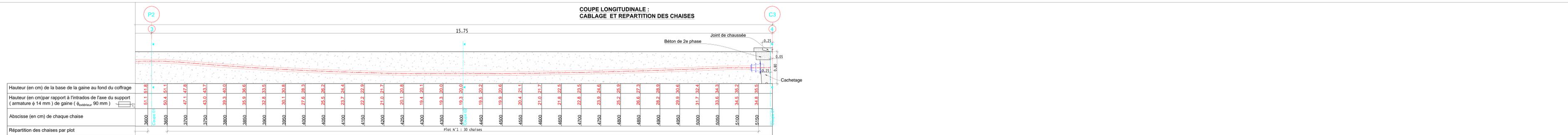
Joint de chaussée

Cachetage

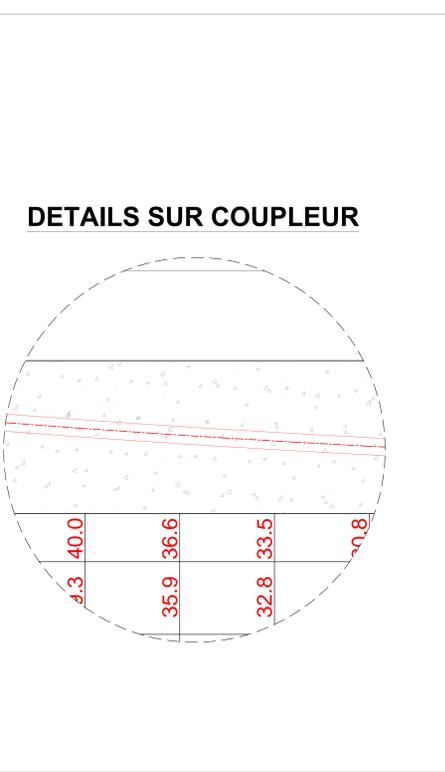
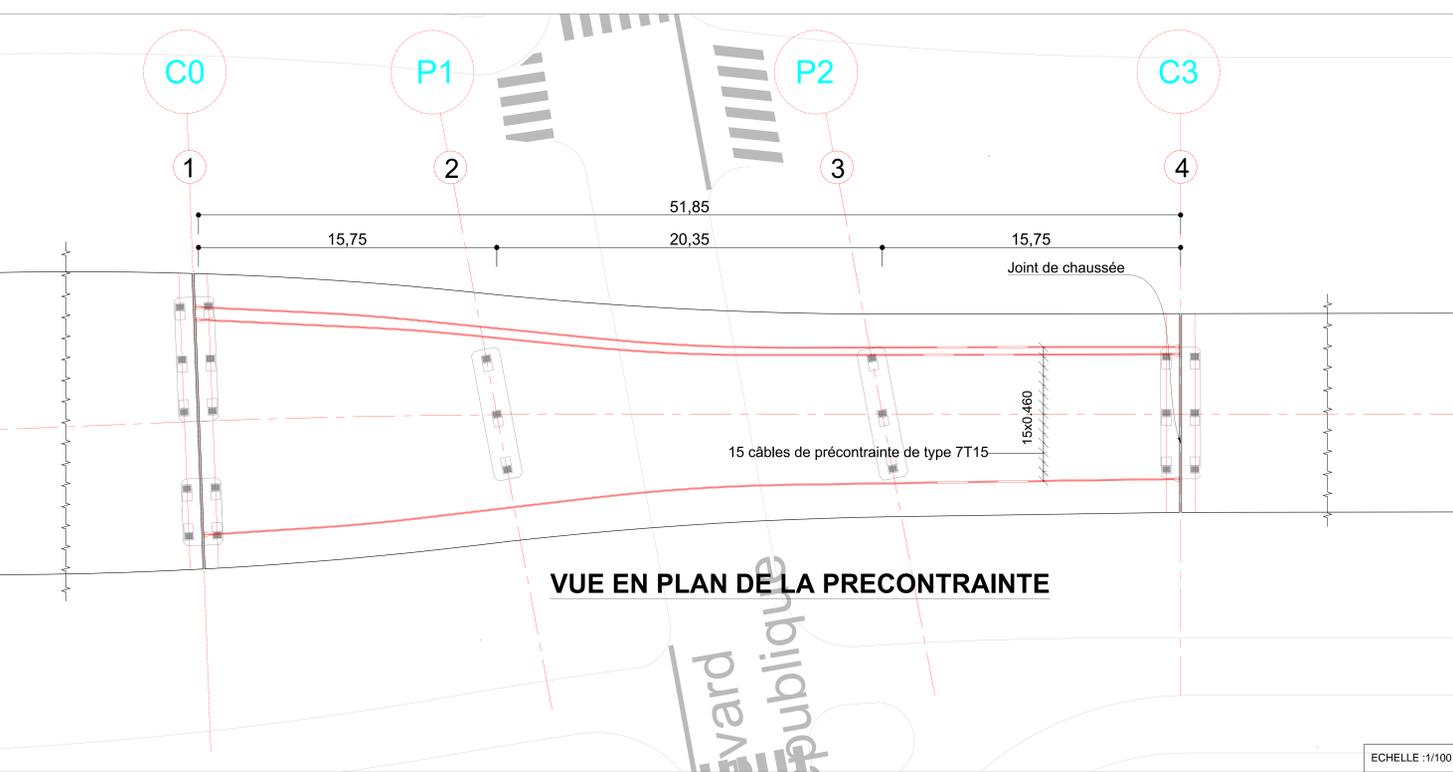




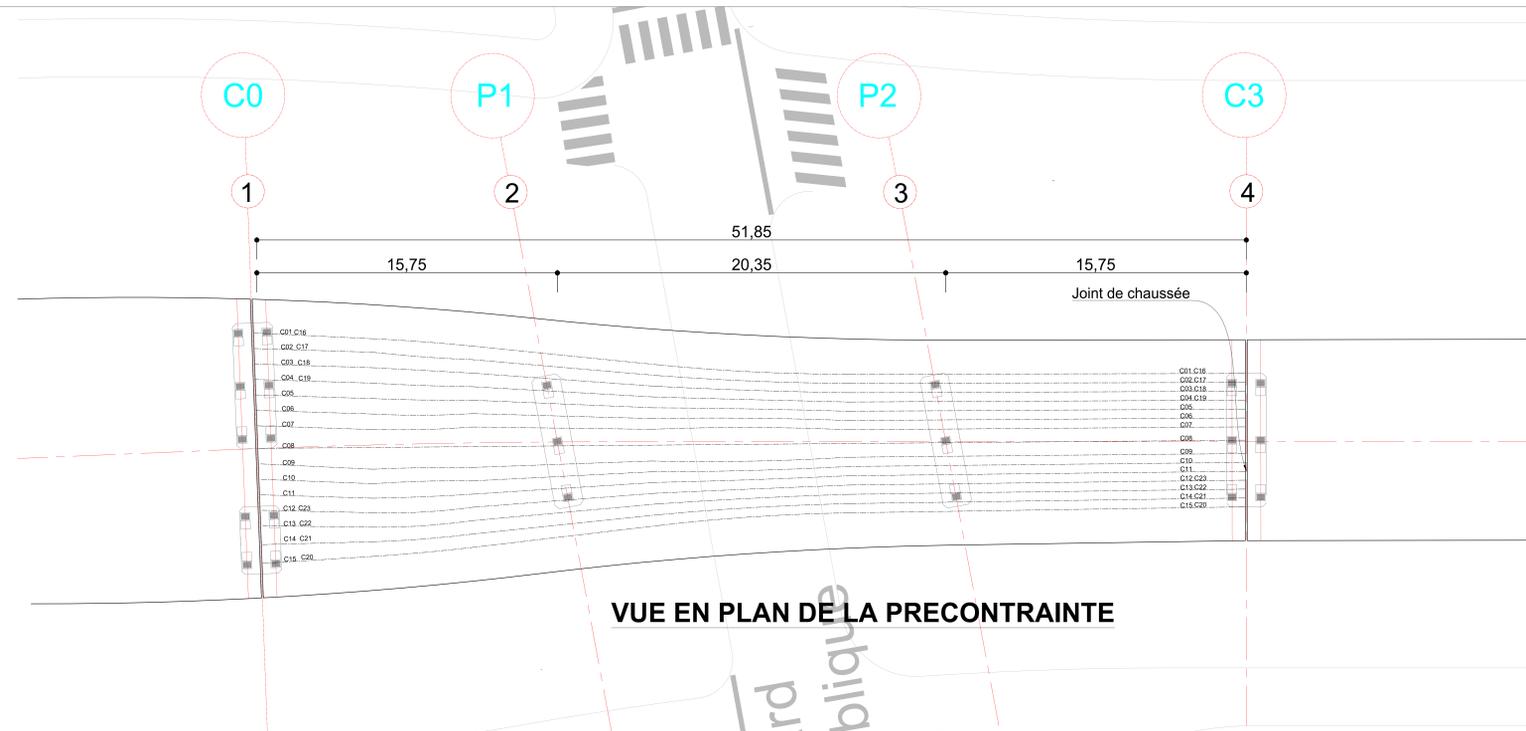
ECHELLE :1/20



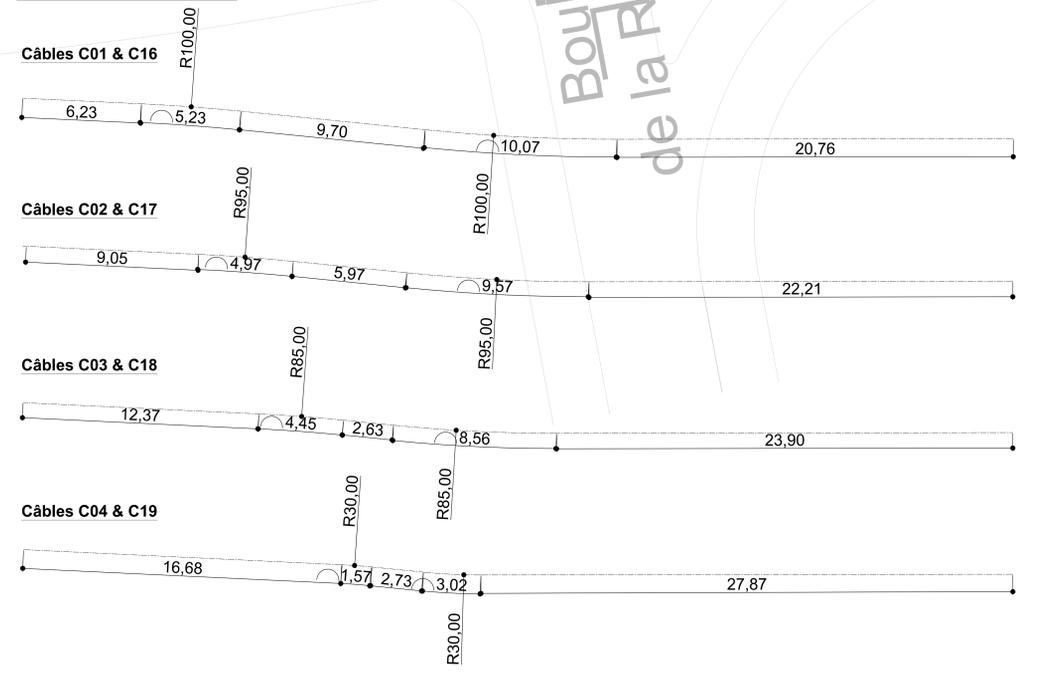
ECHELLE :1/20



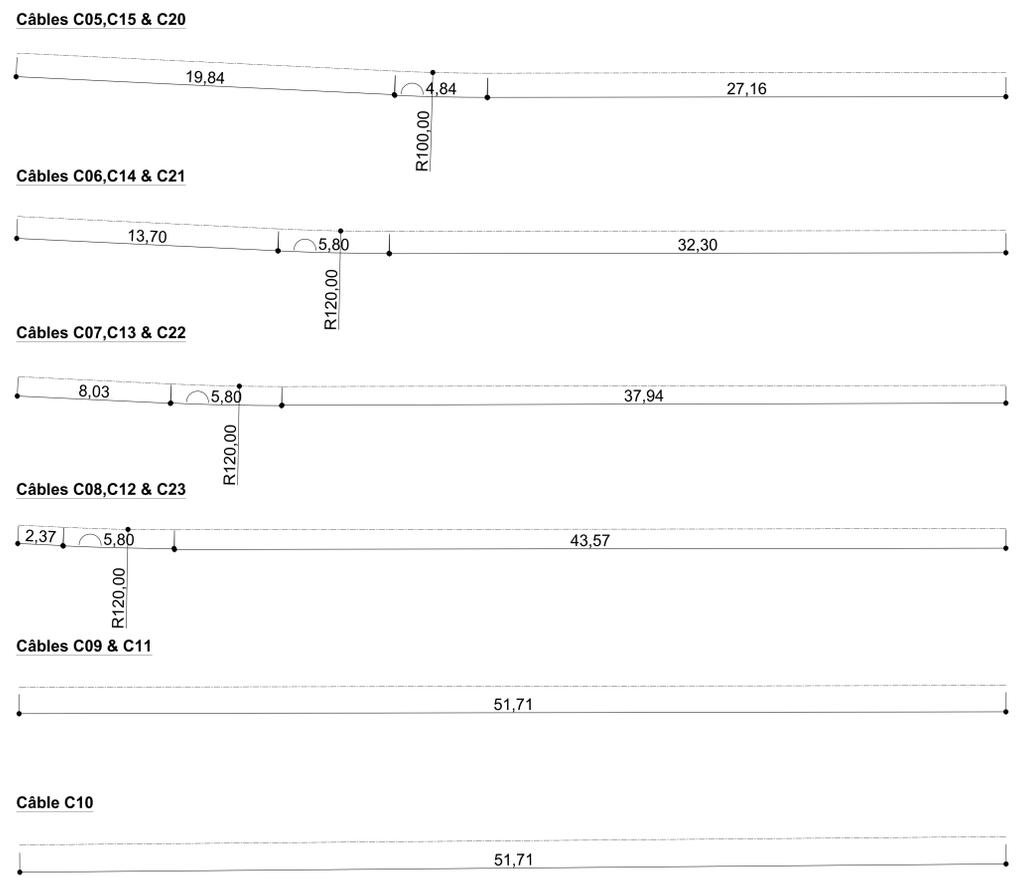
Nombre des ancrages : 46 unités



DETAIL DES CABLES



DETAIL DES CABLES



Nombre des ancrages : 46 unités