

# Chapitre 11 : Etude de la fondation

## **Généralité :**

### **11.1 Définitions :**

Les fondations d'une construction sont constituées par les parties de l'ouvrage qui sont en contact avec le sol auquel elles transmettent les charges de la superstructure, elles constituent donc la partie essentielle de l'ouvrage presque de leur bonne conception et réalisation découle la bonne tenue de l'ensemble

Les éléments de fondation transmettent les charges au sol soit directement (cas des semelles reposant sur le sol ou cas de radiers) soit par l'intermédiaire d'autres organes (cas semelle sur pieux par exemple)

### **11.2 Stabilité des fondations :**

Les massifs de fondation doivent être en équilibre sous l'action des sollicitations dues à la superstructure qui sont :

- des forces verticales ascendantes ou descendantes
- des forces horizontales
- des moments de flexion ou de torsion

Des sollicitations du au sol qui sont :

- des forces verticales ascendantes ou descendantes
- des forces obliques (adhérence, remblai ...etc.).

Les massifs de fondation doivent être stables c'est-à-dire qu'il ne doivent donner lieu à de tassement que si ceux-ci permettent la tenue de l'ouvrage, des tassements uniformes sont admissibles dans certaines limites, mais des tassements différentiels sont rarement compatibles avec la tenue de l'ouvrage il est donc nécessaire d'adapter le type et la structure des fondations à la nature du sol qui va supporter l'ouvrage, l'étude géologique géotechnique a pour objectif de préciser le type, le nombre et la dimension des fondations nécessaires pour fonder un ouvrage donné sur un sol donné

### **11.3 Choix du type de fondation :**

Notre construction n'est pas soumise à des charges présentant d'importante dissymétrie qui pourrait provoquer des tassements différentiels et d'autre part la structure est fortement chargée Facilement soumise à des moments de renversement donc il a été vu

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

intéressant de procéder à l'exécution d'un radier générale ancré à 1 m sur un sol de taux de travail qui vaut 3 bars.

L'angle de frottement interne  $\rho = 10^\circ$

$$N_a = 1,00$$

$$N_q = 2,49$$

$$N_c = 8,45$$

Cohésion du sol  $c = 0,5$  bars

Densité humide  $\delta = 1800$  kg/m<sup>3</sup>

### 11.3 Dimensionnement du radier :

#### 11.3.1 Epaisseur Du Radier Général $H_t$ :

L'épaisseur  $h_t$  est déterminée par la condition de non poinçonnement.

$$Q_u \leq 0,045 U_c \cdot h_t \cdot f_{c28}$$

$Q_u$  : charge calcul à l'ELU.

$U_c$  : c'est le périmètre de l'air de la tour.

$$U_c = h (u_1 + u_2)$$

$$u_1 = D_m - h_0$$

$$u_2 = D_m + h_0$$

$$U_c = 2h \cdot D_m$$

$$D_m = \frac{D_{ext} + D_{int}}{2}$$

$$U_c = 64,16 \text{ m}$$

$$D_m = 8,02 \text{ m}$$

$$Q_u = 1,35G + 1,5Q$$

$$Q_u = 8141574,87 \text{ kg}$$

$$h_t \geq \frac{Q_u}{0,045 U_c \cdot f_{c28}}$$

$$h_t \geq \frac{8141574,87}{0,045 \times 64 \times 16,30 \times 10^5}$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

$$h_t \geq 0,93 \text{ m}$$

⇒ On prend  $h_0 = 3 \text{ m}$

### 11.3.2 Diamètre de radier D :

Le radier est sollicité à la base par un effort normal N et un moment fléchissant M.

Pour éviter le soulèvement de la fondation on élimine la contrainte de traction dans le sol donc :

$$\sigma_{min} \geq 0$$

Le diagramme des contraintes dans le sol est soit trapézoïdale, soit triangulaire.

Le diamètre doit vérifier  $\sigma_{min} \geq 0$  c'est-à-dire  $\frac{N}{S} - \frac{M}{W} \geq 0$ .

#### 11.3.2.1 Poids de la fondation en béton $N_f$ :

$$N_f = \frac{h}{4} \cdot D^2 \cdot h_t \cdot \delta_b$$

$$N_f = \frac{4}{4} \cdot D^2 \cdot 0,93 \cdot 2500$$

$$N_f = 2325 D^2$$

#### 11.3.2.2 Poids du remblai (en terre $\delta_r = 1800 \text{ kg/m}^3$ ) :

$$N_r = \frac{h}{4} D_i^2 (Z - h_t) \delta_r + \frac{h}{4} (D^2 - D_e^2) (Z - h_t) \delta_r$$

Avec (Z : profondeur d'ancrage de la fondation  $z=3$ )

$$N_r = \frac{4}{4} (7,86)^2 (3 - 0,93) 1800 + \frac{4}{4} (D^2 - 8,18^2) (3 - 0,93) 1800$$

$$N_r = 3726 D^2 - 19124,81$$

Donc l'ensemble des efforts normaux à la base du radier est :

$$N = N_f + N_r + Q_u$$

$$N = 3726 D^2 - 19124,81 + 2325 D^2 + 8141754,87$$

$$N = 6051 D^2 + 8122450,06$$

Le radier est sollicité à la base par un moment  $\vec{M}$

$$M = m + T \cdot h_t$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

Avec  $m$  : moment max a la base de la tour.

$$m = 348027 \text{ kg.m}$$

$T$  = effort tranchant max a la base de la tour.

$$T = 18720 \text{ kg}$$

$$h_t = 0,93 \text{ m}$$

On aura donc  $M = 365436,6 \text{ kg.m}$

On a vérifié le radier a la base.

$$\frac{N}{S} - \frac{M}{W} \geq 0(1)$$

Avec  $w$  : module d'inertie de la surface : la base du radier.

$$W = \frac{hD^3}{32} = 0,125 D^3$$

$S$  : l'aire de la surface a la base du radier.

$$S = \frac{hD^2}{64}$$

$$S = 0,0625 D^2$$

$$\frac{N}{S} - \frac{M}{W} \geq 0$$

$$\frac{6051D^2 + 8122450,06}{0,0625D^2} - \frac{365436,6}{0,125D^3} \geq 0$$

$$D^3 + 1342,33D - 30,19 \geq 0$$

$$D = 30,19$$

Par suite :

$$N_f = 3726(30,19)^2 = 3396010,90 \text{ kg}$$

$$N_r = 3726(30,19)^2 - 19124,81 = 3376886,09 \text{ kg}$$

$$S = 0,0625(30,19)^2 = 56,96 \text{ m}^2$$

$$W = 0,125(30,19)^3 = 3439,53 \text{ m}^3$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### 11.4 Calcul de la capacité portante du sol :

D'après M<sup>R</sup> TERZAGUI, la contrainte admissible du sol pour une fondation circulaire soit à vérifier

$$\bar{\sigma}_s \leq \sigma_{sol}$$

$$\bar{\sigma}_s = \delta_r z + \frac{0,6 \cdot \delta_r R N_\delta + \delta_r \cdot z (N_q - 1) + 1,3 \cdot C N_c}{3}$$

$$\bar{\sigma}_s = 1800 \cdot 3 + \frac{0,6(1800) \cdot 8,18,1 + 1800 \cdot 3(2,49 - 1) + 1,3 \cdot 0,5 \cdot 8,45}{3}$$

$$\bar{\sigma}_s = 11028,63 \text{ kg/m}^2$$

$$\bar{\sigma}_s = 1,10 \text{ kg/cm}^2 \leq 3 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{vérifié.}$$

### 11.5 Vérification des contraintes dans le sol :

Les contraintes sont données par :

$$\sigma_{max,min} = \frac{N}{S} \pm \frac{M}{W}$$

$$\sigma_{max,min} = \frac{N_{max} + \alpha(N_f + N_r)}{S} \pm \frac{M_0 + T_0 h_t}{W}$$

Avec  $N_0$  : effort normal de la superstructure à la surface du sol.

$N_f$  et  $N_r$  : représentent respectivement les poids de la fondation et de remblais

$(N_f + N_r) = 6772896,99$  est majoré par le coefficient  $\alpha = 1,35 ; 0,8 ; 1$  selon les combinaisons :

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### 11.6 Combinaison de charge :

#### 11.6.1 Cuve pleine :

Combinaison	N <sub>MAX</sub>	M <sub>MAX</sub>	T <sub>MAX</sub>	σ <sub>MAX</sub>	σ <sub>MIN</sub>
G+P+V <sub>n</sub>	6027789,94	49906952,78	6101094,47	240890,62	210290,95
G+P+E	6027789,94	47589373,66	2234551,99	358077,55	329197,15
G+P+E <sub>h</sub>	6027789,94	348027	18720	224837,40	224624,91
0,8G+E	4800587,59	47589373,66	2234551,99	215390,12	186509,72
0,8G+E <sub>h</sub>	4800587,59	348027	18720	201056,16	200843,68
1,35G+1,5Q+1,2V <sub>n</sub>	8141574,87	59888343,34	7321313,36	322849,67	284066,95
1,35G+1,5P	8141574,87	0,00	0,00	303458,31	303458,31
G+P	6027789,94	0,00	0,00	224731,16	224731,16
G+P+V <sub>n</sub>	6027789,94	50189835,87	6135676,75	240982,22	208480,09
1,35G+1,5P+1,2V <sub>e</sub>	8141574,87	60227803,04	7362812,1	322959,59	283957,04

$$\sigma_{max,min} = \frac{N_{max} + \alpha(6772896,99)}{56,96} \pm \frac{M_0 + T_0}{3439,53}$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### 11.6.2 Cuve vide :

Combinaison	N <sub>MAX</sub>	M <sub>MAX</sub>	T <sub>MAX</sub>	σ <sub>MAX</sub>	σ <sub>MIN</sub>
G+P+V <sub>n</sub>	982789,94	7710320,53	942581,97	138656,77	133663,69
G+P+E	982789,94	7641281,93	365379,88	138480,99	133839,23
0,8G+E	764586,89	7641281,93	365379,88	110868,93	86233,77
1,35G+1,5Q+1,2V <sub>n</sub>	1330824,874	9252384,63	1131098,36	180891,71	180891,71
1,35G+1,5P	1330824,874	0,00	0,00	183887,56	183887,56
G+P	982789,94	0,00	0,00	136160,23	136160,23
G+P+V <sub>e</sub>	982789,94	7993203,62	977164,25	138748,37	133572,09
1,35G+1,5P+1,2V <sub>e</sub>	1330824,874	9591844,34	1172597,1	186993,32	180757,93

$$\sigma_{max,min} = \frac{N_{max} + \alpha(6772896,99)}{56,96} \pm \frac{M_0 + T_0}{3439,53}$$

#### Vérification :

Pour la sollicitation 1,35G+1,5P on a  $3,03 \text{ kg/m}^2 < 3,99 \text{ kg/m}^2$

Pour les sollicitation ou  $\sigma_{min} > 0$  , on aura dans ce cas une répartition trapézoïdale des contraintes

La contrainte exercée sur le sol est :

$$\sigma_1 = \frac{3\sigma_{max} + \sigma_{min}}{4} \leq 1,33 \sigma_s \text{ (dans le cas générale).}$$

$$\sigma_1 = \frac{3\sigma_{max} + \sigma_{min}}{4} \leq \sigma_s \text{ (si le moment M est du a un vent dominant la majorité du temps).}$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

**Calcul  $\sigma_s$**  : on prendra le cas le plus défavorable quand la cuve est pleine.

Combinaison	$\sigma_{MAX}(\text{kg/m}^2)$	$\sigma_{MIN}(\text{kg/m}^2)$	$\sigma_s(\text{kg/m}^2)$	$\bar{\sigma}_s(\text{kg/m}^2)$	Vérification
<b>G+P+V<sub>n</sub></b>	2,4	2,10	2,32	3	Vérifie
<b>G+P+E</b>	3,5	3,2	3,42	3,99	Vérifie
<b>0,8G+E</b>	2,1	1,86	2,04	3,99	Vérifie
<b>1,35G+1,5Q+1,2V<sub>n</sub></b>	3,2	2,8	3,1	3	Vérifie
<b>1,35G+1,5P</b>	3,03	3,03	3,03	3,99	Vérifie
<b>G+P</b>	2,2	2,2	2,2	3,99	Vérifie
<b>G+P+V<sub>e</sub></b>	2,4	2,08	2,32	3	Vérifie
<b>1,35G+1,5P+1,2V<sub>e</sub></b>	3,22	2,83	3,12	3	Vérifie

Pour les sollicitations ou  $\sigma_{min} \leq 0$  la répartition n'est plus trapézoïdale on adaptera alors un autre schéma statique.

L'équation s'écrit :  $N = \frac{1}{2} \sigma_1 \cdot A$

N : effort de compression =  $N_0 + N_r + N_f$

A : air de la surface de la comprimé

**0,8G+ E<sub>h</sub> : Cuve pleine**

$A = 83,35\% \cdot S = 47,48$

$$\sigma_1 = \frac{2N}{A}$$

$N = N_{max} + N_f + N_r$

$N = 4800587,59 + 3396010,90 + 3376886,09$

$N = 11573484,58$

$\sigma_1 = 4,87 \text{ kg/cm}^2$



## Chapitre 11 : Etude de la fondation

Vérification : on doit vérifier :

$$\sigma'_s = \frac{3}{4} \sigma_1 \leq \bar{\sigma}_s = 3,99 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_s = 3,65 \leq 3,99 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{vérifié}$$

**G+P+E<sub>h</sub>** :

$$A = 92,16\% . S = 52,49$$

$$\sigma_1 = \frac{2N}{A}$$

$$N = N_{\max} + N_f + N_r$$

$$N = 6027789,94 + 3396010,90 + 3376886,09$$

$$N = 12800686,93$$

$$\sigma_1 = 4,87 \text{ kg/cm}^2$$

Vérification : on doit vérifier :

$$\sigma'_s = \frac{3}{4} \sigma_1 \leq \bar{\sigma}_s = 3,99 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_s = 3,65 \leq 3,99 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow \text{vérifié}$$

### 11.7 Vérification au renversement de l'ouvrage :

Pour cela il faut vérifier que :

$$\frac{M_{\text{stab}}}{M_{\text{renv}}} \geq F_s = 2$$

$M_{\text{stab}}$  : moment stabilisant de l'ouvrage.

$M_{\text{renv}}$  : moment de renversement de l'ouvrage.

$F_s$  : coefficient de sécurité

**Calcul de  $M_{\text{stab}}$  :**

$$M_{\text{stab}} = \frac{P \cdot D}{2}$$

P : poids de l'ouvrage g compris les fondations.

$$P = N_{\max} + N_f + N_r$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### 11.7.1 Cuve pleine (G+P+E<sub>h</sub>) :

$$P = 12800686,93 \text{ kg}$$

$$D = 30,19 \text{ m}$$

$$M_{\text{stab}} = \frac{P \cdot D}{2}$$

$$M_{\text{stab}} = \frac{12800686 \times 30,19}{2}$$

$$M_{\text{stab}} = 193226369 \text{ kg.m}$$

### 11.7.2 Cuve vide (G+P+E) :

$$P = 982789,94 + 3396010,90 + 3376886,09$$

$$D = 30,19 \text{ m}$$

$$P = 7755686,93 \text{ kg}$$

$$M_{\text{stab}} = \frac{P \cdot D}{2} = 117072094,2 \text{ kg.m}$$

### 11.8 Calcul du moment de renversement $M_{\text{renv}}$ :

$$M_{\text{renv}} = M_0 + T_0 \cdot h_t$$

$M_0$  et  $T_0$  : effort provoqué par l'effet hydrodynamique a la base du fut (pour la cuve vide c'est l'effet du séisme qui provoque ces efforts).

#### 11.8.1 Cuve pleine :

$$M_{\text{renv}} = M_{\text{rp}} = 348027 + 0,93 \times 18720$$

$$M_{\text{renv}} = M_{\text{rp}} = 365436,6 \text{ kg.m}$$

#### 11.8.2 Cuve vide :

$$M_{\text{renv}} = M_{\text{rv}} = 7641281,93 + 0,93 \times 365379,88$$

$$M_{\text{renv}} = M_{\text{rv}} = 7981085,21 \text{ kg.m}$$

### 11.9 Vérification :

#### 11.9.1 Cuve pleine :

$$\frac{M_{\text{stab}}}{M_{\text{renv}}} = \frac{193226369,2}{365436,6}$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

528,75 > 2 ⇒ vérifié

### 11.9.2 Cuve vide :

$$\frac{M_{stab}}{M_{renv}} = \frac{117072094,2}{7981085,21}$$

14,66 > 2 ⇒ vérifié

Le renversement n'est pas à craindre.

### 11.10 Vérification au glissement :

Soit à vérifier :

Avec :

$F_H$  : résultante des forces horizontales.

$F_V$  : résultante des forces verticales.

$f$  : coefficient de frottement terre-béton.

$f = 0,7$

#### 11.10.1 Cuve pleine :

$F_{HP}$  = effort tranchant = 18720 kg

$F_{Vp}$  = effort normale = 12800686,93 kg

$$\frac{F_{HP}}{F_{Vp}} = \frac{18720}{12800686,93} = 0,001 < 0,7 \Rightarrow \text{vérifié}$$

#### 11.10.2 Cuve vide :

$F_{HV}$  = 365379,88

$F_{VV}$  = 7755686,93

$$\frac{F_{HV}}{F_{VV}} = \frac{365379,88}{7755686,93} = 0,047 < 0,7 \Rightarrow \text{vérifié}$$

La stabilité par rapport au glissement est assurée sans problèmes.

### 11.11 Calcul de la plaque de fondation :

Nous avons opté en guise de fondation pour un radier générale circulaire, ce dernier sera calculer par la théorie des plaques et coques de TIMOSHENKO, le radier sera assimilé a une plaque fonctionnant en plancher renversé uniformément charge par la réaction du sol et simplement appuyé sur le pourtour du fut.

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### 11.12 Sollicitation sur la plaque du radier :

Le radier est soumise a une contrainte uniformément répartie.

$$q = 224837,40 \text{ kg/cm}^2$$

Nous avons décomposé le cas réel en deux cas que nous allons traiter séparément.

Les efforts résultants des deux cas (A) et (B) se superposèrent pour donner les efforts finaux sur lesquels le ferrailage du radier s'effectuera.

#### Calcul de P :

$$\pi \cdot a^2 \cdot q = 2 \cdot \pi \cdot b \cdot P \Rightarrow P = \frac{q a^2}{2 \cdot b}$$

$$P = \frac{224837,40(15,09)^2}{2 \cdot (4,01)} = 6383702,88 \text{ kg/ml}$$

#### Etude de cas A :

Nous désignons par :

$M_r$  : moment fléchissant.

$M_p$  : moment fléchissant tangentiel.

$$\text{Pour : } 0 \leq r \leq b : M_r = M_p = \frac{pb}{4} [(1-\mu)(1-\beta^2) - 2(1+\mu) \ln \beta]$$

Avec :

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{4,01}{15,09} = 0,265$$

$$\rho = \frac{r}{a}$$

$\mu = 0$  a L'ELU.

$\mu = 0,2$  a L'ELS.

Pour :  $a \leq r \leq b$

$$M_r = \frac{pb}{4} [(1-\mu) \beta^2 \left(\frac{1}{\rho^2} - 1\right) - 2(1+\mu) \ln \rho]$$

$$M_p = \frac{pb}{4} [(1-\mu) (2 - \beta^2 \left(\frac{1}{\rho^2} - 1\right)) - 2(1+\mu) \ln \rho]$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### Etude de cas B :

$$M_r = \frac{qa^2}{16} [(3+\mu)(1-\rho^2)]$$

$$M_r = \frac{qa^2}{16} [(3+\mu)(1+3\mu)\rho^2]$$

$$a = 15,09 \text{ m} \quad b = 4,01 \text{ m} \quad \beta = 0,265 \quad q = 224837,40 \text{ kg/m}^2 \quad p = 6383702,88 \text{ kg/ml}$$

Les résultats de calcul sont rangés dans les tableaux récapitulatifs suivant :

### 11.13 Moment radiaux : ELU : $\mu = 0$

#### Cas A :

$$0 \leq r \leq 4,01 : M_r =$$

$$4,01 \leq r \leq 15,09 : M_r =$$

#### Cas B :

$$0 \leq r \leq 15,09 : M_r =$$

		$M_r$ (kg.m/ml)		
$r$ (m)	$\rho = \frac{r}{15,09}$	Cas A	Cas B	Cas (A+B)
$r=0$	0	22948074,28	9599493,22	32547567,5
$r = b = 4,01\text{m}$	0,625	22948074,28	8925368,81	31873443,09
$r = a + \frac{a-b}{2} = 9,55$	0,632	6548917,88	5765225,24	12314143,12
$r = a = 15,09 \text{ m}$	1	0	0	0

### 11.14 Moment tangentiel ELU :

$$\mu = 0$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

Cas A :

$$M_p = 12349907,99 - 449416,27 \frac{1}{\rho^2} - 12799324,26 \ln \rho$$

		$M_p$ (kg.m/ml)		
$r$ (m)	$\rho = \frac{r}{15,09}$	Cas A	Cas B	Cas (A+B)
$r=0$	0	22948074,28	9599493,22	32547567,5
$r = b = 4,01\text{m}$	0,625	22948074,28	9374785,083	32322859,36
$r = a + \frac{a-b}{2} = 9,55$	0,632	5351573,83	8321403,89	13672977,72
$r = a = 15,09 \text{ m}$	1	11900491,72	6399662,15	18300153,87

11.15 Effort tranchant :

		$M_p$ (kg.m/ml)		
$r$ (m)	$\rho = \frac{r}{15,09}$	Cas A	Cas B	Cas (A+B)
$r=0$	0	0	0	0
$r = b = 4,01\text{m}$	0,625	6383702,88	449545,51	5934157,37
$r = a + \frac{a-b}{2} = 9,55$	0,632	2676710,86	1072123,65	1604587,21
$r = a = 15,09 \text{ m}$	1	1691681,26	1696398,183	-7416,92

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

### 11.16 Calcul des moments radiaux : $M_r$ a l'ELS ( $\mu=0,2$ ) :

		$M_r$ (kg.m/ml)		
$r$ (m)	$\rho = \frac{r}{15,09}$	Cas A	Cas B	Cas (A+B)
$r=0$	0	25157590,76	10239459,42	35397050,18
$r= b = 4,01m$	0,625	25157590,76	9520393,38	34677984,14
$r = a + \frac{a-b}{2} = 9,55$	0,632	7498520,34	6149573,58	13648093,92
$r = a = 15,09 m$	1	-89883,26	0	-89883,26

### 11.17 Moment tangentiel $M_p$ a l'ELS ( $\mu=0,2$ ) :

		$M_r$ (kg.m/ml)		
$r$ (m)	$\rho = \frac{r}{15,09}$	Cas A	Cas B	Cas (A+B)
$r=0$	0	25157590,76	10239459,42	35397050,19
$r= b = 4,01m$	0,625	25157590,76	9879926,41	35037517,17
$r = a + \frac{a-b}{2} = 9,55$	0,632	31423709,89	8194516,51	39618226,4
$r = a = 15,09 m$	1	9520393,38	5119729,72	14640123,1

### 11.18 Calcul des armatures : à L'ELU

Armature radial :  $M_{r \max} = 32547567,52$  kg.m/ml

$d_r = 200-5$

$d_r = 195$  cm

$$\mu = \frac{M_r}{bd_r^2 f_{bc}}$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

$$\mu = \frac{325475,6752}{1 \times 1,95^2 \times 17 \times 10^5}$$

$$\mu = 0,0503 < 0,392 \text{ vérifié}$$

$$\alpha = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu})$$

$$\alpha = 0,0645$$

$$Z_r = d(1 - 0,4\alpha)$$

$$Z_r = 189,96 \text{ cm}$$

$$A_r = \frac{M_r}{Z_r \sigma_s} = \frac{325475,64}{189,96 \times 348 \times 10^5}$$

$$A_r = 49,23 \text{ cm}^2 \Rightarrow A_{\text{adopté}} = 50,26 \text{ cm}^2 \text{ soit 4T40 espacement } St = 15 \text{ cm } (\emptyset = 12).$$

**Condition de non fragilité :**

$$A_{\min} \geq 0,23 b \cdot d \cdot \frac{f_{t28}}{f_e}$$

$$A_{\min} \geq 0,23 \cdot 100 \cdot 195 \cdot \frac{2,4}{400}$$

$$A_{\min} \geq 26,91 \text{ cm}^2$$

**Armature tangentielle :**  $M_{P \max} = 10239459,43 \text{ kg.m}$

$$d_p = 200 - 5 - 1,6$$

$$d_p = 193,4 \text{ cm}$$

$$\mu = \frac{M_p}{b d_p^2 f_{bc}}$$

$$\mu = \frac{102394,59}{1 \times 1,934^2 \times 17 \times 10^5}$$

$$\mu = 0,0161 < 0,392 \text{ vérifié}$$

$$\alpha = 1,25(1 - \sqrt{1 - 2\mu})$$

$$\alpha = 0,0202$$

$$Z_p = d(1 - 0,4\alpha)$$

$$Z_p = 191,83 \text{ cm}$$



## Chapitre 11 : Etude de la fondation

$$A_p = \frac{M_r}{Z_r \sigma_s} = \frac{102394,59}{1,91 \times 348 \times 10^5}$$

$A_p = 15,40 \text{ cm}^2 \Rightarrow A_{\text{adopté}} = 24,54 \text{ cm}^2$  soit 5T25 espacement  $St = 15 \text{ cm}$  ( $\emptyset = 12$ ).

**Condition de non fragilité :**

$$A_{\min} \geq 0,23 b \cdot d \cdot \frac{f_{t28}}{f_e}$$

$$A_{\min} \geq 0,23 \cdot 100 \cdot 193 \cdot 4 \cdot \frac{2,4}{400}$$

$$A_{\min} \geq 26,68 \text{ cm}^2$$

**Vérification a L'ELS :**

**Pour les armatures radiales :**

$$M_{\text{ser}} = 35397050,18 \text{ kg.m/ml}$$

Pour la vérification on doit vérifier :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{\text{ser}}}{I} \cdot y \leq \bar{\sigma}_{bc} = 18 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{st} = \frac{M_{\text{ser}}}{I} \cdot (d - y) \leq \bar{\sigma}_{st} = 215 \text{ Mpa}$$

**11.19 Calcul de la contrainte maximale du béton :**

**Calcul y :**

$$\frac{by^2}{2} + nA'_s(y-c) - nA_s(d-y) = 0$$

$$50y^2 + 153,9y - 147010,5 = 0$$

$$y = 47,20 \text{ cm}$$

**Calcul de I :**

$$I = \frac{by^3}{3} + 15A_s(d-y)^2$$

$$I = 19973959,81 \text{ cm}^4$$

**Calcul de  $\sigma_{bc}$  :**

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{\text{ser}}}{I} \cdot y$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

$$\sigma_{bc} = \frac{35397050,18}{19973959,81} \cdot 47,20$$

$$\sigma_{bc} = 83,64 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{bc} = 8,36 \text{ Mpa} < 18 \text{ Mpa} \quad \text{condition vérifiée}$$

$$\sigma_{st} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot (d - y)$$

$$\sigma_{st} = 259,08 \text{ Mpa} > 215 \text{ Mpa} \quad \text{condition non vérifiée}$$

Il faut refaire le calcul à L'ELS :

$$\mu = \frac{30M_{ser}}{bd^2\bar{\sigma}_s}$$

$$\mu = 0,132$$

$$\lambda = 1 + \mu$$

$$\lambda = 1,132$$

$$\cos \varphi = \lambda^{-3/2} = 0,830$$

$$\varphi = 33,87^\circ$$

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{\lambda} \cdot \cos \left( 240 + \frac{\varphi}{3} \right)$$

$$\alpha = 0,317$$

$$\sigma_{bc} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{\bar{\sigma}_s}{n}$$

$$\sigma_{bc} = 6,65 \text{ Mpa} < 18 \text{ Mpa} \quad \text{condition vérifiée}$$

**Calcul d'As :**

$$A_s = \frac{\alpha b d \sigma_{bc}}{2 \cdot \bar{\sigma}_s}$$

$$A_s = \frac{0,317 \times 100 \times 195 \times 6,65}{2 \times 215}$$

$$A_s = 95,59 \Rightarrow A_{\text{adopté}} = 100,53 \text{ cm}^2 \text{ soit 8T40 espace de 15 cm}$$

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

**Vérification a L'ELS :**

**Pour les armatures tangentielles :**

$$M_{ser} = 39618226,4 \text{ kg.m/ml}$$

Pour la vérification on doit vérifier :

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot y \leq \bar{\sigma}_{bc} = 18 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{st} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot (d - y) \leq \bar{\sigma}_{st} = 215 \text{ Mpa}$$

**11.20 Calcul de la contrainte maximale du béton :  $A_s = 24,54 \text{ cm}^2$**

**Calcul y :**

$$\frac{by^2}{2} + nA'_s(y-c) - nA_s(d-y) = 0$$

$$50 y^2 + 368,1 - 71190,54 = 0$$

$$y = 34,23 \text{ cm}$$

**Calcul de I :**

$$I = \frac{by^3}{3} + 15A_s(d-y)^2$$

$$I = 10662747,82 \text{ cm}^4$$

**Calcul de  $\sigma_{bc}$  :**

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot y$$

$$\sigma_{bc} = \frac{39618226,4}{10662747,82} \cdot 47,20$$

$$\sigma_{bc} = 175,37 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{bc} = 17,53 \text{ Mpa} < 18 \text{ Mpa} \quad \text{condition vérifiée}$$

$$\sigma_{st} = \frac{M_{ser}}{I} \cdot (d - y)$$

$$\sigma_{st} = 543,21 \text{ Mpa} > 215 \text{ Mpa} \quad \text{condition non vérifiée}$$

Il faut refaire le calcul à L'ELS :

## Chapitre 11 : Etude de la fondation

$$\mu = \frac{30M_{ser}}{bd^2\bar{\sigma}_s}$$

$$\mu = 0,148$$

$$\lambda = 1 + \mu$$

$$\lambda = 1,148$$

$$\cos \varphi = \lambda^{-3/2} = 0,812$$

$$\varphi = 35,61^\circ$$

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{\lambda} \cdot \cos \left( 240 + \frac{\varphi}{3} \right)$$

$$\alpha = 0,333$$

$$\sigma_{bc} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{\bar{\sigma}_s}{n}$$

$$\sigma_{bc} = 7,15 \text{ Mpa} < 18 \text{ Mpa} \quad \text{condition vérifiée}$$

**Calcul d'As :**

$$A_s = \frac{\alpha b d \sigma_{bc}}{2 \bar{\sigma}_s}$$

$$A_s = \frac{0,333 \times 100 \times 193,4 \times 7,15}{2 \times 215}$$

$$A_s = 107,08 \text{ cm}^2 \Rightarrow A_{\text{adopté}} = 113,09 \text{ cm}^2 \text{ soit 9T40 espace de 15 cm}$$

**Vérification au cisaillement :**  $T_r = 5934157,37 \text{ kg}$

$$\tau_u \leq \bar{\tau}_u$$

$$\tau_u = \frac{T_r}{b \cdot d} = \frac{5934157,37}{100 \times 195}$$

$$\tau_u = 0,304 \text{ Mpa} < 1,5 \text{ Mpa} \Rightarrow \text{vérifiée}$$