

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Civil



MEMOIRE DE MASTER PROFESSIONNEL
Spécialité : Génie Civil
Option : Constructions Hydrauliques & Aménagements

Thème

*Analyse du support d'un réservoir surélevé en vue
de l'optimisation de sa forme géométrique*



Réaliser par :

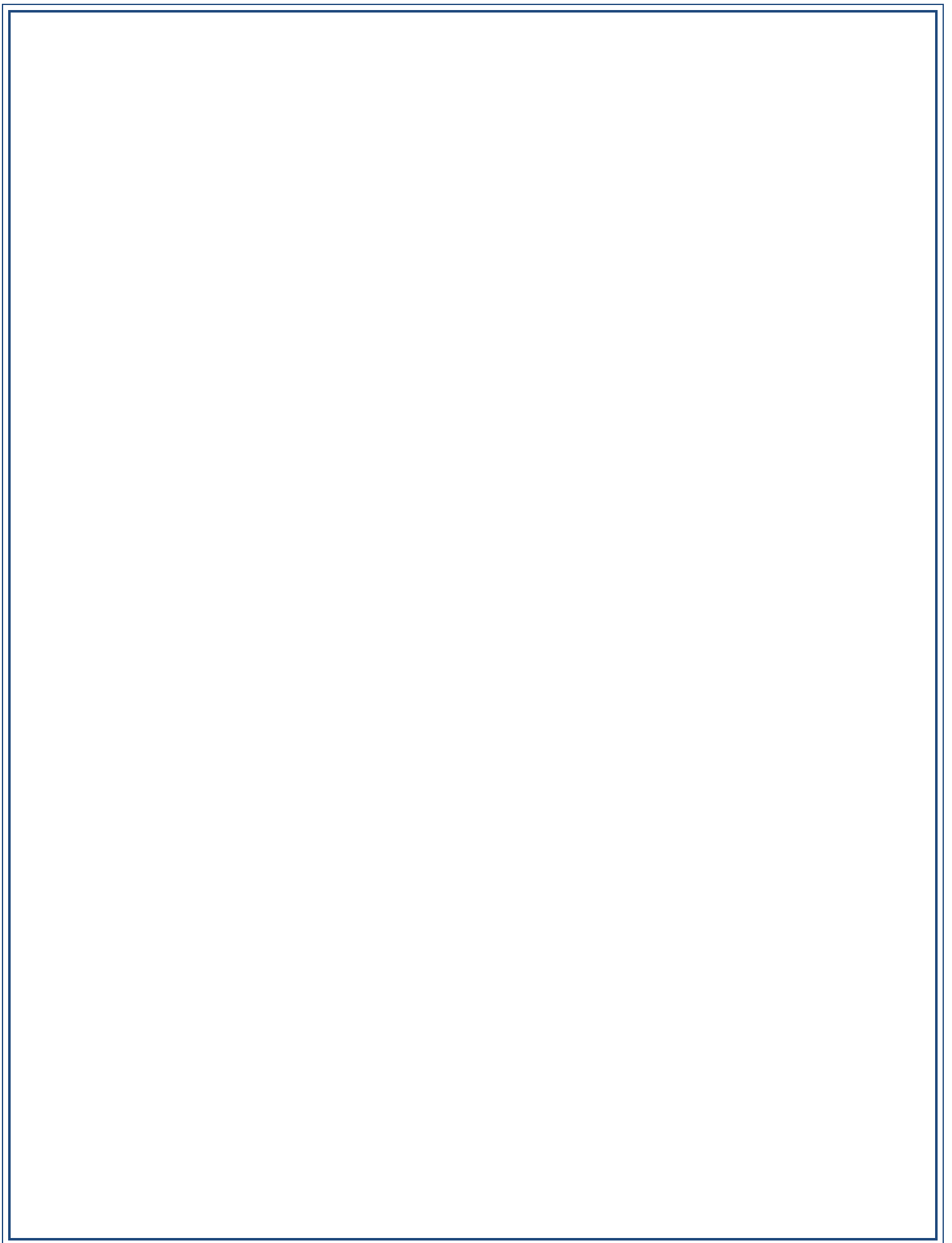
M^{elle} : HALIL ASSIA

M^{dm} : KEZZOULI LILLYA

Diriger par :

M^r :HAMMOUM Hocine

Promotion : 2019/2020





Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont à DIEU le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour donner terme à ce modeste travail.

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Monsieur HAMMOUM Hocine, professeur maitre de conférences au département de génie civil, pour son assistance et sa disponibilité, ces conseils et orientations qui ont grandement contribué à l'élaboration de ce travail ; qu'il trouve ici l'expression de notre plus grande considération.

Nous voudrions également adresser nos sincères remerciements à Madame BOUZELHA Karima, Professeur au département de génie civil, pour son soutien constant, sa disponibilité, et ces précieux conseils, nous ont permis de mener à bien ce travail ; qu'elle trouve ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Nous tenons à remercier toutes nos familles et tous nos amis (es) pour leur soutien et leurs encouragements.

Que tous ceux que nous n'avons pas cités trouvent également l'expression de notre profonde gratitude.





Dédicace

Je remercie ALLAH le tout puissant, clément et miséricordieux de m'avoir motivé

à

Réaliser ce modeste travail.

Je le dédie

A mes chers parents

A mes chers frères Samir, Kader, Salim, Lyamane

Ma chère sœur Mèlissa

A mes chères copines Zahia, Dyhia, Imane, Massissilia.

A tous mes amis sans exception

A tous mes enseignants

A ma chère binôme Lillya et sa famille

A toute la promo CHA 2019/2020.



Assia



Dédicace

Je remercie ALLAH le tout puissant, clément et miséricordieux de m'avoir motivé à

Réaliser ce modeste travail.

Je le dédie

A mon cher père.

Grâce à ton tendre encouragement et ton grand sacrifice, tu as pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments pour toi. Je prie le bon Dieu , de veiller sur toi, en espérant que tu sois toujours fier de moi.

A ma chère mère.

Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes chers frères Bachir et Nassim ;ma chères sœur Dyhia

A mon cher Mari et sa famille

A mes chères copines Mounira et Fettouma

A tous mes amis sans exception

A tous mes enseignants

A ma chère binôme Assia et sa famille

A toute la promo CHA 2019/2020.

Lillya

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralités sur le pré dimensionnements des éléments de structures

1.1 Introduction	1
1.2 Définition des états limites	1
a- États limites de service (ELS)	1
b- États limites ultimes	1
1.3 Présentation de quelques exemples de pré-dimensionnement.....	2
1.3.1 Pré-dimensionnement d'un poteau	2
1.3.2 Pré-dimensionnement d'un pont.....	4
b-Largeur de la table de compression.....	4
c-Nombre de poutre	4
d-Largeur du talon (Lt)	4
e-Épaisseur de l'âme : b_0	4
f-Le gousset de jonction entre le talon et l'âme :	4
g-Pour la section d about	5
h-Gousset de la table de compression	5
1.3. 3 Pré-dimensionnement d'un réservoir surélevé (château d'eau)	5
a) Calcul du diamètre moyen intérieur de la cuve tronconique	6
b) Calcul de la hauteur d'eau utile h_e	6
c) Calcul de la hauteur libre du niveau de l'eau jusqu'à la coupole.....	6
d) Calcul de diamètres supérieur et inférieur de la cuve.....	6
e) Calcul de la flèche de la coupole supérieure f_{sup}	6
f) Calcul du rayon de courbure supérieure	7
g) Calcul de la flèche de la coupole inférieur	7
h) Calcul du rayon de courbure inférieure	8
i) Calcul de l'épaisseur maximal de la paroi de la cuve à la base.....	8
j) Pré-dimensionnement du fût.....	9
Conclusion.....	10

Chapitre 2 : Optimisation d'un fût

2.1. Introduction	12
2.2. Méthodologie.....	12
2.3. Cas de fût à inertie constante.....	13
2.3.1. Calcul de la contrainte normale en fonction de la hauteur Z	14
a- Calcul de la section droite à la hauteur z	14
b- Calcul de l'inertie à la hauteur Z	14
c- Calcul de poids du support à la cote Z	14
d- Calcul de la descente de charge N en fonction de Z	15
e- Calcul de moment fléchissant en fonction de Z	15
f- Vérification des contraintes externes	15
2.4. Etude de cas	16
2.4.1. Présentation du réservoir	16
2.4.2. Calcul des contraintes.....	16
2.5. Support à inertie variable.....	18
2.6. Support cylindrique avec raidisseur	25
a- Calcul des moments d'inertie	25
b- Calcul de poids du support et des raidisseurs à la cote Z	26
Conclusion.....	37

Chapitre 3 : Étude techno-économique du fût

3.1. Introduction	38
3.2. Étude technique	38
3.2.1. Forme cylindrique.....	38
a) Calcul des armatures	38
b) Calcul du poids des aciers.....	39
c) Calcul du volume de béton	40
d) Calcul du coffrage.....	40
3.2.2. Forme tronconique	41
a) Calcul des armatures	45
b) Calcul du poids des aciers.....	46
c) Calcul du volume de béton	47

d) Calcul de coffrage	47
3.2.3. Forme cylindrique avec raidisseurs	48
a) Fut cylindrique	48
a-1) Calcul des armatures	48
a-2) Calcul du poids des armatures.....	49
b) les raidisseurs	50
b-1) Calcul des armatures	50
b-2) calcul de poids des armatures	55
b-3) calcul du coffrage.....	57
3.3. Etude économique	57
Conclusion.....	60
Conclusion générale	

Chapitre 1 : Généralités sur le pré dimensionnements des éléments de structures

Figure 1.1 : Calcul de diamètres supérieur et inférieur de la cuve..... 6
 Figure 1.2 : Schéma représentatif de la coupe radiale de la coupole. 7
 Figure 1.3 : Schéma représentatif de la coupe radiale de la coupole inférieur..... 8

Chapitre 2 : Optimisation d'un fût

Figure 2.1 : Schéma représentatif de l'ouvrage..... 12
 Figure 2.2 : les sollicitations d'ensemble dans le fût. 13
 Figure 2.3 : Schéma du support cylindrique. 13
 Figure 2.4 : Réservoir surélevé. 16
 Figure.2.5 : Diagramme des contraintes du support cylindrique. 18
 Figure 2.6: Macros 19
 Figure 2.7 : Diagramme des contraintes du support à inertie variable..... 21
 Figure 2.8 : Variation du rayon intérieur du fut en fonction de Z..... 21
 Figure 2. 9: courbe du support tronconique. 24
 Figure 2.10 : Diagramme des contraintes du support tronconique linière. 24
 Figure 2.11 : Schéma du support cylindrique avec raidisseurs. 25
 Figure 2.12 : Coupe A-A..... 25
 Figure 2.13 : Représentation des raidisseurs dans le repère centrale. 26
 Figure 2.14 : Fût cylindrique avec raidisseurs. 26
 Figure 2.15: Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs..... 29
 Figure 2.16 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.4m$.
 29
 Figure 2.17 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.5m$.
 30
 Figure 2.18 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.6m$.
 30
 Figure 2.19 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.7m$.
 31
 Figure 2.20: variation de la forme de raidisseur..... 31
 Figure 2.21: Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs..... 34
 Figure 2.22 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.4m$.
 34

Figure 2.23 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.5m$.	35
Figure 2.24 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.6m$.	35
Figure 2.25 : Diagrammes des contraintes du support cylindrique avec raidisseur de $b_0=0.7m$.	36
Figure 2.26 : Variation de la forme linéaire des raidisseurs.	36

Chapitre 3 : Étude techno-économique du fût

Figure 3.1 : le poids propre de support.	42
Figure 3.3 : le poids propre de la cuve.	44
Figure 3.4 : le poids propre des raidisseurs.	51
Figure 3.5 : Le poids de la cuve pleine.	53
Figure 3.6 : courbe de la variation des prix en fonction de la largeur des raidisseurs b_0 .	60

Chapitre 2 : Optimisation d'un fût

Tableau 2.1 : Caractéristique principale de réservoir.....	16
Tableaux.2.2 : Extrait des résultats des Caractéristiques du support cylindrique (Annexe1) .	17
Tableaux 2.3. Extrait de résultats de la variation de la forme géométrique du support (Annexe2).....	20
Tableaux 2.4 : Extrait des résultats des caractéristiques du support de forme tronconique (Annexe4).....	23
Tableau 2.5 : Extrait des résultats des caractéristiques d'un fut cylindrique avec raidisseurs de la forme parabolique.....	28
Tableau 2.6 : Extrait des résultats des caractéristiques d'un fut cylindrique avec raidisseurs de la forme linéaire (Annexe 4).	33

Chapitre 3 : Étude technico-économique du fût

Tableau 3.1 : Tableau récapitulative des résultats de calcul de ferrailage.	39
Tableau 3.2 : Tableau de nomenclature pour la forme cylindrique.....	40
Tableau 3.3 : Tableau de nomenclature pour la forme tronconique.....	47
Tableau 3.4 : Extrait des résultats de la variation de volume.....	47
Tableau 3.5 : Tableau nomenclature de dut cylindrique.	49
Tableau 3.6 : Tableau nomenclature pour le raidisseur	56
Tableau 3.7 : Extrait des résultats de la variation de volume de raidisseur.	56
Tableau 3.8 : les résultats de l'étude technique des raidisseurs pour différent (b_0).	57
Tableau 3.9 : Devis de formes cylindrique.	58
Tableau 3.10 : Devis de forme tronconique.	58
Tableau 3.11 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.3m$).	58
Tableau 3.12 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.4m$).	59

Tableau 3.13 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.5m$).59

Tableau 3.14 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.6m$).59

Tableau 3.15 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.7m$).59

Traditionnellement, l'ingénieur civil de bureau d'études dans son approche déterministe aborde la question d'analyse du support d'un réservoir surélevé d'une manière très simpliste. Le fût adopté dans la majeure partie des cas est de type à inertie constante. L'inconvénient dans ce type d'ouvrage est que les contraintes le long du support sont variables. On sait alors que les contraintes maximales agissent au pied du support. L'ingénieur par simplification, généralise le dimensionnement à toute la tour. Cette manière de faire est loin d'être économique. Le but recherché dans cette étude est de penser à donner une forme élaborée au support en essayant de maîtriser les contraintes et en les maintenant constantes le long du fût. A travers un exemple tiré de la pratique, qui est le réservoir surélevé de capacité 1000m^3 implanté à Boudouaou, wilaya de Boumerdés.

Nous tacherons de proposer plusieurs variantes voir même des pistes pour arriver à une solution avantageuse d'un point de vu technico-économique. Le but recherché est l'optimisation du support de ce réservoir surélevé.

La structure du mémoire est comme suit :

- Le premier chapitre consiste à présenter les généralités sur le pré- dimensionnement des éléments de différentes structures.

- Le deuxième chapitre sera consacré à l'optimisation de la forme du fut de notre château d'eau, en passant par le calcul de volume et du poids de chaque élément constituant notre fût , pour arriver à son poids total ,puis calculer les contrainte .

- Le troisième chapitre sera dédié à l'étude techno-économique. Une étude technique qui se portera sur le ferrailage des différentes variantes de notre support, qui nous permettra de calculer les poids des aciers, les volumes des bétons et la surface des coffrages, utiliser pour chaque variante. En fin l'étude économique nous donnera le cout de chaque variante et nous permettra de choisir la plus économique.

1.1 Introduction

Dans le domaine génie civil, et pour différentes structures (bâtiment, réservoirs et ponts), le pré-dimensionnement des éléments est une première étape de calcul qu'effectue l'ingénieur après avoir reçu les plans d'architecture. Ce pré dimensionnement est effectué à l'état limite ultime puis vérifié à l'état limite de service.

Dans le cadre de premier chapitre, nous présenterons quelques exemples de pré-dimensionnement de certains éléments de structure de génie civil afin d'illustrer la marge de sécurité considéré et qui souvent conduit à un surdimensionnement.

1.2 Définition des états limites

Un ouvrage doit présenter durant toute sa durée d'exploitation des sécurités suffisantes pour d'une part éviter sa ruine ou celle de l'un de ses éléments, et d'autre part empêcher un comportement en service pouvant affecter sa durabilité, son aspect ou le confort des usagers.

La vérification des structures se fait ainsi par le calcul aux états limites, les vérifications doivent être faites pour toutes situations de projet et tous les cas de charges appropriés, pour deux types d'états limite; l'État limite de service (ELS) et états limite ultime.

a- États limites de service (ELS)

Les états limites de service correspondent à des états de la structure lui causant des dommages limites ou a des conditions au-delà desquelles les exigences d'aptitude au service spécifiées pour la structure ou un élément de structure ne sont plus satisfaites (fonctionnement de la structure ou des éléments structuraux, confort des personnes, aspect de la construction).ils sont relatifs aux critères d'utilisation courants : déformation, vibration, durabilité. Leur dépassement peut entrainer des dommages à la structure mais pas sa ruine. Ils concernent la limitation des contraintes, la maîtrise de la fissuration, la limitation des flèches.

b- États limites ultimes

Les états limites ultimes concernent la sécurité des personnes, de la structure et des biens. Ils incluent éventuellement les états précédant un effondrement ou une rupture de la structure .ils correspond au maximum de la capacité portante de l'ouvrage ou d'un de ses éléments par la perte d'équilibre statique, une rupture ou déformation plastique excessive, ou l'instabilité de la forme (flambement...) les vérifications aux états limites ultimes portent sur la flexion, l'effort tranchant, la torsion ,le poinçonnement et la fatigue .

1.3 Présentation de quelques exemples de pré-dimensionnement

Pour illustrer la procédure de pré dimensionnement, nous considérons un élément de bâtiment (poteau), un élément d'un pont (poutres,.....) et un réservoir.

1.3.1 Pré-dimensionnement d'un poteau

Celui-ci est effectué sous deux conditions, à savoir:

- **Condition de non flambement**

$$\lambda = \frac{L_f}{i_{min}} = \frac{L_f}{\sqrt{I_{min}/A}} = \sqrt{12} \frac{L_f}{h} \quad (1.1)$$

λ : L'élancement ;

L_f : Longueur de flambement, $L_f=0,7L_0$;

L_0 = longueur libre du poteau.

Pour les charges appliquées après 28 jours la condition de flambement est donnée par :

- **Condition du R.P.A : pour les poteaux art (7.4.1.R .P.A.99)**

Min (b .h) \geq 25 cm ;

Min (b.h) \geq h /20.

Si les conditions sont vérifiées, nous choisissons une section qui est généralement supérieure aux valeurs limites.

a) Ferrailage des poteaux

Les poteaux sont calculés en flexion composée. Chaque poteau est soumis un effort (N) et à deux moments fléchissant (M_x -x, M_y -y).

Les armatures sont obtenues à l'état limite ultime (E.L.U) sous l'effet des sollicitations les plus défavorables suivant les deux sens pour les cas suivants :

a-1) Combinaisons des charges

En fonction du type de sollicitation, nous distinguons les différentes combinaisons suivantes :

Selon BAEL 91 :

E.L.U : Situation durable : 1,35 G +1,5 Q (*)

Selon le R.P.A 99 :

Situation accidentelle (article 5.2 page 40)

G+Q+E..... (**)

0.8G+E..... (***)

La combinaison (2) comprend la totalité de la charge d'exploitation ainsi que la charge sismique. Du fait que cette charge (exploitation) est tout à fait improbable, une grande partie de celle-ci de (40% à 60%) peut effectivement représenter l'effet des accélérations verticales des séismes.

a-2) Recommandation du RPA99/version 2003 :

D'après le RPA99/version 2003 (article 7.4.2 page 48), les armatures longitudinales doivent être à haute adhérence droites et sans crochet. Leur pourcentage en zone sismique est limité par :

- $A_{\max} = A_s/bh < 3\%$ en zone courante;
- $A_{\max} = A_s/bh < 6\%$ en zone recouvrement;
- $A_{\min} = A_s > 0,8 \%bh$ (zone IIa);
- Le diamètre minimal est de 12 mm;
- La longueur minimale de recouvrement est de $40 \Phi L$;
- La distance maximale entre les barres dans une surface de poteau est de 25 cm;
- Les jonctions par recouvrement doivent être faites si possible, à l'extérieur des zones IIa nodales (zone critiques).

1.3.2 Pré-dimensionnement d'un pont

Les étapes sont comme suit :

a-Hauteur des poutres

La hauteur d'une poutre de pont dont la portée est supérieure ou égale à 20 m ($L \geq 20$) est donnée par la condition suivante selon le guide (SETRA) :

$$\begin{cases} \frac{L}{20} - 0.2 \leq hp \leq \frac{L}{20} + 0,5 \\ \frac{L}{18} \leq hp \leq \frac{L}{15} \end{cases} \quad (1.2)$$

avec :

L : la distance entre les axes des appuis de la travée.

b-Largeur de la table de compression

La table de compression reprend les forces de compressions

$$b \geq 0,6hp$$

Épaisseur de la table de compression $12\text{cm} \leq e \leq 15\text{cm}$.

c-Nombre de poutre

Le nombre de poutre est déterminé par :

$$N = \left(\frac{La}{\lambda} \right) + 1 \quad (1.3)$$

La : entraxe entre les poutres d'extrémité égale à $La = l - (b/2) * 2$

d : entraxe des poutres $1,5 \leq d \leq 2,5$.

d-Largeur du talon (Lt)

La largeur b_t est comprise entre 40 et 70 cm ;

La hauteur h_t est comprise entre 19 et 20 cm, afin de permettre un bon bétonnage et contenir les armatures passives.

e-Épaisseur de l'âme : b_0

L'épaisseur de l'âme b_0 est donnée par la formule suivante :

$$b_0 > \frac{ht}{36} + 6\phi_{gaine} \quad (1.4)$$

ϕ_{gaine} : Diamètre de la gaine.

f-Le gousset de jonction entre le talon et l'âme :

$$1 \leq \text{tg}\phi = \frac{2hg}{bt-b_0} \leq \frac{2}{3} \quad (1.5)$$

Avec :

hg : est donnée par la formule suivante :

$$\frac{bt-b_0}{2} \leq hg \leq \frac{2}{3} \left(\frac{bt-b_0}{2} \right) \quad (1.6)$$

g-Pour la section d about

- Épaisseur de l'âme b₀

L'épaisseur de l'âme est imposée par la plaque d'ancrage sur lesquelles s'appuie le socle de vérins lors de la mise en tension

$$b_0 \geq a + 10 \text{ pour}$$

a : largeur de la plaque d'ancrage

le gousset de jonction entre le talon et l'âme

Elle doit avoir une pente suffisante pour assure un bon bétonnage du talon cette pente doit satisfaire l'expression :

$$1 \leq \tan \theta = 2hg / (bt - b_0) \leq \frac{2}{3} \quad (1.7)$$

h-Gousset de la table de compression

- L'hourdis

L' hourdis est une dalle en béton armé ou en béton précontrainte, qui sert de couverture pour le pont en effet elle destinée à recevoir la couche de roulement et les surcharges d'un pont et à transmettre ces derniers aux poutres.

- Épaisseur du hourdis

Dans notre cas le hourdis est en béton arme sans entretoises intermédiaires et sert comme une dalle de couverture.

- H ≥ λ/15

Tel que λ distance entre axe des poutres.

1.3. 3 Pré-dimensionnement d'un réservoir surélevé (château d'eau)

Il consiste à déterminer le diamètre intérieur de la cuve et la hauteur d'eau utile :

a) Calcul du diamètre moyen intérieur de la cuve tronconique

Le diamètre moyen D_{moy} est calculé par la relation (1.8) :

$$D_{\text{moy}} = 1.405 \sqrt[3]{V} \quad (1.8)$$

b) Calcul de la hauteur d'eau utile h_e

La hauteur d'eau est calculée par la relation (1.9) :

$$h_e = 0,46 \cdot D_{\text{moy}} \quad (1.9)$$

c) Calcul de la hauteur libre du niveau de l'eau jusqu'à la coupole

La hauteur libre est calculée par la relation (1.10) :

$$h_0 = 0,10 \cdot D_{\text{moy}} \quad (1.10)$$

d) Calcul de diamètres supérieur et inférieur de la cuve

Pour avoir une belle silhouette du château d'eau on prend on doit choisir un angle α

Avec : α : l'angle d'inclinaison de la paroi de la cuve par rapport à l'horizontal.

$$\text{On a } \tan \alpha = \frac{H_e}{x} \rightarrow x = \frac{H_e}{\tan \alpha}$$

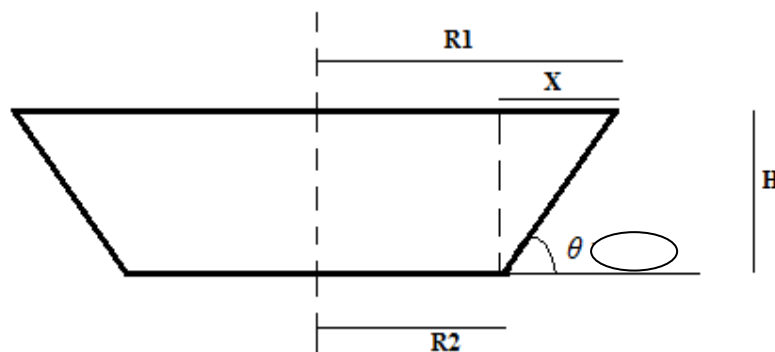


Figure 1.1 : Calcul de diamètres supérieur et inférieur de la cuve.

e) Calcul de la flèche de la coupole supérieure f_{sup}

La flèche de la coupole supérieure est donnée par la relation empirique (1.11) suivante:

$$f_{\text{sup}} = 0.104 D_{\text{sup}} \quad (1.11)$$

avec :

f_{sup} : Flèche de la coupole supérieure;

D_{sup} : Diamètre supérieure de la coupole.

f) Calcul du rayon de courbure supérieure

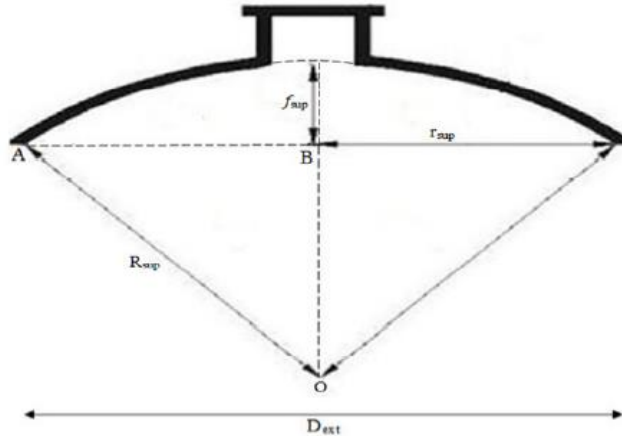


Figure 1.2 : Schéma représentatif de la coupe radiale de la coupole.

En appliquant le théorème de Pythagore au triangle ABO de la figure (2.1), il vient :

$$R_{sup}^2 = \left(\frac{D_{int}}{2}\right)^2 + (R_{sup} - f_{sup})^2 \quad (1.12)$$

D'où :

$$R_{sup} = \frac{1}{8f_{sup}} (D_{int}^2 + 4f_{sup}^2) \quad (2.13)$$

Le rayon de courbure supérieure est donné par la relation (1.14) suivante :

$$R_{sup} = \frac{r_{sup}^2 + f_{sup}^2}{2f_{sup}} \quad (1.14)$$

Avec :

r_{sup} : rayon intérieur de la cuve tronconique en m ;

R_{sup} : Le rayon de courbure supérieure en m.

g) Calcul de la flèche de la coupole inférieure

La flèche de la coupole inférieure est donnée par la relation empirique (1.15) suivante :

$$f_{inf} = 0,104 D'_{int} \quad (1.15)$$

avec :

D_{int} : Diamètre intérieure de fond de cuve en m ;

f_{inf} : La flèche de la coupole inférieure en m.

j) Pré-dimensionnement du fût

Le calcul ce fait suivant les normes donnée par :

- Fascicule 74 Cahier des clauses techniques générales (1998);
- BAEL 91 modifié 99.

- Calcul du poids du support

Le poids est donné par la relation (1.20) suivante :

$$P = \pi * (R_{ext}^2 - R_{int}^2) * H * \gamma_b \quad (1.20)$$

avec :

H : hauteur du fût elle est déterminer en fonction de la consommation d'eau, la pression demandée et la topographie du site que hauteur d'implantation du château d'eau est calculer par l'étude hydraulique;

γ_b : Coefficient de sécurité qui tient compte de la résistance du béton ;

La paroi du fût sera calculer comme un voile telle que :

e_p : épaisseur du fut donnée par le fascicule 74 prise égale minimum 15 cm .

- Combinaisons de charge

ELU

$$P_u = \frac{1.35G+1.5Q}{2.\pi.R} \quad (1.21)$$

avec :

G : Le poids de la tour + poids de la cuve pleine;

Q : La charge d'exploitation.

ELS

$$P_S = \frac{G+Q}{2.\pi.R} \quad (1.22)$$

- Calcul des contraintes

Pour calculer les contraintes de compression nous utilisons l'équation (1.23) :

$$\sigma_{bc} = \frac{P_u}{S} \quad (1.23)$$

$$S = \frac{\pi}{2} \cdot [(D_{ext}^2 - D_{int}^2)] \quad (1.24)$$

Conclusion

Ce pré- dimensionnement peut induire très souvent à un sur dimensionnement des sections et a la non vérification des contraintes aux états limites. C'est dans cette optique que nous souhaitons aborder ce problème par l'angle de l'optimisation du fût.

L'optimisation de cet élément consiste à fixer la contrainte de compression (et/ou traction) en jouant sur la forme de celle-ci, c'est ce que nous tacherons d'aborder dans le chapitre qui va suivre.

2.1. Introduction

Dans les calculs traditionnels effectués par les ingénieurs civils, le fût est considéré comme une section cylindrique constante. Cette manière de faire conduit à un surdimensionnement du support, car les contraintes à la base sont nettement plus importantes que celles à la tête. Il serait plus judicieux de trouver un compromis entre la forme géométrique du fût et les contraintes. L'idée est de faire prévaloir la même contrainte le long du support en modifiant sa forme. Ceci nous conduit à développer l'équation de la forme géométrique du support.

2.2. Méthodologie

Considérons un réservoir surélevé (château d'eau) de forme tronconique constitué essentiellement des éléments suivants (figure 2.1) :

- Un lanterneau ;
- Une coupole de couverture ;
- Une ceinture supérieure ;
- Une cuve tronconique ;
- Une coupole de fond ;
- Une cheminée ;
- Une ceinture inférieure ;
- Une Charpente métallique (échelles, passerelles) ;
- Une fondation (radier général) ;

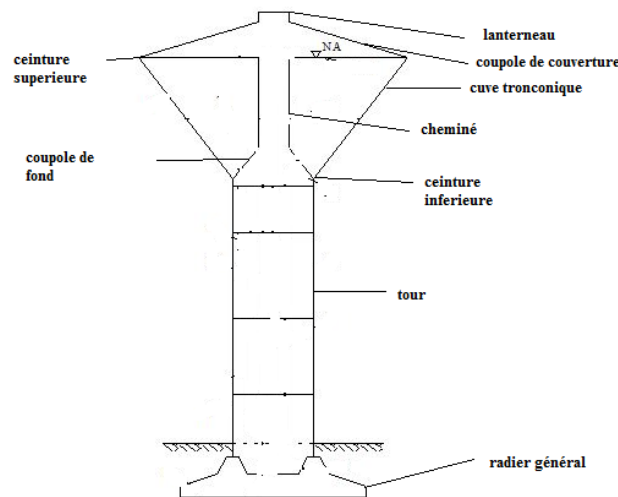


Figure 2.1 : Schéma représentatif de l'ouvrage.

Le fût de forme cylindrique est considéré comme une console encastré dans la fondation, soumis à la flexion composée figure (2.2) ou :

- M : un moment fléchissant;
- N : un effort normal;
- T : un effort tranchant.

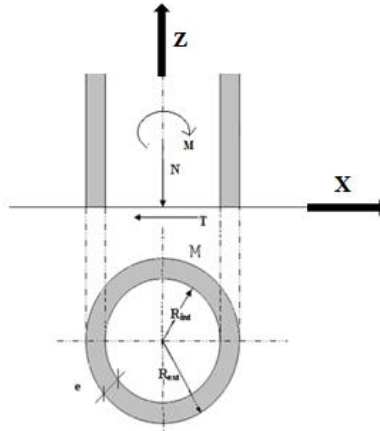


Figure 2.2 : les sollicitations d'ensemble dans le fût.

Plusieurs cas d'étude seront considérés ; à savoir un fût cylindrique à inertie constante, un fût tronconique à inertie variable et enfin un fût cylindrique avec raidisseurs, tout en gardant les contraintes constantes le long du fût.

2.3. Cas de fût à inertie constante

Nous procédons à un calcul classique d'une section cylindrique à inertie constante figure (2.3).

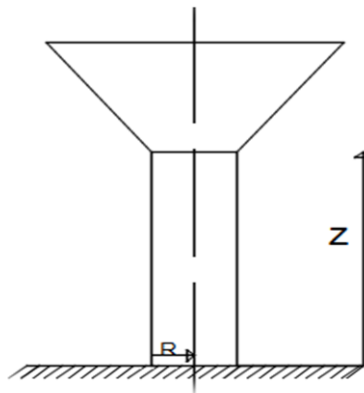


Figure 2.3 : Schéma du support cylindrique.

2.3.1. Calcul de la contrainte normale en fonction de la hauteur Z

Les contraintes normales agissantes dans la section droite du support sont données par la relation

(2.1) :

$$\sigma(z) = \frac{N(z)}{S(z)} \pm \frac{M(z)}{I(z)} \cdot V(z) \quad (2.1)$$

avec :

$N(z)$: effort normal droit vertical à la hauteur (z)

$S(z)$: section droite de fût à la hauteur (z).

$M(z)$: moment fléchissant à la hauteur (z).

$I(z)$: moment d'inertie de la section droite du fût par rapport à un axe passant par son centre de gravité à la hauteur (z).

$V(z)$: Distance de la fibre la plus éloignée par rapport au centre de gravité de la section droite.

Z : hauteur de la section constante droite par rapport au radier.

a- Calcul de la section droite à la hauteur z

La section droite à la hauteur z est donnée par la relation (2.2) :

$$S(z) = \pi \cdot [(R^2(z) - R_i^2(z))] \quad (2.2)$$

avec:

$R(z)$: rayon extérieur du support à la hauteur Z ;

$R_i(z)$: rayon intérieur du support à la hauteur Z.

b- Calcul de l'inertie à la hauteur Z

Pour calculer le moment d'inertie, nous utilisons l'équation (2.3) suivante :

$$I(z) = \frac{\pi}{4} \cdot [(R^4(z) - R_i^4(z))] \quad (2.3)$$

c- Calcul de poids du support à la cote Z

Pour une section constante, le poids est déterminé avec la relation (2.4) :

$$P(z) = \pi \cdot [(R^2(z) - R_i^2(z))] \cdot \gamma_b \cdot (H_{supp} - z) \quad (2.4)$$

Ou :

γ_b : le poids volumique de béton $\gamma_b=2.5t/m^3$;

H_{supp} : hauteur totale du support.

d- Calcul de la descente de charge N en fonction de Z

Celle-ci est obtenue par la relation (2.5) :

$$N(z) = N_c + P(z) \quad (2.5)$$

N_c étant le poids de la cuve pleine au sommet du support.

e- Calcul de moment fléchissant en fonction de Z

Le moment de flexion au droit d'une section quelconque du support à la hauteur (z) est donné par l'équation (2.6), en fonction de la force d'oscillation F_0 et F_1 la force d'impulsion respectivement :

$$M(z) = F_0 \cdot (H_{\text{supp}} + h_0 - z) + F_1 \cdot (H_{\text{supp}} + h_i - z) \quad (2.6)$$

avec :

F_0 : force sismique résultante au niveau de la masse oscillante ;

h_0 : niveau d'application des pressions induite par la masse oscillante par rapport au fond de la cuve ;

F_1 : force sismique résultante au niveau de la masse d'impulsion ;

h_i : niveau d'application des pressions induite par la masse d'impulsion par rapport au fond de la cuve.

f- Vérification des contraintes externes

- **1^{er} Cas** : la contrainte de compression sur chaque bande.

$$\sigma_{\text{max}}(z) = \frac{N(z)}{S(z)} + \frac{M(z)}{I(z)} \cdot V(z) \quad (2.7)$$

La contrainte admissible du béton à la compression σ_{adm}^c est donnée par le (BAEL 91 /R99)

$$\sigma_{\text{adm}}^c = 0.6 \cdot f_{c28} \quad (2.8)$$

La résistance de béton à la compression f_{c28} .

- **2^{eme} Cas** : la contrainte de traction sur chaque bande.

$$\sigma_{\text{min}}(z) = \frac{N(z)}{S(z)} - \frac{M(z)}{I(z)} \cdot V(z) \leq \sigma_{\text{adm}}^t \quad (2.9)$$

σ_{adm}^t étant la contrainte admissible du béton à la traction, donnée par le (BAEL 91/R99)

La contrainte admissible à la traction σ_{adm}^t est donnée par le fascicule 74 par la relation (2. 10) :

$$\sigma_{\text{adm}}^t = 1.1 \cdot \theta \cdot f_{t28} \quad (2.10)$$

$\theta = 1$, cas de la traction simple ;

$\theta = 1 + \frac{2.e_0}{h_0}$, cas de la flexion plane composée, de traction extérieure ayant une excentricité e_0 inférieure à l'épaisseur h_0 de la paroi ;

$\theta = \frac{5}{3}$, autres cas.

$$f_{t28} = 0.6 + 0.06f_{c28} \quad (2.11)$$

f_{t28} étant la résistance de béton à la traction.

2.4. Etude de cas

2.4.1. Présentation du réservoir

L'ouvrage faisant l'objet de notre étude, est un réservoir surélevé (sur fût), implanté à Boudouaou, wilaya de Boumerdés. Les principales caractéristiques de notre château d'eau sont présentées dans le tableau (2.1) :

Tableau 2.1 : Caractéristique principale de réservoir.

Description	Valeurs	Unité
Capacité	1000	m ³
Hauteur total du château d'eau	36,3	m
Hauteur d'eau dans la cuve	6,70	m
Niveau du trop-plein	31,5	m
Hauteur du support	24	m
Le rayon intérieur du support	3.40	m
Le rayon extérieur du support	3.80	m
Epaisseur de la paroi du support	0.4	m



Figure 2.4 : Réservoir surélevé.

2.4.2. Calcul des contraintes

Les contraintes tout au long du fût sont calculées conformément aux relations présentées ci-dessus. Un extrait de résultats obtenu est présenté dans les tableaux (2.2) :

Tableaux.2.2 : Extrait des résultats des Caractéristiques du support cylindrique (Annexe1).

Cote (z)	Ri (m)	R (m)	A (m2)	poids partiel (N) *10 ⁴	Poids cumulé (N) *10 ⁴	I (m4)	M *10 ⁶ (N.m)	V(z) (m)	N(z) *10 ⁶ (N)	σ min	σadm	σ max	σadm
24.00	3.40	3.80	9.05	-	-	58.81	1 620.49	3.80	1 606.65	0.73	2.31	2.82	15.00
23.90	3.40	3.80	9.05	2.26	2.26	58.81	1 683.78	3.80	1 608.91	0.69	2.31	2.87	15.00
23.80	3.40	3.80	9.05	2.26	4.52	58.81	1 747.08	3.80	1 611.17	0.65	2.31	2.91	15.00
23.70	3.40	3.80	9.05	2.26	6.79	58.81	1 810.38	3.80	1 613.44	0.61	2.31	2.95	15.00
23.60	3.40	3.80	9.05	2.26	9.05	58.81	1 873.67	3.80	1 615.70	0.58	2.31	3.00	15.00
23.50	3.40	3.80	9.05	2.26	11.31	58.81	1 936.97	3.80	1 617.96	0.54	2.31	3.04	15.00
22.10	3.40	3.80	9.05	2.26	42.98	58.81	2 823.11	3.80	1 649.63	- 0.00	2.31	3.65	15.00
22.00	3.40	3.80	9.05	2.26	45.24	58.81	2 886.41	3.80	1 651.89	- 0.04	2.31	3.69	15.00
21.90	3.40	3.80	9.05	2.26	47.50	58.81	2 949.71	3.80	1 654.15	- 0.08	2.31	3.73	15.00
21.80	3.40	3.80	9.05	2.26	49.76	58.81	3 013.00	3.80	1 656.41	- 0.12	2.31	3.78	15.00
21.70	3.40	3.80	9.05	2.26	52.02	58.81	3 076.30	3.80	1 658.67	- 0.15	2.31	3.82	15.00
0.50	3.40	3.80	9.05	2.26	531.56	58.81	16 495.07	3.80	2 138.21	- 8.29	2.31	13.02	15.00
0.40	3.40	3.80	9.05	2.26	533.82	58.81	16 558.37	3.80	2 140.47	- 8.33	2.31	13.06	15.00
0.30	3.40	3.80	9.05	2.26	536.08	58.81	16 621.66	3.80	2 142.73	- 8.37	2.31	13.11	15.00
0.20	3.40	3.80	9.05	2.26	538.34	58.81	16 684.96	3.80	2 144.99	- 8.41	2.31	13.15	15.00
0.10	3.40	3.80	9.05	2.26	540.61	58.81	16 748.26	3.80	2 147.26	- 8.45	2.31	13.19	15.00
-	3.40	3.80	9.05	2.26	542.87	58.81	16 811.55	3.80	2 149.52	- 8.49	2.31	13.24	15.00

Le diagramme des contraintes est présenté comme en figure (2.3). L'analyse des résultats montre que les contraintes de compression sont vérifiées tout ou long du fût (inférieures à la contrainte admissible $\sigma_{adm}^c=15$ MPa). Pour ce qui est de la traction, les contraintes de traction (σ_{min}) des bandes de haut sont vérifiées et les contraintes des bandes de bas dépassent la contrainte admissible.

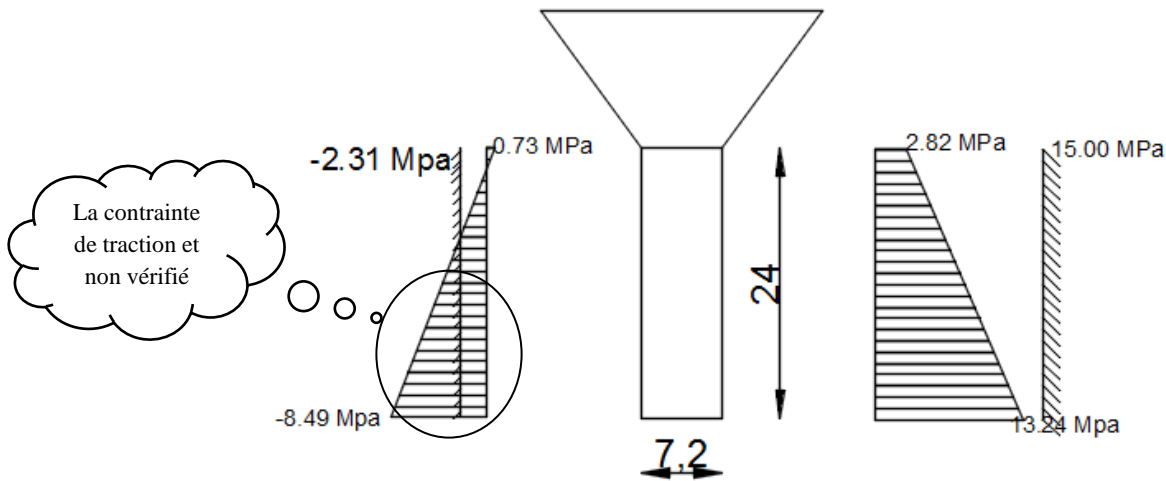


Figure.2.5 : Diagramme des contraintes du support cylindrique.

Pour remédier à ce problème de contrainte, nous proposons de trouver un compromis entre la forme géométrique du fût et les contraintes. L'idée est de faire régner une même contrainte le long du support, en faisant varier l'inertie, en optimisant la forme géométrique du fut.

2.5. Support à inertie variable

Pour déterminer l'inertie du fût en fonction de la hauteur, nous considérerons que la contrainte de compression à la fibre extrême de chaque section droite du fut est égale à la contrainte régnant au niveau du point le plus haut du support. Cette égalité se traduit par :

$$\frac{N(z)}{S(z)} + \frac{M(z)}{I(z)} \cdot V(z) = \sigma_{adm}^c \quad (2.12)$$

Cette dernière équation est résolue pour chaque valeur de z en faisant varier z de 0 à H_{supp} avec un pas de Δz .

En première approximation, nous considérons que la variation de la forme est linéaire entre deux paliers successifs, en considérant Δz très petit, pour le reste de l'étude, nous prendrons $\Delta z=10$ cm. L'équation (2.2) de la surface devient :

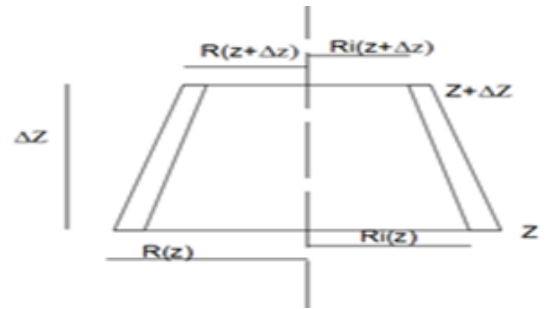
$$S(z) = \pi. [R^2(z) - R_i^2(z)] \quad (2.13)$$

$$S(z - \Delta z) = \pi. [R^2(z - \Delta z) - R_i^2(z - \Delta z)] \quad (2.14)$$

Et l'équation (2.4), s'écrit :

$$\Delta P(z) = \Delta z. \left[\frac{S(z) + S(z - \Delta z)}{2} \right] \cdot \gamma_b \quad (2.15)$$

$$P(z) = P(z - \Delta z) + \Delta P(z) \quad (2.16)$$



Cette méthodologie s'y prête bien à la programmation sur Excel, qui se résume comme suit :

- On se fixe la valeur de la contrainte trouvée sur la première bande,
- Avec l'analyse des scénarios et la valeur cible, on cherche le rayon R_i sur une bande donnée.
- Le processus est répété pour toutes les bandes, à différentes hauteurs Z , pour déterminer les rayons correspondants aux différentes bandes. Une macro est enregistrée à cet effet.

Comme l'illustre la figure (2.6).

```

Sub contrainte ()
,
' contrainte Macro
,
N = Sheets("fût").Cells(11, "D")
For I = 14 To N + 14 - 1
Range(Sheets("fût").Cells(I, "P"), Sheets("fût").Cells(I, "p")).GoalSeek Goal:=0,
ChangingCell:=Sheets("fût").Cells(I, "C")
Next I
End Sub

```

Figure 2.6: Macros

Un extrait des résultats obtenus sont présentés dans les tableaux (2.3) suivants :

Tableaux 2.3. Extrait de résultats de la variation de la forme géométrique du support (Annexe2).

Cote (z)	Ri (m)	R (m)	A (m ²)	poids partiel (N)*10 ⁴	Poids cumulé (N)*10 ⁴	I (m ⁴)	M (N.m)*10 ⁶	V(z) (m)	N(z) (N)*10 ⁶	σ min	σ adm	σ max	σ c adm
24.00	3.40	3.60	4.40	-	-	26.96	1 620.49	3.60	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.44	3.64	4.45	1.11	1.11	27.84	1 683.78	3.64	1 607.76	1.42	2.31	5.82	15.00
23.80	3.47	3.67	4.49	1.12	2.22	28.72	1 747.08	3.67	1 608.87	1.35	2.31	5.82	15.00
23.70	3.51	3.71	4.54	1.13	3.35	29.61	1 810.38	3.71	1 610.00	1.28	2.31	5.82	15.00
23.60	3.55	3.75	4.58	1.14	4.49	30.51	1 873.67	3.75	1 611.14	1.21	2.31	5.82	15.00
20.90	4.39	4.59	5.64	1.40	39.14	56.72	3 582.67	4.59	1 645.79	0.02	2.31	5.82	15.00
20.80	4.41	4.61	5.67	1.41	40.55	57.77	3 645.96	4.61	1 647.20	- 0.01	2.31	5.82	15.00
20.70	4.44	4.64	5.70	1.42	41.97	58.81	3 709.26	4.64	1 648.62	- 0.04	2.31	5.82	15.00
20.60	4.47	4.67	5.74	1.43	43.41	59.87	3 772.55	4.67	1 650.06	- 0.07	2.31	5.82	15.00
20.50	4.49	4.69	5.77	1.44	44.84	60.93	3 835.85	4.69	1 651.49	- 0.09	2.31	5.82	15.00
0.50	8.22	8.42	10.46	2.61	461.53	361.99	16 495.07	8.42	2 068.18	- 1.86	2.31	5.82	15.00
0.40	8.24	8.44	10.47	2.62	464.15	363.92	16 558.37	8.44	2 070.80	- 1.86	2.31	5.82	15.00
0.30	8.25	8.45	10.49	2.62	466.77	365.86	16 621.66	8.45	2 073.42	- 1.86	2.31	5.82	15.00
0.20	8.26	8.46	10.51	2.63	469.39	367.80	16 684.96	8.46	2 076.04	- 1.87	2.31	5.82	15.00
0.10	8.28	8.48	10.53	2.63	472.03	369.74	16 748.26	8.48	2 078.68	- 1.87	2.31	5.82	15.00
-	8.29	8.49	10.55	2.63	474.66	371.40	16 811.55	8.49	2 081.31	- 1.87	2.31	5.82	15.00

Le diagramme des contraintes est illustré par la figure (2.7) :

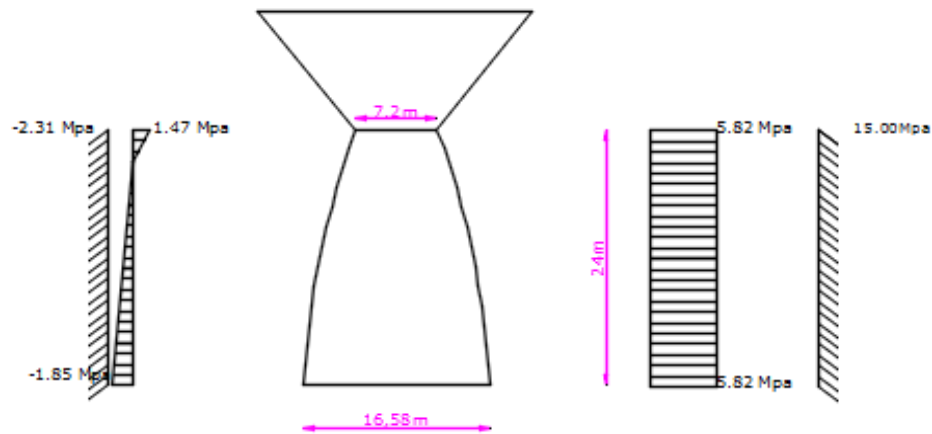


Figure 2.7 : Diagramme des contraintes du support à inertie variable.

L'analyse des résultats montrent que les contraintes de traction et les contraintes de compression qui règnent le long du support sont vérifiées. Par ailleurs, le rayon intérieur abouti à une forme parabolique, telle que l'illustre la figure (2.8).

L'équation du rayon en fonction de la hauteur Z est donnée par polynôme de degré 2, donnée comme suit :

$$Ri(z) = -0.0032z^2 - 0.1173z + 8.2249 \quad (2.17)$$

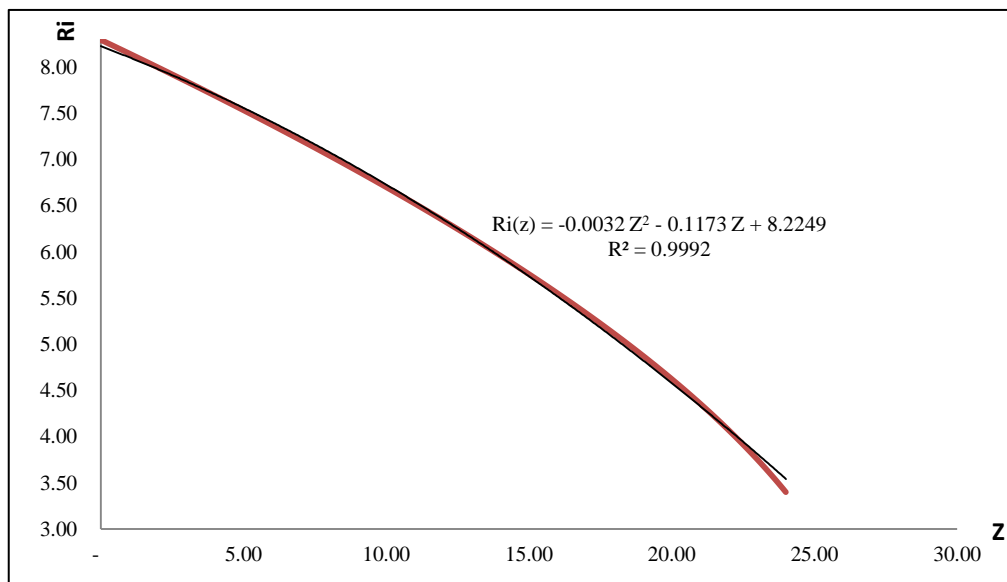


Figure 2.8 : Variation du rayon intérieur du fût en fonction de Z.

D'après la figure (2.8) l'équation de la courbe est donnée par la relation (2.17) de forme de polynôme de degré 2, équation (2.18) :

$$R_i(z) = \alpha z^2 + \beta z + \gamma \quad (2.18)$$

Sauf que le terme du 2^{ème} degré est proche de 0, donc α tend vers 0, dans la réalité la forme est plus proche de la fonction affine linéaire (2.19) ; l'erreur est donc faible :

$$R_i(z) = \beta z + \gamma \quad (2.19)$$

Pour déterminer les coefficients γ et β , nous posons les conditions aux limites qui suivent :

- à la tête du support le rayon est fixe (déterminer par la ceinture inférieure) ; avec $R_i=3.4\text{m}$.
- A la base du support le rayon est fixe (déterminer à partir de l'optimisation) ; avec $R_i=8.29\text{m}$.

Donc :

$$R_i(z) = \beta Z + 8.29 \quad (2.20)$$

Sachant que :

$$\beta = \frac{(3.4 - 8.29)}{24} = -0.20375$$

D'où l'équation de la droite devient :

$$R_i(z) = -0.20375 \cdot Z + 8.29 \quad (2.21)$$

Pour vérifier les contraintes, nous relançons le calcul avec la nouvelle forme géométrique. Un extrait des résultats de calcul est illustré dans les tableaux (2.4) et les figures (2.8) ;(2.9) :

Tableaux 2.4 : Extrait des résultats des caractéristiques du support de forme tronconique (Annexe4).

Cote (z)	Ri (m)	R (m)	A (m ²)	poids partiel (N)*10 ⁴	Poids cumulé (N)*10 ⁴	I (m ⁴)	M (N.m)*10 ⁶	V(z) (m)	N(z) (N)*10 ⁶	σ min	σt adm	σ max	σc adm
24.00	3.40	3.60	4.40	-	-	26.96	1 620.49	3.60	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.42	3.62	4.42	3.46	3.46	27.43	1 683.78	3.62	1 610.11	1.42	2.31	5.86	15.00
23.80	3.44	3.64	4.45	3.48	6.95	27.91	1 747.08	3.64	1 613.60	1.35	2.31	5.91	15.00
23.70	3.46	3.66	4.48	3.50	10.45	28.40	1 810.38	3.66	1 617.10	1.28	2.31	5.95	15.00
23.60	3.48	3.68	4.50	3.52	13.98	28.89	1 873.67	3.68	1 620.63	1.21	2.31	5.99	15.00

21.20	3.97	4.17	5.12	4.01	104.60	42.40	3 392.78	4.17	1 711.25	0.01	2.31	6.68	15.00
21.10	3.99	4.19	5.14	4.03	108.63	43.04	3 456.07	4.19	1 715.28	-0.03	2.31	6.70	15.00
21.00	4.01	4.21	5.17	4.05	112.68	43.69	3 519.37	4.21	1 719.33	-0.06	2.31	6.72	15.00
20.90	4.03	4.23	5.19	4.07	116.75	44.34	3 582.67	4.23	1 723.40	-0.10	2.31	6.74	15.00
20.80	4.05	4.25	5.22	4.09	120.84	45.00	3 645.96	4.25	1 727.49	-0.13	2.31	6.76	15.00
0.50	8.19	8.39	10.42	8.17	1 367.04	357.78	16 495.07	8.39	2 973.69	-1.01	2.31	6.72	15.00
0.40	8.21	8.41	10.44	8.19	1 375.23	360.42	16 558.37	8.41	2 981.88	-1.01	2.31	6.72	15.00
0.30	8.23	8.43	10.47	8.21	1 383.44	363.08	16 621.66	8.43	2 990.09	-1.00	2.31	6.72	15.00
0.20	8.25	8.45	10.49	8.23	1 391.67	365.75	16 684.96	8.45	2 998.32	-1.00	2.31	6.71	15.00
0.10	8.27	8.47	10.52	8.25	1 399.92	368.43	16 748.26	8.47	3 006.57	-0.99	2.31	6.71	15.00
-	8.29	8.49	10.54	8.27	1 408.20	371.13	16 811.55	8.49	3 014.85	-0.99	2.31	6.71	15.00

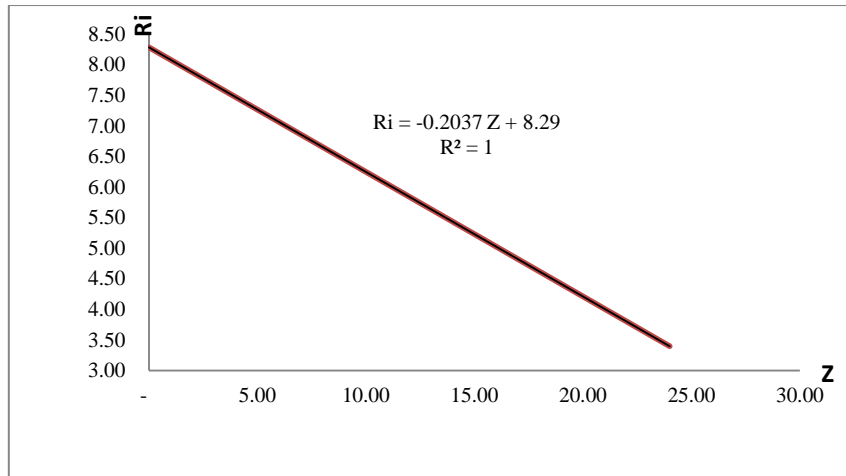


Figure 2. 9: courbe du support tronconique.

Le diagramme des contraintes obtenu est donné par la figure (2.10) ;

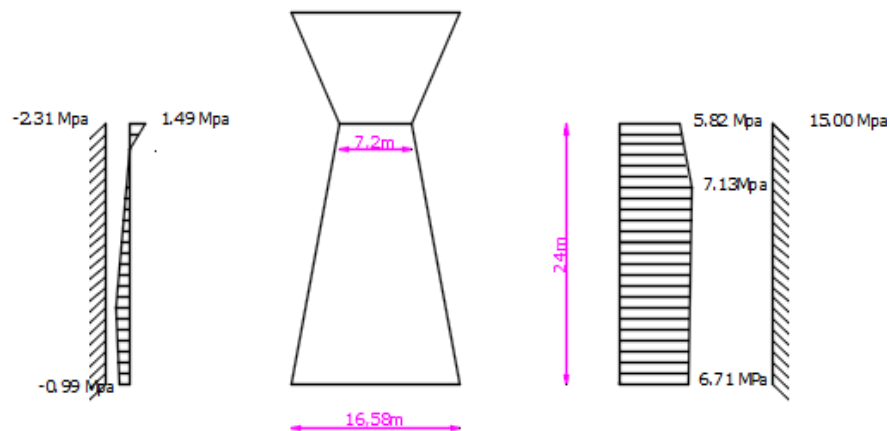


Figure 2.10 : Diagramme des contraintes du support tronconique linière.

Nous remarquons que les contraintes de compression qui règnent le long du support sont vérifiées et que les contraintes de traction sont presque nulles, ce qui confirme la validité de notre équation.

Etant donné que celle solution est difficile à la réalisation. Pour faciliter la mise en œuvre sur le terrain, nous cherchons une solution plus simple à la réalisation.

2.6. Support cylindrique avec raidisseur

Nous considérons cette fois ci un réservoir surélevé posé sur un support cylindrique avec quatre raidisseurs.

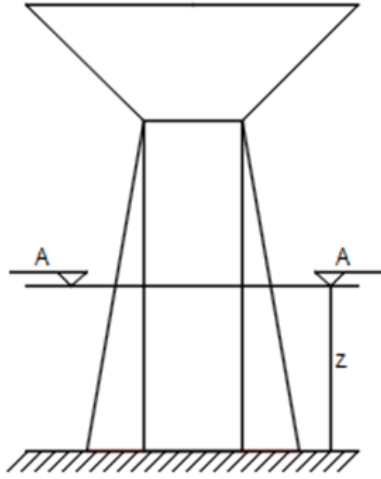


Figure 2.11 : Schéma du support cylindrique avec raidisseurs.

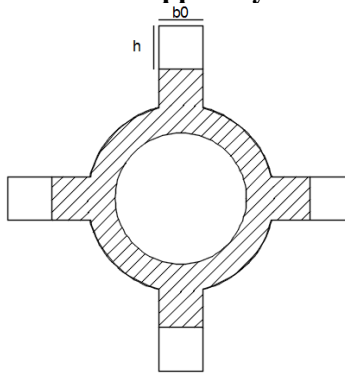


Figure 2.12 : Coupe A-A

Notons que dans ce cas de figure, l'équation de contrainte (2.12) devient :

$$\sigma(z) = \frac{N(z)}{S(z)} \pm \frac{M(z)}{I(z)} \cdot V(z) \quad (2.22)$$

Ou :

$$V(z) = R_{\text{ext}} + h(z) \quad (2.23)$$

a- Calcul des moments d'inertie

Pour calculés les moments d'inertie, on utilise l'équation suivante :

$$I(z) = I_1(z) + 2 \cdot I_X^1 + 2 \cdot I_X^2 \quad (2.24)$$

Avec :

$I_1(z)$: le moment d'inertie du support cylindrique

$$I_1(z) = \frac{\pi}{4} \cdot [R_1^4(z) - R^4(z)] \quad (2.25)$$

- 1) Calcul du moment d'inertie I_x^1, I_x^2 des raidisseurs par apport aux axes passant par leur centre de gravité :

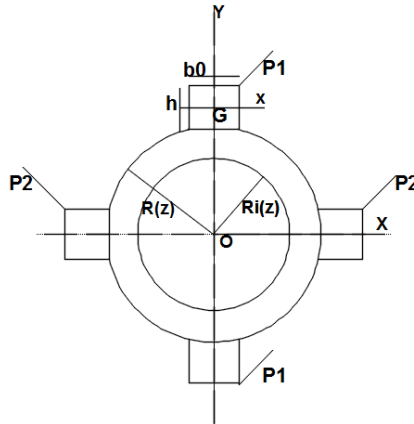


Figure 2.13 : Représentation des raidisseurs dans le repère centrale.

- Moment d'inertie I_x^1 de P1 par apport à G_x :

$$I_x^1 = \frac{hb_0^3}{12} \quad (2.26)$$

- Moment d'inertie I_x^2 de P2 par apport à G_x :

$$I_x^2 = \frac{b_0h^3}{12} \quad (2.27)$$

Calcul du moment d'inertiel I_x^1, I_x^2 d'un raidisseur par rapport à l'axe OX :

$$I_x^1 = I_x^1 + \left[R(z) + \frac{h(z)}{2} \right]^2 \cdot (bh) \quad (2.28)$$

$$I_x^2 = I_x^2 + \left[R(z) + \frac{h(z)}{2} \right]^2 \cdot (bh) \quad (2.29)$$

b- Calcul de poids du support et des raidisseurs à la cote Z

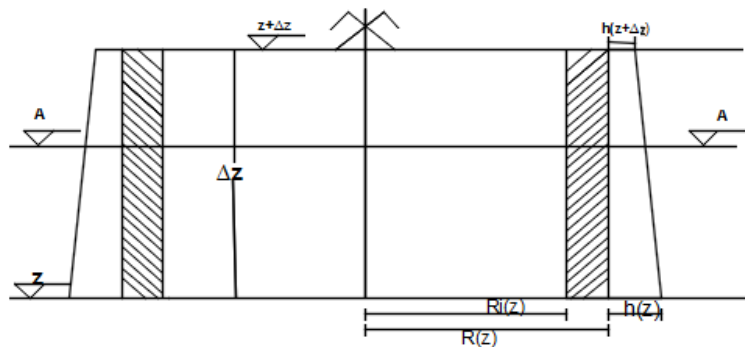


Figure 2.14 : Fût cylindrique avec raidisseurs.

Nous calculons le poids avec l'équation (2.30) qui suit :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{cumulé du fut}} + P_{\text{cumulé des r}} \quad (2.30)$$

Poids du support cylindrique :

$$P(z) = \pi \cdot [R^2(z) - R_i^2(z)] \cdot \gamma_b \cdot (H_{\text{supp}} - z) \quad (2.31)$$

Pour calculer le poids des raidisseurs Nous utilisons l'équation suivante :

$$\Delta P_{pr}(z) = \frac{1}{2} \cdot (B_r(z + \Delta z) + B_r(z)) \cdot \Delta z \cdot \gamma_b \quad (2.32)$$

étant donné que B_r : section droite des raidisseurs.

$$B_r = 4 \cdot (b_0 \cdot h(z)) \quad (2.33)$$

Poids cumulée

$$P_{\text{cumulé des réd}} = P_{pr}(z + \Delta z) + \Delta P_{pr}(z) \quad (2.34)$$

Le calcul des contraintes est effectué en considérant des raidisseurs de largeur $b_0=0.3\text{m}$ jusqu'à $b_0=0.7\text{m}$. Et de hauteur h variable. Un extrait des résultats de calcul est présenté dans les tableaux (2.5). Les diagrammes des contraintes sont illustrés par la figure (2.15) :

Tableau 2.5 : Extrait des résultats des caractéristiques d'un fût cylindrique avec raidisseurs de la forme parabolique.

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B	v(z) (m)	I1 (m4)	b0 (m)	h(z) (m)	Br(z)	I _x ¹ (m4)	I _x ² (m4)	I _x ¹ (m4)	I _x ² (m4)	I (z) (m4)	V(z)	Pds de fut Cylindrique(N) X10 ⁴	Pds partiel de raidisseur (N) X10 ⁴	Pds cumulée (N) X10 ⁴	Pds totale (N) X10 ⁴	Moment M(z) X10 ⁶	N(z) X10 ⁶	σmin	σtadm	σmax	σcadm
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	-	-	-	-	-	-	26.96	3.60	-	-	-	-	1 620.49	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.04	0.05	0.000002	0.0001	0.17	0.17	27.65	3.62	1.10	0.01	0.01	1.11	1 683.78	1 607.76	1.41	2.31	5.82	15.00
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.09	0.11	0.00002	0.0002	0.35	0.35	28.36	3.64	2.20	0.02	0.03	2.23	1 747.08	1 608.88	1.33	2.31	5.82	15.00
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.13	0.16	0.00006	0.0003	0.53	0.53	29.07	3.67	3.30	0.03	0.06	3.36	1 810.38	1 610.01	1.25	2.31	5.82	15.00
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.17	0.21	0.00013	0.0004	0.71	0.71	29.79	3.69	4.40	0.05	0.10	4.50	1 873.67	1 611.15	1.18	2.31	5.82	15.00
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.21	0.26	0.00025	0.0005	0.89	0.89	30.51	3.71	5.50	0.06	0.16	5.66	1 936.97	1 612.31	1.11	2.31	5.82	15.00
21.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	1.04	1.24	0.02772	0.0023	5.29	5.27	48.08	4.12	30.79	0.31	4.61	35.39	3 392.78	1 642.04	0.01	2.31	5.82	15.00
21.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	1.07	1.28	0.03030	0.0024	5.49	5.47	48.88	4.13	31.89	0.32	4.92	36.81	3 456.07	1 643.46	- 0.03	2.31	5.82	15.00
21.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	1.10	1.32	0.03300	0.0025	5.70	5.67	49.69	4.15	32.99	0.32	5.25	38.23	3 519.37	1 644.88	- 0.06	2.31	5.82	15.00
20.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	1.13	1.35	0.03582	0.0025	5.90	5.87	50.49	4.16	34.09	0.33	5.58	39.67	3 582.67	1 646.32	- 0.09	2.31	5.82	15.00
20.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	1.16	1.39	0.03878	0.0026	6.10	6.07	51.30	4.18	35.19	0.34	5.92	41.11	3 645.96	1 647.76	- 0.12	2.31	5.82	15.00
0.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.10	6.12	3.31565	0.0115	61.18	57.87	265.06	6.15	259.50	1.53	211.11	470.61	16 558.37	2 077.26	- 1.87	2.31	5.82	15.00
0.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.11	6.14	3.34428	0.0115	61.51	58.18	266.34	6.16	260.60	1.53	212.64	473.24	16 621.66	2 079.89	- 1.87	2.31	5.82	15.00
0.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.13	6.15	3.37304	0.0115	61.84	58.48	267.61	6.16	261.69	1.54	214.18	475.87	16 684.96	2 082.52	- 1.87	2.31	5.82	15.00
0.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.14	6.17	3.40192	0.0116	62.18	58.79	268.89	6.17	262.79	1.54	215.72	478.51	16 748.26	2 085.16	- 1.87	2.31	5.82	15.00
-	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.16	6.19	3.43091	0.0116	62.51	59.09	270.17	6.18	263.89	1.55	217.27	481.16	16 811.55	2 087.81	- 1.87	2.31	5.82	15.00

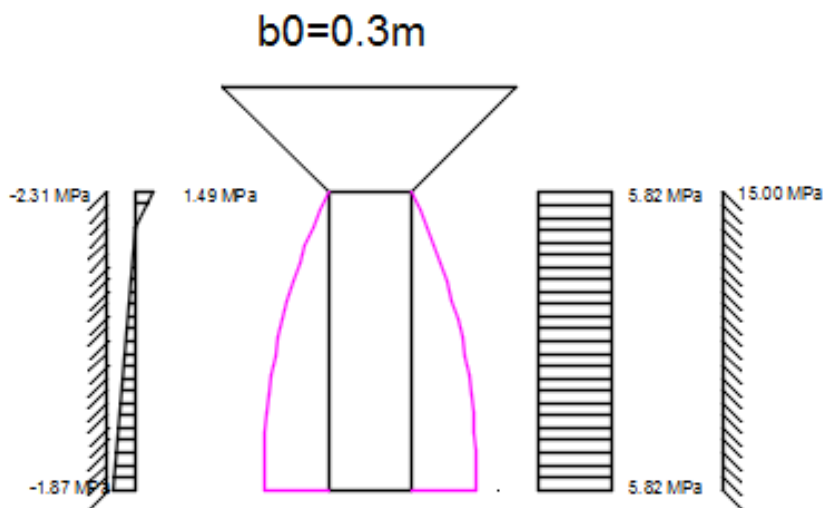


Figure 2.15: Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs.

Nous constatons que les contraintes de traction sont presque égales à la contrainte admissible à la base du fût, tandis que les contraintes de compression sont constantes tout le long de notre support. Les diagrammes de contrainte obtenue en faisant varier b_0 de 0.3m jusqu'à 0.7m .sont illustrés dans les figures (2.16) ;(2.17) ;(2.18) ;(2.19) :

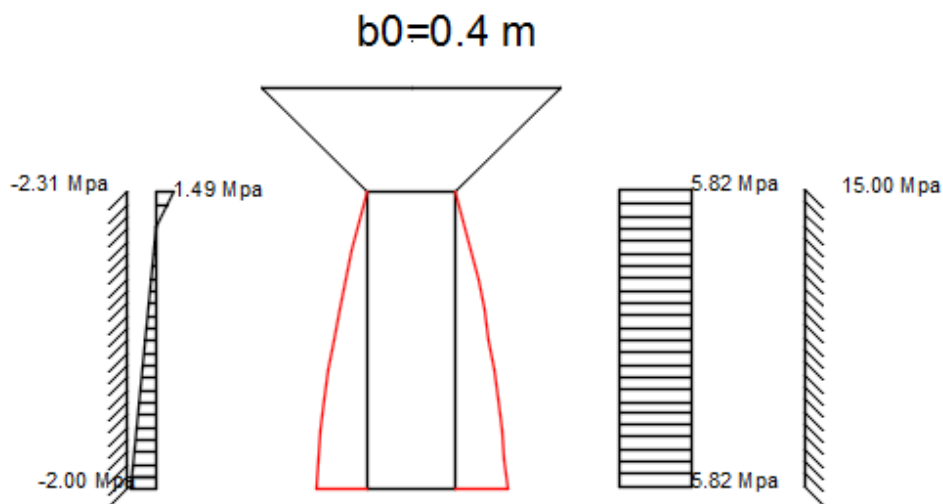


Figure 2.16 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.4m$.

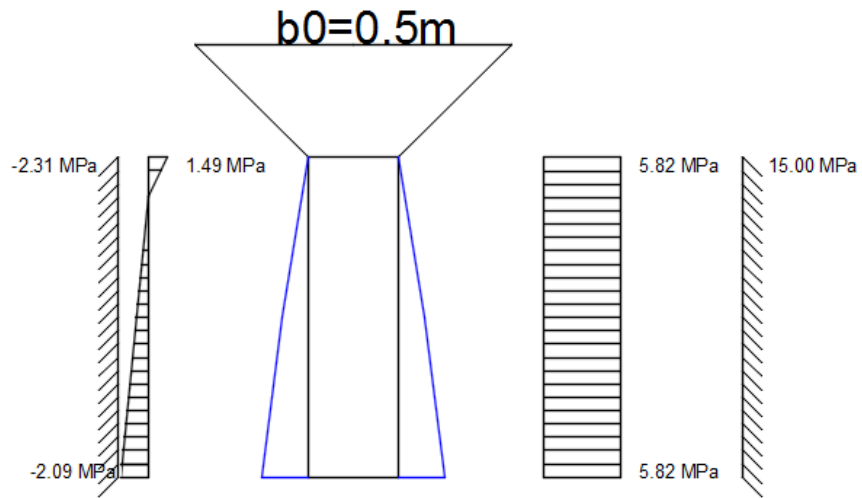


Figure 2.17 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.5m$.

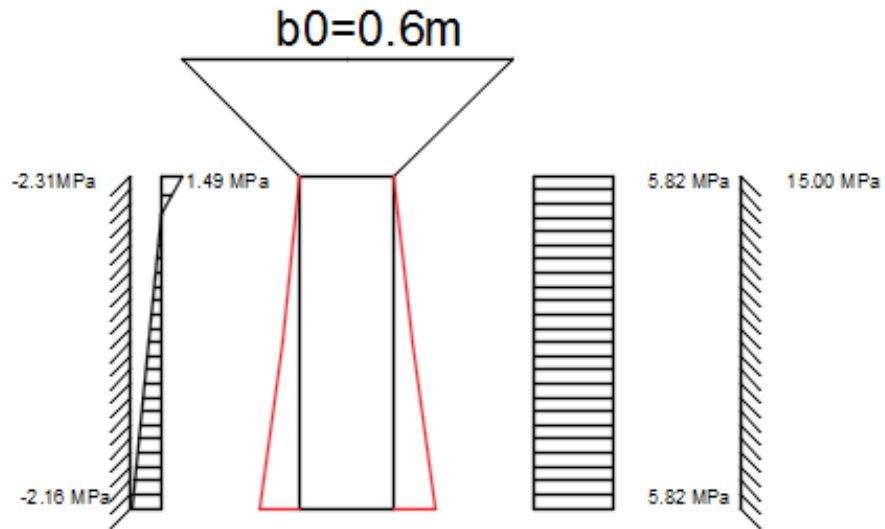


Figure 2.18 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.6m$.

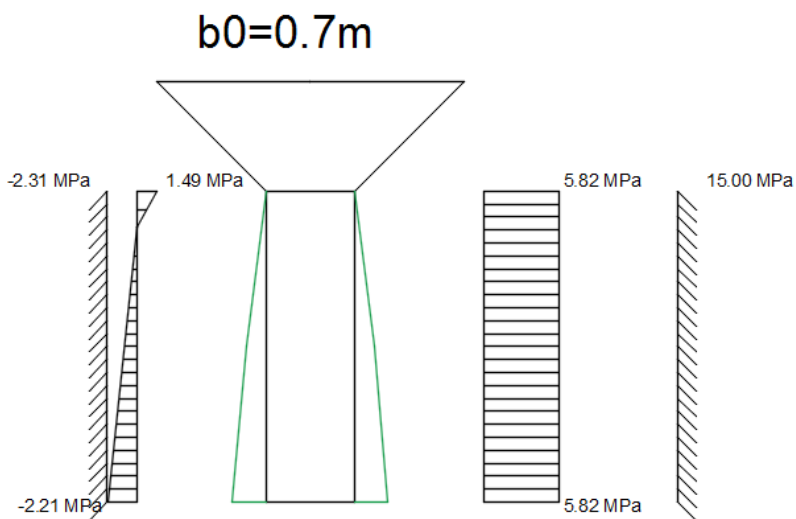


Figure 2.19 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.7m$.

D'après les figures (2.15);(2.16);(2.17);(2.18);(2.19), nous constatant que les contraintes de compression sont constantes et largement vérifiées, tandis que les contraintes de traction sont vérifiées mais presque égales à la contrainte admissible. La hauteur des raidisseurs aboutis à une forme parabolique, telle que l'illustre la figure (2.20).

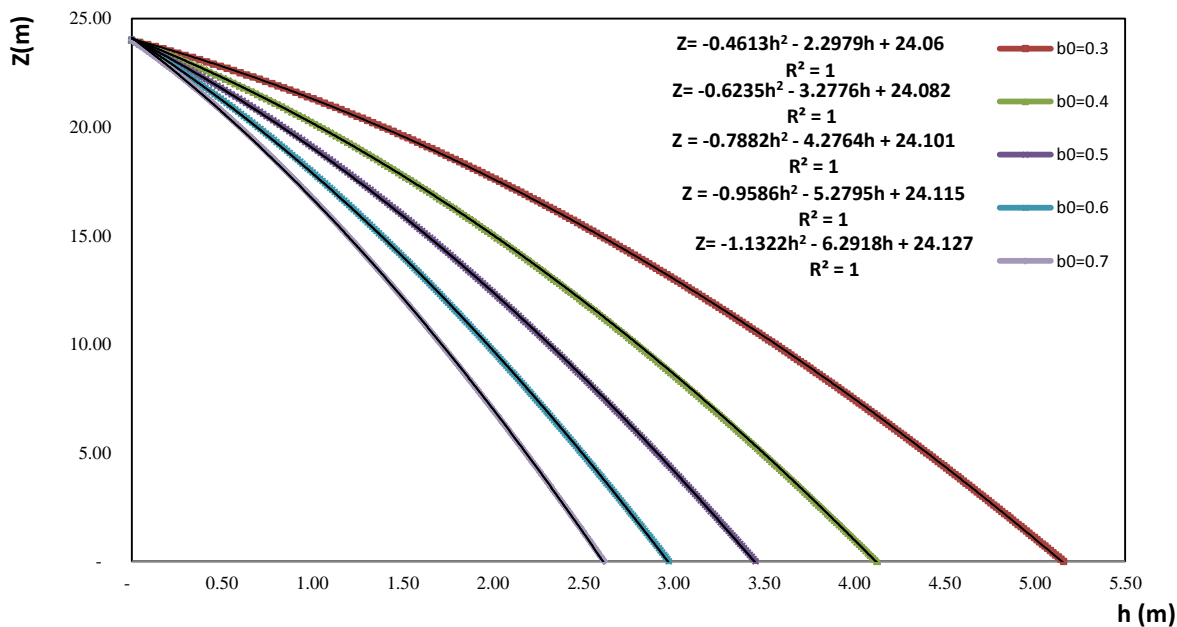


Figure 2.20: variation de la forme de raidisseur.

D'après la figure (2.20) nous constatons que plus b_0 diminue plus la forme z tend vers le linéaire,

Étant donné que cette forme géométrique est pratiquement difficile à réaliser et que l'équation présente un monôme en degré 2 ayant un coefficient très petit, nous proposons de linéariser cette équation comme suit :

$$h(z) = \alpha z + \beta \quad (2.35)$$

Pour déterminer les coefficients α et β , nous posons les conditions limites qui suivent :

- La longueur des raidisseurs à la tête du support ; avec $h=0$ m.
- La longueur des raidisseurs à la base du support ; avec $h=5.16$ m.

avec:

$$h(z) = \alpha z + 5.16 \quad (2.36)$$

sachant que :

$$\alpha = \frac{(0 - 5.16)}{24} = -0.2150$$

D'où l'équation de la droite devient :

$$h(z) = -0.2150Z + 8.29 \quad (2.37)$$

Pour vérifier les contraintes, nous relançons le calcul avec la nouvelle forme géométrique. Un extrait des résultats de calcul est illustré dans les tableaux (2.6) et les figures (2.21) ;(2.22) ;(2.23) ;(2.24) ;(2.25) :

Tableau 2.6 : Extrait des résultats des caractéristiques d'un fût cylindrique avec raidisseurs de la forme linéaire (Annexe 4).

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B (m ²)	v(z) (m)	I1 (m4)	b0 (m)	h(z) (m)	Br(z) (m ²)	I _x ¹ (m4)	I _x ² (m4)	I _x ³ (m4)	I _x ⁴ (m4)	I (z) (m4)	V(z) (m)	Pds de fut cylindrique (N) *10 ⁴	Pds parietale de raidisseur (N) *10 ⁴	Pds cumulée (N)*10 ⁴	Pds totale (N)*10 ⁴	Moment M(z) (N) *10 ⁶	N(z) (N)*10 ⁶	σmin	σtadm	σmax	σcadm
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0	0	0	0	0	0	26.96	3.60	0	0	0	0	1620.49	1606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.02	0.03	0.00000	0.0000	0.08	0.08	27.30	3.61	1.10	0.003	0.003	1.10	1683.78	1607.75	1.41	2.31	5.86	15.00
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.04	0.05	0.00000	0.0001	0.17	0.17	27.64	3.62	2.20	0.01	0.01	2.21	1747.08	1608.86	1.33	2.31	5.90	15.00
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.06	0.08	0.00001	0.0001	0.26	0.26	27.98	3.63	3.30	0.02	0.03	3.33	1810.38	1609.98	1.25	2.31	5.95	15.00
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.09	0.10	0.00002	0.0002	0.34	0.34	28.33	3.64	4.40	0.02	0.05	4.45	1873.67	1611.10	1.17	2.31	5.99	15.00
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.11	0.13	0.00003	0.0002	0.43	0.43	28.68	3.65	5.50	0.03	0.08	5.58	1936.97	1612.23	1.09	2.31	6.03	15.00
20.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.82	0.98	0.01363	0.0018	3.95	3.94	42.75	4.01	41.78	0.24	4.56	46.35	4025.74	1653.00	-0.70	2.31	6.85	15.00
20.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.84	1.01	0.01474	0.0019	4.08	4.07	43.25	4.02	42.88	0.25	4.81	47.69	4089.04	1654.34	-0.74	2.31	6.86	15.00
20.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.86	1.03	0.01590	0.0019	4.21	4.19	43.76	4.03	43.98	0.25	5.07	49.05	4152.33	1655.70	-0.78	2.31	6.87	15.00
19.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.88	1.06	0.01712	0.0020	4.33	4.32	44.27	4.04	45.08	0.26	5.33	50.41	4215.63	1657.06	-0.81	2.31	6.88	15.00
19.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.90	1.08	0.01841	0.0020	4.47	4.45	44.79	4.05	46.18	0.27	5.59	51.78	4278.92	1658.43	-0.85	2.31	6.90	15.00
19.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.92	1.11	0.01975	0.0021	4.60	4.58	45.31	4.06	47.28	0.27	5.87	53.15	4342.22	1659.80	-0.88	2.31	6.91	15.00
0.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.07	6.09	3.26581	0.0114	60.60	57.34	262.84	6.14	259.50	1.52	179.62	439.12	16558.37	2045.77	-1.92	2.31	5.82	15.00
0.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.10	6.11	3.30750	0.0115	61.08	57.79	264.70	6.15	260.60	1.53	181.15	441.74	16621.66	2048.39	-1.91	2.31	5.81	15.00
0.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.12	6.14	3.34955	0.0115	61.57	58.23	266.57	6.16	261.69	1.53	182.68	444.37	16684.96	2051.02	-1.91	2.31	5.80	15.00
0.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.14	6.17	3.39195	0.0116	62.06	58.68	268.45	6.17	262.79	1.54	184.22	447.01	16748.26	2053.66	-1.90	2.31	5.79	15.00
-	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	5.16	6.19	3.43470	0.0116	62.56	59.13	270.34	6.18	263.89	1.54	185.76	449.65	16811.55	2056.30	-1.90	2.31	5.78	15.00

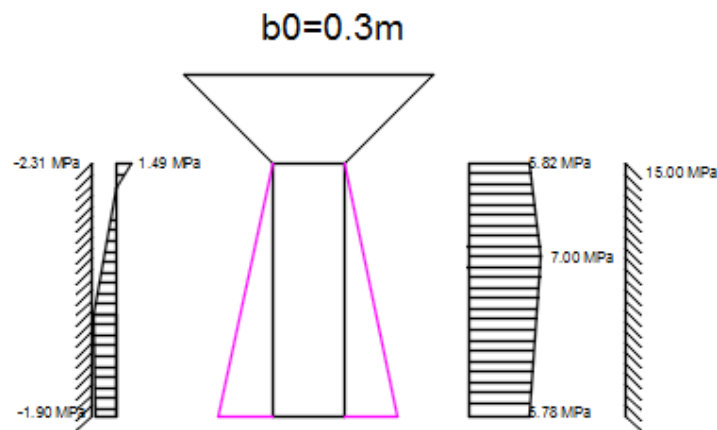


Figure 2.21: Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs.

Nous remarquons que les contraintes de compression et de traction sont vérifiées (ne dépassent pas la contrainte admissible).

Pour procéder à l'analyse, nous avons procédé à la linéarisation des différentes courbes de la figure (2.15) un extrait de résultats est présenté dans les tableaux et les figures pour les différentes largeurs (b_0).

Les diagrammes des contraintes obtenus sont donnés par les figures (2.22) ;(2.23) ;(2.24) ;(2.25) :

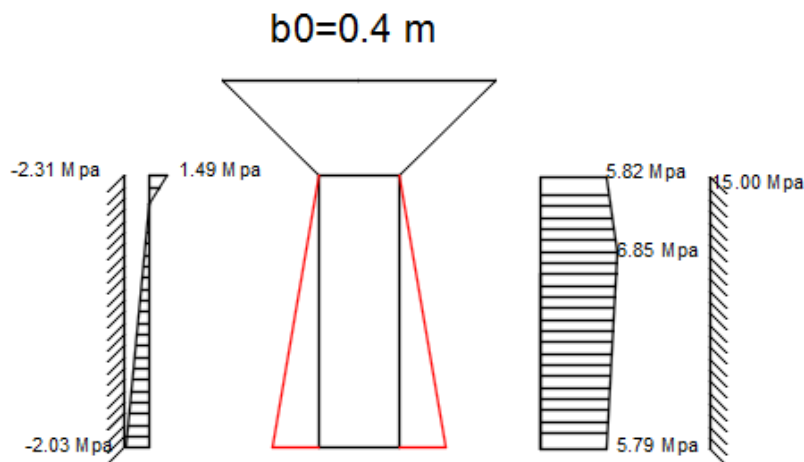


Figure 2.22 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.4m$.

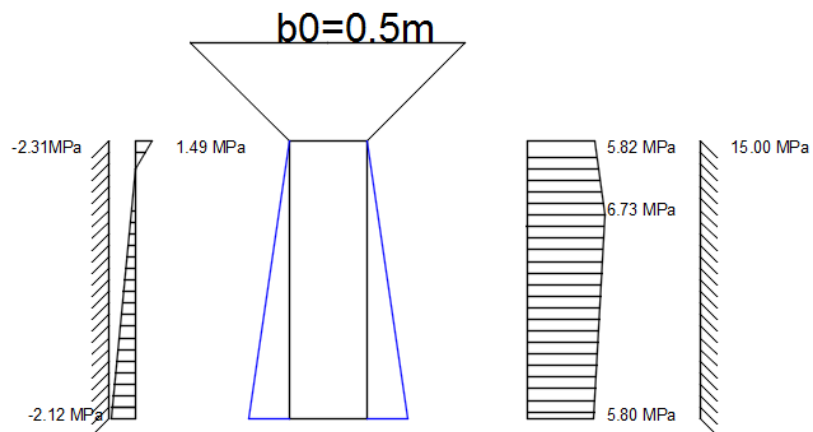


Figure 2.23 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.5m$.

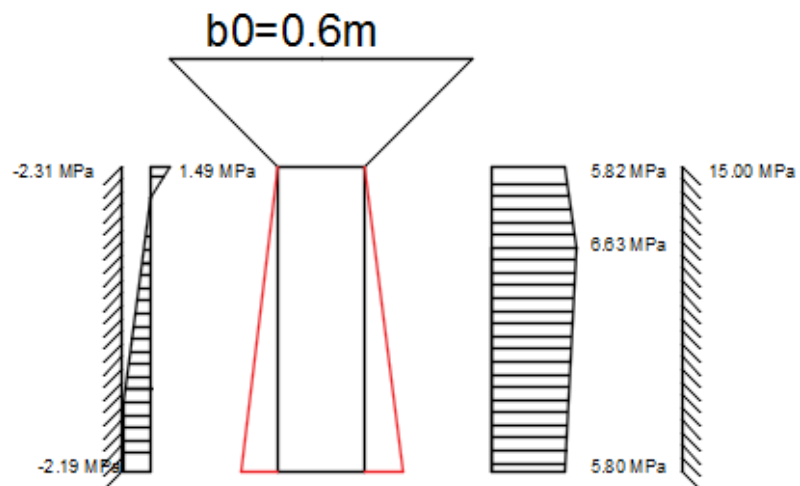


Figure 2.24 : Diagramme des contraintes du support cylindrique avec raidisseurs de $b_0=0.6m$.

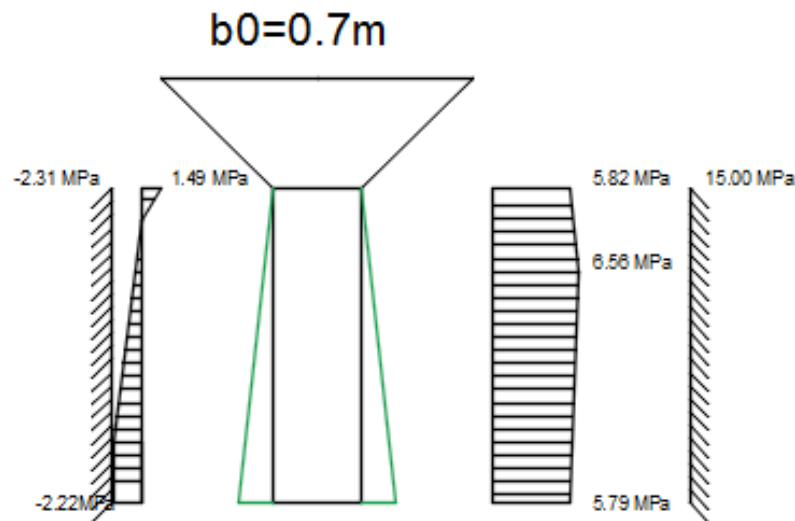


Figure 2.25 : Diagrammes des contraintes du support cylindrique avec raidisseur de $b_0=0.7m$.

Nous constatons que les contraintes de traction est presque à la limite de la contrainte admissible mais toujours vérifié, les contrainte de compression son variable mais ne dépassent pas contrainte admissible.

Après avoir linéariser la forme de nous raidisseurs nous avant représenté la variation de cette dernier dans la figure (2.23) :

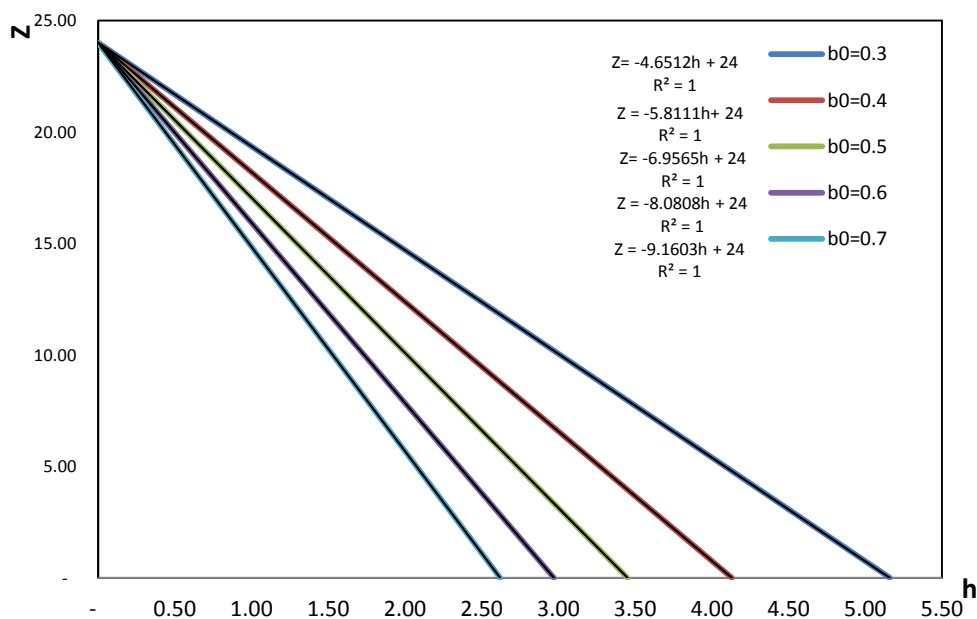


Figure 2.26 : Variation de la forme linéaire des raidisseurs.

Conclusion

La procédure d'optimisation du fût d'un réservoir surélevé, qui fait l'originalité de ce travail, a été conduite en considérant trois variantes ; à savoir :

- Un fût cylindrique à inertie constante : cette forme présente l'avantage de facilité de réalisation. Toutefois, elle induit des contraintes de traction qui dépassent la contrainte admissible et qui nécessite par conséquent une section d'armature considérable ; ce qui rend sa réalisation coûteuse.
- Un fût tronconique à inertie variable : En gardant la contrainte à la tête du fût constante le long du support, nous avons abouti à une forme tronconique, qui ne nécessite pas beaucoup d'armature étant donné que les contraintes de traction restent très faibles. Toutefois, sa réalisation est difficile
- Un fût mixte (cylindre avec raidisseurs) : Cette variante nous semble la plus viable car les contraintes de traction sont vérifiées le long du fût et présente une facilité de réalisation.

Pour le choix définitif d'une variante, nous procédons, dans le prochain chapitre, à une étude technico-économique et c'est à l'issue de cette double étude que nous pourrons trancher.

3.1. Introduction

Après l'optimisation de la forme du fût, nous proposons, dans ce troisième chapitre, une étude technico-économique des trois variantes ayant faits l'objet d'étude ; afin de pouvoir opter pour l'une variante la plus économique. Ce choix sera basé sur des devis établis pour des différentes variantes de fût, et une étude paramétrique sur b_0 pour permettre le choix optimum de la variante à retenir.

3.2. Étude technique

Cette étude sera menée pour les différents fût considérés (cylindrique, tronconique et cylindrique avec raidisseurs). Elle consiste à calculer le poids des aciers, les volumes des bétons et les surfaces de coffrages du fût).

3.2.1. Forme cylindrique

a) Calcul des armatures

➤ Armatures verticales

La section d'armatures tendues est obtenue par la relation :

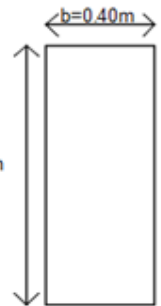
$$A_s \geq \frac{N_{ts}}{\sigma_{st}} \quad (3.1)$$

L'effort normal de traction N_{ts} est donnée par la formule suivante ;

$$\frac{N_{ts}}{B} \leq \sigma_{min} \quad (3.2)$$

$$N_{ts} = B \cdot \sigma_{min} \quad (3.3)$$

$$B = b \cdot h \quad (3.4)$$



Pour la contrainte de traction σ_{st} , nous utilisons l'équation (3.5) conformément au Fascicule 74 :

$$\sigma_{st} = 0.8 \min \left[\frac{2}{3} \cdot f_e, \max \left(\frac{1}{2} f_e, 110 \cdot \sqrt{\eta \cdot f_{t28}} \right) \right] \quad (3.5)$$

Pour les armatures à haute adhérence, $\eta=1.6$.

La section des armatures tendue est donnée par :

$$A_s \geq \frac{N_{ts}}{\sigma_{st}} \quad (3.6)$$

- **Vérification de la condition de non fragilité**

$$A_{\min} \geq B \cdot \frac{f_{t28}}{f_e} \quad (3.7)$$

- **Vérification de la condition de la section minimale du RPA**

Cette condition exige que la section d'armatures soit au moins égale à 0,5% de la section du béton. Soit :

$$A_{RPA} = 0.005 * b * h \quad (3.8)$$

Enfin, la section d'armatures adoptées est donnée par :

$$A_{\text{adop}} = \max(A_s; A_{\min}; A_{RPA}) \quad (3.9)$$

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Tableau récapitulative des résultats de calcul de ferrailage.

Désignation	Valeurs	unité
F_{t28}	2.1	MPa
F_e	400	MPa
σ_{\min}	-8.49	MPa
σ_{st}	161.31	MPa
N_{ts}	3.39	MN
A_s	21.05	Cm ²
A_{\min}	21.00	Cm ²
A_{RPA}	20.00	Cm ²
A_{adop}	21.05	Cm ²

La section d'armatures adoptée est 21,55cm², soit 14T14, disposées en nappes avec un espacement $St = 15\text{Cm}$.

➤ **Armateurs horizontales**

Ce calcul est assimilé au calcul des armatures horizontales d'un voile, tel que donnée par le BAEL (91/R99) :

$$A_H = \frac{A_v}{4} \quad (3.10)$$

Ce qui donne : $A_H = 5.39\text{cm}^2$

Ainsi, nous adoptons 8T10, qu nous disposerons à l'encastrement avec deux nappes et un espacement $St = 15\text{cm}$.

b) Calcul du poids des aciers

Le poids unitaire des barres est donné par la relation :

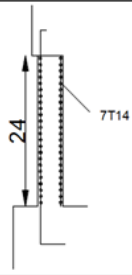
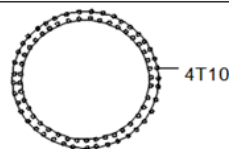
$$P_U = 1. \varpi_{\text{acier}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \varphi^2 \quad (3.11)$$

φ : Diamètre de l'armature ;

ϖ : Poids volumique de l'acier, égale à $=7850 \text{ kg/m}^3$.

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau de nomenclature ci-après :

Tableau 3.2 : Tableau de nomenclature pour la forme cylindrique.

N°	Schéma	φ (mm)	Longueur de barres (m)	Nbr de barres	Langur total (m)	Pds unitaire (kg)	Pds total (kg)
1		14	26.80	318.35	8531.73	1.21	10309.86
2		10	28.88	320.00	9240.35	0.62	5697.02

c) Calcul du volume de béton

Le volume du fût cylindrique est donné par l'équation (3.13) :

$$V = S \cdot H_{\text{supp}} \quad (3.12)$$

$$V = \pi \cdot H_{\text{supp}} \cdot [R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2] \quad (3.13)$$

avec :

H_{supp} : la hauteur de support, $H_{\text{supp}}=24 \text{ m}$;

R_{ext} : le rayon extérieur de fût, $R_{\text{ext}}=3.8 \text{ m}$;

R_{int} : le rayon intérieur de fût, $R_{\text{int}}=3.4 \text{ m}$.

Ce qui donne :

$$V = 217.15 \text{ m}^3.$$

d) Calcul du coffrage

Le coffrage du support de forme cylindrique est calculé en deux étapes :

➤ Coffrage intérieur

Pour calculer le coffrage intérieur, nous utilisons l'équation (3.14) :

$$S_{int} = \pi \cdot R_{int} \cdot H_{supp} \quad (3.13)$$

Soit :

$$S_{int} = 512.71 \text{ m}^2.$$

➤ Coffrage extérieur

Pour calculer le coffrage extérieur nous utilisons l'équation (3.15) :

$$S_{ext} = \pi \cdot R_{ext} \cdot H_{supp} \quad (3.14)$$

Soit :

$$S_{ext} = 573.03 \text{ m}^2.$$

➤ Coffrage total

$$S_{total} = S_{int} + S_{ext} \quad (3.15)$$

$$S_{total} = 1085.73 \text{ m}^2.$$

3.2.2. Forme tronconique

Si nous considérons un élément de la surface du support de dimension ($1 \cdot ds$), cet élément est soumis au poids de la cuve pleine par unité de longueur et à son poids propre.

Notons P le poids propre de support et N le poids de la cuve pleine par unité de longueur. Soit :

• Le poids propre de support

$$P = \gamma_b \cdot e_p \cdot ds \quad (3.16)$$

avec :

γ_b : le poids volumique de béton, $\gamma_b = 2500 \text{ kg/m}^3$;

E_p : l'épaisseur de la paroi de support, $E_p = 0.20 \text{ m}$.

P est décomposé en une composante horizontale P_x et une composante P_y suivant la génératrice de support figure (3.1) :

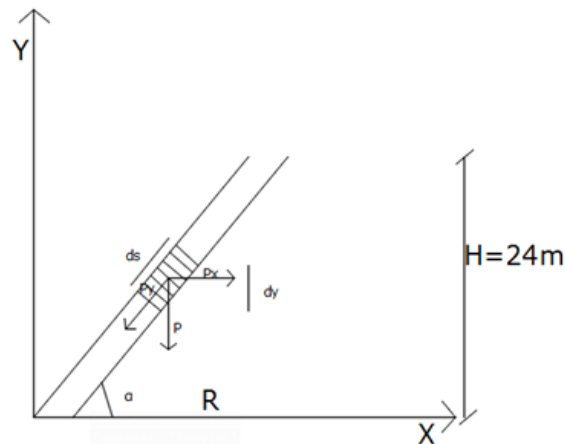
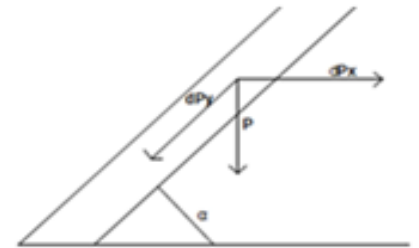


Figure 3.1 : le poids propre de support.

➤ Calcul de P_x

$$\text{tg } \alpha = \frac{P}{dP_x} \quad (3.17)$$

$$dP_x = \frac{P}{\text{tg } \alpha} \quad (3.18)$$



Compte tenu de l'équation (3.16) il vient :

$$dP_x = \frac{\gamma_b \cdot E_p \cdot ds}{\text{tg}(\alpha)} \quad (3.19)$$

Sachant que :

$$\sin(\alpha) = \frac{dy}{ds} \quad (3.20)$$

$$ds = \frac{dy}{\sin(\alpha)} \quad (3.21)$$

α : l'angle formé par le support et le plan horizontal et dy la projections de ds sur l'axe y , il vient :

$$dP_x = \frac{\gamma_b \cdot E_p \cdot dy}{\text{tg} \alpha \cdot \sin \alpha} \quad (3.22)$$

Où :

$$\alpha = \text{actg} \left[\frac{H}{(R_2 - R_1)} \right] \quad (3.23)$$

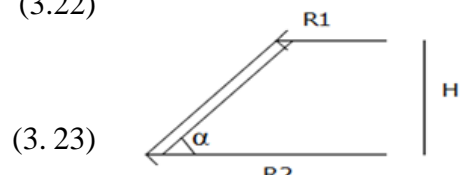


Figure 3.2 : La paroi de support.

$R_1=3.6\text{m}$; $R_2=8.49\text{m}$; $H=24\text{m}$.

Ce qui donne :

$$\alpha = 78.49^\circ$$

Après intégration nous obtenons

$$P_x = \int_0^H \frac{\gamma_b \cdot E_p}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot dy \quad (3.24)$$

$$P_x = \frac{\gamma_b \cdot E_p}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot H \quad (3.25)$$

Soit :

$$P_x = 2495.23 \text{ kg/ml}$$

➤ **Calcul P_y**

$$\sin(\alpha) = \frac{P}{dP_y} \quad (3.26)$$

$$dP_y = \frac{P}{\sin(\alpha)} \quad (3.27)$$

Compte tenu de la relation (3.16), on obtient :

$$dP_y = \frac{\gamma_b \cdot E_p}{\sin^2(\alpha)} \cdot dy \quad (3.28)$$

Après intégration nous obtenons :

$$P_y = \int_0^H \frac{\gamma_b \cdot E_p}{\sin^2(\alpha)} \cdot dy \quad (3.29)$$

$$P_y = \frac{\gamma_b \cdot E_p}{\sin^2(\alpha)} \cdot H \quad (3.30)$$

Soit :

$$P_y = 12498.17 \text{ kg/ml.}$$

• **Le poids de la cuve pleine**

$$N = N_c \cdot ds \quad (3.31)$$

Le poids de la cuve pleine par unité de longueur N_c s'écrit :

$$N_c = \frac{P_c}{2 \cdot \pi \cdot R_2} \quad (3.32)$$

P_c , le poids de la cuve pleine égale à 1606.65 t.

Soit :

$$N = 30 \, 118.53 \text{ kg/ml.}$$

N est décomposé en une composante horizontale N_x et une composante N_y suivant la génératrice de support figure (3.3) :

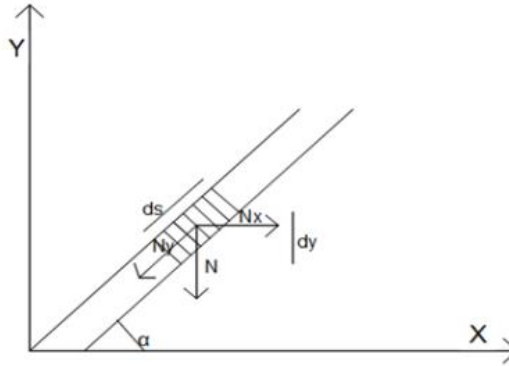


Figure 3.3 : le pois propre de la cuve.

➤ **Calcul de N_x**

Soit :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{N_c}{dN_x} \quad (3.33)$$

Donc :

$$dN_x = \frac{N_c}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (3.34)$$

Compte tenu de l'équation (3.31), il vient :

$$dN_x = \frac{N \cdot ds}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (3.35)$$

Sachant que :

$$ds = \frac{dy}{\sin \alpha} \quad (3.36)$$

α : l'angle formé par le support et le plan horizontal et dy la projections de ds sur l'axe y , il vient :

$$dN_x = \frac{N \cdot dy}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \quad (3.37)$$

Après intégration nous obtenons :

$$N_x = \int_0^H \frac{N}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot dy \quad (3.38)$$

$$N_x = \frac{N}{\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot H \quad (3.39)$$

Après les calculs nous avons obtenu Les résultats suivant :

$$N_x = 6136.65 \text{ kg/ml}$$

➤ **Calcul N_y**

Soit :

$$\sin(\alpha) = \frac{N_c}{dN_y} \quad (3.40)$$

Donc :

$$dN_y = \frac{N_c}{\sin(\alpha)} \quad (3.41)$$

Compte tenu de l'équation (3.31), il vient :

$$dN_y = \frac{N \cdot dy}{\sin^2(\alpha)} \quad (3.42)$$

Après intégration nous obtenons :

$$N_y = \int_0^H \frac{N}{\sin^2(\alpha)} \cdot dy \quad (3.43)$$

$$N_y = \frac{N}{\sin^2(\alpha)} \cdot H \quad (3.44)$$

Le calcul nous donne :

$$N_y = 30737.34 \text{ kg/ml}$$

• **Le poids total de support**

- Suivant l'horizontal

$$N_x = P_x + N_x \quad (3.45)$$

Soit :

$$N_x = 8631.88 \text{ kg/ml.}$$

- Suivant la génératrice

$$N_y = P_y + N_y \quad (3.46)$$

$$N_y = 43235.34 \text{ kg/ml.}$$

a) **Calcul des armatures**

➤ **Armature verticale**

La section à la base de support soumis à un effort de compression ce que nous produisant une compression simple. Donc on adopte un ferrailage minimum.

- **Condition de non fragilité**

$$A_{\min} \geq 0.23 \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{t28}}{f_e} \quad (3.47)$$

Ou :

b : l'épaisseur de support, $b=0.20\text{m}$;

d : distance entre le centre de gravité des aciers tendues et fibre du béton la plus comprimée ; avec l'enrobage de 4cm .

Ce qui donne : $A_{\min} = 2.27\text{cm}^2$

- Vérification de la condition de la section minimale du RPA

Le RPA nous exige que la section d'armatures soit au moins égale à 0,5% de la section du béton :

$$A_{RPA} = 0.005 \cdot b \cdot h \quad (3.48)$$

Soit :

$$A_{RPA} = 9.80 \text{ cm}^2.$$

Enfin, la section d'armatures adoptées est donnée par :

$$A_{\text{adop}} = \max(A_{RPA}; A_{\min}) \quad (3.49)$$

Soit :

$$A_{\text{adop}} = 9.80\text{cm}^2.$$

La section d'armatures adoptée est 9.80cm^2 , soit 14T12, disposées en nappes avec un espacement $St = 15\text{Cm}$.

➤ Armature horizontale

Le fût soumis à un effort de compression N_x , donc le béton seul peut reprendre les efforts de compression sans risque de dépassement de contrainte, on adopte néanmoins un ferrailage minimum défini par :

$$A_{\min} = \text{Max}\left(4U; \frac{B}{1000}\right) \quad (3.50)$$

U : périmètre de la section du béton exprimé en "m" ;

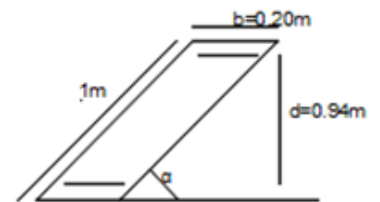
$4U(\text{cm}^2) = 4 (\text{cm}^2/\text{m}) \cdot U(\text{m})$ [(4 cm^2) d'acier par mètre de pourtour] ;

B : section du béton.

Soit :

$$A_{\min} = \text{Max}(4 \cdot 2.36 ; 1.96) = 9.44\text{cm}^2.$$

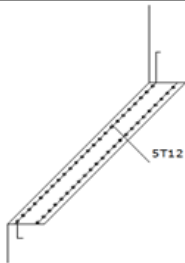
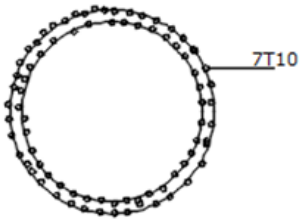
La section d'armatures adoptée est 9.44cm^2 , soit 14T10, disposées en nappes avec un espacement $St = 15\text{Cm}$.



b) Calcul du poids des aciers

Le poids unitaire des barres est calculé par l'équation (3.11), Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau de nomenclature ci-après :

Tableau 3.3 : Tableau de nomenclature pour la forme tronconique.

N°	Schéma	φ (mm)	langur (m)	Nbr de barre	Langur total (m)	Pds unitaire (kg)	Pds total (kg)
1		12	27.29	711.26	19412.40	0.89	17234.60
2		10	38.28	320.00	12250.91	0.62	7553.15

c) Calcul du volume de béton

Pour calculer le volume de la forme tronconique qui varie avec un pas Δz ($\Delta z=10\text{cm}$) nous utilisons l'équation (3.51) :

$$V = \frac{\pi}{2} \cdot \Delta z \cdot [S_{z+\Delta z} + S_z] \quad (3.51)$$

Un extrait des résultats obtenus sont illustré dans le tableau (3.4)

Tableau 3.4 : Extrait des résultats de la variation de volume

Hauteur Z	rayon inter	rayon exter	volume partiel (m3)	volume cumulé (m3)
24.00	3.40	3.60	0.44	0.44
23.90	3.42	3.62	0.44	0.88
23.80	3.44	3.64	0.45	1.33
23.70	3.46	3.66	0.45	1.78
23.60	3.48	3.68	0.45	2.23
23.50	3.50	3.70	0.45	2.69
23.40	3.52	3.72	0.46	3.14
23.30	3.54	3.74	0.46	3.60
23.20	3.56	3.76	0.46	4.06

d) Calcul de coffrage

Le coffrage du support de forme tronconique est calculer on deux étapes :

➤ Coffrage intérieur

Pour calculer le coffrage intérieur nous utilisons l'équation (3.60) :

$$S_{int} = \pi. (R_{int} + r_{int}). \sqrt{H_{sup}^2 + (R_{int} - r_{int})^2} \quad (3.52)$$

où :

R_{int} : le rayon a la base du support, $R_{int}=8.29$ m ;

r_{int} : le rayon a la tête de support, $r_{int}=3.4$ m.

Le résultat obtenu est :

$$S_{int} = 376.27 \text{ m}^2$$

➤ Coffrage extérieur

Pour calculer le coffrage extérieur nous utilisons l'équation (3.61) :

$$S_{ext} = \pi. (R_{ext} + r_{ext}). \sqrt{H_{sup}^2 + (R_{ext} - r_{ext})^2} \quad (3.53)$$

Le résultat obtenu est :

$$S_{ext} = 930.29 \text{ m}^2$$

➤ Coffrage total

$$S_{total} = S_{int} + S_{ext} \quad (3.54)$$

$$S_{total} = 1306.57 \text{ m}^2$$

3.2.3. Forme cylindrique avec raidisseurs**a) Fut cylindrique****a-1) Calcul des armatures**

Calcul des contraintes de traction

$$\sigma_{min} = \frac{N(z)}{A(z)} - \frac{M(z)}{I(z)} \cdot V(z) \quad (3.55)$$

tel que $V(z)$ est le rayon extérieur de fut.

$\sigma_{min} = 0.42$ MPa. Le béton travaille à la compression.

Le béton seul peut reprendre les sollicitations agissant sur le fût, donc on adopte à un ferrailage minimum.

➤ **Armatures verticale**

$$A_{\min} = \text{Max}\left(4U; \frac{B}{1000}\right) \quad (3.56)$$

Soit :

$$A_{\min} = \text{Max}(4 * 2.40; 2) = 9.60\text{cm}^2$$

La section d'armatures adoptée est 9.60cm², soit 14T10, disposées en nappes avec un espacement St = 15Cm.

➤ **Armatures horizontal**

Ce calcul est assimilé au calcul des armatures horizontales d'un voile, tel que donnée par le BAEL (91/R99) :

$$A_H = \frac{A_v}{4} \quad (3.57)$$

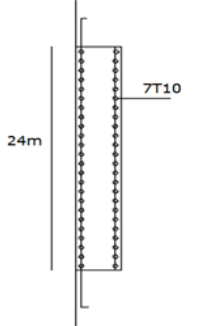
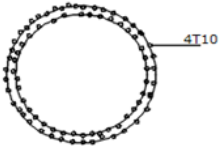
$$A_H = 2.75\text{cm}^2.$$

La section d'armatures adoptée est 2.75 cm², soit 14T10, disposées en nappes avec un espacement St = 15Cm.

a-2) Calcul du poids des armatures

Le poids unitaire des barres est calculé par l'équation (3.11), Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau de nomenclature ci-après :

Tableau 3.5 : Tableau nomenclature de dut cylindrique.

N°	Schéma	Φ (mm)	Longueur (m)	Nbr de barre.	Longueur total (m)	Pds unitaire (kg)	Pds total (kg)
1		10.00	26.80	301.59	8082.69	0.62	4983.28
2		10.00	27.62	320.00	8838.23	0.62	5449.10

a-3) calcul de volume de béton

Pour calculer le volume de fût nous utilisons l'équation (3.67) :

$$V = \pi \cdot H_{sup} \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2) \quad (3.58)$$

Le calcul nous donne :

$$V = 3.14 * 24 * (3.6^2 - 3.4^2) = 105.56 \text{ m}^3$$

a-4) calcul de coffrage

Le coffrage du support de forme cylindrique avec raidisseurs est calculé en deux étapes :

➤ Coffrage intérieur

Pour calculer le coffrage intérieur nous utilisons l'équation (3.59) :

$$S_{int} = \pi \cdot R_{int} \cdot H_{sup} \quad (3.59)$$

Soit :

$$S_{int} = 542.87 \text{ m}^2.$$

➤ Coffrage extérieur

Pour calculer le coffrage extérieur nous utilisons l'équation (3.60) :

$$S_{ext} = [\pi \cdot R_{ext} \cdot H_{sup}] - 4b_0 \quad (3.60)$$

étant donné que b_0 est la largeur des raidisseurs, $b_0=0.3 \text{ m}$.

Ce qui nous donne :

$$S_{ext} = 171.60 \text{ m}^2.$$

➤ Coffrage total

$$S_{total} = S_{int} + S_{ext} \quad (3.61)$$

Soit :

$$S_{total} = 714.47 \text{ cm}^2$$

b) les raidisseurs

b-1) Calcul des armatures

Nous considérons sur un élément de la surface de raidisseur ($1 \cdot ds$), cet élément est soumis au poids de la cuve pleine par unité de longueur (N) et à son poids propre (P).

- **Le poids propre de raidisseur**

Nous pouvons écrire :

$$P = \gamma_b \cdot b_0 \cdot ds \quad (3.62)$$

tel que b_0 : la largeur de raidisseur ; $b_0=0.30\text{m}$.

P est décomposé en une composante horizontale P_x et une composante P_y suivant P_y suivant la génératrice de raidisseur figure (3.4):

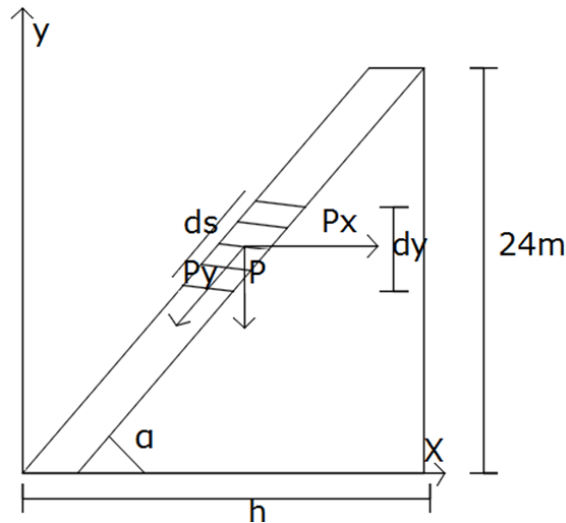


Figure 3.4 : le poids propre des raidisseurs.

➤ Calcul de P_x

Soit :

$$\text{tg } \alpha = \frac{P}{dP_x} \quad (3.63)$$

Donc :

$$dP_x = \frac{P}{\text{tg } \alpha} \quad (3.64)$$

Compte tenu de l'équation (3.62), il vient :

$$dP_x = \frac{\gamma_b \cdot b_0 \cdot ds}{\text{tg } \alpha} \quad (3.65)$$

Sachant que :

$$ds = \frac{dy}{\sin \alpha} \quad (3.67)$$

α : l'angle formé par le support et le plan horizontal et dy la projections de ds sur l'axe y , il vient :

$$dP_x = \frac{\gamma_b \cdot b_0 \cdot dy}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \quad (3.68)$$

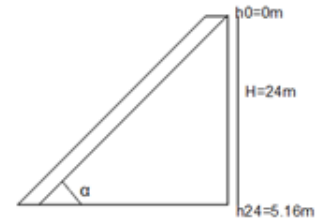
Ou :

$$\alpha = \text{actg} \left[\frac{H}{(h_0 - h_{24})} \right] \quad (3.69)$$

$$h_0 = 0\text{m} ; h_{24} = 5.16 \text{ m.}$$

Ce qui donne :

$$\alpha = \text{actg} \left[\frac{24}{(5.16 - 0)} \right] = 77.87^\circ.$$



Après intégration nous obtenons :

$$P_x = \int_0^H \frac{\gamma_b \cdot b_0}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot dy \quad (3.70)$$

$$P_x = \frac{\gamma_b \cdot b_0}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot H \quad (3.71)$$

$$P_x = 3958.43 \text{ kg/ml.}$$

➤ Calcul P_y

Soit :

$$\sin(\alpha) = \frac{P}{dP_y} \quad (3.72)$$

Donc :

$$dP_y = \frac{P}{\sin(\alpha)} \quad (3.73)$$

Compte tenu de l'équation (3.62), il vient :

$$dP_y = \frac{\gamma_b \cdot b_0}{\sin(\alpha)} \cdot ds \quad (3.74)$$

Sachant que :

$$ds = \frac{dy}{\sin(\alpha)} \quad (3.75)$$

Après intégration nous obtenons :

$$P_y = \int_0^H \frac{Y_b \cdot b_0}{\sin^2(\alpha)} \cdot dy \quad (3.76)$$

$$P_y = \frac{Y_b \cdot b_0}{\sin^2(\alpha)} \cdot H \quad (3.77)$$

$$P_y = 18832.05 \text{ kg/ml.}$$

- **poids de la cuve pleine**

$$N = N_c \cdot ds \quad (3.78)$$

Le poids de la cuve pleine N_c par unité de longueur :

$$N_c = \frac{P_c}{(2 \cdot \pi \cdot R_{ext}) + 4 \cdot (2 \cdot b_0 \cdot h)} \quad (3.79)$$

$$N_c = 4.59 \text{ kg/ml.}$$

N est décomposé en une composante horizontale N_x et une composante N_y suivant la génératrice de support figure (3.5) :

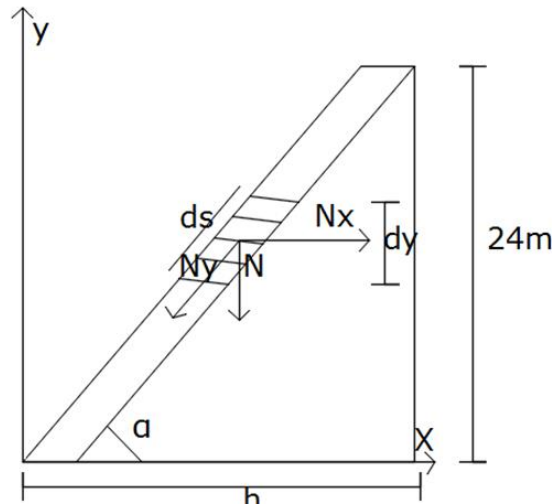


Figure 3.5 : Le poids de la cuve pleine.

➤ **Calcul N_x**

Soit :

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{N}{dN_x} \quad (3.80)$$

Compte tenu de l'équation (3.84), il vient :

$$dN_x = \frac{N \cdot ds}{\text{tg}(\alpha)} \quad (3.81)$$

Sachant que :

$$ds = \frac{dy}{\sin(\alpha)} \quad (3.82)$$

Après intégration nous obtenons :

$$N_x = \int_0^H \frac{N}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot dy \quad (3.83)$$

$$N_x = \frac{N}{\text{tg}(\alpha) \cdot \sin(\alpha)} \cdot H \quad (3.84)$$

Ce qui nous donne :

$$N_x = 0.99 \text{kg/ml}$$

➤ **Calcul N_y**

Soit :

$$\sin(\alpha) = \frac{N}{dN_y} \quad (3.85)$$

Compte tenu de l'équation (3.84), il vient :

$$dN_y = \frac{N_c \cdot ds}{\sin(\alpha)} \quad (3.86)$$

Après l'intégration nous obtenons :

$$N_y = \int_0^H \frac{N}{\sin^2(\alpha)} \cdot dy \quad (3.87)$$

$$N_y = \frac{N}{\sin^2(\alpha)} \cdot H \quad (3.88)$$

Ce qui nous donne :

$$N_y = 4.69 \text{kg/ml}$$

• **Le poids total de raidisseur**

- Suivant l'horizontal

$$N_X = P_x + N_x \quad (3.89)$$

$$N_X = 3959.42 \text{ kg/ml.}$$

- Suivant la génératrice

$$N_Y = P_y + N_y \quad (3.90)$$

$$N_y = 18836.74 \text{kg/ml.}$$

Les efforts sont de compression donc le béton seul peut le répondre, donc on adopte à un ferrailage forfaitaire.

➤ **Armatures verticale**

- **Vérification de la condition de non fragilité**

$$A_{\min} \geq 0.23 \cdot b_0 d \cdot \frac{f_{t28}}{f_e} \quad (3.91)$$

avec :

$$A_{\min} = 1.77 \text{ cm}^2.$$

- **Vérification de la condition de la section minimale du RPA**

Cette condition exige que la section d'armatures soit au moins égale à 0,5% de la section du béton. Soit :

$$A_{RPA} = 0.005 \cdot b_0 \cdot h \quad (3.92)$$

$$A_{RPA} = 7.33 \text{ cm}^2.$$

Enfin, la section d'armatures adoptées est donnée par :

$$A_{adop} = \max(A_{\min}; A_{RPA}) \quad (3.93)$$

$$A_{adop} = 7.33 \text{ cm}^2.$$

La section d'armatures adoptée est 7.33cm², soit 14T10, disposées en nappes avec un espacement St = 15Cm.

➤ **Armatures horizontale**

Condition de non fragilité

Nous utilisons l'équation (3.91) :

$$A_{\min} \geq 0.23 \cdot b_0 d \cdot \frac{f_{t28}}{f_e} = 2.78 \text{ cm}^2.$$

- **Vérification de la condition de la section minimale du RPA**

Cette condition exige que la section d'armatures soit au moins égale à 0,5% de la section du béton. Soit :

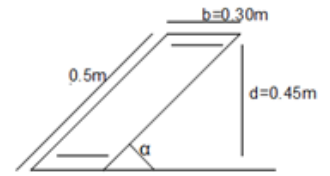
$$A_{RPA} = 7.33 \text{ cm}^2.$$

Enfin, la section d'armatures adoptées est donnée par :

$$A_{adop} = \max(A_{\min}; A_{RPA})$$

$$A_{adop} = 7.33 \text{ cm}^2.$$

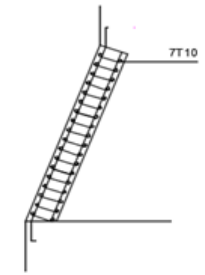
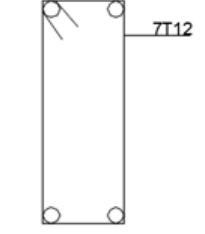
La section d'armatures adoptée est 7.33cm², soit 7T12, avec un espacement St = 15Cm.



b-2) calcul de poids des armatures

Le poids unitaire des barres est calculé par l'équation (3.11), Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau de nomenclature ci-après :

Tableau 3.6 : Tableau nomenclature pour le raidisseur

N°	Schéma	Φ (mm)	Longueur (m)	Nbr de barre.	Longueur total (m)	Pds unitaire (kg)	Pds total (kg)
1		10.00	24.61	307.20	7558.78	0.62	4660.27
2		12.00	5.70	640.00	3648.00	0.89	3238.75

b-2) calcul du volume des raidisseurs

Pour calculer ce volume qui varie avec un pas Δz , ($\Delta z=10\text{cm}$) nous utilisons l'équation (3.94) :

$$V = \left[\frac{S_z + S_{z+\Delta z}}{2} \right] \cdot \Delta z \quad (3.94)$$

Un extrait des résultats obtenu est présenté dans le tableau (3.7) :

Tableau 3.7 : Extrait des résultats de la variation de volume de raidisseur.

Hauteur Z (m)	h(z) (m)	b0 (m)	volume partiel (m ³)	volume cumulée (m ³)
24.00	-	0.30	0.0003	0.0003
23.90	0.02	0.30	0.0010	0.0013
23.80	0.04	0.30	0.0016	0.0029
23.70	0.06	0.30	0.0023	0.0052
23.60	0.09	0.30	0.0029	0.0081
23.50	0.11	0.30	0.0035	0.0116
23.40	0.13	0.30	0.0042	0.0158
23.30	0.15	0.30	0.0048	0.0206

- **Le volume total de la forme cylindrique avec raidisseurs :**

$V_{\text{Total}} = \text{volume du fût} + \text{volume des raidisseurs a la base.}$

$$V_{\text{Total}} = 124.13\text{m}^3.$$

b-3) calcul du coffrage

Le coffrage du support de forme cylindrique avec raidisseurs est calculé comme suit:

$$S = 4. [2. (b_0 + h_{\text{moy}})]. H_{\text{sup}} \quad (3.95)$$

tel-que $h_{\text{moy}} = \left[\frac{h_0 + h_{24}}{2} \right] = 2.58 \text{ m.}$

$$S = 552.96 \text{ m}^2.$$

Le coffrage total du fût cylindrique avec raidisseurs :

$S_{\text{total}} = \text{coffrage des raidisseurs} + \text{coffrage du fût cylindrique.}$

$$S_{\text{total}} = 1267.43\text{m}^2.$$

Par procéder analogue nous calculons pour les différentes largeurs (b_0) des raidisseurs les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau (3.8) :

Tableau 3.8 : les résultats de l'étude technique des raidisseurs pour différent (b_0).

les valeurs de b_0	ferraillage adopté	le volume	le coffrage
0.40	14T10	19.82	473.28
	7T12		
0.50	14T12	20.70	427.20
	7T14		
0.60	14T12	21.38	400.32
	7T16		
0.70	14T12	26.70	385.92
	7T16		

3.3. Etude économique

Pour le choix de la variante du fût à retenir, nous procédons à une étude économique pour l'estimation du cout relatif aux poids des aciers, au volume de béton et à la surface de coffrage calculés au préalable.

Les prix des matériaux (béton, acier, coffrage) sont donnés par l'entreprise Makoudi, comme suit

- Le prix unitaire de l'acier est de 180.00 DA/kg,
- Le prix total est calculé par l'équation (3.96) :

$$P_{total} = P_{unitaire} \cdot P_{acier} + 0.1 \cdot P_{acier} \quad (3.96)$$

- Le prix unitaire de béton est de 29000.00 DA/m³.
- Le prix est total est calculé par l'équation (3.97) :

$$P_{total} = P_{unitaire} \cdot P_{béton} \quad (3.97)$$

- Le prix unitaire de coffrage est de 550.00 DA/m².
- Le prix total est calculé par l'équation (3.98) :

$$P_{total} = P_{unitaire} \cdot P_{coffrage} \quad (3.98)$$

Les résultats des devis, obtenus pour les différentes formes sont illustrés dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 3.9 : Devis de formes cylindrique.

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P. unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	17 607.57	180.00	3 169 362.44
2.00	Béton armée	m3	217.15	29 000.00	6 297 259.64
3.00	coffrage cylindrique	m2	1 085.73	550.00	597 153.93
				total	10063776.01

Tableau 3.10 : Devis de forme tronconique.

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P. unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	26 388.44	180.00	4 749 918.81
2.00	Béton armée	m3	179.30	29 000.00	5 199 612.30
3.00	Coffrage tronconique	m2	1 306.57	550.00	718 611.33
				Total	10 668 142.44

Tableau 3.11 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs (b₀=0.3m).

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P. unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	20 164.54	180.00	3 629 616.91
2.00	Béton armée	m3	124.13	29 000.00	3 599 871.88
3.00	Coffrage	m2	1 267.43	550.00	697 084.97
				total	7 926 573.76

Tableau 3.12 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.4m$).

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P .unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	18 872.27	180.00	3 397 009.43
2.00	Béton armée	m3	125.38	29 000.00	3 636 063.88
3.00	Coffrage	m2	1 187.35	550.00	653 040.97
				total	7 686 114.28

Tableau 3.13 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.5m$).

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P .unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	20 843.53	180.00	3 751 835.40
2.00	Béton armée	m3	126.26	29 000.00	3 661 467.88
3.00	Coffrage	m2	1 140.87	550.00	627 476.97
				total	8 040 780.24

Tableau 3.14 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.6m$).

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P .unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	21 307.44	180.00	3 835 338.86
2.00	Béton armée	m3	126.94	29 000.00	3 681 303.88
3.00	Coffrage	m2	1 113.59	550.00	612 472.97
				total	8 129 115.71

Tableau 3.15 : Le devis de la forme cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.7m$).

N°	Désignation des travaux	Unité	Quantité	P .unitaire (DA)	Mentant (DA)
1.00	Acier	Kg	20 390.54	180.00	3670 297.09
2.00	Béton armée	m3	132.26	29 000.00	3 835 594.03
3.00	Coffrage	m2	1 069.03	550.00	587 965.36
				Total	8 093 856.48

Les résultats illustrés dans les tableaux (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) montrent que le fût de forme cylindrique avec raidisseurs est la variante la plus économique. Pour fixer la largeur b_0 du raidisseur, nous avons tracé la courbe de variation du prix en fonction de cette largeur b_0 comme le montre la figure (3.6) ; il apparaît que $b_0=0.4$ offre la variante la plus économique.

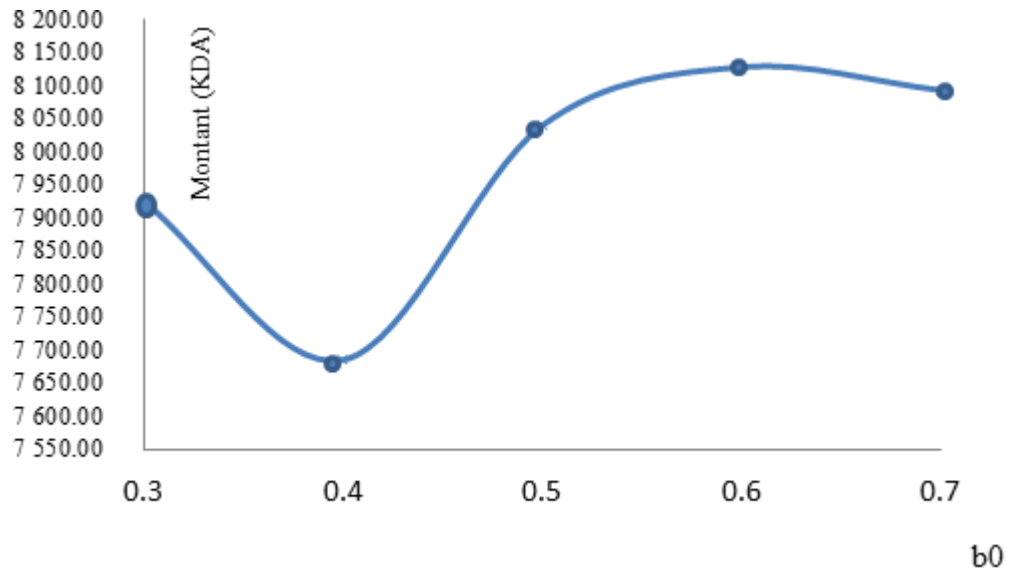


Figure 3.6 : courbe de la variation des prix en fonction de la largeur des raidisseurs b_0 .

Conclusion

L'étude technico-économique effectuée, dans ce chapitre, a permis le choix adéquat d'une variante du fût parmi les trois variantes étudiées (fût cylindrique, fût tronconique, fût cylindrique avec raidisseurs). La forme cylindrique avec quatre raidisseurs de largeur $b_0=0.4\text{m}$ est retenue est révélée la moins cher et la plus économique avec un cout de 7 686 114.28 DA.

Dans cette études, nous avons étudié et somme arrivés à adopter la forme du support la plus avantageuse à notre réservoir.

En démarrnant d'un calcul déterministe de l'ingénieur, nous nous sommes intéressés a trois variante différentes, avec comme objectif l'optimisation technico-économique du support, ces variante se résument comme suit :

- Première variante : Un fût cylindrique à inertie constante : cette forme présente l'avantage de la facilité de réalisation. Toutefois, elle induit des contraintes de traction qui dépassent la contrainte admissible et qui nécessite par conséquent une section d'armature considérable ; ce qui rend sa réalisation coûteuse.
- Deuxième variante : Un fût tronconique à inertie variable : En gardant la contrainte à la tête du fut constante le long du support, nous avons abouti à une forme tronconique, qui ne nécessite pas beaucoup d'armature étant donné que les contraintes de traction restent très faibles. Toutefois, sa réalisation est difficile et nécessite une technicité particulière.
- Troisième variante : Un fût mixte (cylindre avec raidisseurs) : Cette variante nous semble la plus viable car les contraintes de traction sont vérifiées le long du fût et présente une facilité de réalisation.

Pour le choix définitif de la variante la plus avantageuse, l'étude technico-économique effectuée, a permis le choix adéquat de la forme cylindrique avec quatre raidisseurs de largeur $b_0=0.4\text{m}$ cette variante se révèle la moins cher donc la plus économique avec un cout de 7 686 114.28 DA.

Cette solution retenue est intéressante a plus d'un titre .D'abord, elle est facile à réaliser sue site d'un point de vue technique, on réalise le support a inertie constante puis on vient rajouter les raidisseurs avec un coffrage simple.

Puis d'un point de vue résistance, c'est les raidisseurs qui jouent le rôle de régulateur des contraintes. et encore, d'un point de vue économique c'est une solution viable .et enfin, d'un point du vue esthétique, l'architecture de l'ouvrage s'intègre très bien en milieu urbain.

Il est vrai que ce type d'ouvrage n'est pas très répandu dans le parc Algérien. Le but final de ce travail c'est de mettre en évidence toutes ces qualités et inciter les ingénieurs a penser à ce type d'ouvrages.

A.GUERRIN et **R.C.LAVAU**R, Traité de béton armé. Tome 6.réservoirs- châteaux d'eau. Édition DUNOD. Paris. France, (1972).

BAEL 91 révisées 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages des constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.

FASCICULE-74, Cahier des clauses techniques générales 1998.

H.HAMMOUM. Cours de module ouvrages hydrauliques (1 et 2) (master 1 et master 2).

H.HAMMOUM, **K.BOUZELHA**, **L.TABELLOUT**. Annales du bâtiment et des travaux publics (Recherche des moments d'inertie axiaux du support en pilotis d'un réservoir surélevé) ,2018.

L, TABELLOUT, dirigé par **H.HAMMOUM**. Recherche des axes principaux d'inertie d'un support en pilotis d'un réservoir surélève. Mémoire de master en génie civil, UMMTO, 2014.

R .P.A 99 /version 2003, Règles parasismiques algériennes.

Y.MANSOURI, **M.SEDIKI**, dirigé par **H.HAMMOUM** Etude d'un réservoir surélevé et Optimisation de la forme de son fut. Mémoire de master en génie civil, UMMTO, 2018.

Annexe 1

Caractéristique de support de forme cylindrique.

Cote (z)	Ri (m)	R (m)	A (m2)	poids partiel (N)	Poids cumulé (N)	I (m4)	M (N.m)	V(z) (m)	N(z) (N)	σ min	σ adm	σ max	σ c adm
24.00	3.40	3.80	9.05	-	-	58.81	16 204873.40	3.80	16 066 500.00	0.73	2.31	2.82	15.00
23.90	3.40	3.80	9.05	22 619.47	22 619.47	58.81	16 837 834.40	3.80	16 089 119.47	0.69	2.31	2.87	15.00
23.80	3.40	3.80	9.05	22 619.47	45 238.93	58.81	17 470 795.40	3.80	16 111 738.93	0.65	2.31	2.91	15.00
23.70	3.40	3.80	9.05	22 619.47	67 858.40	58.81	18 103 756.40	3.80	16 134 358.40	0.61	2.31	2.95	15.00
23.60	3.40	3.80	9.05	22 619.47	90 477.87	58.81	18 736 717.40	3.80	16 156 977.87	0.58	2.31	3.00	15.00
23.50	3.40	3.80	9.05	22 619.47	113 097.34	58.81	19 369 678.40	3.80	16 179 597.34	0.54	2.31	3.04	15.00
23.40	3.40	3.80	9.05	22 619.47	135 716.80	58.81	20 002 639.40	3.80	16 202 216.80	0.50	2.31	3.08	15.00
23.30	3.40	3.80	9.05	22 619.47	158 336.27	58.81	20 635 600.40	3.80	16 224 836.27	0.46	2.31	3.13	15.00
23.20	3.40	3.80	9.05	22 619.47	180 955.74	58.81	21 268 561.40	3.80	16 247 455.74	0.42	2.31	3.17	15.00
23.10	3.40	3.80	9.05	22 619.47	203 575.20	58.81	21 901 522.40	3.80	16 270 075.20	0.38	2.31	3.21	15.00
23.00	3.40	3.80	9.05	22 619.47	226 194.67	58.81	22 534 483.40	3.80	16 292 694.67	0.34	2.31	3.26	15.00
22.90	3.40	3.80	9.05	22 619.47	248 814.14	58.81	23 167 444.40	3.80	16 315 314.14	0.31	2.31	3.30	15.00
22.80	3.40	3.80	9.05	22 619.47	271 433.61	58.81	23 800 405.40	3.80	16 337 933.61	0.27	2.31	3.34	15.00
22.70	3.40	3.80	9.05	22 619.47	294 053.07	58.81	24 433 366.40	3.80	16 360 553.07	0.23	2.31	3.39	15.00
22.60	3.40	3.80	9.05	22 619.47	316 672.54	58.81	25 066 327.40	3.80	16 383 172.54	0.19	2.31	3.43	15.00
22.50	3.40	3.80	9.05	22 619.47	339 292.01	58.81	25 699 288.40	3.80	16 405 792.01	0.15	2.31	3.47	15.00
22.40	3.40	3.80	9.05	22 619.47	361 911.47	58.81	26 332 249.40	3.80	16 428 411.47	0.11	2.31	3.52	15.00
22.30	3.40	3.80	9.05	22 619.47	384 530.94	58.81	26 965 210.40	3.80	16 451 030.94	0.08	2.31	3.56	15.00
22.20	3.40	3.80	9.05	22 619.47	407 150.41	58.81	27 598 171.40	3.80	16 473 650.41	0.04	2.31	3.60	15.00
22.10	3.40	3.80	9.05	22 619.47	429 769.88	58.81	28 231 132.40	3.80	16 496 269.88	- 0.00	2.31	3.65	15.00
22.00	3.40	3.80	9.05	22 619.47	452 389.34	58.81	28 864 093.40	3.80	16 518 889.34	- 0.04	2.31	3.69	15.00
21.90	3.40	3.80	9.05	22 619.47	475 008.81	58.81	29 497 054.40	3.80	16 541 508.81	- 0.08	2.31	3.73	15.00
21.80	3.40	3.80	9.05	22 619.47	497 628.28	58.81	30 130 015.40	3.80	16 564 128.28	- 0.12	2.31	3.78	15.00
21.70	3.40	3.80	9.05	22 619.47	520 247.74	58.81	30 762 976.40	3.80	16 586 747.74	- 0.15	2.31	3.82	15.00
21.60	3.40	3.80	9.05	22 619.47	542 867.21	58.81	31 395 937.40	3.80	16 609 367.21	- 0.19	2.31	3.86	15.00
21.50	3.40	3.80	9.05	22 619.47	565 486.68	58.81	32 028 898.40	3.80	16 631 986.68	- 0.23	2.31	3.91	15.00
21.40	3.40	3.80	9.05	22 619.47	588 106.14	58.81	32 661 859.40	3.80	16 654 606.14	- 0.27	2.31	3.95	15.00
21.30	3.40	3.80	9.05	22 619.47	610 725.61	58.81	33 294 820.40	3.80	16 677 225.61	- 0.31	2.31	3.99	15.00
21.20	3.40	3.80	9.05	22 619.47	633 345.08	58.81	33 927 781.40	3.80	16 699 845.08	- 0.35	2.31	4.04	15.00
21.10	3.40	3.80	9.05	22 619.47	655 964.55	58.81	34 560 742.40	3.80	16 722 464.55	- 0.38	2.31	4.08	15.00
21.00	3.40	3.80	9.05	22 619.47	678 584.01	58.81	35 193 703.40	3.80	16 745 084.01	- 0.42	2.31	4.12	15.00
20.90	3.40	3.80	9.05	22 619.47	701 203.48	58.81	35 826 664.40	3.80	16 767 703.48	- 0.46	2.31	4.17	15.00
20.80	3.40	3.80	9.05	22 619.47	723 822.95	58.81	36 459 625.40	3.80	16 790 322.95	- 0.50	2.31	4.21	15.00
20.70	3.40	3.80	9.05	22 619.47	746 442.41	58.81	37 092 586.40	3.80	16 812 942.41	- 0.54	2.31	4.25	15.00
20.60	3.40	3.80	9.05	22 619.47	769 061.88	58.81	37 725 547.40	3.80	16 835 561.88	- 0.58	2.31	4.30	15.00
20.50	3.40	3.80	9.05	22 619.47	791 681.35	58.81	38 358 508.40	3.80	16 858 181.35	- 0.62	2.31	4.34	15.00
20.40	3.40	3.80	9.05	22 619.47	814 300.82	58.81	38 991 469.40	3.80	16 880 800.82	- 0.65	2.31	4.39	15.00
20.30	3.40	3.80	9.05	22 619.47	836 920.28	58.81	39 624 430.40	3.80	16 903 420.28	- 0.69	2.31	4.43	15.00
20.20	3.40	3.80	9.05	22 619.47	859 539.75	58.81	40 257 391.40	3.80	16 926 039.75	- 0.73	2.31	4.47	15.00
20.10	3.40	3.80	9.05	22 619.47	882 159.22	58.81	40 890 352.40	3.80	16 948 659.22	- 0.77	2.31	4.52	15.00
20.00	3.40	3.80	9.05	22 619.47	904 778.68	58.81	41 523 313.40	3.80	16 971 278.68	- 0.81	2.31	4.56	15.00
19.90	3.40	3.80	9.05	22 619.47	927 398.15	58.81	42 156 274.40	3.80	16 993 898.15	- 0.85	2.31	4.60	15.00
19.80	3.40	3.80	9.05	22 619.47	950 017.62	58.81	42 789 235.40	3.80	17 016 517.62	- 0.88	2.31	4.65	15.00
19.70	3.40	3.80	9.05	22 619.47	972 637.09	58.81	43 422 196.40	3.80	17 039 137.09	- 0.92	2.31	4.69	15.00
19.60	3.40	3.80	9.05	22 619.47	995 256.55	58.81	44 055 157.40	3.80	17 061 756.55	- 0.96	2.31	4.73	15.00
19.50	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 017 876.02	58.81	44 688 118.40	3.80	17 084 376.02	- 1.00	2.31	4.78	15.00
19.40	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 040 495.49	58.81	45 321 079.40	3.80	17 106 995.49	- 1.04	2.31	4.82	15.00
19.30	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 063 114.95	58.81	45 954 040.40	3.80	17 129 614.95	- 1.08	2.31	4.86	15.00
19.20	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 085 734.42	58.81	46 587 001.40	3.80	17 152 234.42	- 1.11	2.31	4.91	15.00
19.10	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 108 353.89	58.81	47 219 962.40	3.80	17 174 853.89	- 1.15	2.31	4.95	15.00
19.00	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 130 973.36	58.81	47 852 923.40	3.80	17 197 473.36	- 1.19	2.31	4.99	15.00
18.90	3.40	3.80	9.05	22 619.47	1 153 592.82	58.81	48 485 884.40	3.80	17 220 092.82	- 1.23	2.31	5.04	15.00

Annexe 2

Caractéristique d'un fût de forme parabolique.

Cote (z)	Ri (m)	R (m)	A (m ²)	poids partiel (N)	Poids cumulé (N)	I (m ⁴)	M (N.m)	V(z) (m)	N(z) (N)	σ min	σ adm	σ max	σ adm
24.00	3.40	3.60	4.40	-	-	26.96	16 204 873.40	3.60	16 066 500.00	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.44	3.64	4.45	11 054.70	11 054.70	27.84	16 837 834.40	3.64	16 077 554.70	1.42	2.31	5.82	15.00
23.80	3.47	3.67	4.49	11 172.05	22 226.75	28.72	17 470 795.40	3.67	16 088 726.75	1.35	2.31	5.82	15.00
23.70	3.51	3.71	4.54	11 287.70	33 514.45	29.61	18 103 756.40	3.71	16 100 014.45	1.28	2.31	5.82	15.00
23.60	3.55	3.75	4.58	11 401.76	44 916.21	30.51	18 736 717.40	3.75	16 111 416.21	1.21	2.31	5.82	15.00
23.50	3.58	3.78	4.63	11 514.27	56 430.48	31.41	19 369 678.40	3.78	16 122 930.48	1.15	2.31	5.82	15.00
23.40	3.62	3.82	4.67	11 625.30	68 055.78	32.32	20 002 639.40	3.82	16 134 555.78	1.09	2.31	5.82	15.00
23.30	3.65	3.85	4.72	11 734.91	79 790.69	33.23	20 635 600.40	3.85	16 146 290.69	1.03	2.31	5.82	15.00
23.20	3.69	3.89	4.76	11 843.17	91 633.87	34.15	21 268 561.40	3.89	16 158 133.87	0.97	2.31	5.82	15.00
23.10	3.72	3.92	4.80	11 950.12	103 583.99	35.07	21 901 522.40	3.92	16 170 083.99	0.92	2.31	5.82	15.00
23.00	3.75	3.95	4.84	12 055.81	115 639.80	36.00	22 534 483.40	3.95	16 182 139.80	0.87	2.31	5.82	15.00
22.90	3.79	3.99	4.88	12 160.29	127 800.09	36.93	23 167 444.40	3.99	16 194 300.09	0.81	2.31	5.82	15.00
22.80	3.82	4.02	4.93	12 263.60	140 063.68	37.87	23 800 405.40	4.02	16 206 563.68	0.76	2.31	5.82	15.00
22.70	3.85	4.05	4.97	12 365.77	152 429.46	38.82	24 433 366.40	4.05	16 218 929.46	0.71	2.31	5.82	15.00
22.60	3.88	4.08	5.01	12 466.86	164 896.32	39.77	25 066 327.40	4.08	16 231 396.32	0.67	2.31	5.82	15.00
22.50	3.92	4.12	5.05	12 566.89	177 463.22	40.72	25 699 288.40	4.12	16 243 963.22	0.62	2.31	5.82	15.00
22.40	3.95	4.15	5.09	12 665.91	190 129.12	41.68	26 332 249.40	4.15	16 256 629.12	0.58	2.31	5.82	15.00
22.30	3.98	4.18	5.13	12 763.94	202 893.06	42.65	26 965 210.40	4.18	16 269 393.06	0.53	2.31	5.82	15.00
22.20	4.01	4.21	5.16	12 861.01	215 754.07	43.62	27 598 171.40	4.21	16 282 254.07	0.49	2.31	5.82	15.00
22.10	4.04	4.24	5.20	12 957.15	228 711.22	44.60	28 231 132.40	4.24	16 295 211.22	0.45	2.31	5.82	15.00
22.00	4.07	4.27	5.24	13 052.40	241 763.61	45.58	28 864 093.40	4.27	16 308 263.61	0.41	2.31	5.82	15.00
21.90	4.10	4.30	5.28	13 146.77	254 910.38	46.57	29 497 054.40	4.30	16 321 410.38	0.37	2.31	5.82	15.00
21.80	4.13	4.33	5.31	13 240.30	268 150.68	47.56	30 130 015.40	4.33	16 334 650.68	0.33	2.31	5.82	15.00
21.70	4.16	4.36	5.35	13 333.00	281 483.68	48.56	30 762 976.40	4.36	16 347 983.68	0.29	2.31	5.82	15.00
21.60	4.19	4.39	5.39	13 424.91	294 908.58	49.56	31 395 937.40	4.39	16 361 408.58	0.26	2.31	5.82	15.00
21.50	4.22	4.42	5.42	13 516.03	308 424.62	50.57	32 028 898.40	4.42	16 374 924.62	0.22	2.31	5.82	15.00
21.40	4.25	4.45	5.46	13 606.41	322 031.02	51.58	32 661 859.40	4.45	16 388 531.02	0.19	2.31	5.82	15.00
21.30	4.27	4.47	5.50	13 696.04	335 727.06	52.60	33 294 820.40	4.47	16 402 227.06	0.15	2.31	5.82	15.00
21.20	4.30	4.50	5.53	13 784.96	349 512.02	53.62	33 927 781.40	4.50	16 416 012.02	0.12	2.31	5.82	15.00
21.10	4.33	4.53	5.57	13 873.18	363 385.20	54.65	34 560 742.40	4.53	16 429 885.20	0.09	2.31	5.82	15.00
21.00	4.36	4.56	5.60	13 960.72	377 345.92	55.68	35 193 703.40	4.56	16 443 845.92	0.05	2.31	5.82	15.00
20.90	4.39	4.59	5.64	14 047.59	391 393.51	56.72	35 826 664.40	4.59	16 457 893.51	0.02	2.31	5.82	15.00
20.80	4.41	4.61	5.67	14 133.82	405 527.33	57.77	36 459 625.40	4.61	16 472 027.33	- 0.01	2.31	5.82	15.00
20.70	4.44	4.64	5.70	14 219.41	419 746.74	58.81	37 092 586.40	4.64	16 486 246.74	- 0.04	2.31	5.82	15.00
20.60	4.47	4.67	5.74	14 304.39	434 051.13	59.87	37 725 547.40	4.67	16 500 551.13	- 0.07	2.31	5.82	15.00
20.50	4.49	4.69	5.77	14 388.77	448 439.90	60.93	38 358 508.40	4.69	16 514 939.90	- 0.09	2.31	5.82	15.00
20.40	4.52	4.72	5.81	14 472.55	462 912.45	61.99	38 991 469.40	4.72	16 529 412.45	- 0.12	2.31	5.82	15.00
20.30	4.55	4.75	5.84	14 555.76	477 468.22	63.06	39 624 430.40	4.75	16 543 968.22	- 0.15	2.31	5.82	15.00
20.20	4.57	4.77	5.87	14 638.41	492 106.63	64.13	40 257 391.40	4.77	16 558 606.63	- 0.18	2.31	5.82	15.00
20.10	4.60	4.80	5.90	14 720.51	506 827.14	65.21	40 890 352.40	4.80	16 573 327.14	- 0.20	2.31	5.82	15.00
20.00	4.62	4.82	5.94	14 802.07	521 629.21	66.29	41 523 313.40	4.82	16 588 129.21	- 0.23	2.31	5.82	15.00
19.90	4.65	4.85	5.97	14 883.11	536 512.32	67.38	42 156 274.40	4.85	16 603 012.32	- 0.25	2.31	5.82	15.00
19.80	4.68	4.88	6.00	14 963.62	551 475.94	68.47	42 789 235.40	4.88	16 617 975.94	- 0.28	2.31	5.82	15.00
19.70	4.70	4.90	6.03	15 043.64	566 519.58	69.57	43 422 196.40	4.90	16 633 019.58	- 0.30	2.31	5.82	15.00
19.60	4.73	4.93	6.07	15 123.16	581 642.74	70.67	44 055 157.40	4.93	16 648 142.74	- 0.33	2.31	5.82	15.00
19.50	4.75	4.95	6.10	15 202.19	596 844.93	71.78	44 688 118.40	4.95	16 663 344.93	- 0.35	2.31	5.82	15.00
19.40	4.78	4.98	6.13	15 280.76	612 125.69	72.89	45 321 079.40	4.98	16 678 625.69	- 0.37	2.31	5.82	15.00
19.30	4.80	5.00	6.16	15 358.85	627 484.54	74.01	45 954 040.40	5.00	16 693 984.54	- 0.39	2.31	5.82	15.00
19.20	4.83	5.03	6.19	15 436.49	642 921.04	75.13	46 587 001.40	5.03	16 709 421.04	- 0.42	2.31	5.82	15.00
19.10	4.85	5.05	6.22	15 513.69	658 434.72	76.26	47 219 962.40	5.05	16 724 934.72	- 0.44	2.31	5.82	15.00
19.00	4.87	5.07	6.25	15 590.44	674 025.17	77.39	47 852 923.40	5.07	16 740 525.17	- 0.46	2.31	5.82	15.00
18.90	4.90	5.10	6.28	15 666.77	689 691.94	78.52	48 485 884.40	5.10	16 756 191.94	- 0.48	2.31	5.82	15.00
18.80	4.92	5.12	6.31	15 742.67	705 434.61	79.66	49 118 845.40	5.12	16 771 934.61	- 0.50	2.31	5.82	15.00
18.70	4.95	5.15	6.34	15 818.16	721 252.77	80.81	49 751 806.40	5.15	16 787 752.77	- 0.52	2.31	5.82	15.00
18.60	4.97	5.17	6.37	15 893.25	737 146.02	81.96	50 384 767.40	5.17	16 803 646.02	- 0.54	2.31	5.82	15.00
18.50	4.99	5.19	6.40	15 967.93	753 113.95	83.11	51 017 728.40	5.19	16 819 613.95	- 0.56	2.31	5.82	15.00
18.40	5.02	5.22	6.43	16 042.22	769 156.17	84.27	51 650 689.40	5.22	16 835 656.17	- 0.58	2.31	5.82	15.00
18.30	5.04	5.24	6.46	16 116.13	785 272.29	85.44	52 283 650.40	5.24	16 851 772.29	- 0.60	2.31	5.82	15.00
18.20	5.06	5.26	6.49	16 189.65	801 461.95	86.61	52 916 611.40	5.26	16 867 961.95	- 0.62	2.31	5.82	15.00
18.10	5.09	5.29	6.52	16 262.81	817 724.76	87.78	53 549 572.40	5.29	16 884 224.76	- 0.64	2.31	5.82	15.00
18.00	5.11	5.31	6.55	16 335.60	834 060.36	88.96	54 182 533.40	5.31	16 900 560.36	- 0.65	2.31	5.82	15.00

Annexe 3

Caractéristique d'un fût de forme tronconique

Cote (z)	Ri (m)	R (m)	A (m ²)	poids partiel (N)	Poids cumulé (N)	I (m ⁴)	M (N.m)	V(z) (m)	N(z) (N)	σ_{min}	σ_{adm}	σ_{max}	$\sigma_{c adm}$	
24.00	3.40	3.60	4.40	-	-	26.96	16 204 873.40	3.60	16 066 500.00	1.49	2.31	5.82	15.00	
23.90	3.42	3.62	4.42	34 644.16	34 644.16	27.43	16 837 834.40	3.62	16 101 144.16	1.42	2.31	5.86	15.00	
23.80	3.44	3.64	4.45	34 845.26	69 489.42	27.91	17 470 795.40	3.64	16 135 989.42	1.35	2.31	5.91	15.00	
23.70	3.46	3.66	4.48	35 046.35	104 535.77	28.40	18 103 756.40	3.66	16 171 035.77	1.28	2.31	5.95	15.00	
23.60	3.48	3.68	4.50	35 247.44	139 783.21	28.89	18 736 717.40	3.68	16 206 283.21	1.21	2.31	5.99	15.00	
23.50	3.50	3.70	4.53	35 448.53	175 231.74	29.38	19 369 678.40	3.70	16 241 731.74	1.15	2.31	6.03	15.00	
23.40	3.52	3.72	4.55	35 649.63	210 881.37	29.88	20 002 639.40	3.72	16 277 381.37	1.08	2.31	6.07	15.00	
23.30	3.54	3.74	4.58	35 850.72	246 732.09	30.39	20 635 600.40	3.74	16 313 232.09	1.02	2.31	6.11	15.00	
23.20	3.56	3.76	4.60	36 051.81	282 783.91	30.90	21 268 561.40	3.76	16 349 283.91	0.96	2.31	6.14	15.00	
23.10	3.58	3.78	4.63	36 252.91	319 036.81	31.42	21 901 522.40	3.78	16 385 536.81	0.90	2.31	6.18	15.00	
23.00	3.60	3.80	4.65	36 454.00	355 490.81	31.95	22 534 483.40	3.80	16 421 990.81	0.85	2.31	6.21	15.00	
22.90	3.62	3.82	4.68	36 655.09	392 145.91	32.48	23 167 444.40	3.82	16 458 645.91	0.79	2.31	6.24	15.00	
22.80	3.64	3.84	4.71	36 856.19	429 002.09	33.01	23 800 405.40	3.84	16 495 502.09	0.73	2.31	6.28	15.00	
22.70	3.66	3.86	4.73	37 057.28	466 059.37	33.55	24 433 366.40	3.86	16 532 559.37	0.68	2.31	6.31	15.00	
22.60	3.69	3.89	4.76	37 258.37	503 317.75	34.10	25 066 327.40	3.89	16 569 817.75	0.63	2.31	6.34	15.00	
22.50	3.71	3.91	4.78	37 459.47	540 777.21	34.65	25 699 288.40	3.91	16 607 277.21	0.58	2.31	6.37	15.00	
22.40	3.73	3.93	4.81	37 660.56	578 437.77	35.21	26 332 249.40	3.93	16 644 937.77	0.53	2.31	6.40	15.00	
22.30	3.75	3.95	4.83	37 861.65	616 299.43	35.78	26 965 210.40	3.95	16 682 799.43	0.48	2.31	6.43	15.00	
22.20	3.77	3.97	4.86	38 062.75	654 362.17	36.35	27 598 171.40	3.97	16 720 862.17	0.43	2.31	6.45	15.00	
22.10	3.79	3.99	4.88	38 263.84	692 626.01	36.93	28 231 132.40	3.99	16 759 126.01	0.38	2.31	6.48	15.00	
22.00	3.81	4.01	4.91	38 464.93	731 090.95	37.51	28 864 093.40	4.01	16 797 590.95	0.34	2.31	6.50	15.00	
21.90	3.83	4.03	4.94	38 666.03	769 756.97	38.10	29 497 054.40	4.03	16 836 256.97	0.29	2.31	6.53	15.00	
21.80	3.85	4.05	4.96	38 867.12	808 624.09	38.70	30 130 015.40	4.05	16 875 124.09	0.25	2.31	6.55	15.00	
21.70	3.87	4.07	4.99	39 068.21	847 692.30	39.30	30 762 976.40	4.07	16 914 192.30	0.21	2.31	6.58	15.00	
21.60	3.89	4.09	5.01	39 269.31	886 961.61	39.91	31 395 937.40	4.09	16 953 461.61	0.17	2.31	6.60	15.00	
21.50	3.91	4.11	5.04	39 470.40	926 432.01	40.52	32 028 898.40	4.11	16 992 932.01	0.12	2.31	6.62	15.00	
21.40	3.93	4.13	5.06	39 671.49	966 103.50	41.14	32 661 859.40	4.13	17 032 603.50	0.08	2.31	6.64	15.00	
21.30	3.95	4.15	5.09	39 872.58	1 005 976.08	41.77	33 294 820.40	4.15	17 072 476.08	0.05	2.31	6.66	15.00	
21.20	3.97	4.17	5.12	40 073.68	1 046 049.76	42.40	33 927 781.40	4.17	17 112 549.76	0.01	2.31	6.68	15.00	
21.10	3.99	4.19	5.14	40 274.77	1 086 324.53	43.04	34 560 742.40	4.19	17 152 824.53	-	0.03	2.31	6.70	15.00
21.00	4.01	4.21	5.17	40 475.86	1 126 800.40	43.69	35 193 703.40	4.21	17 193 300.40	-	0.06	2.31	6.72	15.00
20.90	4.03	4.23	5.19	40 676.96	1 167 477.36	44.34	35 826 664.40	4.23	17 233 977.36	-	0.10	2.31	6.74	15.00
20.80	4.05	4.25	5.22	40 878.05	1 208 355.41	45.00	36 459 625.40	4.25	17 274 855.41	-	0.13	2.31	6.76	15.00
20.70	4.07	4.27	5.24	41 079.14	1 249 434.55	45.66	37 092 586.40	4.27	17 315 934.55	-	0.17	2.31	6.77	15.00
20.60	4.09	4.29	5.27	41 280.24	1 290 714.79	46.34	37 725 547.40	4.29	17 357 214.79	-	0.20	2.31	6.79	15.00
20.50	4.11	4.31	5.29	41 481.33	1 332 196.12	47.02	38 358 508.40	4.31	17 398 696.12	-	0.23	2.31	6.81	15.00
20.40	4.13	4.33	5.32	41 682.42	1 373 878.54	47.70	38 991 469.40	4.33	17 440 378.54	-	0.26	2.31	6.82	15.00
20.30	4.15	4.35	5.35	41 883.52	1 415 762.06	48.39	39 624 430.40	4.35	17 482 262.06	-	0.29	2.31	6.84	15.00
20.20	4.17	4.37	5.37	42 084.61	1 457 846.67	49.09	40 257 391.40	4.37	17 524 346.67	-	0.32	2.31	6.85	15.00
20.10	4.19	4.39	5.40	42 285.70	1 500 132.37	49.80	40 890 352.40	4.39	17 566 632.37	-	0.35	2.31	6.86	15.00
20.00	4.22	4.42	5.42	42 486.80	1 542 619.17	50.51	41 523 313.40	4.42	17 609 119.17	-	0.38	2.31	6.88	15.00
19.90	4.24	4.44	5.45	42 687.89	1 585 307.06	51.23	42 156 274.40	4.44	17 651 807.06	-	0.41	2.31	6.89	15.00
19.80	4.26	4.46	5.47	42 888.98	1 628 196.04	51.95	42 789 235.40	4.46	17 694 696.04	-	0.44	2.31	6.90	15.00
19.70	4.28	4.48	5.50	43 090.08	1 671 286.12	52.68	43 422 196.40	4.48	17 737 786.12	-	0.46	2.31	6.91	15.00
19.60	4.30	4.50	5.52	43 291.17	1 714 577.29	53.42	44 055 157.40	4.50	17 781 077.29	-	0.49	2.31	6.93	15.00
19.50	4.32	4.52	5.55	43 492.26	1 758 069.55	54.17	44 688 118.40	4.52	17 824 569.55	-	0.51	2.31	6.94	15.00
19.40	4.34	4.54	5.58	43 693.36	1 801 762.90	54.92	45 321 079.40	4.54	17 868 262.90	-	0.54	2.31	6.95	15.00
19.30	4.36	4.56	5.60	43 894.45	1 845 657.35	55.68	45 954 040.40	4.56	17 912 157.35	-	0.56	2.31	6.96	15.00
19.20	4.38	4.58	5.63	44 095.54	1 889 752.89	56.45	46 587 001.40	4.58	17 956 252.89	-	0.59	2.31	6.97	15.00
19.10	4.40	4.60	5.65	44 296.64	1 934 049.53	57.22	47 219 962.40	4.60	18 000 549.53	-	0.61	2.31	6.98	15.00
19.00	4.42	4.62	5.68	44 497.73	1 978 547.26	58.00	47 852 923.40	4.62	18 045 047.26	-	0.63	2.31	6.99	15.00
18.90	4.44	4.64	5.70	44 698.82	2 023 246.08	58.79	48 485 884.40	4.64	18 089 746.08	-	0.65	2.31	7.00	15.00

Annexe 4

Caractéristique d'un fût cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.3m$)

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B	v(z) (m)	II (m ⁴)	h ₀ (m)	h(z) (m)	Br(z)	I ₁ ² (m ⁴)	I ₂ ² (m ⁴)	I ₃ ² (m ⁴)	I ₄ ² (m ⁴)	I(z) (m ⁴)	V(z)	Pds cumulée (N)	Pds pariétale de raidisseur (N)	Pds cumulée (N)	Pds totale (N)	Moment M(z)	N(z)	σ _{min}	σ _{t adm}	σ _{max}	σ _{c adm}
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	-	-	-	-	-	-	26.96	3.60	-	-	-	-	1 620.49	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.02	0.03	0.00000	0.0000	0.08	0.08	27.30	3.61	1.10	0.003	0.003	1.10	1 683.78	1 607.75	1.41	2.31	5.86	15.00
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.04	0.05	0.00000	0.0001	0.17	0.17	27.64	3.62	2.20	0.01	0.01	2.21	1 747.08	1 608.86	1.33	2.31	5.90	15.00
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.06	0.08	0.00001	0.0001	0.26	0.26	27.98	3.63	3.30	0.02	0.02	3.33	1 810.38	1 609.98	1.25	2.31	5.95	15.00
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.09	0.10	0.00002	0.0002	0.34	0.34	28.33	3.64	4.40	0.02	0.05	4.45	1 873.67	1 611.10	1.17	2.31	5.99	15.00
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.11	0.13	0.00003	0.0002	0.43	0.43	28.68	3.65	5.50	0.03	0.08	5.58	1 936.97	1 612.23	1.09	2.31	6.03	15.00
23.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.13	0.15	0.00005	0.0003	0.52	0.52	29.04	3.66	6.60	0.04	0.12	6.71	2 000.26	1 613.36	1.02	2.31	6.07	15.00
23.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.15	0.18	0.00009	0.0003	0.61	0.61	29.40	3.68	7.70	0.04	0.16	7.85	2 063.56	1 614.50	0.95	2.31	6.11	15.00
23.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.17	0.21	0.00013	0.0004	0.70	0.70	29.77	3.69	8.80	0.05	0.21	9.00	2 126.86	1 615.65	0.88	2.31	6.14	15.00
23.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.19	0.23	0.00018	0.0004	0.79	0.79	30.14	3.70	9.90	0.05	0.26	10.16	2 190.15	1 616.81	0.81	2.31	6.18	15.00
23.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.22	0.26	0.00025	0.0005	0.89	0.89	30.51	3.71	11.00	0.06	0.32	11.32	2 253.45	1 617.97	0.74	2.31	6.21	15.00
22.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.24	0.28	0.00033	0.0005	0.98	0.98	30.89	3.72	12.10	0.07	0.39	12.49	2 316.74	1 619.14	0.67	2.31	6.25	15.00
22.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.26	0.31	0.00043	0.0006	1.08	1.08	31.27	3.73	13.19	0.07	0.46	13.66	2 380.04	1 620.31	0.60	2.31	6.28	15.00
22.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.28	0.34	0.00055	0.0006	1.17	1.17	31.65	3.74	14.19	0.08	0.55	14.84	2 443.34	1 621.49	0.54	2.31	6.31	15.00
22.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.30	0.36	0.00068	0.0007	1.27	1.27	32.04	3.75	15.39	0.09	0.63	16.03	2 506.63	1 622.68	0.48	2.31	6.34	15.00
22.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.32	0.39	0.00084	0.0007	1.37	1.37	32.44	3.76	16.49	0.09	0.73	17.22	2 569.93	1 623.87	0.41	2.31	6.37	15.00
22.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.34	0.41	0.00102	0.0008	1.47	1.47	32.84	3.77	17.59	0.10	0.83	18.42	2 633.22	1 625.07	0.35	2.31	6.40	15.00
22.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.37	0.44	0.00122	0.0008	1.57	1.57	33.24	3.78	18.69	0.11	0.93	19.62	2 696.52	1 626.27	0.29	2.31	6.43	15.00
22.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.39	0.46	0.00145	0.0009	1.67	1.67	33.65	3.79	19.79	0.11	1.04	20.84	2 759.82	1 627.49	0.24	2.31	6.46	15.00
22.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.41	0.49	0.00170	0.0009	1.78	1.77	34.06	3.80	20.89	0.12	1.16	22.06	2 823.11	1 628.71	0.18	2.31	6.48	15.00
22.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.43	0.52	0.00199	0.0010	1.88	1.88	34.48	3.82	21.99	0.13	1.29	23.28	2 886.41	1 629.93	0.12	2.31	6.51	15.00
21.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.45	0.54	0.00230	0.0010	1.98	1.98	34.90	3.83	23.09	0.13	1.42	24.51	2 949.71	1 631.16	0.07	2.31	6.54	15.00
21.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.47	0.57	0.00265	0.0011	2.09	2.09	35.32	3.84	24.19	0.14	1.56	25.75	3 013.00	1 632.40	0.01	2.31	6.56	15.00
21.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.49	0.59	0.00302	0.0011	2.20	2.20	35.75	3.85	25.29	0.15	1.71	27.00	3 076.30	1 633.65	- 0.04	2.31	6.58	15.00
21.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.52	0.62	0.00343	0.0012	2.31	2.31	36.19	3.86	26.39	0.15	1.86	28.25	3 139.59	1 634.90	- 0.09	2.31	6.61	15.00
21.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.54	0.65	0.00388	0.0012	2.42	2.41	36.63	3.87	27.49	0.16	2.02	29.50	3 202.89	1 636.15	- 0.14	2.31	6.63	15.00
21.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.56	0.67	0.00437	0.0013	2.53	2.53	37.07	3.88	28.59	0.16	2.18	30.77	3 266.19	1 637.42	- 0.19	2.31	6.65	15.00
21.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.58	0.70	0.00489	0.0013	2.64	2.64	37.52	3.89	29.69	0.17	2.35	32.04	3 329.48	1 638.69	- 0.24	2.31	6.67	15.00
21.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.60	0.60	0.00545	0.0014	2.75	2.75	37.97	3.90	30.79	0.16	2.51	33.30	3 392.78	1 639.95	- 0.28	2.31	6.69	15.00
21.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.62	0.50	0.00606	0.0014	2.87	2.86	38.42	3.91	31.89	0.14	2.65	34.54	3 456.07	1 641.19	- 0.33	2.31	6.71	15.00
21.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.65	0.77	0.00671	0.0015	2.98	2.98	38.89	3.92	32.99	0.16	2.81	35.79	3 519.37	1 642.44	- 0.37	2.31	6.73	15.00
20.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.67	0.80	0.00740	0.0015	3.10	3.09	39.35	3.93	34.09	0.20	3.00	37.09	3 582.67	1 643.74	- 0.42	2.31	6.74	15.00
20.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.69	0.83	0.00814	0.0015	3.22	3.21	39.82	3.94	35.19	0.20	3.21	38.39	3 645.96	1 645.04	- 0.46	2.31	6.76	15.00
20.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.71	0.85	0.00893	0.0016	3.34	3.33	40.30	3.95	36.29	0.21	3.42	39.70	3 709.26	1 646.35	- 0.50	2.31	6.78	15.00
20.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.73	0.88	0.00977	0.0016	3.46	3.45	40.78	3.97	37.38	0.22	3.63	41.02	3 772.55	1 647.67	- 0.55	2.31	6.79	15.00
20.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.75	0.90	0.01065	0.0017	3.58	3.57	41.26	3.98	38.48	0.22	3.86	42.34	3 835.85	1 648.99	- 0.59	2.31	6.81	15.00
20.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.77	0.93	0.01159	0.0017	3.70	3.69	41.75	3.99	39.58	0.23	4.09	43.67	3 899.15	1 650.32	- 0.63	2.31	6.82	15.00
20.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.80	0.95	0.01259	0.0018	3.83	3.82	42.25	4.00	40.68	0.24	4.32	45.00	3 962.44	1 651.65	- 0.66	2.31	6.84	15.00
20.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.82	0.98	0.01363	0.0018	3.95	3.94	42.75	4.01	41.78	0.24	4.56	46.35	4 025.74	1 653.00	- 0.70	2.31	6.85	15.00
20.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.84	1.01	0.01474	0.0019	4.08	4.07	43.25	4.02	42.88	0.25	4.81	47.69	4 089.04	1 654.34	- 0.74	2.31	6.86	15.00
20.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.86	1.03	0.01590	0.0019	4.21	4.19	43.76	4.03	43.98	0.25	5.07	49.05	4 152.33	1 655.70	- 0.78	2.31	6.87	15.00
19.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.88	1.06	0.01712	0.0020	4.33	4.32	44.27	4.04	45.08	0.26	5.33	50.41	4 215.63	1 657.06	- 0.81	2.31	6.88	15.00
19.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.90	1.08	0.01841	0.0020	4.47	4.45	44.79	4.05	46.18	0.27	5.59	51.78	4 278.92	1 658.43	- 0.85	2.31	6.90	15.00
19.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.30	0.92	1.11	0.01975	0.0021	4.60	4.58	45.31	4.06	47.28	0.27	5.87	53.15	4 342.22	1 659.80	-	2.31	6.91	15.00

Annexe 5

Caractéristique d'un fût cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.4m$)

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B	v(z) (m)	II (m4)	b0 (m)	h(z) (m)	Br(z)	I ₁ (m4)	I ₂ (m4)	I ₃ (m4)	I ₄ (m4)	I(z) (m4)	V(z)	Pds cumulée (N)	Pds pariétale de raidisseur (N)	Pds cumulée (N)	Pds totale (N)	Moment M(z)	N(z)	σmin	σt adm	σmax	σc adm
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	-	-	-	-	-	-	26.96	3.60	-	-	-	-	1 620.49	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.02	0.03	0.000002	0.0001	0.09	0.09	27.32	3.61	1.10	0.003	0.003	1.10	1 683.78	1 607.75	1.41	2.31	5.86	15.00
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.03	0.06	0.000014	0.0002	0.18	0.18	27.68	3.62	2.20	0.010	0.014	2.21	1 747.08	1 608.86	1.33	2.31	5.90	15.00
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.05	0.08	0.000046	0.0003	0.27	0.27	28.05	3.63	3.30	0.017	0.031	3.33	1 810.38	1 609.98	1.25	2.31	5.93	15.00
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.07	0.11	0.0001	0.0004	0.36	0.36	28.42	3.63	4.40	0.024	0.055	4.45	1 873.67	1 611.10	1.18	2.31	5.97	15.00
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.09	0.14	0.00002	0.0005	0.46	0.46	28.79	3.64	5.50	0.031	0.086	5.58	1 936.97	1 612.23	1.10	2.31	6.01	15.00
23.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.10	0.17	0.00004	0.0006	0.55	0.55	29.17	3.65	6.60	0.038	0.124	6.72	2 000.26	1 613.37	1.03	2.31	6.04	15.00
23.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.12	0.19	0.00006	0.0006	0.65	0.65	29.54	3.66	7.70	0.045	0.169	7.87	2 063.56	1 614.52	0.96	2.31	6.07	15.00
23.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.14	0.22	0.00009	0.0007	0.74	0.74	29.93	3.67	8.80	0.052	0.220	9.02	2 126.86	1 615.67	0.89	2.31	6.11	15.00
23.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.15	0.25	0.00012	0.0008	0.84	0.84	30.31	3.68	9.90	0.059	0.279	10.17	2 190.15	1 616.82	0.82	2.31	6.14	15.00
23.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.17	0.28	0.00017	0.0009	0.94	0.94	30.70	3.69	11.00	0.065	0.344	11.34	2 253.45	1 617.99	0.76	2.31	6.17	15.00
22.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.19	0.30	0.00023	0.0010	1.03	1.03	31.10	3.69	12.10	0.072	0.416	12.51	2 316.74	1 619.16	0.69	2.31	6.20	15.00
22.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.21	0.33	0.00029	0.0011	1.13	1.13	31.50	3.70	13.19	0.079	0.496	13.69	2 380.04	1 620.34	0.63	2.31	6.23	15.00
22.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.22	0.36	0.00037	0.0012	1.23	1.23	31.90	3.71	14.29	0.086	0.582	14.88	2 443.34	1 621.53	0.57	2.31	6.25	15.00
22.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.24	0.39	0.00047	0.0013	1.33	1.34	32.30	3.72	15.39	0.093	0.675	16.07	2 506.63	1 622.72	0.50	2.31	6.28	15.00
22.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.26	0.41	0.00057	0.0014	1.44	1.44	32.71	3.73	16.49	0.100	0.774	17.27	2 569.93	1 623.92	0.45	2.31	6.31	15.00
22.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.28	0.44	0.00070	0.0015	1.54	1.54	33.12	3.74	17.59	0.107	0.881	18.47	2 633.22	1 625.12	0.39	2.31	6.33	15.00
22.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.29	0.47	0.00083	0.0016	1.64	1.64	33.54	3.75	18.69	0.114	0.995	19.69	2 696.52	1 626.34	0.33	2.31	6.35	15.00
22.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.31	0.50	0.00099	0.0017	1.75	1.75	33.95	3.75	19.79	0.120	1.115	20.91	2 759.82	1 627.56	0.27	2.31	6.38	15.00
22.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.33	0.52	0.00117	0.0017	1.85	1.85	34.38	3.76	20.89	0.127	1.242	22.13	2 823.11	1 628.78	0.22	2.31	6.40	15.00
22.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.34	0.55	0.00136	0.0018	1.96	1.96	34.80	3.77	21.99	0.134	1.377	23.37	2 886.41	1 630.02	0.17	2.31	6.42	15.00
21.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.36	0.58	0.00157	0.0019	2.07	2.07	35.23	3.78	23.09	0.141	1.518	24.61	2 949.71	1 631.26	0.11	2.31	6.44	15.00
21.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.38	0.61	0.00181	0.0020	2.18	2.18	35.67	3.79	24.19	0.148	1.666	25.86	3 013.00	1 632.51	0.06	2.31	6.46	15.00
21.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.40	0.63	0.00207	0.0021	2.29	2.29	36.10	3.80	25.29	0.155	1.821	27.11	3 076.30	1 633.76	0.01	2.31	6.48	15.00
21.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.41	0.66	0.00235	0.0022	2.40	2.40	36.54	3.81	26.39	0.162	1.982	28.37	3 139.59	1 635.02	- 0.04	2.31	6.50	15.00
21.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.43	0.69	0.00265	0.0023	2.51	2.51	36.99	3.82	27.49	0.169	2.151	29.64	3 202.89	1 636.29	- 0.09	2.31	6.52	15.00
21.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.45	0.72	0.00299	0.0024	2.62	2.62	37.44	3.82	28.59	0.176	2.327	30.92	3 266.19	1 637.57	- 0.13	2.31	6.54	15.00
21.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.46	0.74	0.00334	0.0025	2.73	2.73	37.89	3.83	29.69	0.182	2.509	32.20	3 329.48	1 638.85	- 0.18	2.31	6.55	15.00
21.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.48	0.77	0.00373	0.0026	2.85	2.85	38.35	3.84	30.79	0.189	2.698	33.49	3 392.78	1 640.14	- 0.23	2.31	6.57	15.00
21.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.50	0.80	0.00414	0.0027	2.96	2.96	38.81	3.85	31.89	0.196	2.894	34.78	3 456.07	1 641.43	- 0.27	2.31	6.59	15.00
21.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.52	0.83	0.00459	0.0028	3.08	3.08	39.27	3.86	32.99	0.203	3.098	36.08	3 519.37	1 642.73	- 0.31	2.31	6.60	15.00
20.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.53	0.85	0.00506	0.0028	3.20	3.19	39.74	3.87	34.09	0.210	3.307	37.39	3 582.67	1 644.04	- 0.36	2.31	6.62	15.00
20.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.55	0.88	0.00557	0.0029	3.31	3.31	40.21	3.88	35.19	0.217	3.524	38.71	3 645.96	1 645.36	- 0.40	2.31	6.63	15.00
20.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.57	0.91	0.00610	0.0030	3.43	3.43	40.69	3.88	36.29	0.224	3.748	40.03	3 709.26	1 646.68	- 0.44	2.31	6.64	15.00
20.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.59	0.94	0.00668	0.0031	3.55	3.55	41.16	3.89	37.38	0.231	3.979	41.36	3 772.55	1 648.01	- 0.48	2.31	6.66	15.00
20.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.60	0.96	0.00728	0.0032	3.67	3.67	41.65	3.90	38.48	0.237	4.216	42.70	3 835.85	1 649.35	- 0.52	2.31	6.67	15.00
20.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.62	0.99	0.00793	0.0033	3.80	3.79	42.14	3.91	39.58	0.244	4.460	44.04	3 899.15	1 650.69	- 0.56	2.31	6.68	15.00
20.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.64	1.02	0.00860	0.0034	3.92	3.91	42.63	3.92	40.68	0.251	4.712	45.40	3 962.44	1 652.05	- 0.59	2.31	6.69	15.00
20.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.65	1.05	0.00932	0.0035	4.04	4.04	43.12	3.93	41.78	0.258	4.970	46.75	4 025.74	1 653.40	- 0.63	2.31	6.70	15.00
20.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.67	1.07	0.01008	0.0036	4.17	4.16	43.62	3.94	42.88	0.265	5.235	48.12	4 089.04	1 654.77	- 0.67	2.31	6.71	15.00
20.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.69	1.10	0.01087	0.0037	4.29	4.29	44.12	3.94	43.98	0.272	5.507	49.49	4 152.33	1 656.14	- 0.70	2.31	6.72	15.00
19.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.71	1.13	0.01171	0.0038	4.42	4.41	44.63	3.95	45.08	0.279	5.785	50.87	4 215.63	1 657.52	- 0.73	2.31	6.73	15.00
19.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.72	1.16	0.01258	0.0039	4.55	4.54	45.14	3.96	46.18	0.286	6.071	52.25	4 278.92	1 658.90	- 0.77	2.31	6.74	15.00
19.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.74	1.18	0.01351	0.0039	4.68	4.67	45.66	3.97	47.28	0.293	6.364	53.64	4 342.22	1 660.29	- 0.80	2.31	6.75	15.00
19.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.76	1.21	0.01447	0.0040	4.81	4.80	46.17	3.98	48.38	0.299	6.663	55.04	4 405.52	1 661.69	- 0.83	2.31	6.76	15.00
19.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.77	1.24	0.01548	0.0041	4.94	4.93	46.70	3.99	49.48	0.306	6.969	56.45	4 468.81	1 663.10	- 0.87	2.31	6.77	15.00
19.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.79	1.27	0.01653	0.0042	5.07	5.06	47.22	4.00	50.58	0.313	7.283	57.86	4 532.11	1 664.51	- 0.90	2.31	6.77	15.00
19.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.40	0.81	1.29	0.01764	0.0043	5.21	5.19	47.76	4.00	51.68	0.320	7.603	59.28						

Annexe 6

Caractéristique d'un fût cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.5m$)

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B	v(z) (m)	II (m ⁴)	b0 (m)	h(z) (m)	Br(z)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	I (z) (m ⁴)	V(z)	Pds du fût (N)	Pds parietale de raidisseur (N)	Pds cumulee (N)	Pds totale (N)	Moment M(z)	N(z)	emim	et adm	emax	cc adm
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50							26.96	3.60	-	-	-	-	1 620.49	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.01	0.03	0.000001	0.0001	0.09	0.09	27.34	3.61	1.10	0.004	0.004	1.10	1 683.78	1 607.75	1.41	2.31	5.85	15.00
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.03	0.06	0.000010	0.0003	0.19	0.19	27.71	3.61	2.20	0.011	0.014	2.21	1 747.08	1 608.86	1.33	2.31	5.89	15.00
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.04	0.09	0.000033	0.0004	0.28	0.28	28.09	3.62	3.30	0.018	0.032	3.33	1 810.38	1 609.98	1.26	2.31	5.92	15.00
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.06	0.12	0.00001	0.0006	0.38	0.38	28.48	3.63	4.40	0.025	0.058	4.46	1 873.67	1 611.11	1.18	2.31	5.96	15.00
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.07	0.14	0.00002	0.0007	0.48	0.48	28.86	3.64	5.50	0.032	0.090	5.59	1 936.97	1 612.24	1.11	2.31	5.99	15.00
23.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.09	0.17	0.00003	0.0009	0.57	0.57	29.25	3.64	6.60	0.040	0.129	6.73	2 000.26	1 613.38	1.04	2.31	6.02	15.00
23.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.10	0.20	0.00004	0.0010	0.67	0.67	29.64	3.65	7.70	0.047	0.176	7.87	2 063.56	1 614.52	0.97	2.31	6.05	15.00
23.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.12	0.23	0.00006	0.0012	0.77	0.77	30.04	3.66	8.80	0.054	0.230	9.03	2 126.86	1 615.68	0.90	2.31	6.08	15.00
23.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.13	0.26	0.00009	0.0013	0.87	0.87	30.44	3.66	9.90	0.061	0.291	10.19	2 190.15	1 616.84	0.84	2.31	6.11	15.00
23.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.14	0.29	0.00012	0.0015	0.97	0.97	30.84	3.67	11.00	0.068	0.359	11.35	2 253.45	1 618.00	0.77	2.31	6.14	15.00
22.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.16	0.32	0.00016	0.0016	1.07	1.07	31.25	3.68	12.10	0.075	0.435	12.53	2 316.74	1 619.18	0.71	2.31	6.16	15.00
22.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.17	0.35	0.00021	0.0018	1.17	1.17	31.65	3.69	13.19	0.083	0.518	13.71	2 380.04	1 620.36	0.64	2.31	6.19	15.00
22.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.19	0.37	0.00027	0.0019	1.27	1.28	32.06	3.69	14.29	0.090	0.607	14.90	2 443.34	1 621.55	0.58	2.31	6.21	15.00
22.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.20	0.40	0.00034	0.0021	1.38	1.38	32.48	3.70	15.39	0.097	0.704	16.10	2 506.63	1 622.75	0.52	2.31	6.24	15.00
22.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.22	0.43	0.00042	0.0022	1.48	1.48	32.90	3.71	16.49	0.104	0.809	17.30	2 569.93	1 623.95	0.47	2.31	6.26	15.00
22.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.23	0.46	0.00051	0.0024	1.59	1.59	33.32	3.72	17.59	0.111	0.920	18.51	2 633.22	1 625.16	0.41	2.31	6.28	15.00
22.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.24	0.49	0.00061	0.0025	1.69	1.70	33.74	3.72	18.69	0.119	1.039	19.73	2 696.52	1 626.38	0.35	2.31	6.30	15.00
22.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.26	0.52	0.00072	0.0027	1.80	1.80	34.17	3.73	19.79	0.126	1.160	20.96	2 759.82	1 627.61	0.30	2.31	6.32	15.00
22.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.27	0.55	0.00083	0.0028	1.91	1.91	34.60	3.74	20.89	0.133	1.297	22.19	2 823.11	1 628.84	0.25	2.31	6.34	15.00
22.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.29	0.58	0.00099	0.0030	2.02	2.02	35.03	3.74	21.99	0.140	1.438	23.43	2 886.41	1 630.08	0.19	2.31	6.36	15.00
21.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.30	0.60	0.00115	0.0031	2.12	2.13	35.46	3.75	23.09	0.147	1.585	24.68	2 949.71	1 631.33	0.14	2.31	6.38	15.00
21.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.32	0.63	0.00132	0.0033	2.23	2.24	35.90	3.76	24.19	0.155	1.739	25.93	3 013.00	1 632.58	0.09	2.31	6.40	15.00
21.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.33	0.66	0.00151	0.0034	2.35	2.35	36.35	3.77	25.29	0.162	1.901	27.19	3 076.30	1 633.84	0.04	2.31	6.42	15.00
21.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.35	0.69	0.00171	0.0036	2.46	2.46	36.79	3.77	26.39	0.169	2.070	28.46	3 139.59	1 635.11	- 0.01	2.31	6.43	15.00
21.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.36	0.72	0.00193	0.0037	2.57	2.57	37.24	3.78	27.49	0.176	2.246	29.74	3 202.89	1 636.39	- 0.05	2.31	6.45	15.00
21.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.37	0.75	0.00218	0.0039	2.68	2.68	37.69	3.79	28.59	0.183	2.429	31.02	3 266.19	1 637.67	- 0.10	2.31	6.46	15.00
21.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.39	0.78	0.00244	0.0040	2.80	2.80	38.15	3.79	29.69	0.190	2.620	32.31	3 329.48	1 638.96	- 0.14	2.31	6.48	15.00
21.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.40	0.81	0.00272	0.0042	2.91	2.91	38.61	3.80	30.79	0.198	2.818	33.61	3 392.78	1 640.26	- 0.19	2.31	6.49	15.00
21.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.42	0.83	0.00302	0.0043	3.03	3.03	39.07	3.81	31.89	0.205	3.022	34.91	3 456.07	1 641.56	- 0.23	2.31	6.51	15.00
21.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.43	0.86	0.00334	0.0045	3.14	3.14	39.53	3.82	32.99	0.212	3.234	36.22	3 519.37	1 642.87	- 0.27	2.31	6.52	15.00
20.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.45	0.89	0.00369	0.0046	3.26	3.26	40.00	3.82	34.09	0.219	3.454	37.54	3 582.67	1 644.19	- 0.32	2.31	6.53	15.00
20.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.46	0.92	0.00406	0.0048	3.38	3.38	40.47	3.83	35.19	0.226	3.680	38.87	3 645.96	1 645.52	- 0.36	2.31	6.54	15.00
20.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.47	0.95	0.00445	0.0049	3.50	3.50	40.95	3.84	36.29	0.234	3.914	40.20	3 709.26	1 646.85	- 0.40	2.31	6.56	15.00
20.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.49	0.98	0.00486	0.0051	3.62	3.62	41.43	3.84	37.38	0.241	4.154	41.54	3 772.55	1 648.19	- 0.43	2.31	6.57	15.00
20.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.50	1.01	0.00531	0.0052	3.74	3.74	41.91	3.85	38.48	0.248	4.402	42.89	3 835.85	1 649.54	- 0.47	2.31	6.58	15.00
20.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.52	1.04	0.00577	0.0054	3.86	3.86	42.39	3.86	39.58	0.255	4.658	44.24	3 899.15	1 650.89	- 0.51	2.31	6.59	15.00
20.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.53	1.06	0.00627	0.0055	3.98	3.98	42.88	3.87	40.68	0.262	4.920	45.60	3 962.44	1 652.25	- 0.55	2.31	6.60	15.00
20.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.55	1.09	0.00679	0.0057	4.10	4.10	43.37	3.87	41.78	0.270	5.189	46.97	4 025.74	1 653.62	- 0.58	2.31	6.61	15.00
20.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.56	1.12	0.00734	0.0058	4.23	4.23	43.87	3.88	42.88	0.277	5.466	48.35	4 089.04	1 655.00	- 0.62	2.31	6.62	15.00
20.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.58	1.15	0.00792	0.0060	4.35	4.35	44.37	3.89	43.98	0.284	5.750	49.73	4 152.33	1 656.38	- 0.65	2.31	6.62	15.00
19.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.59	1.18	0.00853	0.0061	4.48	4.48	44.87	3.89	45.08	0.291	6.041	51.12	4 215.63	1 657.77	- 0.69	2.31	6.63	15.00
19.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.60	1.21	0.00917	0.0063	4.61	4.60	45.38	3.90	46.18	0.298	6.339	52.52	4 278.92	1 659.17	- 0.72	2.31	6.64	15.00
19.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.62	1.24	0.00984	0.0064	4.73	4.73	45.88	3.91	47.28	0.305	6.645	53.93	4 342.22	1 660.58	- 0.75	2.31	6.65	15.00
19.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.63	1.27	0.01054	0.0066	4.86	4.86	46.40	3.92	48.38	0.313	6.958	55.34	4 405.52	1 661.99	- 0.78	2.31	6.65	15.00
19.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.65	1.29	0.01128	0.0067	4.99	4.99	46.91	3.92	49.48	0.320	7.277	56.76	4 468.81	1 663.41	- 0.82	2.31	6.66	15.00
19.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.66	1.32	0.01205	0.0069	5.12	5.11	47.43	3.93	50.58	0.327	7.604	58.18	4 532.11	1 664.83	- 0.85	2.31	6.67	15.00
19.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.50	0.68	1.35	0.01285	0.0070	5.25	5.25	47.95	3.94	51.68	0.334	7.939	59.62						

Annexe 7

Caractéristique d'un fût cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.6m$)

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B	$v(z)$ (m)	l (m ⁴)	b_0 (m)	$h(z)$ (m)	$Br(z)$	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	$I(z)$ (m ⁴)	$V(z)$	Pds du fût (N)	Pds paretele de raidisseur (N)	Pds cumulée (N)	Pds totale (N)	Moment $M(z)$	$N(z)$	σ_{min}	σ_{adm}	σ_{max}	σ_c adm	
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	-	-	-	-	-	-	26.96	3.60	-	-	-	1 620.49	1 606.65	1.49	2.31	5.82	15.00		
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.01	0.03	0.0000001	0.0002	0.10	0.10	27.35	3.61	1.10	0.0037	0.0037	1.10	1 683.78	1 607.75	1.41	2.31	5.85	15.00	
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.02	0.06	0.0000008	0.0004	0.19	0.19	27.74	3.61	2.20	0.0111	0.0149	2.21	1 747.08	1 608.86	1.33	2.31	5.88	15.00	
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.04	0.09	0.0000026	0.0007	0.29	0.29	28.13	3.62	3.30	0.0186	0.0334	3.33	1 810.38	1 609.98	1.26	2.31	5.92	15.00	
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.05	0.12	0.00001	0.0009	0.39	0.39	28.52	3.62	4.40	0.0260	0.0594	4.46	1 873.67	1 611.11	1.19	2.31	5.95	15.00	
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.06	0.15	0.00001	0.0011	0.49	0.49	28.92	3.63	5.50	0.0334	0.0928	5.59	1 936.97	1 612.24	1.11	2.31	5.98	15.00	
23.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.07	0.18	0.00002	0.0013	0.59	0.59	29.32	3.64	6.60	0.0408	0.1337	6.73	2 000.26	1 613.38	1.04	2.31	6.01	15.00	
23.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.09	0.21	0.00003	0.0016	0.69	0.69	29.72	3.64	7.70	0.0483	0.1819	7.88	2 063.56	1 614.53	0.98	2.31	6.03	15.00	
23.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.10	0.24	0.00005	0.0018	0.79	0.79	30.13	3.65	8.80	0.0557	0.2376	9.03	2 126.86	1 615.68	0.91	2.31	6.06	15.00	
23.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.11	0.27	0.00007	0.0020	0.89	0.90	30.54	3.66	9.90	0.0631	0.3007	10.20	2 190.15	1 616.85	0.84	2.31	6.09	15.00	
23.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.12	0.30	0.00009	0.0022	1.00	1.00	30.95	3.66	11.00	0.0705	0.3713	11.37	2 253.45	1 618.02	0.78	2.31	6.11	15.00	
22.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.14	0.33	0.00013	0.0025	1.10	1.10	31.36	3.67	12.10	0.0780	0.4492	12.54	2 316.74	1 619.19	0.72	2.31	6.14	15.00	
22.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.15	0.36	0.00016	0.0027	1.20	1.21	31.78	3.67	13.19	0.0854	0.5346	13.73	2 380.04	1 620.38	0.66	2.31	6.16	15.00	
22.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.16	0.39	0.00021	0.0029	1.31	1.31	32.20	3.68	14.29	0.0928	0.6274	14.92	2 443.34	1 621.57	0.60	2.31	6.18	15.00	
22.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.17	0.42	0.00026	0.0031	1.41	1.42	32.62	3.69	15.39	0.1002	0.7277	16.12	2 506.63	1 622.77	0.54	2.31	6.20	15.00	
22.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.19	0.45	0.00032	0.0033	1.52	1.52	33.04	3.69	16.49	0.1077	0.8353	17.33	2 569.93	1 623.98	0.48	2.31	6.22	15.00	
22.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.20	0.48	0.00039	0.0036	1.63	1.63	33.47	3.70	17.59	0.1151	0.9504	18.54	2 633.22	1 625.19	0.42	2.31	6.24	15.00	
22.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.21	0.50	0.00047	0.0038	1.73	1.74	33.90	3.71	18.69	0.1225	1.0729	19.77	2 696.52	1 626.42	0.37	2.31	6.26	15.00	
22.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.22	0.53	0.00055	0.0040	1.84	1.84	34.33	3.71	19.79	0.1299	1.2029	20.99	2 759.82	1 627.64	0.32	2.31	6.28	15.00	
22.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.24	0.56	0.00065	0.0042	1.95	1.95	34.77	3.72	20.89	0.1374	1.3402	22.23	2 823.11	1 628.88	0.26	2.31	6.30	15.00	
22.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.25	0.59	0.00076	0.0045	2.06	2.06	35.21	3.72	21.99	0.1448	1.4850	23.48	2 886.41	1 630.13	0.21	2.31	6.32	15.00	
21.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.26	0.62	0.00088	0.0047	2.17	2.17	35.65	3.73	23.09	0.1522	1.6372	24.73	2 949.71	1 631.38	0.16	2.31	6.33	15.00	
21.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.27	0.65	0.00101	0.0049	2.28	2.29	36.09	3.74	24.19	0.1596	1.7969	25.99	3 013.00	1 632.64	0.11	2.31	6.35	15.00	
21.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.28	0.68	0.00115	0.0051	2.39	2.40	36.54	3.74	25.29	0.1671	1.9639	27.25	3 076.30	1 633.90	0.06	2.31	6.37	15.00	
21.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.30	0.71	0.00131	0.0053	2.51	2.51	36.99	3.75	26.39	0.1745	2.1384	28.53	3 139.59	1 635.18	0.02	2.31	6.38	15.00	
21.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.31	0.74	0.00148	0.0056	2.62	2.62	37.44	3.75	27.49	0.1819	2.3203	29.81	3 202.89	1 636.46	-	0.03	2.31	6.40	15.00
21.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.32	0.77	0.00167	0.0058	2.73	2.74	37.90	3.76	28.59	0.1893	2.5097	31.10	3 266.19	1 637.75	-	0.07	2.31	6.41	15.00
21.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.33	0.80	0.00187	0.0060	2.85	2.85	38.36	3.77	29.69	0.1968	2.7064	32.39	3 329.48	1 639.04	-	0.12	2.31	6.42	15.00
21.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.35	0.83	0.00208	0.0062	2.96	2.97	38.82	3.77	30.79	0.2042	2.9106	33.70	3 392.78	1 640.35	-	0.16	2.31	6.43	15.00
21.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.36	0.86	0.00231	0.0065	3.08	3.08	39.28	3.78	31.89	0.2116	3.1222	35.01	3 456.07	1 641.66	-	0.20	2.31	6.45	15.00
21.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.37	0.89	0.00256	0.0067	3.19	3.20	39.75	3.79	32.99	0.2190	3.3413	36.33	3 519.37	1 642.98	-	0.25	2.31	6.46	15.00
20.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.38	0.92	0.00282	0.0069	3.31	3.32	40.22	3.79	34.09	0.2265	3.5677	37.65	3 582.67	1 644.30	-	0.29	2.31	6.47	15.00
20.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.40	0.95	0.00310	0.0071	3.43	3.43	40.69	3.80	35.19	0.2339	3.8016	38.99	3 645.96	1 645.64	-	0.33	2.31	6.48	15.00
20.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.41	0.98	0.00341	0.0074	3.55	3.55	41.17	3.80	36.29	0.2413	4.0429	40.33	3 709.26	1 646.98	-	0.37	2.31	6.49	15.00
20.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.42	1.01	0.00372	0.0076	3.67	3.67	41.64	3.81	37.38	0.2487	4.2917	41.68	3 772.55	1 648.33	-	0.40	2.31	6.50	15.00
20.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.43	1.04	0.00406	0.0078	3.79	3.79	42.13	3.82	38.48	0.2562	4.5478	43.03	3 835.85	1 649.68	-	0.44	2.31	6.51	15.00
20.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.45	1.07	0.00442	0.0080	3.91	3.91	42.61	3.82	39.58	0.2636	4.8114	44.40	3 899.15	1 651.05	-	0.48	2.31	6.52	15.00
20.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.46	1.10	0.00480	0.0082	4.03	4.04	43.10	3.83	40.68	0.2710	5.0824	45.77	3 962.44	1 652.42	-	0.51	2.31	6.53	15.00
20.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.47	1.13	0.00520	0.0085	4.16	4.16	43.59	3.84	41.78	0.2784	5.3609	47.14	4 025.74	1 653.79	-	0.55	2.31	6.53	15.00
20.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.48	1.16	0.00562	0.0087	4.28	4.28	44.08	3.84	42.88	0.2859	5.6467	48.53	4 089.04	1 655.18	-	0.58	2.31	6.54	15.00
20.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.60	0.50	1.19	0.00606	0.0089	4.40	4.41	44.58	3.85	43.98	0.2933	5.9400	49.92	4 152.33	1 656.57	-	0.62	2.31	6.55	15.00

Annexe 8

Caractéristique d'un fût cylindrique avec raidisseurs ($b_0=0.7m$)

Cote z	Rayon inter (m)	Rayon ext (m)	Section B	v(z) (m)	II (m ⁴)	b0 (m)	h(z) (m)	Br(z)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	I(z) (m ⁴)	V(z)	Pds du fût (N)	Pds pariétele de raidisseur (N)	Pds cumulée (N)	Pds totale (N)	Moment M(z)	N(z)	cm in	ct adm	cmax	
24.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	-	-	-	-	-	26.96	3.60	-	-	-	-	1 620.49	1 606.65	1.49	2.31	5.82	
23.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.01	0.03	0.0000001	0.0003	0.10	27.36	3.61	1.10	0.0038	0.0038	1.10	1 683.78	1 607.75	1.41	2.31	5.85	
23.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.02	0.06	0.0000006	0.0006	0.20	27.76	3.61	2.20	0.0115	0.0153	2.21	1 747.08	1 608.86	1.34	2.31	5.88	
23.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.03	0.09	0.0000020	0.0009	0.30	28.16	3.62	3.30	0.0191	0.0344	3.33	1 810.38	1 609.98	1.26	2.31	5.91	
23.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.04	0.12	0.00000	0.0012	0.40	28.57	3.62	4.40	0.0267	0.0611	4.46	1 873.67	1 611.11	1.19	2.31	5.94	
23.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.05	0.15	0.00001	0.0016	0.50	28.98	3.63	5.50	0.0344	0.0955	5.59	1 936.97	1 612.24	1.12	2.31	5.97	
23.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.07	0.18	0.00002	0.0019	0.61	29.39	3.63	6.60	0.0420	0.1376	6.73	2 000.26	1 613.38	1.05	2.31	5.99	
23.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.08	0.21	0.00003	0.0022	0.71	29.80	3.64	7.70	0.0497	0.1872	7.88	2 063.56	1 614.53	0.98	2.31	6.02	
23.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.09	0.24	0.00004	0.0025	0.81	30.21	3.64	8.80	0.0573	0.2445	9.04	2 126.86	1 615.69	0.92	2.31	6.05	
23.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.10	0.28	0.00006	0.0028	0.92	30.63	3.65	9.90	0.0650	0.3095	10.21	2 190.15	1 616.86	0.85	2.31	6.07	
23.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.11	0.31	0.00008	0.0031	1.02	31.05	3.65	11.00	0.0726	0.3821	11.38	2 253.45	1 618.03	0.79	2.31	6.09	
22.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.12	0.34	0.00010	0.0034	1.13	31.47	3.66	12.10	0.0802	0.4623	12.56	2 316.74	1 619.21	0.73	2.31	6.11	
22.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.13	0.37	0.00013	0.0037	1.23	31.90	3.67	13.19	0.0879	0.5502	13.74	2 380.04	1 620.39	0.67	2.31	6.14	
22.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.14	0.40	0.00017	0.0041	1.34	32.32	3.67	14.29	0.0955	0.6457	14.94	2 443.34	1 621.59	0.61	2.31	6.16	
22.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.15	0.43	0.00021	0.0044	1.45	32.75	3.68	15.39	0.1032	0.7489	16.14	2 506.63	1 622.79	0.55	2.31	6.18	
22.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.16	0.46	0.00026	0.0047	1.55	33.19	3.68	16.49	0.1108	0.8597	17.35	2 569.93	1 624.00	0.49	2.31	6.20	
22.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.17	0.49	0.00031	0.0050	1.66	33.62	3.69	17.59	0.1184	0.9781	18.57	2 633.22	1 625.22	0.44	2.31	6.21	
22.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.19	0.52	0.00037	0.0053	1.77	34.06	3.69	18.69	0.1261	1.1042	19.80	2 696.52	1 626.45	0.38	2.31	6.23	
22.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.20	0.55	0.00044	0.0056	1.88	34.50	3.70	19.79	0.1337	1.2380	21.03	2 759.82	1 627.68	0.33	2.31	6.25	
22.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.21	0.58	0.00052	0.0059	1.99	34.94	3.70	20.89	0.1414	1.3793	22.27	2 823.11	1 628.92	0.28	2.31	6.26	
22.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.22	0.61	0.00061	0.0062	2.10	35.39	3.71	21.99	0.1490	1.5283	23.52	2 886.41	1 630.17	0.23	2.31	6.28	
21.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.23	0.64	0.00070	0.0066	2.22	35.83	3.71	23.09	0.1567	1.6850	24.78	2 949.71	1 631.43	0.18	2.31	6.29	
21.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.24	0.67	0.00081	0.0069	2.33	36.28	3.72	24.19	0.1643	1.8493	26.04	3 013.00	1 632.69	0.13	2.31	6.31	
21.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.25	0.70	0.00092	0.0072	2.44	36.74	3.73	25.29	0.1719	2.0212	27.31	3 076.30	1 633.96	0.08	2.31	6.32	
21.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.26	0.73	0.00105	0.0075	2.55	37.19	3.73	26.39	0.1796	2.2008	28.59	3 139.59	1 635.24	0.04	2.31	6.34	
21.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.27	0.76	0.00119	0.0078	2.67	37.65	3.74	27.49	0.1872	2.3880	29.88	3 202.89	1 636.53	-	0.01	2.31	6.35
21.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.28	0.79	0.00133	0.0081	2.78	38.11	3.74	28.59	0.1949	2.5829	31.17	3 266.19	1 637.82	-	0.05	2.31	6.36
21.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.29	0.83	0.00149	0.0084	2.90	38.57	3.75	29.69	0.2025	2.7854	32.47	3 329.48	1 639.12	-	0.10	2.31	6.37
21.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.31	0.86	0.00167	0.0087	3.02	39.04	3.75	30.79	0.2101	2.9955	33.78	3 392.78	1 640.43	-	0.14	2.31	6.38
21.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.32	0.89	0.00185	0.0090	3.13	39.50	3.76	31.89	0.2178	3.2133	35.10	3 456.07	1 641.75	-	0.18	2.31	6.39
21.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.33	0.92	0.00205	0.0094	3.25	39.97	3.76	32.99	0.2254	3.4388	36.43	3 519.37	1 643.08	-	0.22	2.31	6.40
20.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.34	0.95	0.00226	0.0097	3.37	40.45	3.77	34.09	0.2331	3.6718	37.76	3 582.67	1 644.41	-	0.26	2.31	6.41
20.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.35	0.98	0.00249	0.0100	3.49	40.92	3.77	35.19	0.2407	3.9125	39.10	3 645.96	1 645.75	-	0.30	2.31	6.42
20.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.36	1.01	0.00273	0.0103	3.61	41.40	3.78	36.29	0.2484	4.1609	40.45	3 709.26	1 647.10	-	0.34	2.31	6.43
20.60	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.37	1.04	0.00298	0.0106	3.73	41.88	3.79	37.38	0.2560	4.4169	41.80	3 772.55	1 648.45	-	0.38	2.31	6.44
20.50	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.38	1.07	0.00325	0.0109	3.85	42.37	3.79	38.48	0.2636	4.6805	43.17	3 835.85	1 649.82	-	0.42	2.31	6.45
20.40	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.39	1.10	0.00354	0.0112	3.97	42.85	3.80	39.58	0.2713	4.9518	44.54	3 899.15	1 651.19	-	0.45	2.31	6.46
20.30	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.40	1.13	0.00384	0.0115	4.09	43.34	3.80	40.68	0.2789	5.2307	45.91	3 962.44	1 652.56	-	0.49	2.31	6.46
20.20	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.41	1.16	0.00416	0.0119	4.21	43.83	3.81	41.78	0.2866	5.5173	47.30	4 025.74	1 653.95	-	0.52	2.31	6.47
20.10	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.43	1.19	0.00450	0.0122	4.34	44.33	3.81	42.88	0.2942	5.8115	48.69	4 089.04	1 655.34	-	0.56	2.31	6.48
20.00	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.44	1.22	0.00486	0.0125	4.46	44.82	3.82	43.98	0.3018	6.1133	50.10	4 152.33	1 656.75	-	0.59	2.31	6.48
19.90	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.45	1.25	0.00523	0.0128	4.59	45.32	3.82	45.08	0.3095	6.4228	51.50	4 215.63	1 658.15	-	0.62	2.31	6.49
19.80	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.46	1.28	0.00562	0.0131	4.71	45.82	3.83	46.18	0.3171	6.7400	52.92	4 278.92	1 659.57	-	0.65	2.31	6.50
19.70	3.40	3.60	4.40	3.60	26.96	0.70	0.47	1.31	0.00603	0.0134	4.84	46.33	3.83	47.28	0.3248	7.0647	54.35	4 342.22	1 661.00	-	0.69	2.31	6.50

Annexe 9

Tableau récapitulatif pour le choix des barres

D	8	10	12	14	16	20	25	32	40
1	0,50	0,79	1,13	1,54	2,01	3,14	4,91	8,04	12,56
2	1,00	1,57	2,26	3,08	4,02	6,28	9,81	16,08	25,12
3	1,51	2,36	3,39	4,62	6,03	9,42	14,72	24,12	37,68
4	2,01	3,14	4,52	6,15	8,04	12,56	19,63	32,15	50,24
5	2,51	3,93	5,65	7,69	10,05	15,70	24,53	40,19	62,80
6	3,01	4,71	6,78	9,23	12,06	18,84	29,44	48,23	75,36
7	3,52	5,50	7,91	10,77	14,07	21,98	34,34	56,27	87,92
8	4,02	6,28	9,04	12,31	16,08	25,12	39,25	64,31	100,48
9	4,52	7,07	10,17	13,85	18,09	28,26	44,16	72,35	113,04
10	5,02	7,85	11,30	15,39	20,10	31,40	49,06	80,38	125,60
11	5,53	8,64	12,43	16,92	22,11	34,54	53,97	88,42	138,16
12	6,03	9,42	13,56	18,46	24,12	37,68	58,88	96,46	150,72
13	6,53	10,21	14,70	20,00	26,12	40,82	63,78	104,50	163,28
14	7,03	10,99	15,83	21,54	28,13	43,96	68,69	112,54	175,84
15	7,54	11,78	16,96	23,08	30,14	47,10	73,59	120,58	188,40
16	8,04	12,56	18,09	24,62	32,15	50,24	78,50	128,61	200,96
17	8,54	13,35	19,22	26,16	34,16	53,38	83,41	136,65	213,52
18	9,04	14,13	20,35	27,69	36,17	56,52	88,31	144,69	226,08
19	9,55	14,92	21,48	29,23	38,18	59,66	93,22	152,73	238,64
20	10,05	15,70	22,61	30,77	40,19	62,80	98,13	160,77	251,20
21	10,55	16,49	23,74	32,31	42,20	65,94	103,03	168,81	263,76
22	11,05	17,27	24,87	33,85	44,21	69,08	107,94	176,84	276,32
23	11,56	18,06	26,00	35,39	46,22	72,22	112,84	184,88	288,88
24	12,06	18,84	27,13	36,93	48,23	75,36	117,75	192,92	301,44
25	12,56	19,63	28,26	38,47	50,24	78,50	122,66	200,96	314,00
26	13,06	20,41	29,39	40,00	52,25	81,64	127,56	209,00	326,56
27	13,56	21,20	30,52	41,54	54,26	84,78	132,47	217,04	339,12
28	14,07	21,98	31,65	43,08	56,27	87,92	137,38	225,08	351,68
29	14,57	22,77	32,78	44,62	58,28	91,06	142,28	233,11	364,24
30	15,07	23,55	33,91	46,16	60,29	94,20	147,19	241,15	376,80