

UDL S.B.A

Département de Génie Civil

Module (Pont 2)

Chapitre XI

Les piles

- Définition
- Formes de la pile
- Sections du fût
- Sollicitations
- Calcul de la pile :
 - Stabilité d'ensemble
 - Chevêtre
 - Fût
 - Semelles

M^r Z. Louhibi

1) Définition:

La pile est un appui intermédiaire d'un pont à travées multiples. Son rôle est de transmettre les charges verticales et horizontales du tablier vers les fondations. La pile est constituée de 3 parties:

1- de sommier: c'est la partie supérieure de la pile qui reçoit les charges du tablier, elle est en B.A.

2- de fût: c'est la partie verticale qui fait descendre les charges vers la fondation. Le fût est construit soit en B.A, en B.P, en maçonnerie ou en métal. En élévation, le fût représente un fruit (obliquité β).

3- la fondation: c'est une semelle en B.A. Elle est soit superficielle, soit semi profonde sur puit en gros béton, soit profonde sur pieux.

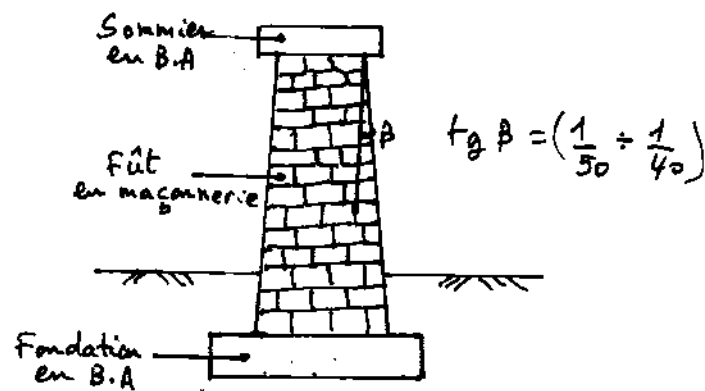


Fig A - 1 Eléments d'une pile

Le sommier est bien ferraillé au niveau des dés d'appuis. Pour éviter l'éclatement du béton dû à la forte pression localisée, un frettage est adopté pour confiner le béton.

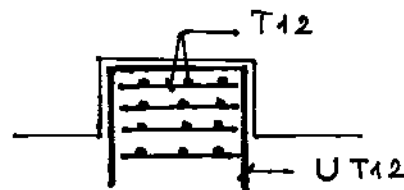


Fig A - 2 Frettage du dé d'appui.

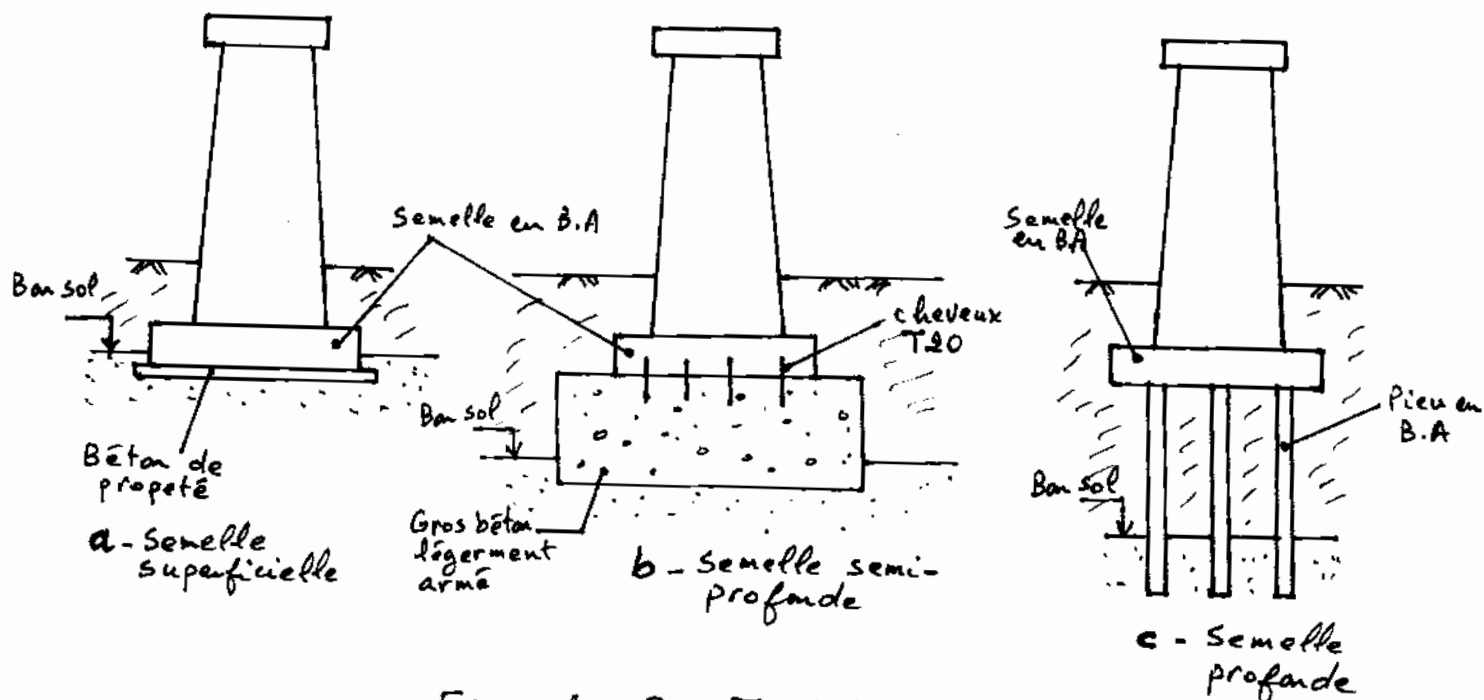


Fig A - 3 Fondations des piles

2) Formes de la pile:

2-1 Pile-voile: le fût est une voile en B.A

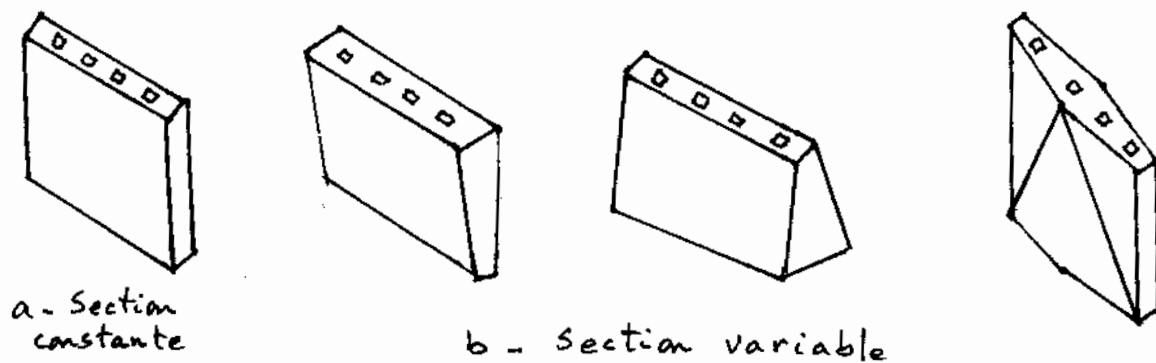


Fig A - 4 Formes d'une pile-voile

2-2 Pile à fûts jumeaux:

Lorsqu'il s'agit d'un pont à pontes latérales, la partie centrale du fût est inutile. On prévoit 2 fûts symétriques sans les appareils d'appuis, cependant ces 2 fûts sont contreventés par un chaînage en B.A.

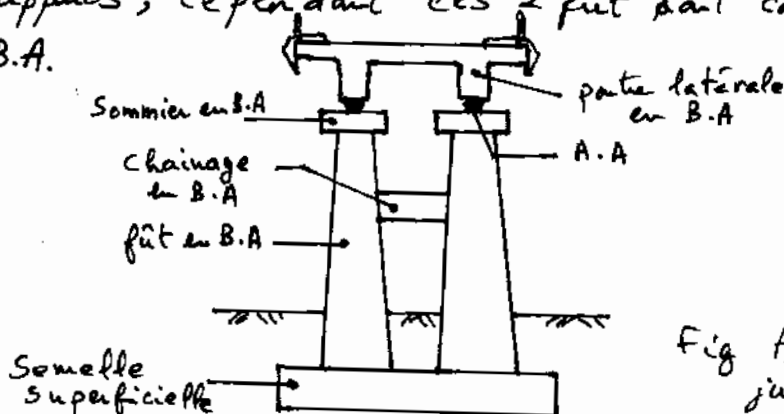


Fig A - 5 Pile à fûts jumeaux en B.A

2-3 Pile à chevêtre sur colonnes :

Le fût est constitué de plusieurs colonnes identiques de sections carrées ou circulaires. Le sommier est un chevêtre en B.A reposant sur les colonnes et supportant les charges du tablier transmises par l'intermédiaire des appareils d'appuis.

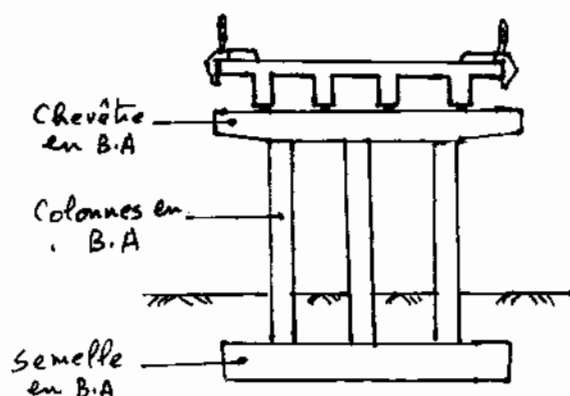


Fig A - 6 Pile à colonnes multiples sans chevêtre.

En zone urbaine, et dans le cas où l'on évite l'encombrement en dessous du pont, on prévoit des piles monocolonne supportant le chevêtre.

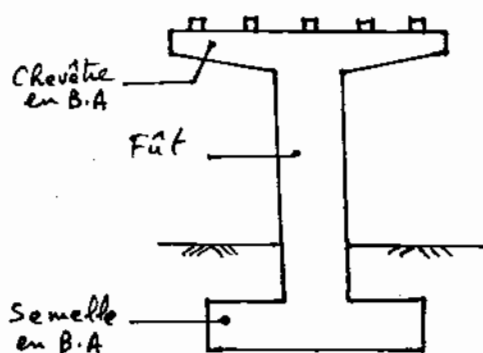


Fig A - 7 Pile monocolonne (Pile marteau)

2-4 Pile de forme spéciale :

Pour des raisons architecturales, la pile peut prendre plusieurs formes, parmi lesquelles celles de la figure A - 8.

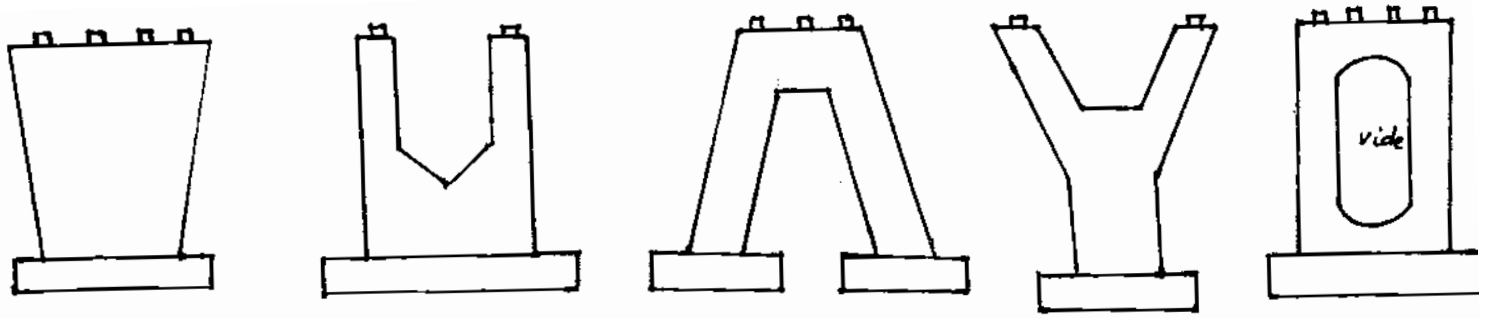


Fig A-8 Formes spéciales des piles

3) Sections du fût:

3-1 Site fluvial:

Pour mieux résister aux poussées hydrodynamiques, le fût possède:

- une section minimale face au courant de l'eau.
- une forme hydrodynamique pour faciliter l'écoulement de l'eau. On distingue les sections en triangle, en demi cercle et en triangle convexe.

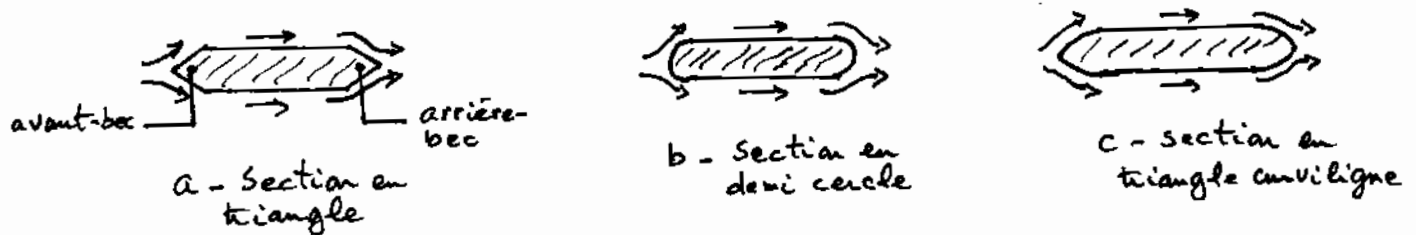


Fig A-9 Sections hydrodynamiques courantes du fût.

Cependant, il existe d'autres formes de sections hydrodynamiques comme le montre la figure A-10.

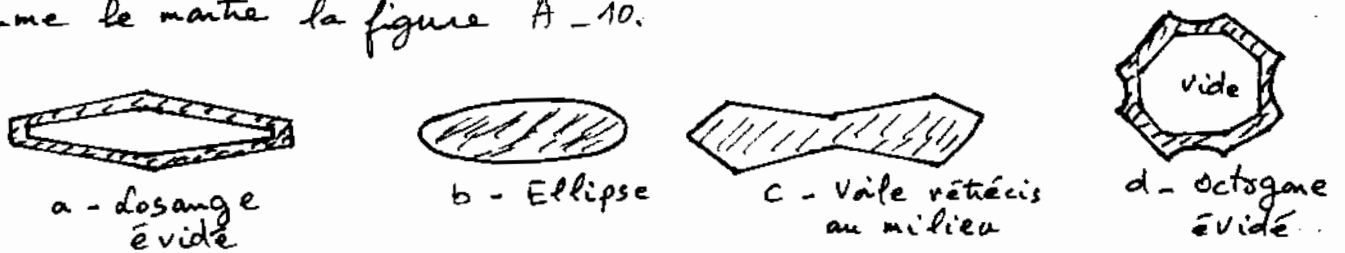


Fig A-10 Sections hydrodynamiques spéciales du fût.

3-2 Fût élancé:

Dans les piles de grande hauteur ($H \geq 15m$), il est préférable d'avoir des sections évidées des fûts, et ce pour réduire le poids propre de la pile (flambement, seisme, ...), tout en assurant sa rigidité flexionnelle et torsionnelle. Cependant un fût à section pleine résiste mieux au choc qu'un fût à section creuse.

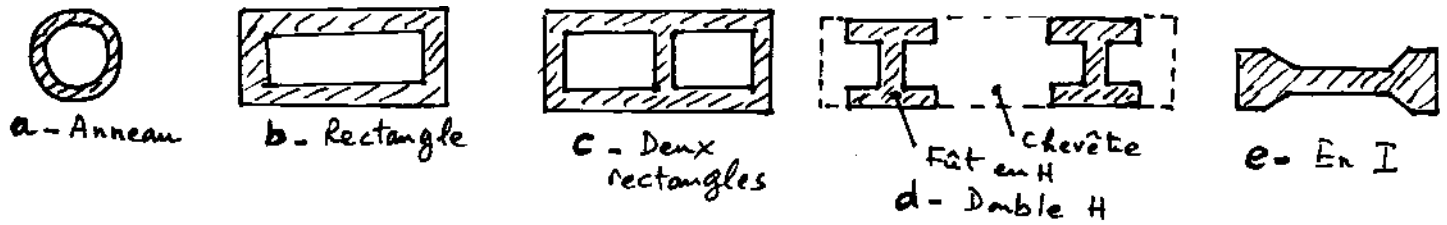


Fig A - 11 Sections creuses des fûts élancés.

4) Sollicitations:

La pile est soumise à deux groupes de charges :

4-1 Charges provenant du tablier:

Elles s'appliquent directement au somier (chevêtre).

a - Réactions verticales:

- Charges permanentes
- Surcharges courantes A(1), B et C.
- " exceptionnelles M, D et E.
- Force sismique verticale $F_v = \pm \frac{7G}{100}$

(G : poids du tablier)

b - Réactions horizontales:

- Force de freinage (longitudinalement)
- Force centrifuge (transversalement)
- Force sismique longitudinalement ou transversalement, $F_H = \frac{G}{10}$
- Déformation linéaire du tablier due aux effets différés de fluage retrait et température.
- Imperfection de la forme et de la position des appareils d'appuis

4-2 Charges appliquées sur le fût:

Elles s'appliquent directement sur le long du fût, et ne proviennent pas du tablier.

- La pression du vent
- " hydrodynamique
- " de la glace
- Les forces sismiques F_v et F_H dues au poids G' de la pile.
- des chocs des véhicules et des objets flottants contre la pile.
- Actions chimique des eaux fluviales agressives sur le matériau de la pile.

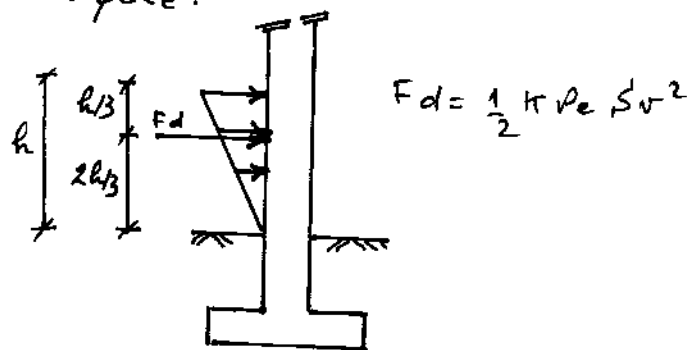


Fig A - 12 Force hydrodynamique

5) Calcul de la pile

5-1 la stabilité d'ensemble

5-1-1 Stabilité au renversement:

Cette vérification se fait dans le sens longitudinal du pont où la dimension de la semelle est plus petite que celle du sens transversal. On doit vérifier à l'ELU

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 1.5 \quad \dots (A-1)$$

où M_s et M_r sont respectivement le moment stabilisant et le moment renversant par rapport au point C de renversement (fig. A-13, A-14, A-15). Le renversement doit être vérifié pour les 3 cas suivants:

1^{er} cas: En construction

P_H^i est la pression horizontale du vent en construction (cf. CHAP. 4). P_H^i dépend du délai D de réalisation de l'ouvrage.

$$\left. \begin{aligned} D \leq 1 \text{ mois} : P_H^i &= \frac{5}{4} \text{ kN/m}^2 \\ D > 1 \text{ mois} : P_H^i &= \frac{5}{3} \text{ kN/m}^2 \end{aligned} \right\} \dots (A-2)$$

q_{prc} est la charge des équipements de chantier posés sur le tablier.

La combinaison d'action à l'ELU (cf. CHAP. 4) est donnée par

$$\text{ELU : } 1.35 (G_{\max} + Q_{prc}) + (G_{\min} + Q_{prc}) + 1.5 W \quad \dots (A-3)$$

où W est l'action du vent.

2^e cas: En exploitation

$$\text{ELU : } 1.35 G_{\max} + G_{\min} + \{ 1.605 Q_r \dots (A-4)$$

où Q_r est la surcharge routière normale telle que B, AII) accompagnés de St.

$$\text{ELU : } 1.35 G_{\max} + G_{\min} + \{ 1.35 Q_{rp}$$

où Q_{rp} est la surcharge routière particulière telle que Mc120, D240...

3^e cas: En seisme

$$\text{ELU : } G_{\max} + G_{\min} + F_a + \{ 1.07 \alpha Q_r \dots (A-5)$$

où F_a est l'action du seisme.

α est un coefficient qui dépend de la classe du pont.

$$\left. \begin{aligned} \text{Classe I} : \alpha &= 0,6 \\ \text{II} : \alpha &= 0,4 \\ \text{III} : \alpha &= 0,2 \end{aligned} \right\} \dots (A-6)$$

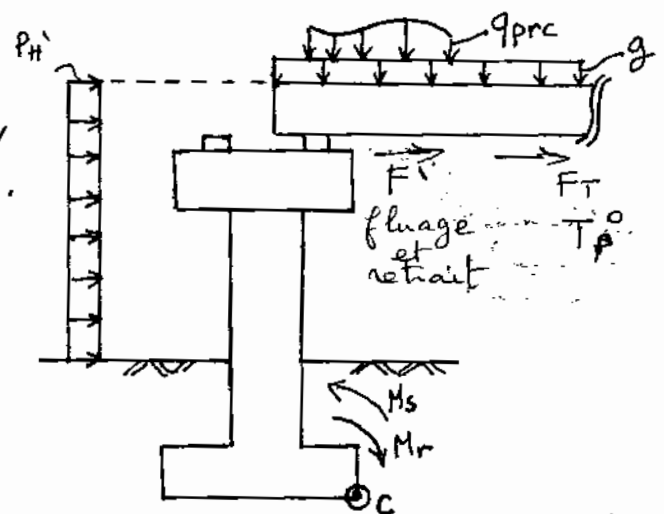


Fig. A-13 Renversement en construction.

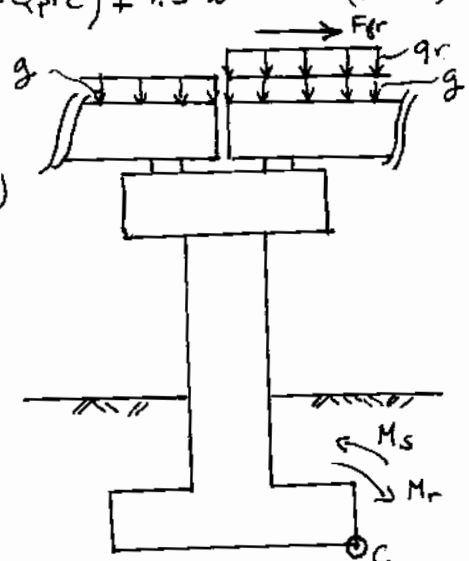


Fig. A-14 Renversement en exploitation.

Le poids G est considéré stabilisant mais le seisme ascendant $F_s = 7G/100$ va alléger ce poids qui deviendra $0,93G$.

5-1-2 Stabilité à l'enfoncement

À l'ELS les contraintes du sol doivent être inférieures à la contrainte admissible.

Il est recommandé que le sol sous la semelle soit totalement comprimé. Dans le cas extrême, il faut limiter la zone traccée en respectant la relation.

$$B' \geq 0,75 B \dots (A-7)$$

où B est la largeur de la semelle.

B' est la largeur comprimée (fig. A-16)

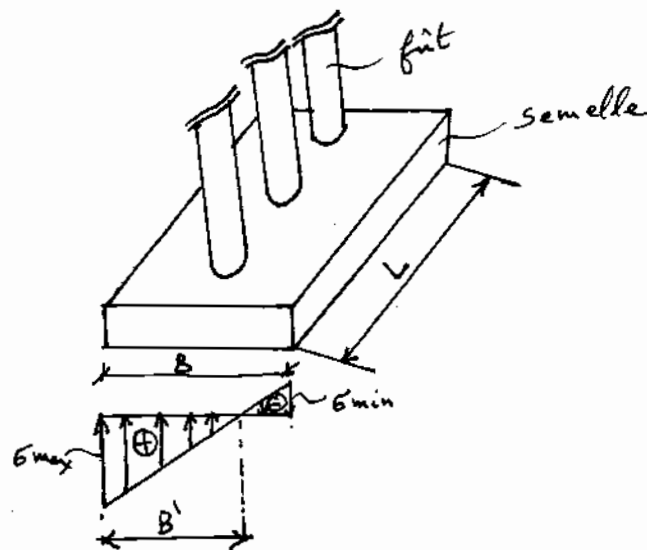


Fig. A-16 Zone comprimée sans la semelle

Cas 1: Sol entièrement comprimé ($\sigma_{\min} > 0$) ($e \leq B/6$)

On a à l'ELS:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{V}{B \cdot L} \left(1 + 6 \frac{e}{B} \right) \\ \sigma_{\min} &= \frac{V}{B \cdot L} \left(1 - 6 \frac{e}{B} \right) \end{aligned} \right\} \dots (A-8)$$

où e est l'excentricité: $e = \frac{B}{2} - e_c \dots (A-9)$

$$\text{ave } e_c = \frac{M}{V} \dots (A-10)$$

où M est le moment résultant à l'ELS Fig. A-17 Sol entièrement comprimé.

$$M = M_s - M_r \dots (A-11)$$

N est la résultante des charges verticales à l'ELS.

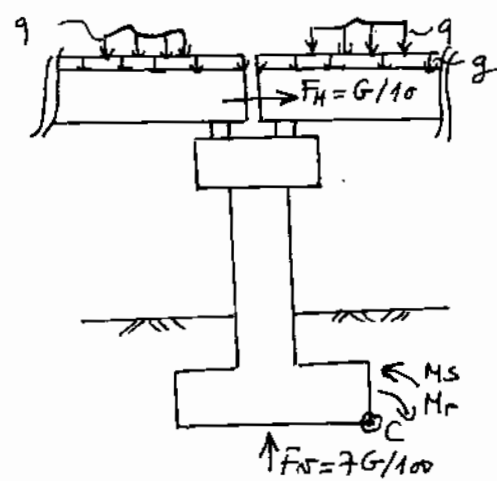
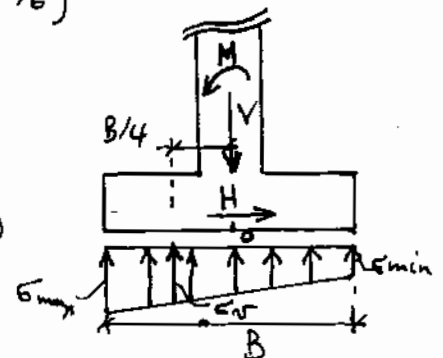


Fig. A-15 Renversement en seisme.



On doit vérifier que la contrainte σ_v se trouvant à $B/4$ du milieu de la semelle soit inférieure à la contrainte admissible du sol σ_{adm} :

$$\sigma_v = 3 \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{4} \leq \sigma_{adm} \dots (A-12)$$

Cas 2: Sol partiellement comprimé ($\sigma_{min} < 0$ et $B' \geq 0,75B$)

Seule la zone comprimée est considérée. $\Rightarrow e > \frac{B}{6}$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{V}{B.L} \times \frac{4}{3(1 - \frac{2e}{B})} \\ \sigma_{min} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (A-13)$$

$$\sigma_v = 3 \frac{\sigma_{max}}{4} \leq \sigma_{adm} \dots (A-14)$$

N.B: la vérification des contraintes se fait aussi dans le sens transversal, les équations (A-8) et (A-13) seront utilisées en permutant les termes B et L entre eux.

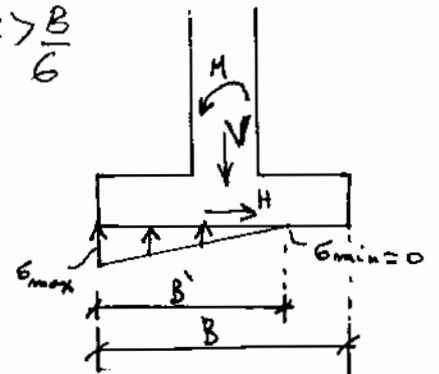


Fig. A-18 sol partiellement comprimé.

5-1-3 Stabilité au glissement

A l'ELU, on doit avoir

$$H \leq \frac{V \tan \varphi}{1,2} + \frac{C A'}{1,5} \dots (A-15)$$

où φ est l'angle de frottement interne du sol d'assise.

C est la cohésion du sol.

A' est l'aire de la partie comprimée de la semelle, d'après la figure (A-16)

$$A' = B' . L \dots (A-16)$$

Exercice 1:

Soit le pont représenté dans la figure (A-19). Il est constitué de 2 travées de 30 m chacune. Le tablier est à pontes sans chaussée en B. Données:

1) Vérifier la stabilité de la pile:

a - En construction,

b - En exploitation ($A(R) + S_t$).

c - En séisme.

des 2 travées est soumise au convoi D240.

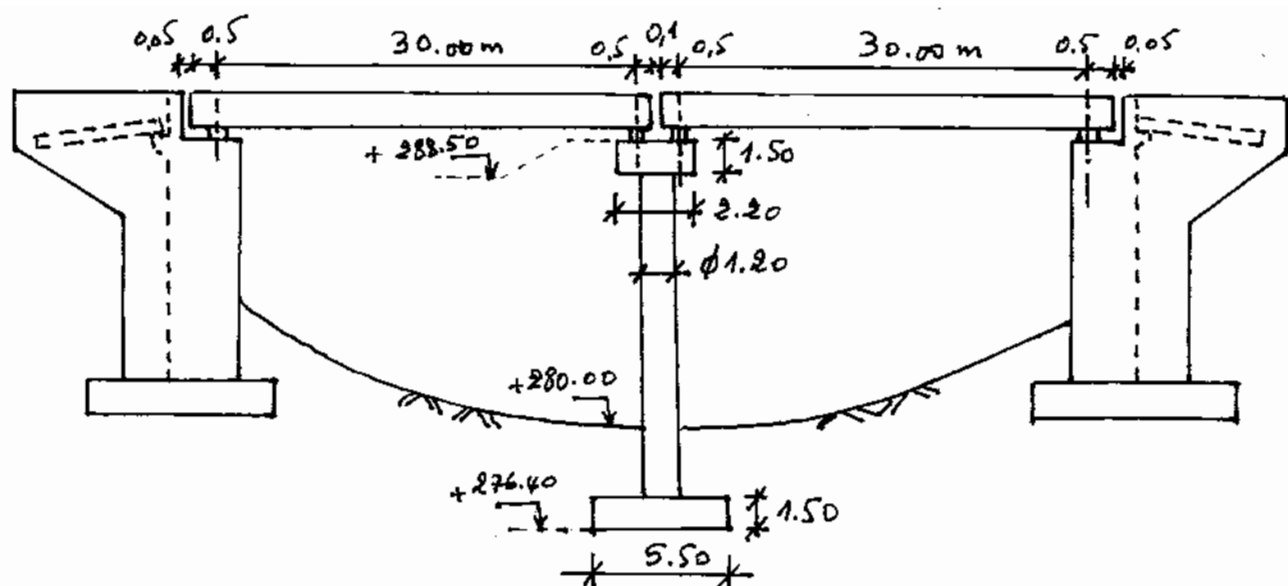
b - Transversalement: quand le convoi D240 est excentré.

Données: - $F_v = 64 \text{ kN}$; $F_T = 120 \text{ kN}$.

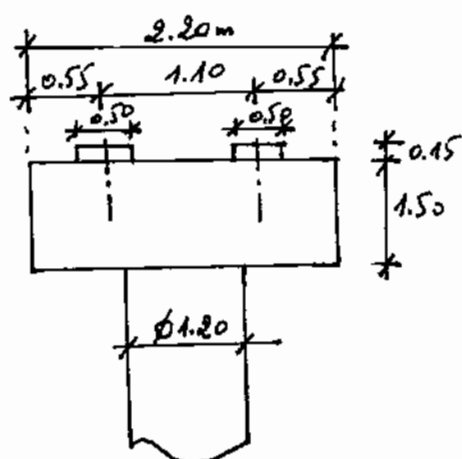
- Durant le chantier qui est de 8 mois, les équipements de réalisation sont posés directement sur le tablier et sont assimilés à une charge répartie $q_{prc} = 50 \text{ kN/ml}$ et d'étendue $l_q = 10 \text{ m}$.

- Dimensions du dé d'appui: $(0,5 \times 0,5) \times 0,15 \text{ m}$.

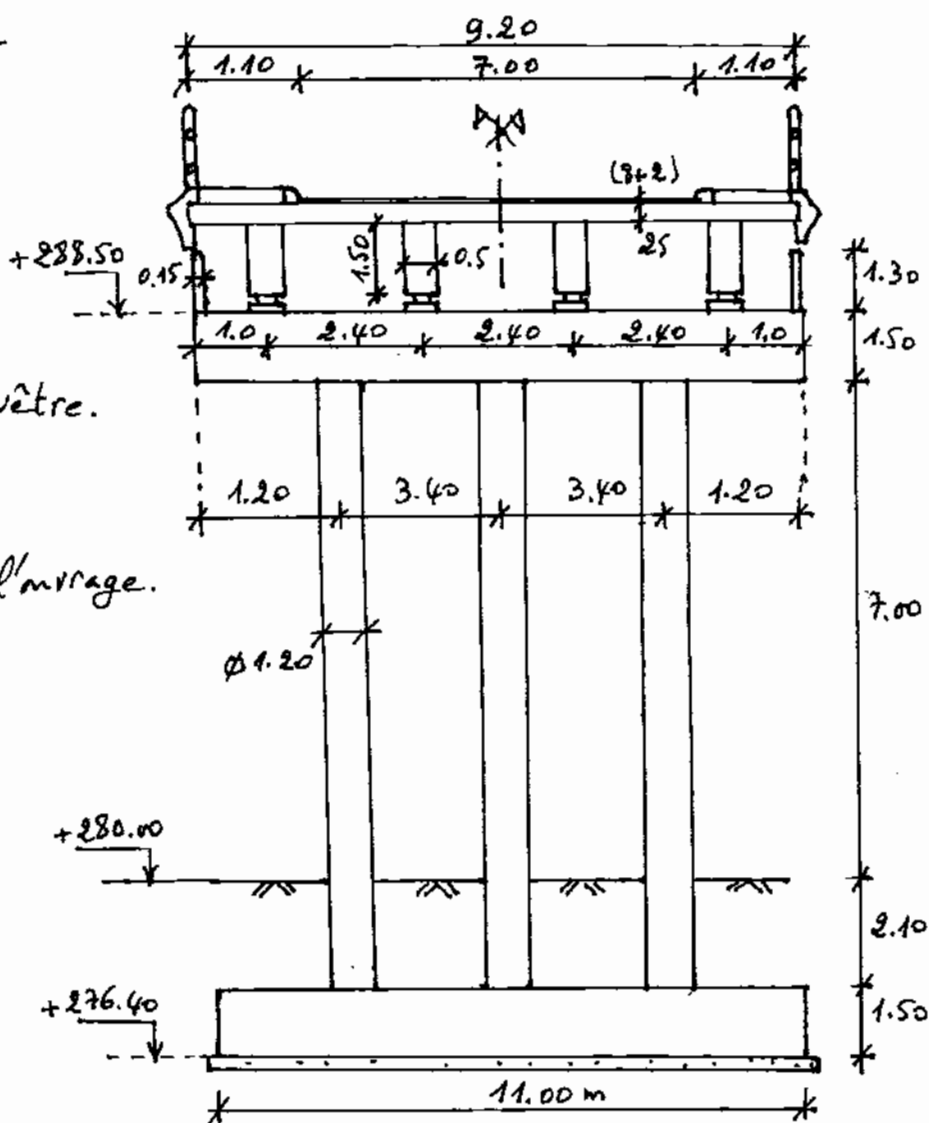
- Sol: $\sigma_s = 3 \text{ bars} = 0,3 \text{ MPa}$; $\varphi = 30^\circ$; $C = 120 \text{ kPa}$; $\gamma_R = 20 \text{ kN/m}^3$.



a - Coupe longitudinale



c - Détail du chevêtre.



b - Coupe transversale

Fig. A-19 Détail de l'ouvrage.

Solution:

Calculons le poids propre du tablier :

- Pontres : $0.5 \times 1.5 \times 25 \times 4 = 75 \text{ kN/ml}$
- Hourdis : $9.20 \times 0.25 \times 25 = 57.5 \text{ kN/ml}$
- Chape d'étanchéité : $0.02 \times 7 \times 20 = 2.80 \text{ kN/ml}$
- Couche de roulement en B.B. : $0.08 \times 7 \times 22 = 12.32 \text{ kN/ml}$
- Trottoirs et corniches : $11.25 \times 2 = 22.5 \text{ kN/ml}$
- Garde corps : $1 \times 2 = 2 \text{ kN/ml}$

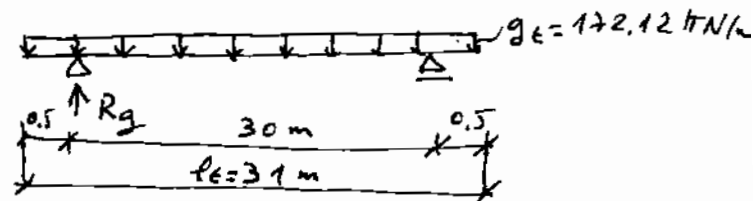
$$g_t = \sum_{i=1}^6 g_i \Rightarrow g_t = 172.12 \text{ kN/ml}$$

La réaction sur la pile due au poids d'une seule travée

$$R_g = g_t \frac{l_t}{2}$$

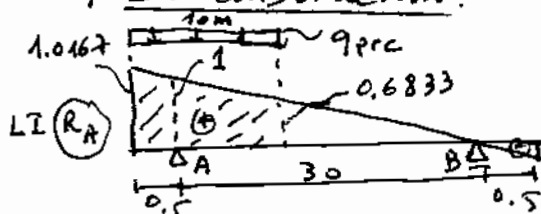
$$R_g = 172.12 \times \frac{31}{2}$$

$$R_g = 2667.860 \text{ kN}$$



1) Stabilité de la pile:

a/ En construction:



$$r_t^+ = \frac{(1.0167 + 0.6833) \times 10}{2} = 8.5$$

$$R_{q_{prec}} = q_{prec} \times r_t^+$$

$$R_{q_{prec}} = 50 \times 8.5 \Rightarrow R_{q_{prec}} = 425 \text{ kN}$$

$$d(R_{q_{prec}}) = \frac{5.50}{2} - \frac{1.10}{2} = 2.20 \text{ m}$$

$$d(R_g) = 2.20 \text{ m}$$

$$\text{Délais} = 8 \text{ mois} > 1 \text{ mois} \Rightarrow p_H' = \frac{5}{3} \text{ kN/m}^2$$

Calculons les mts stabilisant et renversant par rapport au pt c.

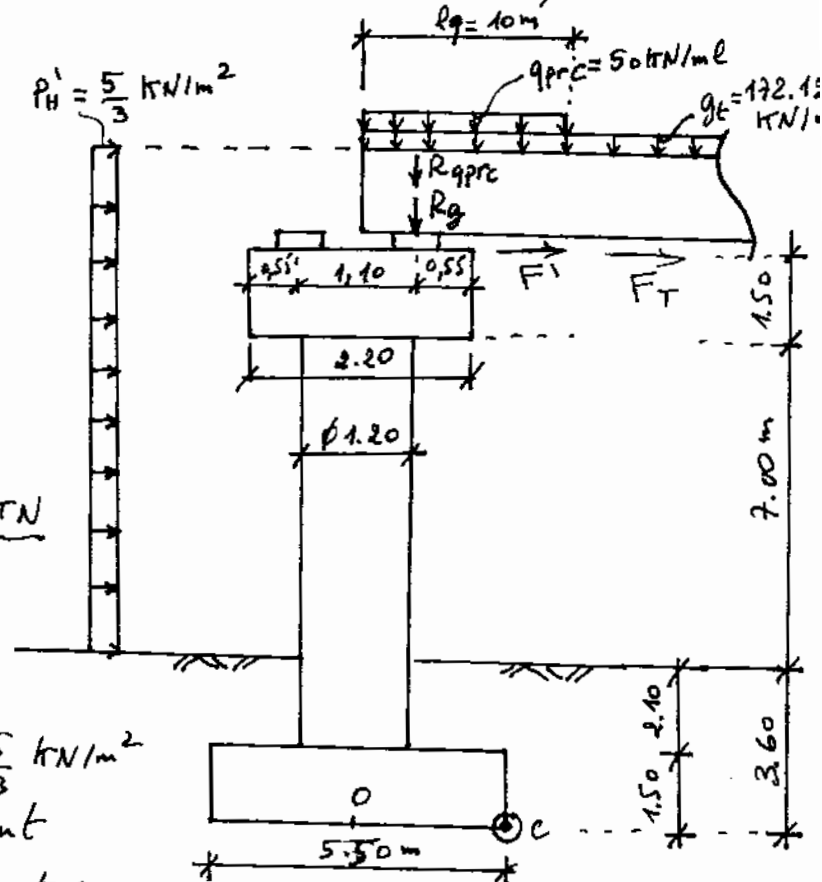


Fig. A-20 Sollicitations d'une pile en phase de construction

Solution**a- Phase de construction**

On peut envisager les 2 situations :

- 1- Tablier vide (sans q_{prc}) pour vérifier les stabilités au renversement et au glissement.
- 2- Tablier chargé (par q_{prc}) pour vérifier la stabilité à l'enfoncement.

a-1 / Stabilité au renversement : à l'ELU

Désignation	V (KN)	H (KN)	d (m)	Ms (KN.m)	Mr (KN.m)
— Tablier : $R_g \times (1,0)$	2667,860	—	2,200	5869,292	—
$F' \times (1,0)$	—	64,000	12,100	—	774,400
$FT \times (0,8)$	—	96,000	12,100	—	1 161,60
— Murettes latérales : $2 \times 0,15 \times 1,30 \times 2,20 \times 25 \times (1,0)$	21,450	—	2,750	58,988	—
— Dés d'appui : $8 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times (1,0)$	7,500	—	2,750	20,625	—
— Chevêtre : $2,2 \times 1,5 \times 9,2 \times 25 \times (1,0)$	759,000	—	2,750	2087,25	—
— Fûts : $3 \times \pi \times (1,2)^2 / 4 \times 9,1 \times 25 \times (1,0)$	771,500	—	2,750	2121,625	—
— Semelle : $5,5 \times 11 \times 1,5 \times 25 \times (1,0)$	2268,750	—	2,750	6239,063	—
— Remblai : $(5,5 \times 11 \times 2,1 - 3 \times \pi \times (1,2)^2 / 4 \times 2,1) \times 20 \times (1,0)$	2389,570	—	2,750	6571,318	—
— Vent : sur tablier : $5/3 \times 9,2 \times 1,75 \times (1,5)$	—	40,250	13,125	—	528,281
sur chevêtre : $5/3 \times 9,2 \times 1,5 \times (1,5)$	—	34,500	11,350	—	391,575
sur fûts : $5/3 \times 1,2 \times 7,0 \times (1,5)$	—	63,000	7,100	—	447,300
$\times 3$					
$\Sigma =$	8885,630	297,750	—	22968,160	3303,156

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{22968.160}{3303.156} = 6.95 > 1.5 \text{ C.V}$$

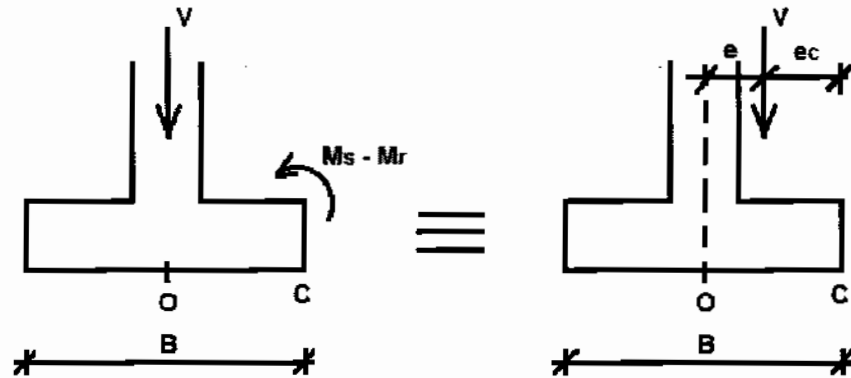
a-2 / Stabilité à l'enfoncement : à l'ELS

Désignation	V (KN)	H (KN)	d (m)	Ms (KN.m)	Mr (KN.m)
— Tablier : $R_g \times (1,0)$	2667,860	—	2,200	5869,292	—
$F' \times (1,0)$	—	64,000	12,100	—	774,400
$FT \times (0,8)$	—	96,000	12,100	—	1 161,60
$R_{prc} \times (1,0)$	425,000	—	2,200	935,000	—
— Murettes latérales : $2 \times 0,15 \times 1,30 \times 2,20 \times 25 \times (1,0)$	21,450	—	2,750	58,988	—
— Dés d'appui : $8 \times 0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times (1,0)$	7,500	—	2,750	20,625	—
— Chevêtre : $2,2 \times 1,5 \times 9,2 \times 25 \times (1,0)$	759,000	—	2,750	2087,25	—
— Fûts : $3 \times \pi \times (1,2)^2 / 4 \times 9,1 \times 25 \times (1,0)$	771,500	—	2,750	2121,625	—
— Semelle : $5,5 \times 11 \times 1,5 \times 25 \times (1,0)$	2268,750	—	2,750	6239,063	—
— Remblai : $(5,5 \times 11 \times 2,1 - 3 \times \pi \times (1,2)^2 / 4 \times 2,1) \times 20 \times (1,0)$	2389,570	—	2,750	6571,318	—
— Vent : sur tablier : $5/3 \times 9,2 \times 1,75 \times (1,0)$	—	26,833	13,125	—	352,183
sur chevêtre : $5/3 \times 9,2 \times 1,5 \times (1,0)$	—	23,000	11,350	—	261,050
sur fûts : $5/3 \times 1,2 \times 7,0 \times (1,0)$	—	42,000	7,100	—	298,200
$\times 3$					
$\Sigma =$	9310,630	251,833	—	23903,160	2847,433

$$e_c = \frac{M_s - M_r}{V} = \frac{(23903.16 - 2847.433)}{9310.63} = 2.261 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - e_c \Rightarrow \boxed{e = 0.489 \text{ m}}$$

$$e = 0.489 \text{ m} < \frac{B}{6} = 0.917 \Rightarrow \text{sol entièrement comprimé sous la semelle.}$$



$$\sigma_{\max} = \frac{V}{BL} \left(1 + 6 \frac{e}{B} \right) : \sigma_{\max} = \frac{9310.63 \times 10^{-3}}{5.5 \times 11} \left(1 + 6 \times \frac{0.489}{5.5} \right) \Rightarrow \boxed{\sigma_{\max} = 0.236 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{V}{BL} \left(1 - 6 \frac{e}{B} \right) : \sigma_{\min} = \frac{9310.63 \times 10^{-3}}{5.5 \times 11} \left(1 - 6 \times \frac{0.489}{5.5} \right) \Rightarrow \boxed{\sigma_{\min} = 0.072 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_v = \frac{3\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{4} \Rightarrow \sigma_v = 0.195 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 0.3 \text{ MPa} \quad \text{C.V}$$

a-3 / Stabilité au glissement : à l'ELU

$$H \leq \frac{V \tan \phi}{1.2} + \frac{C A'}{1.5}$$

$$A' = B \times L : A' = 5.5 \times 11 \Rightarrow A' = 60.5 \text{ m}^2$$

$$H = 297.75 \text{ KN} < \frac{8885.63 \times \tan 30^\circ}{1.2} + \frac{120 \times 60.5}{1.5} = 9115.101 \text{ KN} \quad \text{C.V}$$

b - En exploitation

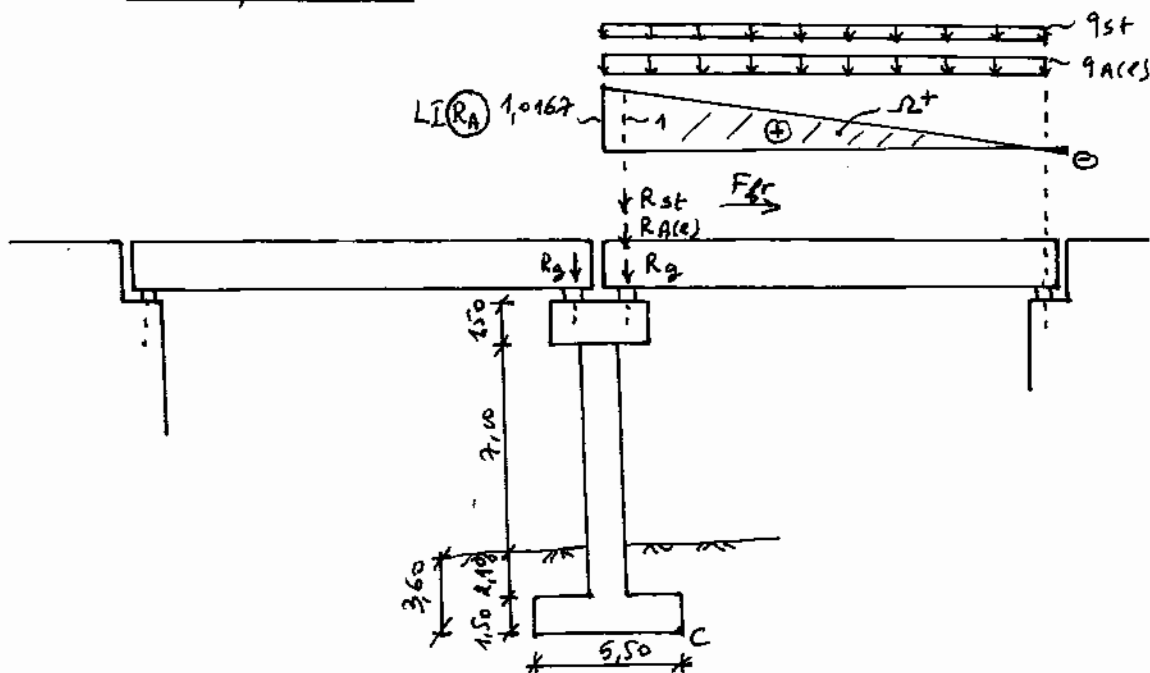


Fig. A-21 Chargement de la pile en phase d'exploitation.

R_{acc}

$$\frac{R_{acc}}{R_{acc}^{max}} \Rightarrow l = 30 + 0,5 = 30,5 \text{ m}$$

$$A(l) = 2,30 + \frac{360}{12+l} : A(l) = 2,30 + \frac{360}{12+30,5} = 10,771 \text{ kN/m}^2$$

$$L_r = 7,00 \text{ m} \rightarrow \text{Pout de classe I}$$

$$L_c = L_r = 7,00 \text{ m} : n = \text{int}\left(\frac{L_c}{\frac{7}{3}}\right) = \text{int}\left(\frac{7}{\frac{7}{3}}\right) = \text{int}(2,33) = 2$$

$$v = \frac{L_c}{n} : v = \frac{7}{2} = 3,50 \text{ m}$$

$$\text{Classe I} \begin{cases} \text{tab} \rightarrow a_1 = 1,0 \\ n = 2 \end{cases}$$

$$A_1(l) = \sup \begin{cases} a_1 \times A(l) = 10,771 \\ 4 - 0,002l = 4 - 0,002 \times 30,5 = 3,939 \end{cases} = 10,771 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Classe I} \rightarrow v_0 = 3,5 \text{ m}$$

$$a_2 = \frac{v_0}{v} = \frac{3,5}{3,5} = 1 : A_2(l) = a_2 \times A_1(l) = 10,771 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{acc} = A_2(l) \times L_c : q_{acc} = 10,771 \times 7 = 75,40 \text{ kN/m}$$

$$\Omega^+ = \frac{1,0167 \times 30,5}{2} = 15,504 : R_{acc} = q_{acc} \times \Omega^+$$

$$R_{acc} = 75,4 \times 15,504 = 1169,00 \text{ kN}$$

R_{st}

$$q_{st} = s_t \times l_t \times 2$$

$$q_{st} = 1,5 \times 1,1 \times 2 = 3,3 \text{ kN/ml}$$

$$R_{st} = q_{st} \times \Omega^+ : R_{st} = 3,3 \times 15,504 = 51,163 \text{ kN}$$

F_{fr}

de freinage du système Bc peut accompagner $A(l)$ et s_t .

$$F_{fr} = \frac{300}{2} = 150 \text{ kN}$$

F_{fr} est transmise des dés d'appuis vers le chevêtre, elle s'applique donc sur la face supérieure du chevêtre. $d = 1,5 + 7 + 3,60 = 12,1 \text{ m}$.

b - 1/ Stabilité au renversement : à l'ELU

Désignation	V(kN)	H(kN)	d(m)	M _s (kN.m)	M _r (kN.m)
- Tablier : de droite : R _g x (1,0)	2667,860	—	2,20	5869,292	—
de gauche : R _g x (1,0)	2667,860	—	3,30	8803,938	—
- R _A (l) x (1,605)	1876,245	—	2,20	4127,739	—
- R _{st} x (1,605)	82,117	—	2,20	180,657	—
- Murettes latérales : 0,15 x 1,3 x 2,2 x 25 x (1,0)	21,45	—	2,75	58,987	—
- Dés d'appuis : 0,5 x 0,5 x 0,15 x 25 x 4 x (1,0)	3,75	—	2,20	8,25	—
0,5 x 0,5 x 0,15 x 25 x 4 x (1,0)	3,75	—	3,30	12,375	—
- Chevêtre : 2,2 x 1,5 x 9,20 x 25 x (1,0)	759,00	—	2,75	2087,25	—
- Fûts : $\pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 9,10 \times 25 \times 3 \times (1,0)$	777,50	—	2,75	2161,625	—
- Semelle : $\frac{4}{5,5 \times 11 \times 1,5 \times 25 \times (1,0)}$	2268,75	—	2,75	6239,063	—
- Remblai : $(5,5 \times 11 \times 2,1 - 3 \times \pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 2,1) \times 20 \times (1,0)$	2389,57	—	2,75	6571,318	—
- Freinage : $\frac{300}{2} \times (1,605)$	—	240,75	12,10	—	2913,075
$\Sigma =$	13511,852	240,75	—	36120,494	2913,075

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{36120,494}{2913,075} = 12,4 > 1,5 \text{ C.V.}$$

b - 2/ Stabilité à l'enfoncement : à l'ELS

à l'ELS : $G + 1,2 Q_{Acc} + Q_{st} + 1,2 Q_{fr}(BC)$

$$V = 13007,453 \text{ kN}$$

$$M_s = 35010,817 \text{ kN.m}$$

$$M_r = 2178,000 \text{ kN.m}$$

$$e_c = \frac{M_s - M_r}{V} = \frac{35010,817 - 2178}{13007,453} = 2,524 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - e_c : e = \frac{5,5}{2} - 2,524 = 0,226 \text{ m} < \frac{B}{6} = 0,917 \text{ m}$$

le sol est entièrement comprimé sans la semelle.

$$\sigma_{max} = \frac{V}{B.L} \left(1 + \frac{6e}{B}\right) : \sigma_{max} = \frac{13007,453 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 + \frac{6 \times 0,226}{5,5}\right) = 0,268 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \frac{V}{B.L} \left(1 - \frac{6e}{B}\right) : \sigma_{min} = \frac{13007,453 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 - \frac{6 \times 0,226}{5,5}\right) = 0,162 \text{ MPa}$$

$$\sigma_v = \frac{3\sigma_{max} + \sigma_{min}}{4} : \sigma_v = \frac{3 \times 0,268 + 0,162}{4} = 0,242 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 0,31 \text{ MPa}$$

b - 3/ Stabilité au glissement : à l'ELU

$$\text{à l'ELU} : H \leq \frac{V \cdot \tan \varphi}{1,2} + \frac{c \cdot A'}{1,5}$$

$$H = 240,75 \text{ kN} < \frac{13511,852 \times \tan 30^\circ}{1,2} + \frac{120 \times 60,5}{1,5} = 11340,893 \text{ kN}$$

Remarques:

- 1) En exploitation, on peut envisager un deuxième cas où les 2 travées sont chargées.
- 2) Si les 2 travées sur la pile ne sont pas identiques, les forces horizontales dues aux effets différents de retrait fluage et T_p ne s'annulent pas, elles rentrent dans les calculs.

C - En seisme: $G_{max} + G_{min} + \{1,07 \times Q_r$

Remarques:

1) * la force verticale du seisme: $F_v = \pm \frac{7G}{100}$

G est le poids total de la structure y compris la partie enterrée.

* la force horizontale: $F_H = \frac{G}{10}$

G est le poids de la partie non enterrée de la structure, la partie enterrée n'est pas supposée exercer des mots horizontaux.

2) Si l'on veut faire la vérification de renversement, on utilise en plus de la force horizontale du seisme, la force verticale ascendante qui a tendance à alléger le poids propre de la structure qui deviendra $0,93 G$, dans ces conditions on ne fait pas intervenir le terme $\{1,07 \times Q_r$ du fait qu'il joue un rôle stabilisant.

3) Si l'on veut faire la vérification à l'enfacement, on utilise en plus de F_H , F_v descendant par augmenter la charge verticale. Dans ces conditions, on fait intervenir le terme $\{1,07 \times Q_r$.

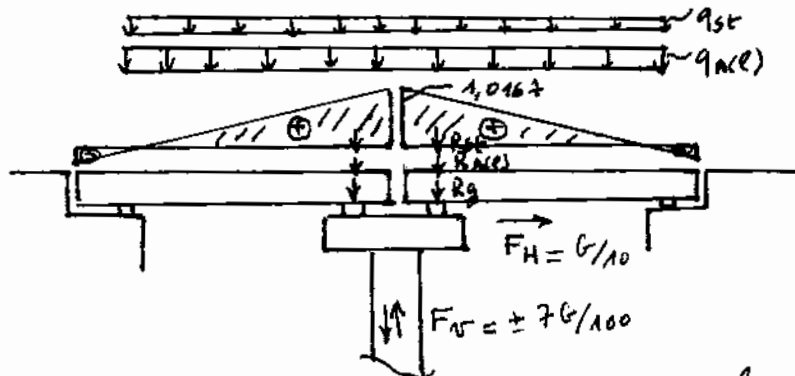


Fig. A-22 Pile avec 2 travées chargées

$$R_{A(l)} \max \Rightarrow l = 2 \times 30,5 = 61 \text{ m}$$

$$A(l) = 2,3 + \frac{360}{12+l} : A(l) = 2,3 + \frac{360}{12+61} = 7,231 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{classe I } y_{tab} \rightarrow a_1 = 1,0$$

$$A_1(l) = \sup \left\{ \begin{array}{l} 1 \times 7,231 \\ 4 - 0,002 \times 61 = 3,878 \end{array} \right\} \Rightarrow A_1(l) = 7,231 \text{ kN/m}^2$$

$$a_2 = \frac{v_0}{v} = 1 : A_2(l) = 1 \times 7,231 \Rightarrow A_2(l) = 7,231 \text{ kN/m}^2$$

$$\Omega^+ = 2 \times 15,504 = 31,008$$

$$q_{A(l)} = A_2(l) \times L_c : q_{A(l)} = 7,231 \times 7 = 50,617 \text{ kN/ml}$$

$$R_{A(l)} = q_{A(l)} \times \Omega^+ : R_{A(l)} = 50,617 \times 31,008 \Rightarrow R_{A(l)} = 1569,532 \text{ kN}$$

$$R_{st} = q_{st} \times \Omega^+ : R_{st} = 3,3 \times 31,008 \Rightarrow R_{st} = 102,326 \text{ kN}$$

$$\text{classe I: } \alpha = 0,6 : 1,07 \times Q_r = 1,07 \times 0,6 Q_r$$

C-1/ Stabilité au renversement : à l'ELU

I - Charges verticales (séisme ascendant)	V (kN)	H (kN)	d (m)	M _s (kN.m)	M _r (kN.m)
- Tablier: droit: $R_g \times 0,93 \times (1,0)$	2481,110	—	2,20	5458,442	—
gauche: $R_g \times 0,93 \times (1,0)$	2481,110	—	3,30	8187,663	—
- Murettes latérales: $0,15 \times 1,3 \times 2,2 \times 25 \times 2 \times 0,93 \times (1,0)$	19,949	—	2,75	54,860	—
- Dés d'appuis: $0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times 4 \times 0,93 \times (1,0)$	3,488	—	2,20	7,674	—
$0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times 4 \times 0,93 \times (1,0)$	3,488	—	3,30	11,510	—
- Chevêtre: $2,2 \times 1,5 \times 9,20 \times 25 \times 0,93 \times (1,0)$	705,870	—	2,75	1941,143	—
- Fûts: $\pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 9,1 \times 25 \times 3 \times 0,93 \times (1,0)$	717,495	—	2,75	5802,329	—
- Remblai: $(5,5 \times 11 \times 2,1 - 3 \times \pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 2,1) \times 20 \times$	2222,30	—	2,75	6111,325	—
$5,5 \times 11 \times 1,5 \times 25 \times 0,93 \times (1,0)$	2109,938	—	2,75	5802,330	—
$\Sigma =$	10744,748	—	—	33377,276	—
II - Charges verticales (séisme descendant)	V (kN)	H (kN)	d (m)	M _s (kN.m)	M _r (kN.m)
- Tablier: droit: $R_g \times 1,07 \times (1,0)$	2854,610	—	2,2	6280,142	—
gauche: $R_g \times 1,07 \times (1,0)$	2854,610	—	3,3	9420,213	—
- RAC: droit: $\frac{1}{2} \times 1,07 \times 0,6 \times 1569,532 \times (1,0)$	503,820	—	2,2	1108,404	—
gauche: $\frac{1}{2} \times 1,07 \times 0,6 \times 1569,532 \times (1,0)$	503,820	—	3,3	1662,606	—
- RSt: droit: $\frac{1}{2} \times 1,07 \times 0,6 \times 102,326 \times (1,0)$	32,847	—	2,2	72,263	—
gauche: $\frac{1}{2} \times 1,07 \times 0,6 \times 102,326 \times (1,0)$	32,847	—	3,3	108,395	—
- Murettes latérales: $0,15 \times 1,3 \times 2,2 \times 25 \times 1,07 \times (1,0)$	22,952	—	2,75	63,118	—
- Dés d'appuis: $0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times 4 \times 1,07 \times (1,0)$	4,013	—	2,2	8,829	—
$0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times 4 \times 1,07 \times (1,0)$	4,013	—	3,3	13,243	—
- Chevêtre: $2,2 \times 1,5 \times 9,2 \times 25 \times 1,07 \times (1,0)$	812,13	—	2,75	2233,358	—
- Fûts: $\pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 9,1 \times 25 \times 3 \times 1,07 \times (1,0)$	825,505	—	2,75	2270,139	—
- Remblai: $(5,5 \times 11 \times 2,1 - 3 \times \pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 2,1) \times 20 \times 1,07 \times (1,0)$	2556,840	—	2,75	7031,310	—
- Semelle: $5,5 \times 11 \times 1,5 \times 25 \times 1,07 \times (1,0)$	2427,563	—	2,75	6675,798	—
$\Sigma =$	13435,570	—	—	36947,818	—
III - Séisme horizontal	V (kN)	H (kN)	d (m)	M _s (kN.m)	M _r (kN.m)
- Tablier: $2 \times R_g \times 0,1 \times (1,0)$	—	533,572	12,10	—	6456,221
- Murettes latérales: $0,15 \times 1,3 \times 2,2 \times 25 \times 2 \times 0,1 \times (1,0)$	—	2,145	12,75	—	27,349
- Dés d'appuis: $0,5 \times 0,5 \times 0,15 \times 25 \times 8 \times 0,1 \times (1,0)$	—	0,75	12,75	—	9,131
- Chevêtre: $2,2 \times 1,5 \times 9,2 \times 25 \times 0,1 \times (1,0)$	—	75,9	11,350	—	861,465
- Fûts: $\pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 7 \times 25 \times 3 \times 0,1 \times (1,0)$	—	59,346	7,100	—	421,357
$\Sigma =$	—	671,713	—	—	7775,523

C-1-1/ Séisme ascendant: $\frac{M_s}{M_r} = \frac{33377,276}{7775,523} = 4,292 > 1,5$ C.V

C-1-2/ Séisme descendant: $\frac{M_s}{M_r} = \frac{36947,818}{7775,523} = 4,752 > 1,5$ C.V

C-2 / Vérification à l'enfoncement : à l'ELS

C-2-1 / Seisme ascendant :

$$e_c = \frac{M_s - M_r}{V} = \frac{33377,276 - 7775,473}{10744,748} = 2,383 \text{ m}$$

$$e = \frac{B}{2} - e_c = \frac{5,5}{2} - 2,383 \Rightarrow e = 0,367 \text{ m} < \frac{B}{6} = 0,917 \text{ m}$$

le sol est entièrement comprimé sous la semelle.

$$\sigma_{\max} = \frac{V}{BL} \left(1 + 6 \frac{e}{B} \right) = \frac{10744,748 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 + 6 \times \frac{0,367}{5,5} \right) = 0,249 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{V}{BL} \left(1 - 6 \frac{e}{B} \right) = \frac{10744,748 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 - 6 \times \frac{0,367}{5,5} \right) = 0,106 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = \frac{3\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{4} = \frac{3 \times 0,249 + 0,106}{4} = 0,213 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 1,5 \times 93 = 0,45 \text{ MPa}$$

C-2-2 / Seisme descendant :

C.V

$$e_c = \frac{36947,818 \times 10^{-3} - 7775,473}{13435,57} = 2,171 \text{ m}$$

$$e = \frac{5,5}{2} - 2,171 = 0,579 \text{ m} < \frac{B}{6} = 0,917 \text{ m} \rightarrow \text{le sol est entièrement comprimé sous la semelle.}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{13435,57 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 + 6 \times \frac{0,579}{5,5} \right) = 0,362 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{13435,57 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 - 6 \times \frac{0,579}{5,5} \right) = 0,082 \text{ MPa}$$

$$\sigma_r = \frac{3 \times 0,362 + 0,082}{4} = 0,292 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 0,45 \text{ MPa C.V}$$

C-3 / Vérification au glissement : à l'ELU

Le cas le plus défavorable est celui du seisme ascendant

$$H \leq \frac{V \tan \varphi}{1,2} + \frac{CA'}{1,5}$$

$$H = 671,713 \text{ kN} < \frac{10744,748 \times \tan 30^\circ}{1,2} + \frac{120 \times 60,5}{1,5} = 10009,57 \text{ kN}$$

C.V

Exercice 1bis:

Mêmes données de l'exercice 1.
Vérifier l'enfacement de la pile:

- a/ Longitudinalement; quand une des deux travées est chargée par le système D240.
- b/ Transversalement; quand le carvoi D240 est excentré.

Solution:

a/ Longitudinalement: D240 appliqué sur une seule travée

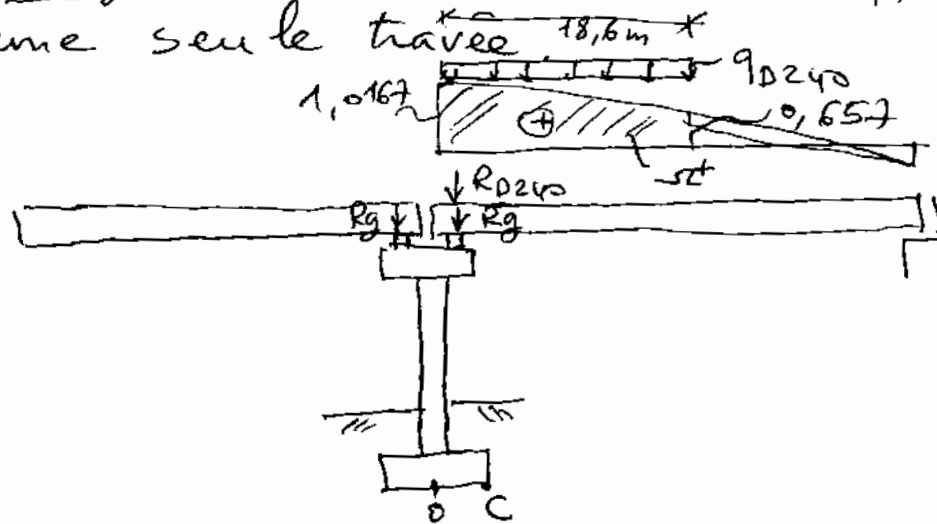


Fig. A 23 - Une travée chargée par D240.

$$q_{D240} = \frac{2400}{18,6} = 129,032 \text{ kN/m}^2$$

$$\eta^+ = \frac{(1,0167 + 0,657)}{2} \times 18,6 = 15,565$$

$$R_{D240} = 9 \times 10^2 = 129,032 \times 15,565 = 2008,383 \text{ kN}$$

$$R_g = 2667,860 \text{ kN}$$

 $\bar{a} \models L S, \text{ or } a:$

Désignation	V (kN)	d (m)	M _s (kN.m)
- Tablier : Droit : R _g x (1,0)	2667,86	2,20	5869,292
Gauche: R _g x (1,0)	2667,86	3,30	8803,938
- R _D 240 x (1,0)	2008,383	2,20	4418,443
- Murettes	21,45	2,75	58,5875
- Dés d'appuis : de droite	3,75	2,2	8,25
de gauche	3,75	3,3	12,375
- Chevêtre	759	2,75	2087,25
- Fûts	771,5	2,75	2161,625
- Semelle	2268,75	2,75	6239,063
- Remblai	2389,57	2,75	6571,318
Σ =	13565,623	—	36242,917

$$e_c = \frac{M_s - M_c}{V} : e_c = \frac{36242,917 - 0}{13565,623} = 2,672 \text{ m}$$

$$e = \frac{5,5}{2} - 2,672 \Rightarrow e = 0,078 \text{ m} < \underline{B} = 0,917 \text{ m}$$

le sol est entièrement comprimé sous la semelle.

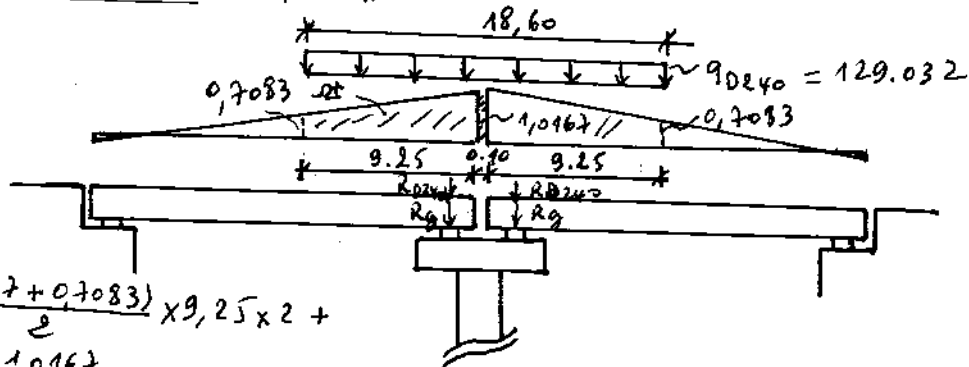
$$\sigma_{\max} = \frac{13565,623 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 + 6 \times \frac{0,078}{5,5} \right) = 0,243 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{13565,623 \times 10^{-3}}{5,5 \times 11} \times \left(1 - 6 \times \frac{0,078}{5,5}\right) = 0,205 \text{ MPa}$$

$$G_v = \frac{3G_{\max} + G_{\min}}{4} : G_v = \frac{3 \times 0,243 + 0,205}{4}$$

$$\sigma_N = 0,234 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 0,3 \text{ MPa} \quad \text{C.V}$$

b/ Transversement : D₂₄₀ excentré



$$\sigma^2 = \frac{(1,0167 + 0,7083)}{2} \times 9,25 \times 2 + 0,1 \times 1,0167$$

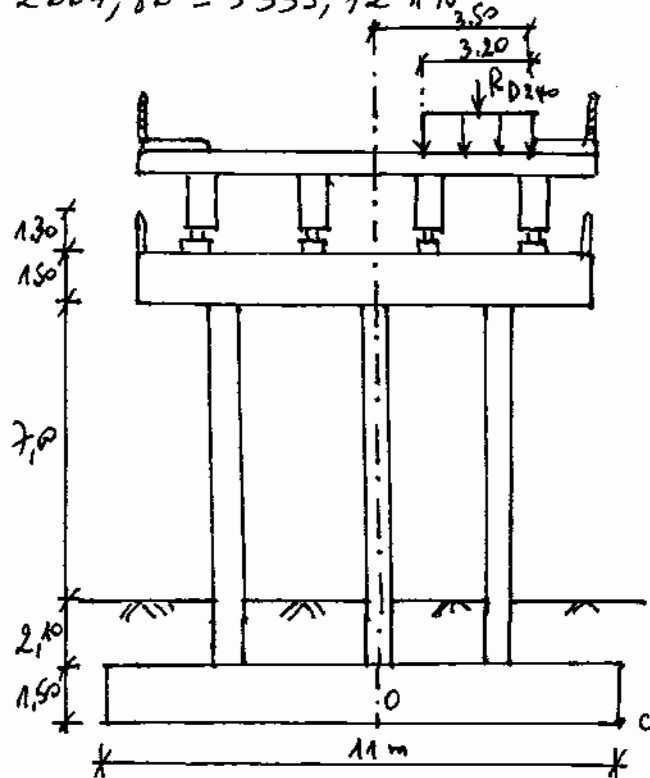
$$-R^+ = 16,058$$

$$R_{D240} = q \times r^+ = 129.032 \times 16,058 = 2072 \text{ kN}$$

Fig. A-24 2 travées chargées
par D240.

$$d(D240) = \frac{11}{2} - \left(\frac{3.20}{2} + 0,3 \right) = 3.60 \text{ m}$$

$$2 R_g = 2 \times 2667,86 = 5335,72 \text{ kN}$$



à l'E.L.S, on a:

Désignation	V (kN)	d (m)	M _s (kN.m)
- Tablier : 2 R _g x (1,0)	5335,720	5,5	29346,460
- R _{D240} x (1,0)	2072	3,6	7459,200
- Murettes : 0,15 x 1,3 x 2,2 x 25	10,725	0,975	10,457
0,15 x 1,3 x 2,2 x 25	10,725	10,025	107,518
- Dés d'appuis : 0,5 x 0,5 x 0,15 x 25 x 8 x (1,0)	7,50	5,5	41,25
- Chevêtre : 2,2 x 1,5 x 9,20 x 25 x (1,0)	759	5,5	4174,5
- Fûts : $\pi \times \frac{1,2^2}{4} \times 9,1 \times 25 \times 3 \times (1,0)$	771,5	5,5	4243,25
- Semelle	2268,75	5,5	12478,125
- Remblai	2389,57	5,5	13142,635
$\Sigma =$	13625,49	—	71003,395

$$e_c = \frac{71003,395 - 0}{13625,49} = 5,211 \text{ m} : e = \frac{L}{2} - e_c \Rightarrow e = \frac{11}{2} - 5,211 = 0,289 \text{ m} < \frac{L}{6} = 1,83$$

Le sol est entièrement comprimé sous la semelle.

$$\sigma_{\max} = \frac{V}{BL} \left(1 + 6 \frac{e}{L} \right) : \sigma_{\max} = \frac{13625,49 \times 10^3}{5,5 \times 11} \times \left(1 + 6 \times \frac{0,289}{11} \right) = 0,261 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{V}{BL} \left(1 - 6 \frac{e}{L} \right) : \sigma_{\min} = \frac{13625,49 \times 10^3}{5,5 \times 11} \times \left(1 - 6 \times \frac{0,289}{11} \right) = 0,190 \text{ MPa}$$

$$\sigma_v = \frac{3 \sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{4} : \sigma_v = \frac{3 \times 0,261 + 0,190}{4} = 0,243 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 0,3 \text{ MPa}$$

C.V

5-2 Calcul des charges revenant à chaque dé d'appui:

Etape 1 : On calcule la réaction maximale R^{max} sur la pile.

a- Charge répartie : $R^{max} = q(\sum z_1^+ + \sum z_2^+) \dots (A-17)$

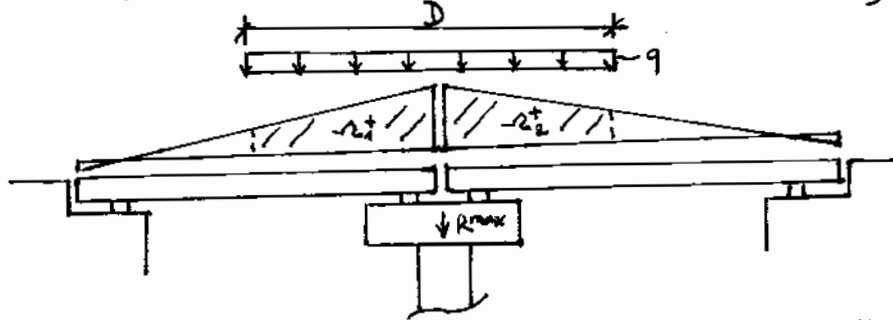


Fig. A-25 Réaction maximale d'une pile sous une charge répartie.

b- Charges concentrées :

Exemple du système Bc : $R^{max} = n \times b_c \times S_{Bc} \times (\sum P_i \cdot y_i) \dots (A-18)$
 n est le nombre de files de camions.

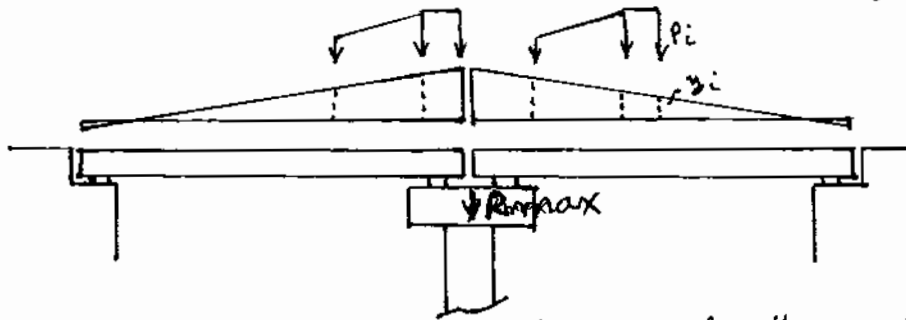


Fig. A-26 Réaction maximale d'une pile sous des charges concentrées.

Etape 2 : On dessine les lignes d'influence des réactions R_i des dé d'appuis.

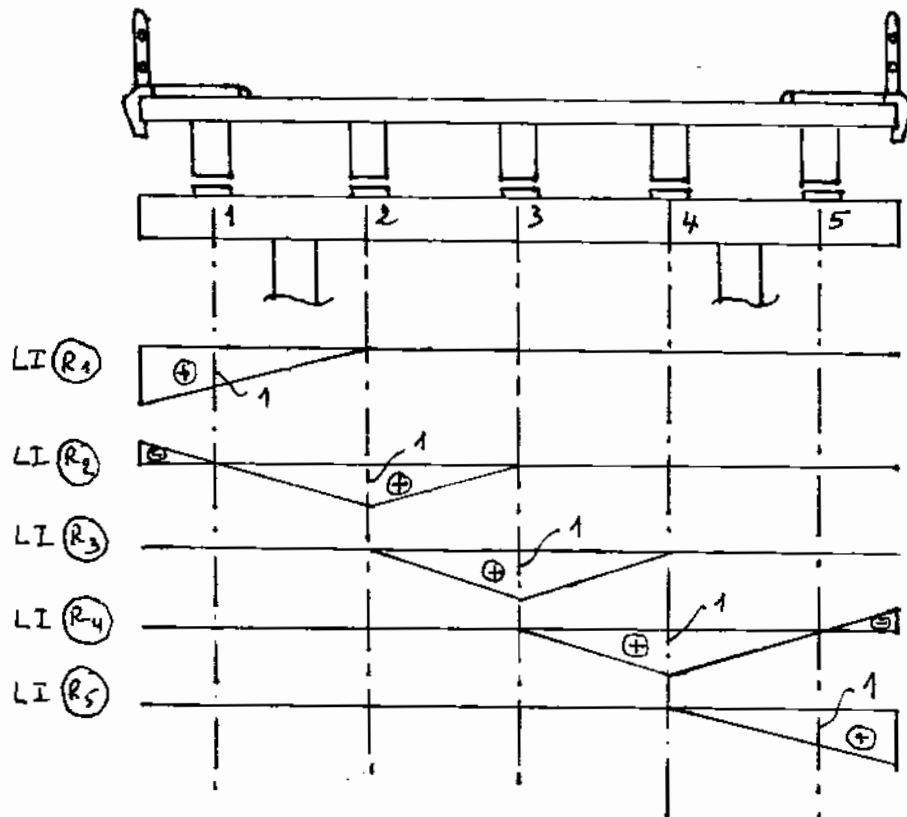


Fig. A-27 Lignes d'influence des réactions de chaque dé d'appui.

Etape 3: On charge les lignes d'influence des réactions des d s d'appui par la force r donn e par :

$$\left. \begin{array}{l} \text{charge r p rt e : } r = \frac{R_{\max}}{L_{\text{charg e}}} \\ \text{charges concentr es : } r_i = \frac{R_{\max}}{m} \end{array} \right\} \dots (A-19)$$

où m est le nombre de files de roues.

Etape 4: On calcule la réaction de chaque d  d'appui

$$\left. \begin{array}{l} \text{charge r p rt e : } R_i = r \cdot \Omega_i^+ \\ \text{charge concentr e : } R_i = \sum r_i \cdot y_i \end{array} \right\} \dots (A-20)$$

D'après l'exemple de la figure A-28, on a :

$$\begin{aligned} R_1 &= r \times \Omega_1^+ \\ R_2 &= r \times \Omega_2^+ + r_i \times y_1^{(2)} \\ R_3 &= r_i \times (y_1^{(3)} + y_2^{(3)}) + r \times \Omega_3^+ \\ R_4 &= r_i \times y_1^{(4)} \\ R_5 &= 0 \end{aligned}$$

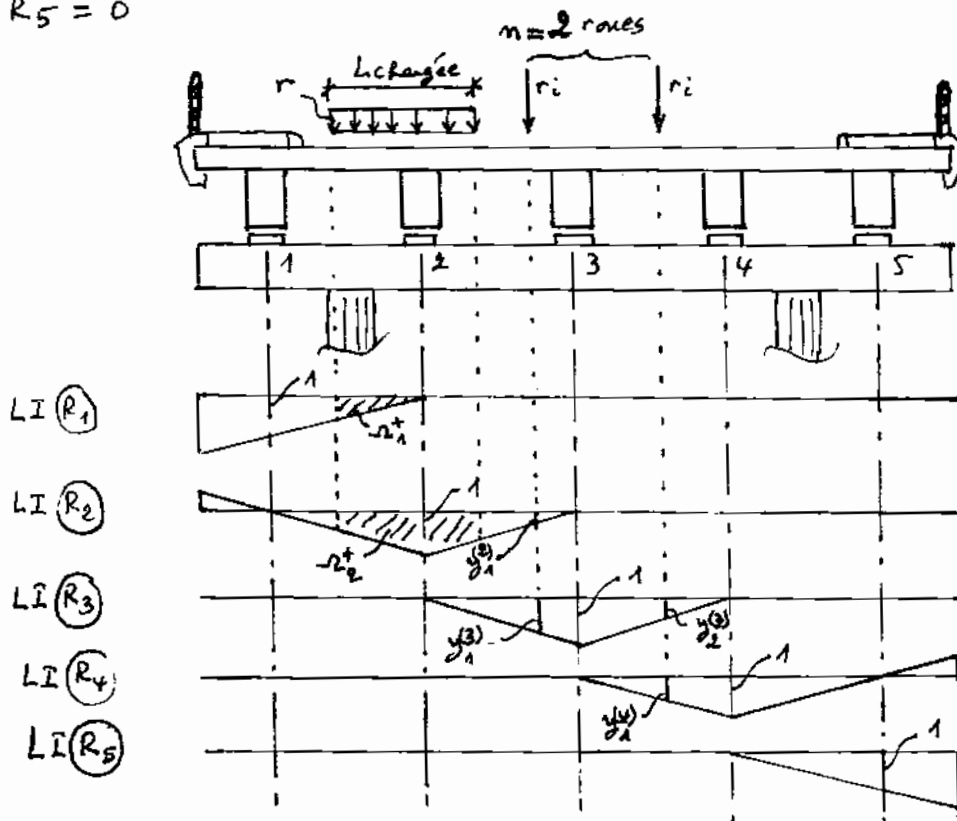


Fig. A-28 Changement des lignes d'influences des réactions R_i des d s d'appuis.

Exercice 3: Pour le pont de l'exercice 1, évaluer la réaction de chaque d  d'appui due à :

- 1) la charge permanente.
- 2) Le système Bc excentré vers la droite.

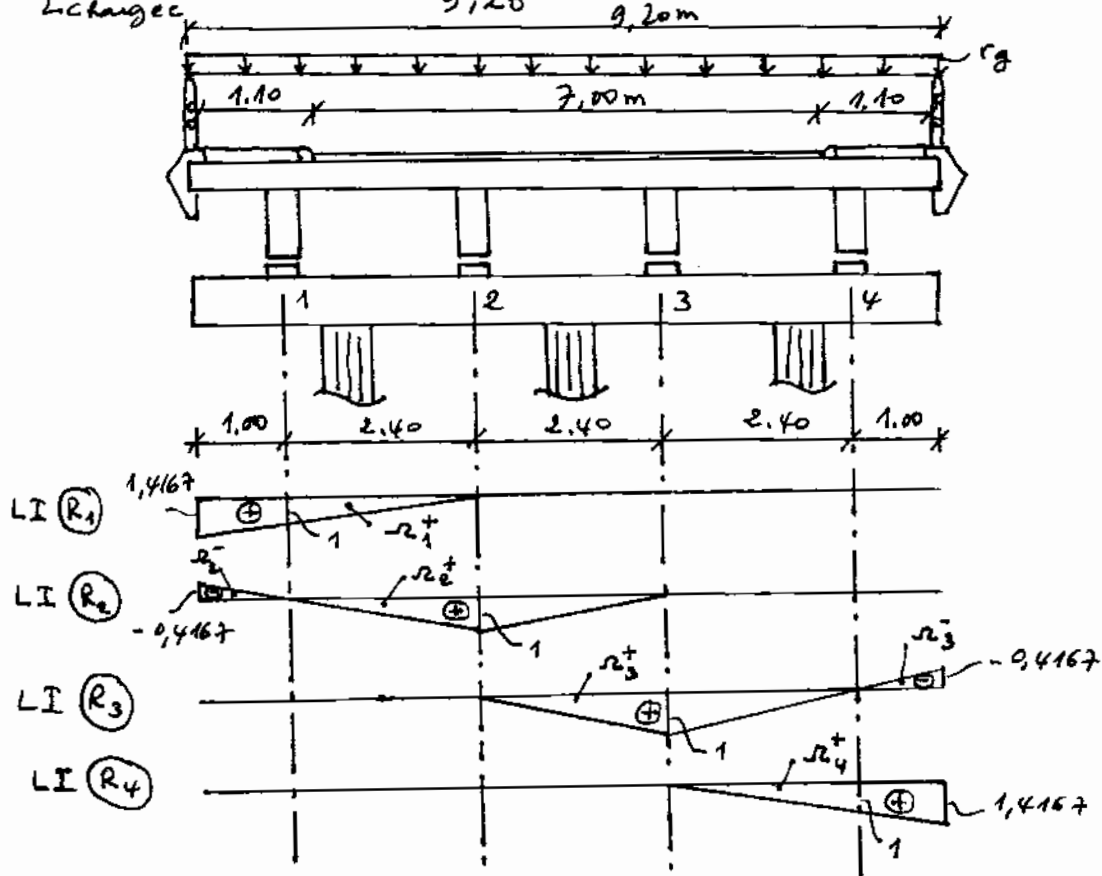
Solution:

1) Les réactions dues à la charge permanente.

$$R_g^{\max} = 2 \times g \frac{L_b}{2}$$

$$R_g^{\max} = 2 \times 172,12 \times \frac{31}{2} \Rightarrow R_g^{\max} = 5335,720 \text{ kN}$$

$$r_g = \frac{R_g^{\max}}{L_{\text{chargée}}} : r_g = \frac{5335,72}{9,20} \Rightarrow r_g = 579,970 \text{ kN/ml}$$



$$\eta_1^+ = \frac{1}{2} \times 3,40 \times 1,4167 = 2,408$$

$$\eta_2^+ = \frac{1}{2} \times 4,8 \times 1 = 2,40 : \eta_2^- = + \frac{1}{2} \times (-0,4167) \times 1 = -0,208$$

$$\eta_3^+ = 2,40 : \eta_3^- = -0,208$$

$$\eta_4^+ = 2,408$$

$$R_{1g} = r_g \times \eta_1^+ : R_{1g} = 579,97 \times 2,408 = 1396,568 \text{ kN}$$

$$R_{2g} = r_g \times (\eta_2^+ + \eta_2^-) : R_{2g} = 579,970 \times (2,4 - 0,208) = 1271,294 \text{ kN}$$

$$R_{3g} = 1271,294 \text{ kN}$$

$$R_{4g} = 1396,568 \text{ kN}$$

$$R_{1g} + R_{2g} + R_{3g} + R_{4g} = (1396,568 + 1271,294) \times 2 = 5335,724 \text{ kN} = R_g^{\max}$$

2) Calculons les coefficients b_c et S_{bc}

Pont de classe I
nombre de voies $n=2$ } $\xrightarrow{\text{tab}} b_c = 1,10$

$$S_{Bc} = 1 + \frac{0,4}{1+0,2L} + \frac{0,6}{1+4 \times \frac{G}{S_{Bc}}}$$

Calcul des réactions $\rightarrow L = L_p = 30 \text{ m}$

$$G = g \times L : G = 172,12 \times 30 = 5163,6 \text{ kN}$$

Sur une longueur $L = 30 \text{ m}$, on peut mettre 2 camions B_c longitudinalement et 2 files transversalement, soit au total 4 camions.

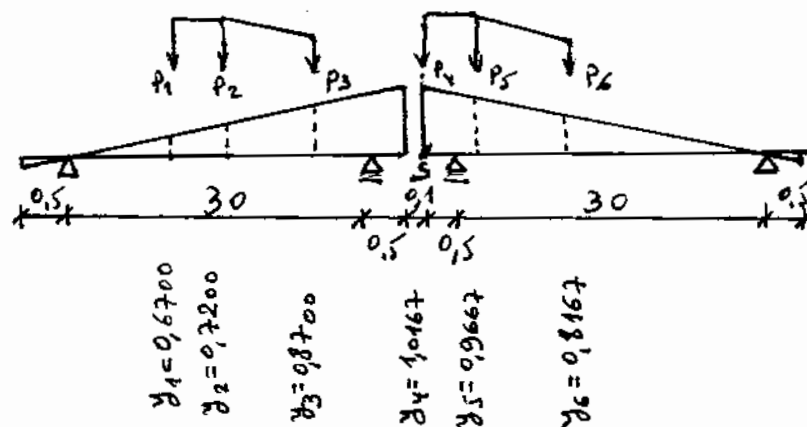
$$B_c = 4 \times 300 = 1200 \text{ kN}$$

$$S_{Bc} = B_c \times b_c = 1200 \times 1,1 = 1320 \text{ kN}$$

$$S_{Bc} = 1 + \frac{0,4}{1+0,2 \times 30} + \frac{0,6}{1+4 \times \frac{5163,6}{1320}} \Rightarrow S_{Bc} = 1,093$$

Cherchons la position des essieux B_c qui donne la réaction maximale dans la pile. Nous utilisons la méthode d'approximations successives avec $u_s = 30,6 \text{ m}$ et $l = 61,1 \text{ m}$ (fig. ci-dessous)

Force en S	R(kN)	R. u_s/l	R _{g1}	R _{g2}	$R_{g1} \geq R.u_s/l$ et $R_{g2} < R.u_s/l$
P ₆	600	300,49	600	540	C.N.V
P ₅	"	"	540	420	C.N.V
P₄	"	"	420	300	C.V
P ₃	"	"	300	240	C.N.V
P ₂	"	"	240	120	C.N.V
P ₁	"	"	120	0	C.N.V



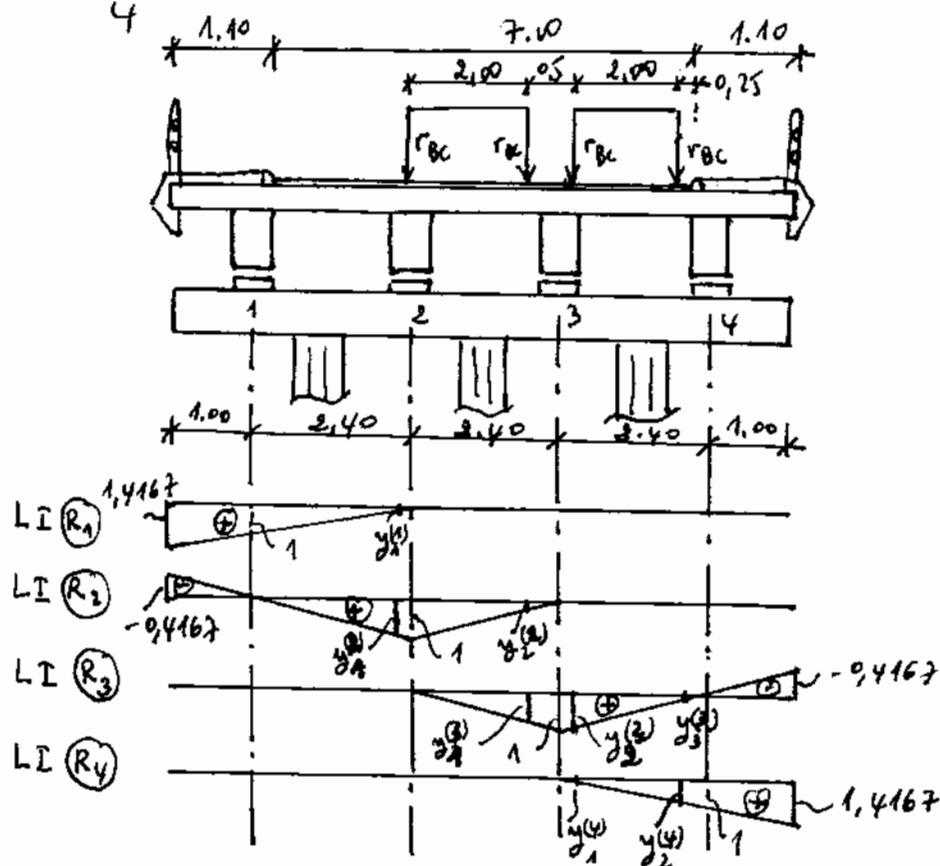
$$R_{Bc}^{\max} = n \times b_c \times S_{Bc} \times P \left(y_1 + y_2 + \frac{y_3}{2} + y_4 + y_5 + \frac{y_6}{2} \right)$$

$$R_{Bc}^{\max} = 2 \times 1,1 \times 1,093 \times 120 \times \left(0,670 + 0,720 + \frac{0,870}{2} + 1,0167 + 0,9667 + \frac{0,8167}{2} \right)$$

$$R_{Bc}^{\max} = 1216,752 \text{ kN}$$

$$r_{Bc} = \frac{R_{Bc}^{max}}{4} \quad (\text{on dispose de 4 files de rones})$$

$$r_{Bc} = \frac{1216,752}{4} = 304,188 \text{ kN}$$



$$R_{1Bc} = r_{Bc} \times y_1^{(1)} : R_{1Bc} = 304,188 \times 0,0208 = 6,327 \text{ kN}$$

$$R_{2Bc} = r_{Bc} \times (y_1^{(2)} + y_2^{(2)}) : R_{2Bc} = 304,188 \times (0,9792 + 0,1875) = 354,896 \text{ kN}$$

$$R_{3Bc} = r_{Bc} \times (y_1^{(3)} + y_2^{(3)} + y_3^{(3)}) : R_{3Bc} = 304,188 \times (0,8125 + 0,9791 + 0,1458) = 589,333 \text{ kN}$$

$$R_{4Bc} = r_{Bc} \times (y_1^{(4)} + y_2^{(4)}) : R_{4Bc} = 304,188 \times (0,0208 + 0,8541) = 266,134 \text{ kN}$$

$$R_{1Bc} + R_{2Bc} + R_{3Bc} + R_{4Bc} = 1216,69 \text{ kN} \approx 1216,752 \text{ kN}$$

5.3 Calcul du sommier

Il est soumis à un effort de traction F_3 (fig. A-29).

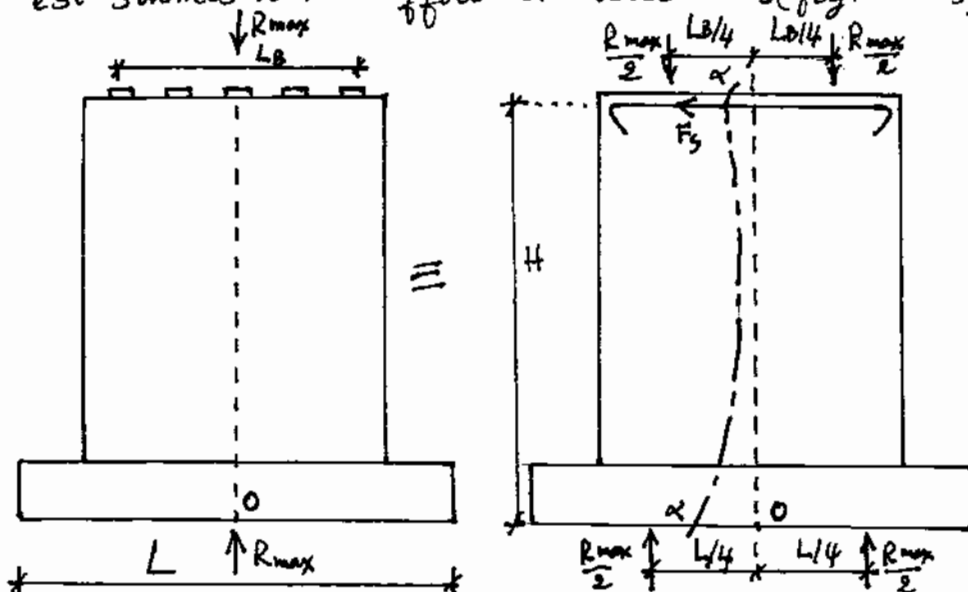


Fig. A-29 Modélisation des efforts dans la pite

Faisons par la pensée la coupe (x-x), le tranch de la pile est en équilibre

$$\sum M^{t/o} = 0 \Rightarrow \frac{R_{max}}{2} \times \frac{L}{4} - \frac{R_{max}}{2} \times \frac{L_B}{4} - F_s \cdot H = 0$$

$$F_s = \frac{R_{max}}{8H} (L - L_B) \dots (A-21)$$

Selon SETRA, l'effort F_s doit être au minimum égal au $\frac{1}{4}$ de R_{max} .

à l'ELU, on a

$$F_s = \sup \left(\frac{R_{max}}{8H} (L - L_B), \frac{R_{max}}{4} \right) \dots (A-22)$$

Exercice 3: Soit le pont-dalle en B.P à 2 travées solidaires représenté de la figure (A-30). Les réactions sur la pile ont été évaluées à:

$$R_g = 2890 \text{ kN}, \quad R_{MC120} = 940 \text{ kN}; \quad \delta_{MC120} = 1,15.$$

Calculer l'effort de traction F_s s'exerçant sur le sommier.

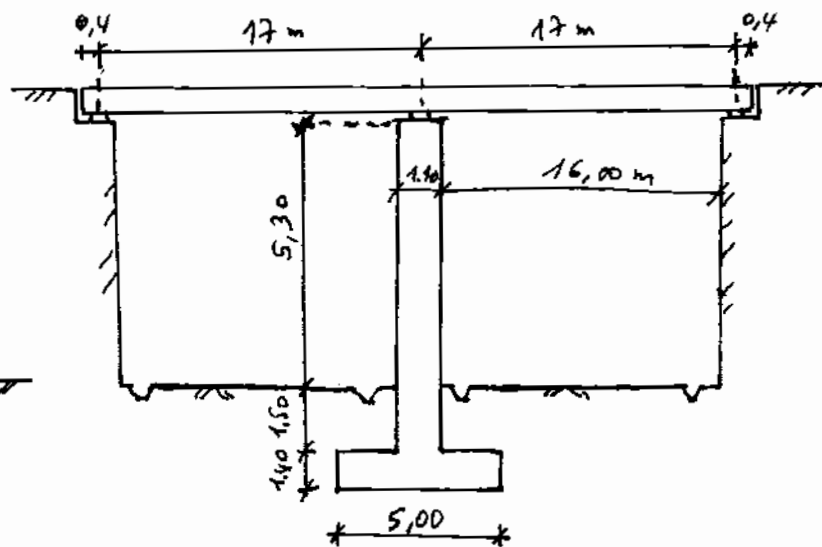
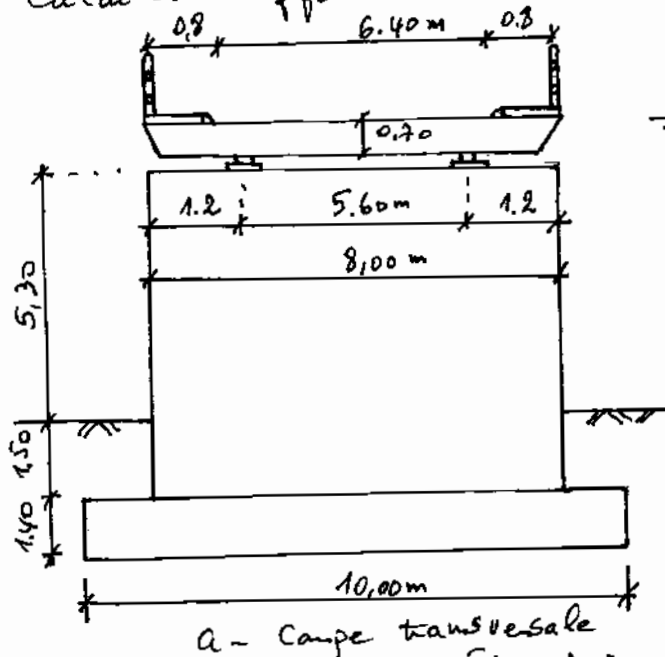


Fig. A-30 Représentation du pont-dalle

Solution:

$$R_{max} = 1,35 R_g + 1,35 (R_{MC120} \times \delta_{MC120})$$

$$R_{max} = 1,35 \times 2890 + 1,35 \times (940 \times 1,15) = 5360,850 \text{ kN}$$

$$L_B = 5,60 \text{ m}$$

$$H = 5,3 + 1,5 + 1,4 = 8,20 \text{ m}$$

$$\text{à l'ELU: } F_s = \sup \left(\frac{R_{max}}{8H} (L - L_B), \frac{R_{max}}{4} \right) \Rightarrow F_s = \sup \left(\frac{5360,85}{8 \times 8,2} \times (10 - 5,6) = 359,569 \text{ kN}, \frac{5360,85}{4} = 1340,213 \text{ kN} \right)$$

$$\text{soit } F_s = 1340,213 \text{ kN.}$$

5-4 Calcul du chevêtre:

5-4-1 Flexion simple:

5-4-1-a / Le fut est un voile:

de cheville est calculé comme une console soumise au moment fléchissant d'encastrement du $\bar{a}$:

- $R_1^{\max}$: la réaction maximale de l'appui appartenant à la console
- g_c : le poids propre du chevalet par mètre linéaire
- G_m : le poids propre de la munette latérale.

Notons qu'à l'ELU : $R_A^{max} = 1.35 R_{1g} + \begin{cases} 1.605 R_{1g} & (ACP, B, St) \\ 1.35 R_{1g} & (D_{240}, Mc120) \end{cases} \dots (A-23)$

$$\bar{a} \text{ 2'ELS: } R_1^{\max} = R_{1g} + \begin{cases} 1,2 R_{1g}(A(1), B) + R_{st} \\ R_{1g}(D_{240}, M_{c120}) \end{cases}$$

D'après l'exemple de la figure A-31, on a l'effort tranchant à l'encastement (S):

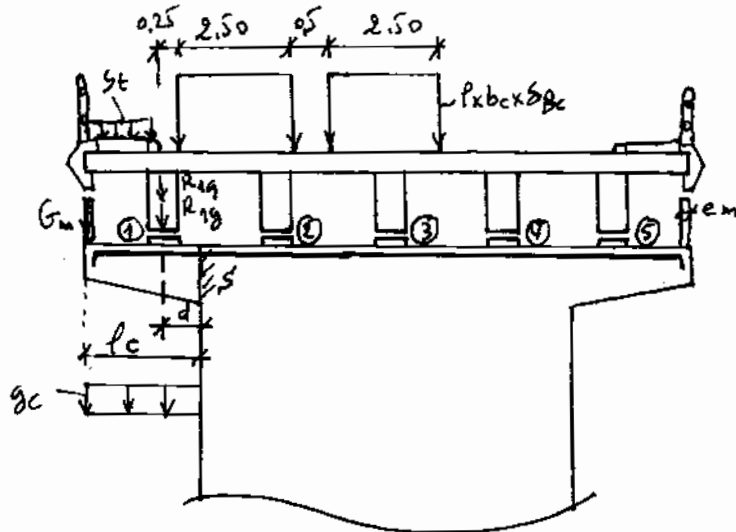
$$\bar{a} \text{ D'ELU: } T_u = -1.35(R_{1g} + g_c \cdot \ell_c + G_m) - 1.605(R_{18c} + R_{15t})$$
$$\bar{a} \text{ 1'ELS : } T_{sc} = -(R_{ig} + g_c \cdot k + G_m) - 1,2 R_{13c} - R_{15t}$$


Fig. A-31 Exemple d'un chevalet en console

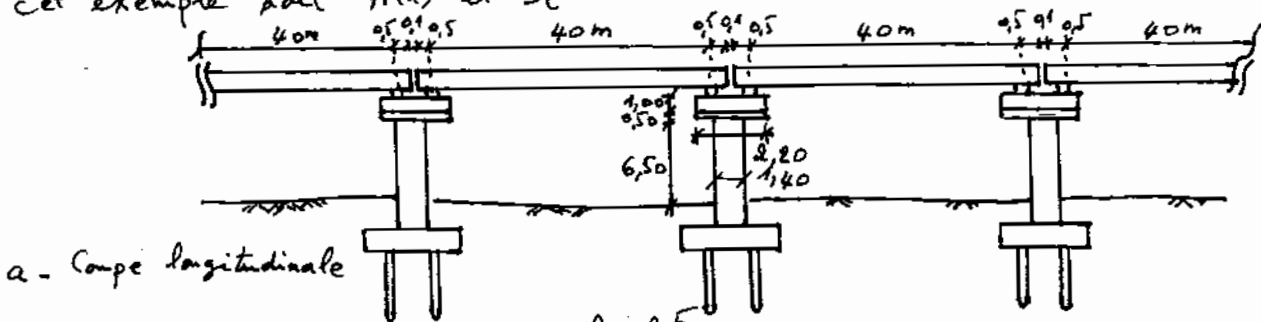
le moment fléchissant à l'encastrement(s) est donné par :

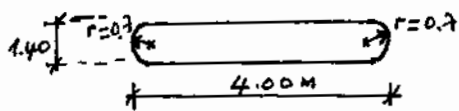
à l'ELU : $M_u = -1.35 \left(R_{1g} \cdot d + g_c \cdot \frac{l_c^2}{2} + G_m \cdot \left(l_c - \frac{e_m}{2} \right) \right) - 1.605 (R_{1Bc} + R_{1st}) \cdot d$

$$\text{à l'ELS : } M_{ser} = - \left(R_{1g} \cdot d + g_c \cdot \frac{l_c^2}{2} + G_m \cdot \left(l_c - \frac{e_m}{2} \right) \right) - 1,2 R_{BC} \cdot d - R_{1st} \cdot d$$

Exercise 4:

Exercice 4:
Calculer les efforts T, M à l'encastrement du chevet d'une pile de viaduc (fig. A-3).
Le poids propre du tablier est 180 kN/ml . Les charges d'exploitation considérées dans
cet exemple sont $A(1)$ et S_5 .





c - coupe A-A sur le fût

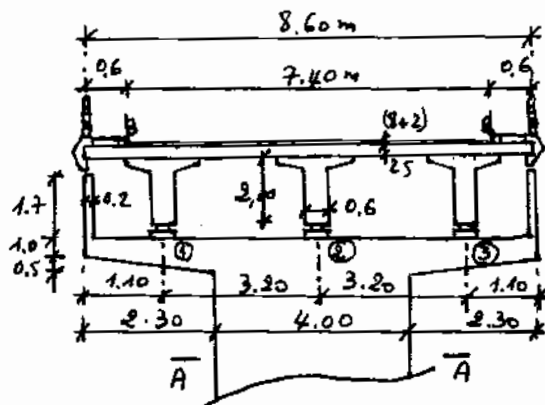


Fig. A-32 Détails de l'ouvrage

b - Coupe transversale

Solution:

Etape 1: Calcul de R_{max} de la pile

a) Charge permanente: $R_g = 2 \times \left(g \times \frac{L_c}{2} \right) : R_g = 2 \times \left(180 \times \frac{4.1}{2} \right) \Rightarrow R_g = 7380 \text{ kN}$

b) Système A(l): $0.5 \quad 40.5 \quad 0.5 \quad 1.0125 \quad 40.5 \quad 0.5$

$R_{A(l)} \rightarrow l = 2 \times 40.5$
 $l = 81 \text{ m}$

$A(l) = 2.3 + \frac{360}{12+l} : A(l) = 2.3 + \frac{360}{12+81} \Rightarrow A(l) = 6.171 \text{ kN/m}^2$

$L_r = 7.40 \text{ m} > 7 \text{ m} \rightarrow \text{classe I}$

$L_c = L_r - 2 \times 0.5 : L_c = 7.40 - 2 \times 0.5 \Rightarrow L_c = 6.40 \text{ m}$

$n = \text{int}\left(\frac{L_c}{3}\right) = 2 : v = \frac{L_c}{n} = \frac{6.40}{2} = 3.20 \text{ m} : \text{classe I}_y \rightarrow a_1 = 1.0$

$A_1(l) = \sup \left\{ \begin{array}{l} a_1 \times A(l) \\ 4 - 0.002 l \end{array} \right\} = \sup \left\{ \begin{array}{l} 6.171 \\ 3.84 \end{array} \right\} \Rightarrow A_1(l) = 6.171 \text{ kN/m}^2$

classe I $\rightarrow v_0 = 3.5 \text{ m}$

$a_2 = \frac{v_0}{v} = \frac{3.50}{3.20} = 1.09375$

$A_2(l) = a_2 \times A_1(l) = 1.09375 \times 6.171 \Rightarrow A_2(l) = 6.750 \text{ kN/m}^2$

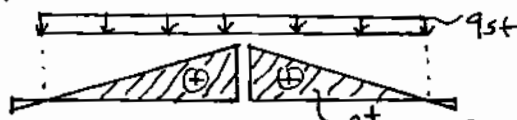
$q_{A(l)} = A_2(l) \times L_c : q_{A(l)} = 6.750 \times 6.40 \Rightarrow q_{A(l)} = 43.200 \text{ kN/ml}$

$\Sigma^+ = 2 \times \left(\frac{1}{2} \times 40.5 \times 1.0125 \right) = 41.00625$

$R_{A(l)} = q_{A(l)} \times \Sigma^+ = 43.200 \times 41.00625 \Rightarrow R_{A(l)} = 1771.470 \text{ kN}$

c) Surcharge du trottoir: $s_t = 1.50 \text{ kN/m}^2$

$q_{st} = s_t \times (l_{t1} + l_{t2}) : q_{st} = 1.5 \times (0.6 + 0.6) = 1.80 \text{ kN/ml}$



$R_{st} = q_{st} \times \Sigma^+ = 1.80 \times 41.00625 \Rightarrow R_{st} = 73.811 \text{ kN}$

Etape 2: Calcul de la réaction R_1 revenant au des d'appuis n° 1

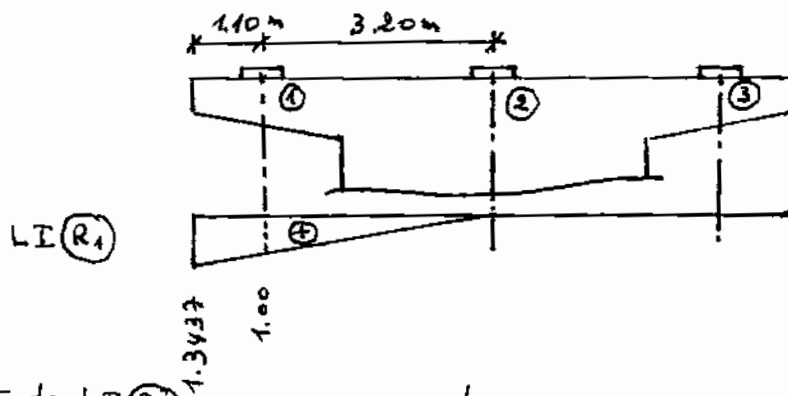
a) calcul de r_g , $r_{A(l)}$ et r_{st}

$r_g = \frac{R_g}{L_{chargée}} : r_g = \frac{7380}{8.60} \Rightarrow r_g = 858.140 \text{ kN/ml}$

$r_{A(l)} = \frac{R_{A(l)}}{L_{chargée}} : r_{A(l)} = \frac{1771.470}{6.40} \Rightarrow r_{A(l)} = 276.792 \text{ kN/ml}$

$r_{st} = \frac{R_{st}}{L_{chargée}} : r_{st} = \frac{73.811}{2 \times 0.6} \Rightarrow r_{st} = 61.509 \text{ kN/ml}$

b) LI (R₁)



c) Chargement de LI (R₁) par r_g, r_{A(1)} et r_{st}.

c1/ R_{1g}

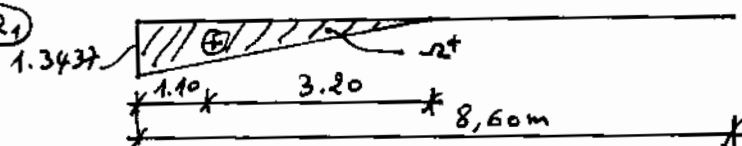
$$\alpha^+ = \frac{1}{2} \times 4,30 \times 1,3437$$

$$\alpha^+ = 2,889$$

$$R_{1g} = r_g \times \alpha^+$$

$$R_{1g} = 858,14 \times 2,889$$

$$R_{1g} = 2479,166 \text{ kN}$$



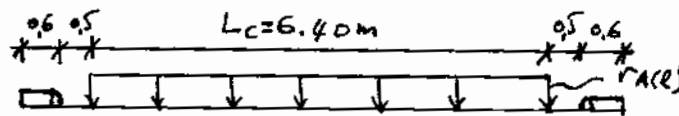
c2/ R_{1A(1)}

$$\alpha^+ = \frac{1}{2} \times 3,20 \times 1 = 1,60$$

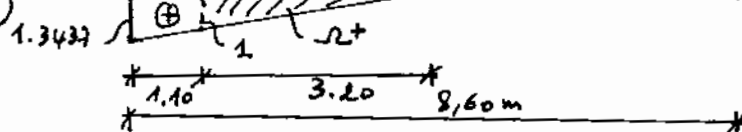
$$R_{1A(1)} = r_{A(1)} \times \alpha^+$$

$$R_{1A(1)} = 276,792 \times 1,60$$

$$R_{1A(1)} = 442,867 \text{ kN}$$



LI (R₁)



c3/ R_{1st}

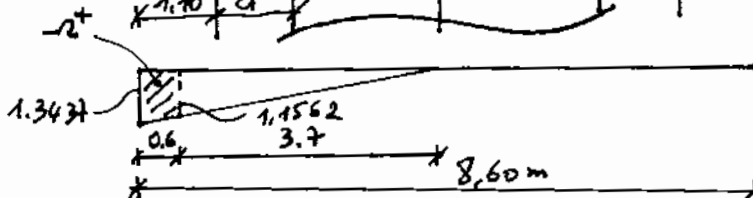
$$\alpha^+ = \frac{(1,3437 + 1,1562)}{2} \times 0,6$$

$$\alpha^+ = 0,75$$

$$R_{1st} = r_{st} \times \alpha^+$$

$$R_{1st} = 61,509 \times 0,75$$

$$R_{1st} = 46,132 \text{ kN}$$



LI (R₁)

c4/ d

Le bras de levier de R₁ par rapport à l'encastrement

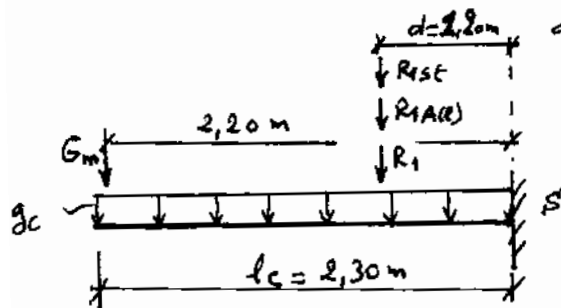
$$d = 2,3 - 1,1 \Rightarrow d = 1,20 \text{ m}$$

Etape 3: Calcul des efforts T, M à l'encastrement de la console.

Le poids de la console: $G_c = (1 \times 2,2 + 1,5 \times 2,2) \times 2,3 \times 25 = 158,125 \text{ kN}$

soit par ml de longueur de la console: $g_c = \frac{G_c}{l_c} = \frac{158,125}{2,3} = 68,75 \text{ kN/ml}$

Le poids de la murette: $G_m = 0,2 \times 1,7 \times 2,2 \times 25 = 18,7 \text{ kN}$



$$d(G_m) = 2,3 - \frac{0,2}{2} = 2,20 \text{ m}$$

a) L'effort tranchant T:

$$\begin{aligned} \text{ELU: } T_u &= -1,35(R_{1g} + g_c l_c + G_m) - 1,605(R_{1A(e)} + R_{1st}) \\ T_u &= -1,35 \times (2479,166 + 68,75 \times 2,3 + 18,7) - 1,605 \times (442,867 + 46,13) \\ T_u &= -4370,431 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{ELS: } T_{ser} = -(R_{1g} + g_c l_c + G_m) - 1,2 R_{1A(e)} - R_{1st}$$

$$T_{ser} = -(2479,166 + 68,75 \times 2,3 + 18,7) - 1,2 \times 442,867 - 46,132$$

$$T_{ser} = 3233,563 \text{ kN}$$

b) le moment fléchissant M:

$$\text{ELU: } M_u = -1,35 \left(R_{1g} \cdot d + g_c \cdot \frac{l_c^2}{2} + G_m \cdot \left(l_c - \frac{e_m}{2} \right) \right) - 1,605 (R_{1A(e)} + R_{1st}) \cdot d$$

$$M_u = -1,35 \times (2479,166 \times 1,20 + 68,75 \times \frac{2,3^2}{2} + 18,7 \times 2,2) - 1,605 \times (442,867 + 46,132) \times 1,2$$

$$M_u = -5259,089 \text{ kN.m}$$

$$\text{ELS: } M_{ser} = - \left(R_{1g} \cdot d + g_c \cdot \frac{l_c^2}{2} + G_m \cdot \left(l_c - \frac{e_m}{2} \right) \right) - (1,2 \times R_{1A(e)} + R_{1st}) \cdot d$$

$$M_{ser} = - \left(2479,166 \times 1,2 + 68,75 \times \frac{2,3^2}{2} + 18,7 \times 2,20 \right) - (1,2 \times 442,867 + 46,132) \times 1,20$$

$$M_{ser} = -3891,070 \text{ kN.m}$$

S-4-1-b) Le fût est composé de plusieurs colonnes

le chevette est assimilée à une poutre continue appuyée sur les colonnes et soumise aux charges:

- R_i : réaction du dé d'appui $n^o(i)$. Cette réaction se décompose R_{ig} et R_{iq} .

- g_c : le poids propre du chevette par mètre linéaire.

- G_m : le poids propre de la murette latérale.

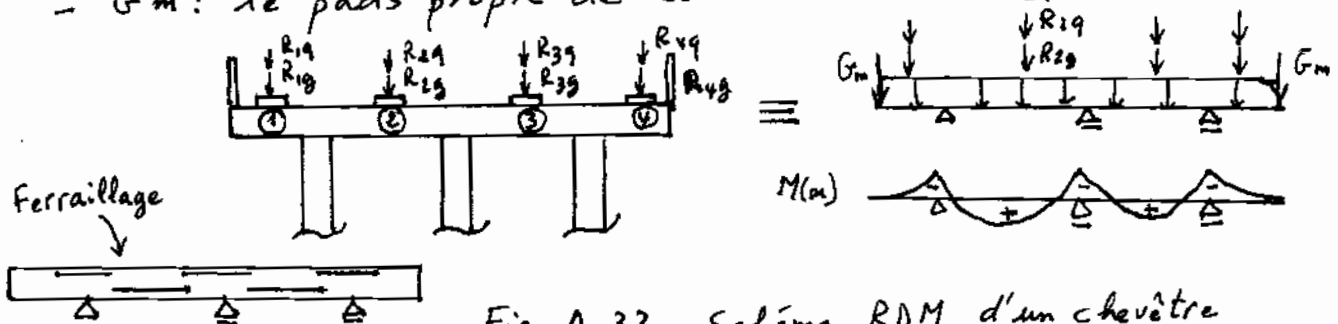
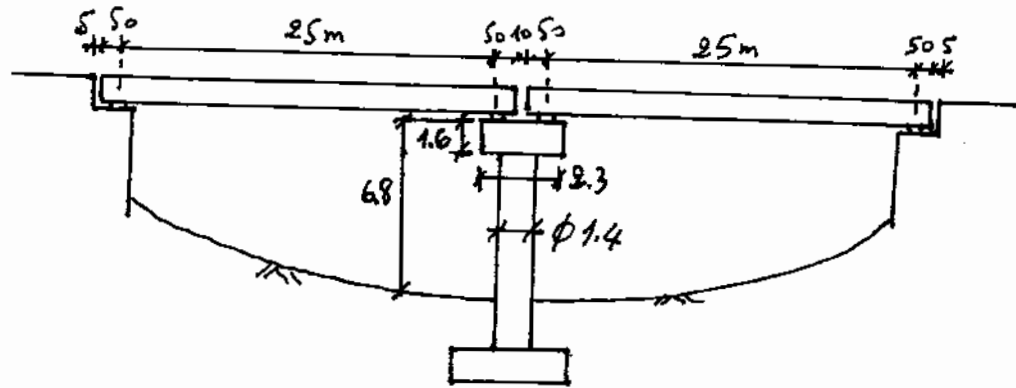


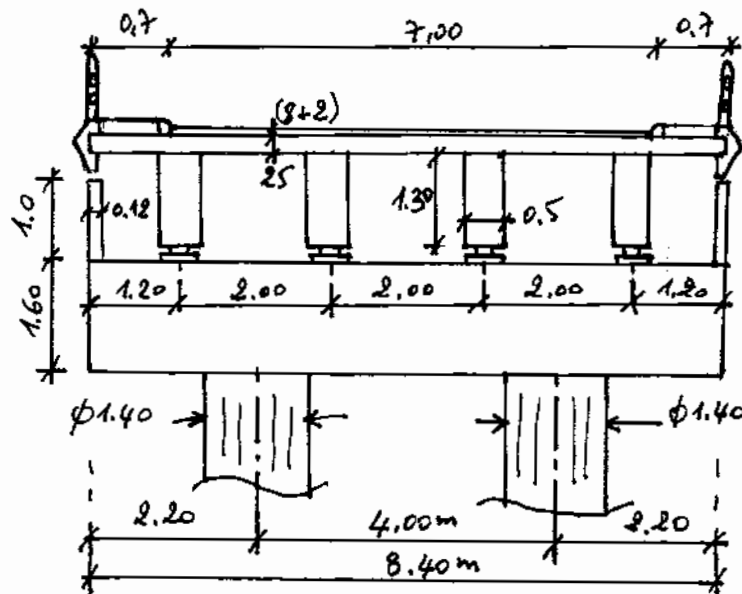
Fig. A-33 Schéma RDM d'un chevette reposant sur 3 colonnes.

Exercice 5:

Pour le chevetre de pile représenté dans la figure A-34, calculer les efforts T, M à l'ELU et l'ELS. La portée de chaque travée est de 25 m, son poids propre est de 172 kN/ml . Le système de charge considéré est le enva D240 centré sur l'axe de l'ouvrage.



a - Coupe longitudinale



b - Coupe transversale

Fig. A-34 Détail de la pile du pont

Solution:

Étape 1: Calcul des réactions R_g et R_{D240} de la pile

a) $R_g = (g \frac{l}{2}) \times 2$: $R_g = (172 \times \frac{26}{2}) \times 2 \Rightarrow R_g = 4472 \text{ kN}$

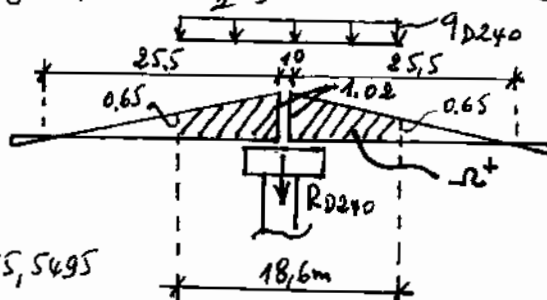
b) $q_{D240} = \frac{2400}{18,6} \text{ kN/ml}$

$\alpha^+ = 2 \times \left(\frac{1,02 + 0,65}{2} \right) \times 9,25 + 1,02 \times 0,1$

$\alpha^+ = 15,5495$

$R_{D240} = q_{D240} \times \alpha^+ = \frac{2400}{18,6} \times 15,5495$

$R_{D240} = 2006,387 \text{ kN}$



Etape 2: Calcul des réactions R_1 et R_2

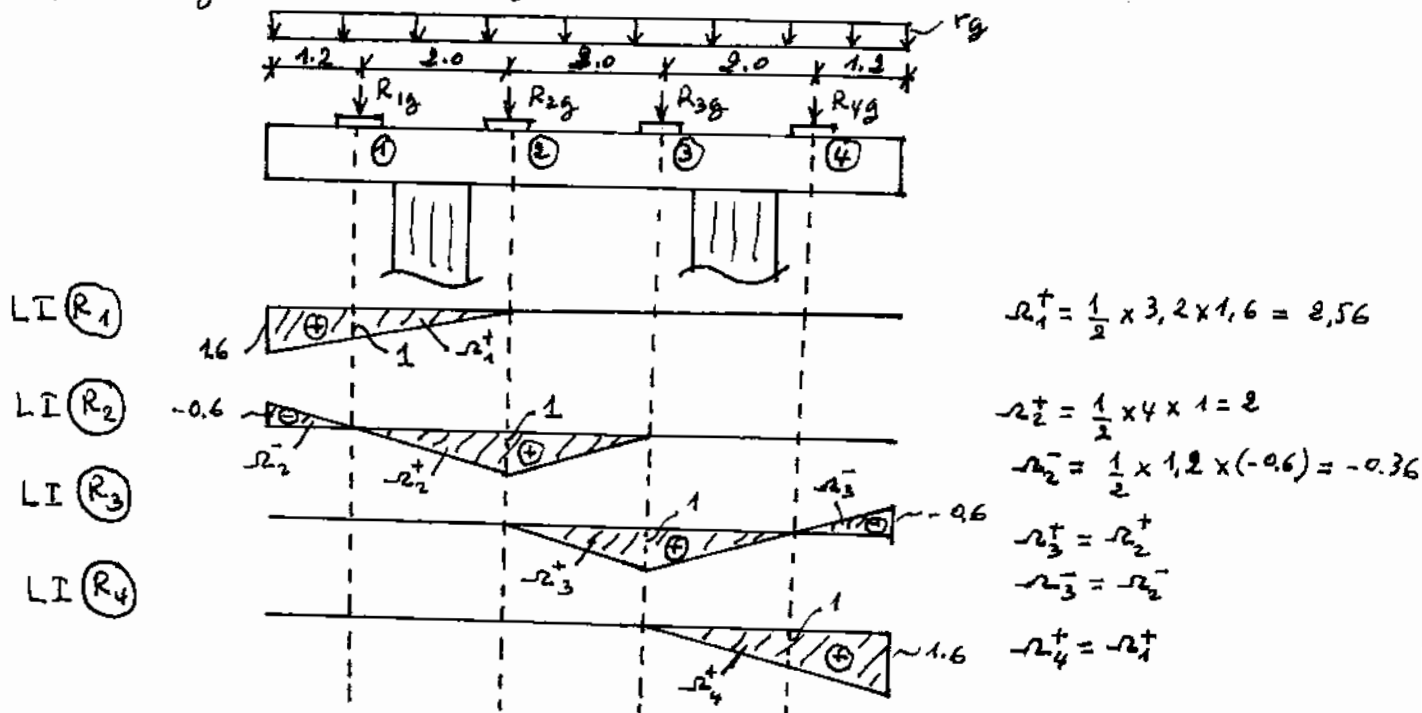
Vu la symétrie de la structure et du chargement, on a $R_1 = R_4$ et $R_2 = R_3$.

a) $r_g = \frac{R_g}{L_{\text{chargée}}} : r_g = \frac{4472}{8,4} \Rightarrow r_g = 532,381 \text{ kN/m}$

$r_{D240} = \frac{R_{D240}}{L_{\text{chargée}}} : r_{D240} = \frac{2006,387}{3,20} \Rightarrow r_{D240} = 626,996 \text{ kN/m}$

b) Chargement de LI (R_1) et LI (R_2)

b1) Chargement avec r_g :

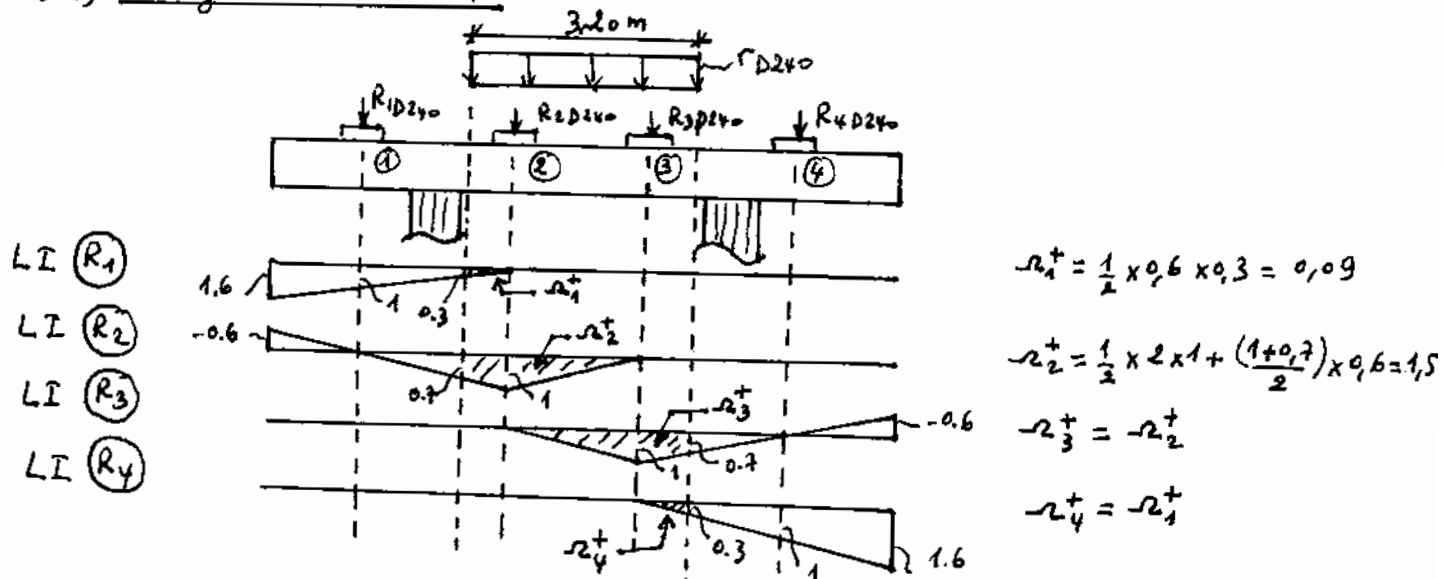


$R_{1g} = r_g \cdot r_1^+ : R_{1g} = 532,381 \times 2,56 \Rightarrow R_{1g} = 1362,895 \text{ kN} : R_{4g} = R_{1g}$

$R_{2g} = r_g \cdot (r_2^+ + r_2^-) : R_{2g} = 532,381 \times (2 - 0,36) \Rightarrow R_{2g} = 873,105 \text{ kN} : R_{3g} = R_{2g}$

N.B: On vérifie bien que $2 \times (R_{1g} + R_{2g}) = R_g = 4472 \text{ kN}$.

b2) Chargement avec r_{D240} :



$$R_{1D240} = r_{D240} \times 2.1 : R_{1D240} = 626,996 \times 0,09 \Rightarrow R_{1D240} = 56,430 \text{ kN}$$

$$R_{2D240} = r_{D240} \times 2.2 : R_{2D240} = 626,996 \times 1,51 \Rightarrow R_{2D240} = 946,764 \text{ kN}$$

$$R_{4D240} = R_{1D240} \text{ et } R_{3D240} = R_{2D240}$$

N.B: On vérifie bien que $2 \times (R_{1D240} + R_{2D240}) = R_{D240} = 2006,387 \text{ kN}$

Etape 3: Calcul des efforts T, M dans le chevêtre

D'après la figure A-34, on a:

- de poids propre du chevêtre: $g_c = b \times h \times \gamma_b : g_c = 2,3 \times 1,6 \times 25$

$$g_c = 92 \text{ kN/m}$$

- de poids propre de la murette latérale: $G_m = 0,12 \times 1,0 \times 2,3 \times 25$

$$G_m = 6,9 \text{ kN}$$

$$\text{ELU: } M_u = 1,35 M_g + 1,35 M_{D240}$$

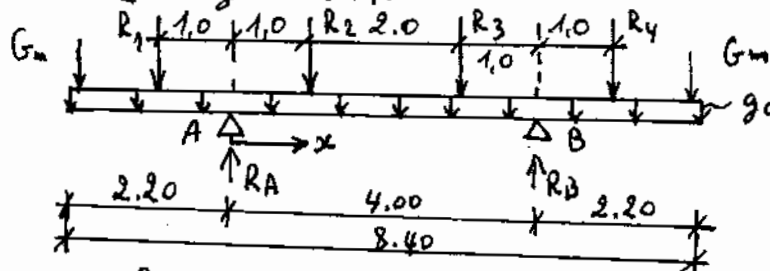
$$\text{ELS: } M_{ser} = M_g + M_{D240}$$

On remarque que $M_u = 1,35 M_{ser}$, le calcul RDM se fait à l'ELS, et une fois les résultats des efforts T et M obtenus, ils seront multipliés par 1,35 pour avoir les efforts à l'ELU.

$$\text{à l'ELS: } R_1 = R_{1g} + R_{1D240} : R_1 = 1362,895 + 56,430 \Rightarrow R_1 = 1419,325$$

$$R_2 = R_{2g} + R_{2D240} : R_2 = 873,105 + 946,764 \Rightarrow R_2 = 1819,869 \text{ kN}$$

$$R_3 = R_2 \text{ et } R_4 = R_1$$



$$R_A = R_B = \frac{g_c \times 8,4}{2} + G_m + R_1 + R_2$$

$$R_A = R_B = 92 \times \frac{8,4}{2} + 6,9 + 1419,325 + 1819,869 \Rightarrow R_A = R_B = 3632,494 \text{ kN}$$

Puisque la structure et le chargement sont symétriques, le moment fléchissant maximal est obtenu à mi-travée ($x = \frac{l}{2} = \frac{4}{2} = 2 \text{ m}$) et le moment minimal (négatif) est obtenu sur l'appui A ou B. Les efforts tranchants maximal et minimal seront calculés au niveau de l'appui A.

$$M^{\max} = M(x = l/2) = R_A \times 2 - G_m \times (2,14 + 2) - R_1 \times 3 - R_2 \times 1 - g_c \times \frac{4,2^2}{2}$$

$$M^{\max} = 3632,494 \times 2 - 6,9 \times 4,14 - 1419,325 \times 3 - 1819,869 \times 1 - 92 \times \frac{4,2^2}{2}$$

$$M^{\max} = 347,138 \text{ kN.m}$$

$$M^{\min} = M(x=0) = -G_m \times 2,14 - R_1 \times 1 - g_c \times \frac{2,2^2}{2}$$

$$M^{\min} = -6,9 \times 2,14 - 1419,325 \times 1 - 92 \times \frac{2,2^2}{2}$$

$$M^{\min} = -1656,731 \text{ kN.m}$$

$$T^{\min} = T_A(\text{gauche}) = -G_m - R_1 - g_c \times 2,2$$

$$T^{\min} = -6,9 - 1419,325 - 92 \times 2,2$$

$$T^{\min} = -1628,625 \text{ kN}$$

$$T^{\max} = T_A(\text{droit}) = T_A(\text{gauche}) + R_A$$

$$T^{\max} = -1628,625 + 3632,494$$

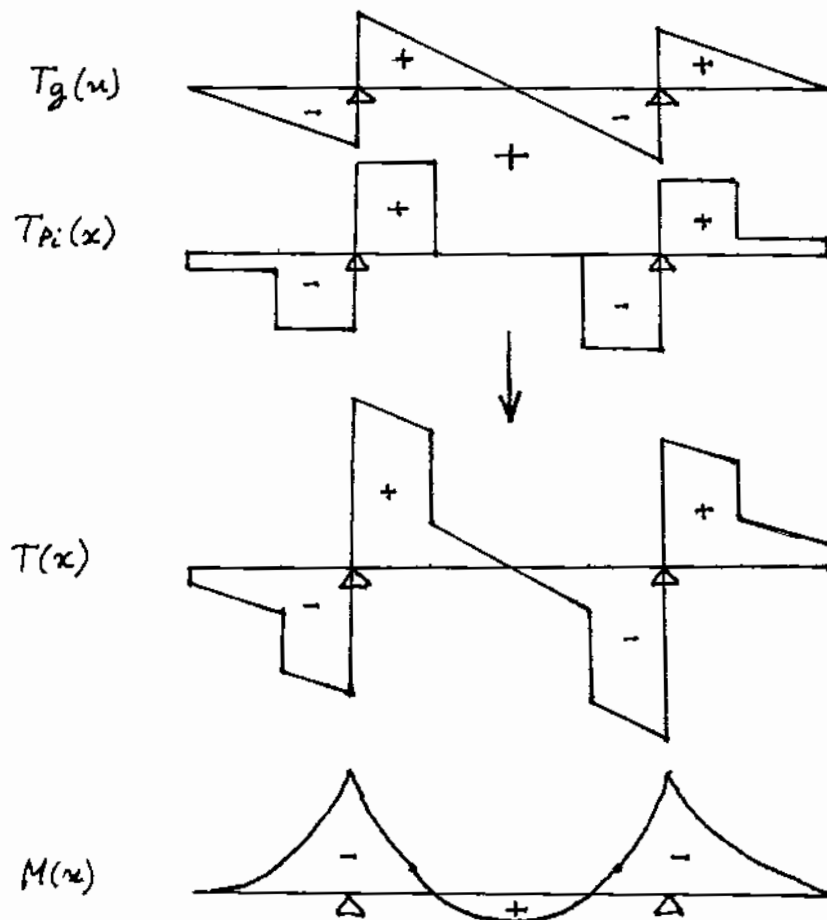
$$T^{\max} = 2003,869 \text{ kN}$$

$$\bar{a} \text{ l'ELU} : M^{\max} = 1,35 \times 347,138 \Rightarrow M^{\max} = 468,636 \text{ kN.m}$$

$$M^{\min} = 1,35 \times (-1656,731) \Rightarrow M^{\min} = -2236,587 \text{ kN.m}$$

$$T^{\max} = 1,35 \times 2003,869 \Rightarrow T^{\max} = 2705,223 \text{ kN}$$

$$T^{\min} = 1,35 \times (-1628,625) \Rightarrow T^{\min} = -2198,644 \text{ kN}$$



Ferraillage
du chevêtre



Remarques:

- 1) Les réactions d'appui du chevêtre deviennent des efforts normaux par les fûts.
- 2) Si le chevêtre repose sur plus de 2 appuis, le système sera résolu par la méthode des 3 moments.

5-4-2 Torsion

Le chevet est soumis à la torsion dans les 3 cas suivants:

1^{er} cas : En construction

à l'ELU : $M_{tu} = 1,35 (R_g \cdot e + R_{prc} \cdot e) \dots (A-24)$

à l'ELS : $M_{ser} = R_g \cdot e + R_{prc} \cdot e \dots (A-25)$

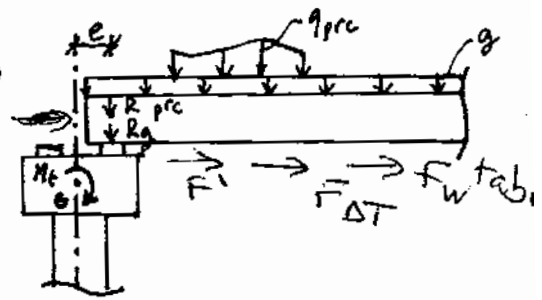


Fig. A-35 Torsion du chevet en phase de construction.

2^e cas : En exploitation

Une seule travée est chargée avec l'existence éventuelle de la force de freinage F_{fr} .

On chargera la plus grande des 2 travées. Dans l'exemple de la figure A-36, c'est la travée n° ② qui est plus longue.

a/ charge routière normale q_r telle que A(1), B accompagnés de st.

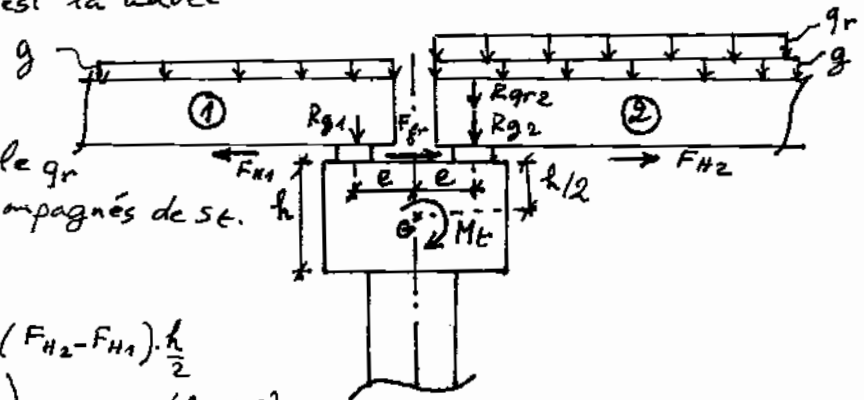


Fig. A-36 Torsion du chevet en phase d'exploitation.

à l'ELU :

$$M_{tu} = 1,35 (R_{g2} - R_{g1}) \cdot e + 1,35 (F_{H2} - F_{H1}) \cdot \frac{h}{2} + 1,605 (R_{gr2} \cdot e + F_{fr} \cdot \frac{h}{2}) \dots (A-26)$$

F_{H1} et F_{H2} sont les forces horizontales dans les travées ① et ② dues aux déformations différentes de retrait, fluage et température. F_{H1} et F_{H2} sont de signes opposés, si les 2 travées sont identiques la résultante de F_{H1} et F_{H2} est nulle.

à l'ELS :

$$M_{ser} = (R_{g2} - R_{g1}) \cdot e + (F_{H2} - F_{H1}) \cdot \frac{h}{2} + 1,2 (R_{A(1), B} \cdot e + F_{fr} \cdot \frac{h}{2}) + R_{st} \cdot e \dots (A-27)$$

b/ Charge routière particulière q_{rp} (M_{c120} , D_{240}).

On ne fait pas intervenir la force de freinage.

à l'ELU :

$$M_{tu} = 1,35 (R_{g2} - R_{g1}) \cdot e + 1,35 (F_{H2} - F_{H1}) \cdot \frac{h}{2} + 1,35 R_{qrp} \cdot e \dots (A-28)$$

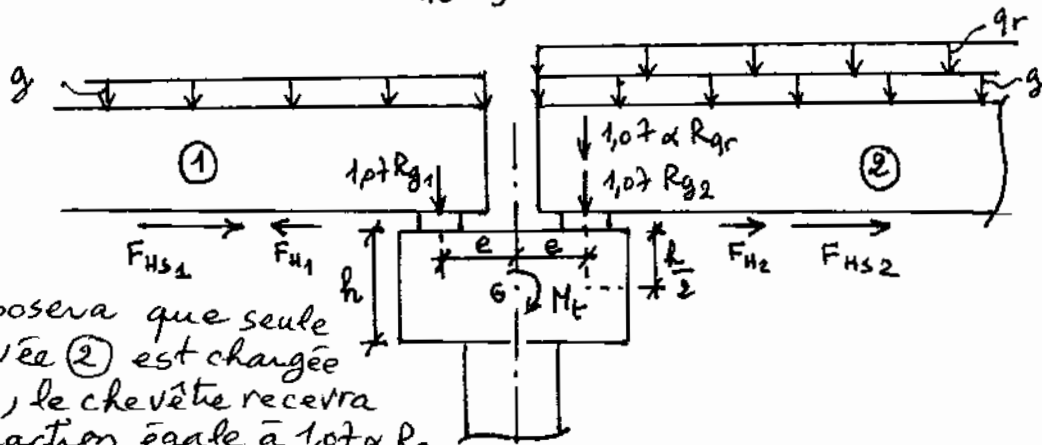
à l'ELS :

$$M_{ser} = (R_{g2} - R_{g1}) \cdot e + (F_{H2} - F_{H1}) \cdot \frac{h}{2} + R_{qrp} \cdot e \dots (A-29)$$

3^e cas : En seisme

On va considérer le seisme horizontal et le seisme descendant. Le chevet recevra les forces sismiques horizontales F_{Hs1} et F_{Hs2} qui ont le même sens (fig. A-37). Il recevra aussi $1,07 R_{g1}$ et $1,07 R_{g2}$.

$$\left. \begin{aligned} F_{Hs1} &= \frac{G_1}{10} \\ F_{Hs2} &= \frac{G_2}{10} \end{aligned} \right\} \dots (A-30)$$



On supposera que seule la travée (2) est chargée par q_r , le châpêtre recevra une réaction égale à $1,07 \alpha R_{gr}$. α est donné par l'éq (A-32).

Fig. A-37 Torsion du châpêtre en cas de séisme.

à l'ELU :

$$M_{tu} = 1,07(R_{g2} - R_{g1}) \cdot e + 1,07 \alpha R_{gr} \cdot e + (F_{H2} - F_{H1}) \cdot \frac{h}{2} + (F_{Hs1} + F_{Hs2}) \cdot \frac{h}{2} \dots (A-31)$$

où α est un coefficient multiplicateur d'accompagnement de la surcharge.

$$\left. \begin{aligned} \text{Class I} : \alpha &= 0,6 \\ \text{" II} : \alpha &= 0,4 \\ \text{" III} : \alpha &= 0,2 \end{aligned} \right\} \dots (A-32)$$

Exercice 6 :

Soit le pont de l'exercice 5. On se propose de calcul de moment de torsion dans le châpêtre de la pile en phase de construction.

Les surcharges de chantier sont assimilées à une charge répartie $S_{prc} = 10 \text{ kN/m}^2$ d'étendue (longueur) $L_g = 12 \text{ m}$ et de largeur $B_g = 6,5 \text{ m}$ placée à l'extrémité gauche du tablier.

Solution :

Etape 1 : Calcul des réactions R_g et R_{gprc}

a/ $R_g = g \cdot \frac{L_g}{2} : R_g = 172 \times \frac{26}{2} \Rightarrow R_g = 2236 \text{ kN}$

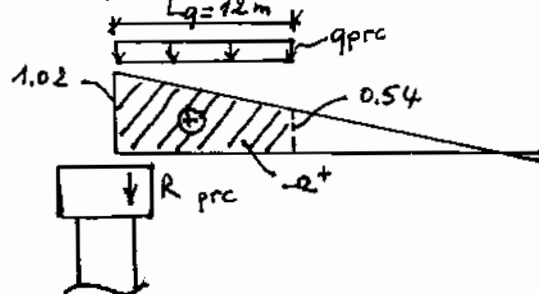
b/ $q_{prc} = S_{prc} \times B_g : q_{prc} = 10 \times 6,5 = 65 \text{ kN/ml}$

$$x_2^+ = \frac{(1,02 + 0,54) \times 12}{2} = 9,36$$

$$R_{prc} = q_{prc} \times x_2^+$$

$$R_{prc} = 65 \times 9,36$$

$$R_{prc} = 608,4 \text{ kN}$$

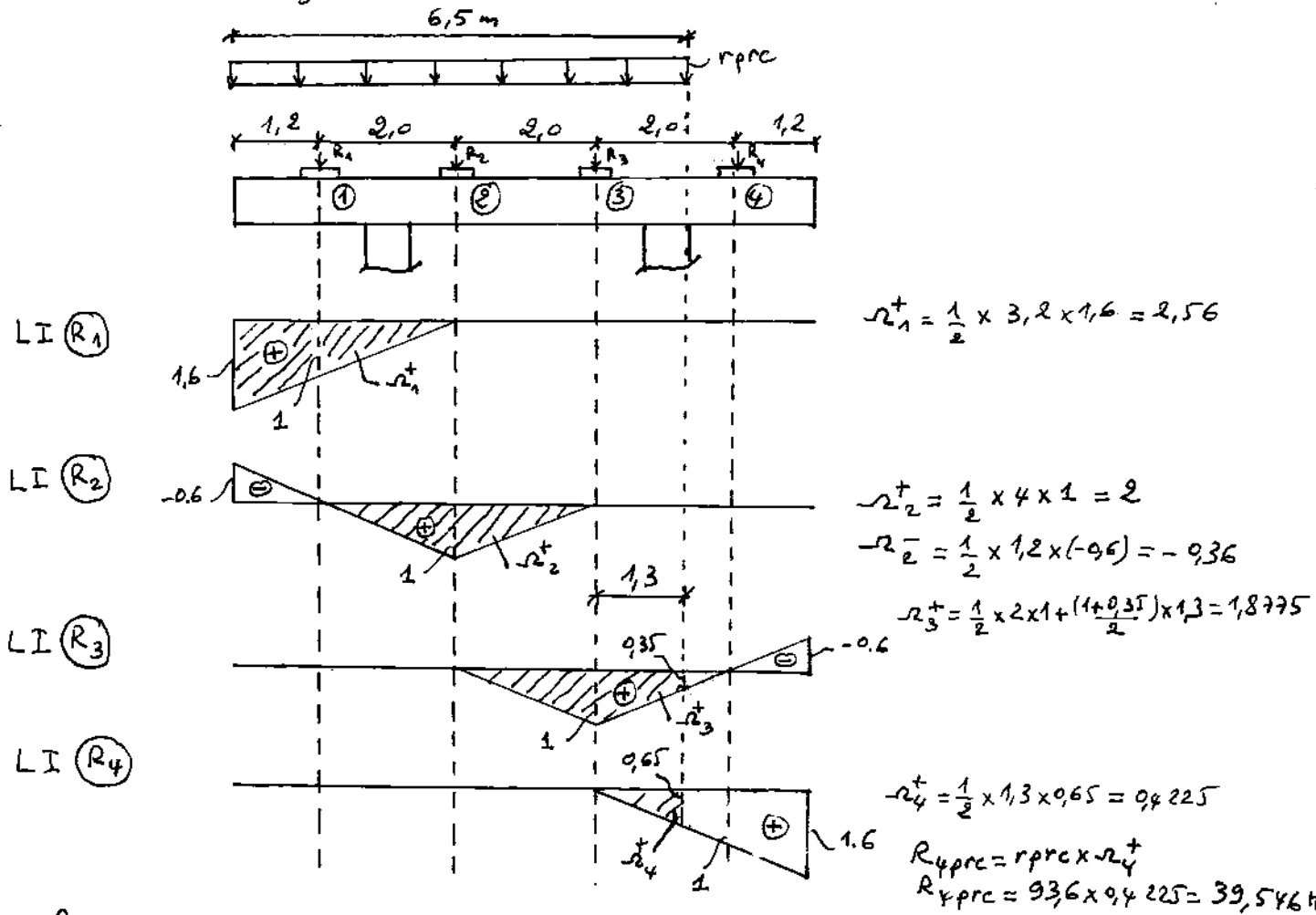


Etape 2 : Calcul des réactions R_1, R_2, R_3 et R_4

D'après l'exercice 5, $R_{1g} = R_{4g} = \frac{1362,895}{2} = 681,448 \text{ kN}$

$$R_{2g} = R_{3g} = \frac{873,105}{2} = 436,552 \text{ kN}$$

$$r_{prc} = \frac{R_{prc}}{L_{chargée}} : r_{prc} = \frac{608,4}{6,5} \Rightarrow r_{prc} = 93,6 \text{ kN/ml}$$



$$R_{1prc} = r_{prc} \times \eta_1^+ : R_{1prc} = 93,6 \times 2,56 = 239,616 \text{ kN}$$

$$R_{2prc} = r_{prc} \times (\eta_2^+ + \eta_2^-) : R_{2prc} = 93,6 \times (2 - 0,36) = 153,504 \text{ kN}$$

$$R_{3prc} = r_{prc} \times \eta_3^+ : R_{3prc} = 93,6 \times 1,8775 = 175,734 \text{ kN}$$

d'excentricité des réactions par rapport au centre de torsion G est d'après la figure A-34-a de l'exercice 5 : $e = 0,55 \text{ m}$

Etape 3: Calcul du moment de torsion M_t dans le chevêtre

D'après les équations (A-24) et (A-25), on a

$$M_{tu} = 1,35 (R_g + R_{prc}) \cdot e$$

$$M_{tes} = (R_g + R_{prc}) \cdot e$$

On remarque que $M_{tu} = 1,35 M_{tes}$. On va étudier le système à l'ELS et les M_{tu} seront déduits par multiplication par 1,35.

à l'ELS: $R_1 = R_{1g} + R_{1prc} : R_1 = 681,448 + 239,616 = 921,064 \text{ kN}$

$$M_{t1} = R_1 \times e : M_{t1} = 921,064 \times 0,55 = 506,6 \text{ kN.m}$$

$$R_2 = R_{2g} + R_{2prc} : R_2 = 436,552 + 153,504 = 590,056 \text{ kN}$$

$$M_{t2} = R_2 \times e : M_{t2} = 590,056 \times 0,55 = 324,5 \text{ kN.m}$$

$$R_3 = R_{3g} + R_{3prc} : R_3 = 436,552 + 175,734 = 612,286 \text{ kN}$$

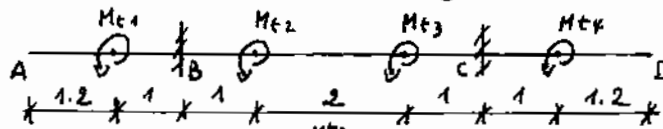
$$M_{t3} = R_3 \times e : M_{t3} = 612,286 \times 0,55 = 336,8 \text{ kN.m}$$

$$R_4 = R_{4g} + R_{4prc} : R_4 = 681,448 + 39,546 = 720,994 \text{ kN}$$

$$M_{t4} = R_4 \times e : M_{t4} = 720,994 \times 0,55 = 396,5 \text{ kN.m}$$

de chevêtre est supposé encastré dans les colonnes qui vont limiter son moment de torsion.

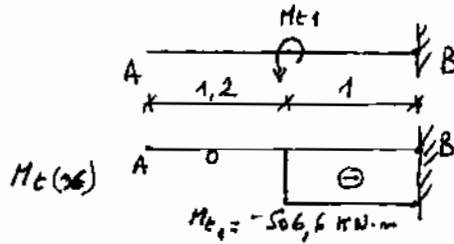
NB: d'implantation des colonnes joue un rôle important pour la limitation du moment de torsion du chevêtre



La poutre AB:

d'équilibre de moments de torsion nous donne : $-M_{t1} + M_{tB} = 0 \Rightarrow M_{tB} = M_{t1}$

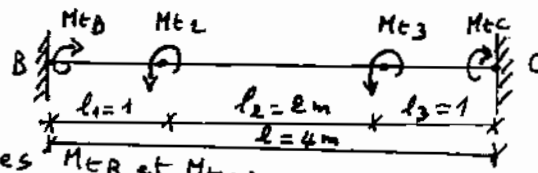
$$M_{tB} = 506,6 \text{ kN.m}$$



La poutre BC:

Le système est hyperstatique.

Il compte 2 inconnues M_{tB} et M_{tC} .



L'équilibre des moments de torsion donne:

$$M_{tB} - M_{t2} - M_{t3} + M_{tC} = 0 \dots (1)$$

L'angle de rotation final en C est nul : $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \dots (2)$

$$\text{or } \varphi_1 = \frac{M_{tB}}{G I_c^t} \cdot l_1$$

avec G : module de déformation transversale.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

I_c^t : le moment d'inertie torsionnel du chevêtre.

NB: Si $M_t(x)$ est variable

$$\varphi_1 = \int \frac{M_t(x)}{G \cdot I_c^t} dx$$

$$\varphi_2 = \frac{(M_{tB} - M_{t2})}{G I_c^t} \cdot l_2$$

$$\varphi_3 = \frac{(M_{tB} - M_{t2} - M_{t3})}{G I_c^t} \cdot l_3$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \Rightarrow \frac{1}{G I_c^t} [M_{tB} l_1 + (M_{tB} - M_{t2}) \cdot l_2 + (M_{tB} - M_{t2} - M_{t3}) \cdot l_3] = 0$$

$$M_{tB} \cdot l - M_{t2} \cdot (l_2 + l_3) - M_{t3} \cdot l_3 = 0 \Rightarrow M_{tB} = \frac{M_{t2}(l_2 + l_3) + M_{t3} \cdot l_3}{l}$$

$$M_{tB} = \frac{324,5 \times (3) + 336,8 \times 1}{4} = 327,6 \text{ kN.m}$$

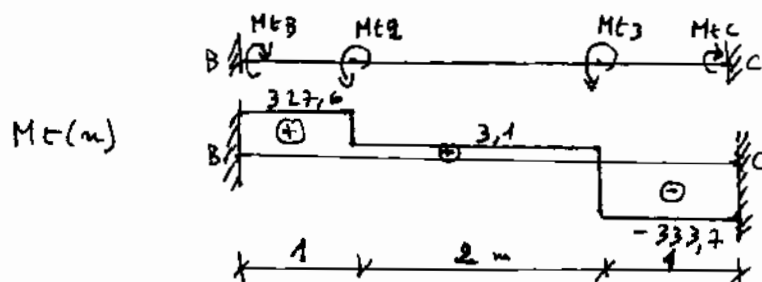
On remplace la valeur de M_{tB} dans l'équation (1):

$$+327,6 - 324,5 - 336,8 + M_{tC} = 0 \Rightarrow M_{tC} = +333,7 \text{ kN.m}$$

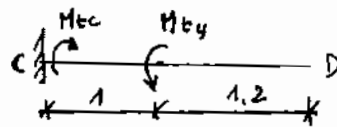
$$0 \leq x \leq 1 \Rightarrow M_t(x) = M_{tB} = 327,6 \text{ kN.m}$$

$$1 \leq x \leq 3 \Rightarrow M_t(x) = M_{tB} - M_{t2} : M_t(x) = 327,6 - 324,5 = 3,1 \text{ kN.m}$$

$$3 \leq x \leq 4 \Rightarrow M_t(x) = M_{tB} - M_{t2} - M_{t3} : M_t(x) = 327,6 - 324,5 - 336,8 = -333,7 \text{ kN.m}$$

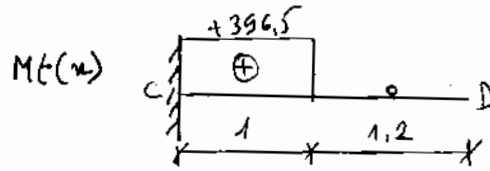


la poutre CD :



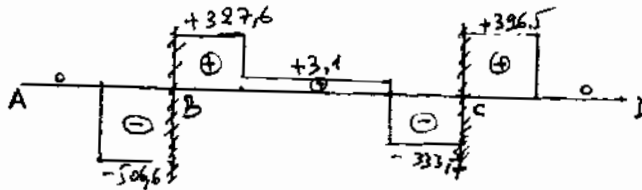
L'équilibre des moments de torsion: $M_{tc} - M_{t4} = 0$

$$M_{tc} = M_{t4} \Rightarrow M_{tc} = 396,5 \text{ kN.m}$$



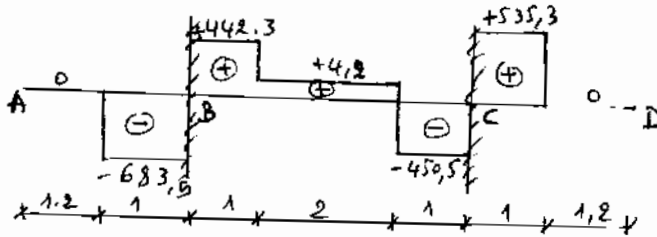
ELS:

$M_E^s(x)$



ELU : le diagramme est obtenu en multipliant par 1,35

$M_E^u(x)$



à l'ELU $|M_{tu}|^{max} = 683,9 \text{ kN.m}$

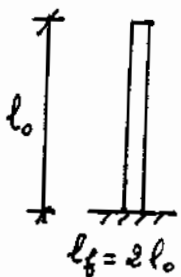
5-5 Calcul du fût

Il doit être vérifié à la flexion composée (N, M), où N et M sont respectivement l'effort normal et le moment fléchissant dans le fût. Mais avant tout il faut faire un calcul de vérification du fût au flambement.

5-5-1 Vérification au flambement

5-5-1-a) Longueur de flambement (l_f)

Sa valeur dépend de la liaison du fût avec le tablier ou le chevêtre



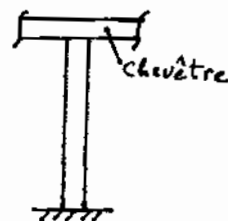
a- Le tablier peut se détacher horizontalement et verticalement de la pile (appui libre).



b- de tablier ne peut pas se détacher verticalement de la pile (appui simple).



c- Le fût est partiellement encastré dans le tablier, ou bien il est solidaire au chevêtre, des détachements horizontal et vertical sont empêchés.



d- La pile est totalement encastrée dans le tablier.

Fig. A-38 Différentes liaisons de la pile avec le tablier.

5-5-1-b/ d'élanement (λ)

$$\lambda = \frac{l_f}{i} \dots (A-33)$$

où i est le rayon de giration de la section transversale de la pile.

$$i = \sqrt{\frac{I}{B}} \dots (A-34)$$

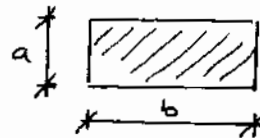
où I est le moment d'inertie flexionnel de la section de pile et dans la direction susceptible au flambement.

B est l'aire de la section de la pile.

si l'élanement $\lambda < 50$; le calcul au flambement n'est pas nécessaire.

exemples:

- Section rectangulaire



$$\begin{cases} B = a \times b \\ I_a = \frac{b a^3}{12} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i_a = \frac{a}{\sqrt{12}} \\ \lambda_a = \frac{\sqrt{12}}{a} l_{fa} \end{cases} \dots (A-35)$$

- Section circulaire



$$\begin{cases} B = \frac{\pi D^2}{4} \\ I = \frac{\pi D^4}{64} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} i = \frac{D}{4} \\ \lambda = 4 \frac{l_f}{D} \end{cases} \dots (A-36)$$

5-5-2 Calcul à la flexion composée

5-5-2-1 Longitudinalement

a/ En construction

à l'ELU:

$$\begin{cases} N_u = 1.35 G_f + 1.35 R_g + 1.35 R_{prc} \\ M_u = 1.35 M_{Rg} + 1.35 M_{R_{prc}} + 1.5 M_w \end{cases} \dots (A-37)$$

où G_f est le poids propre du fût plus le chevêtre.

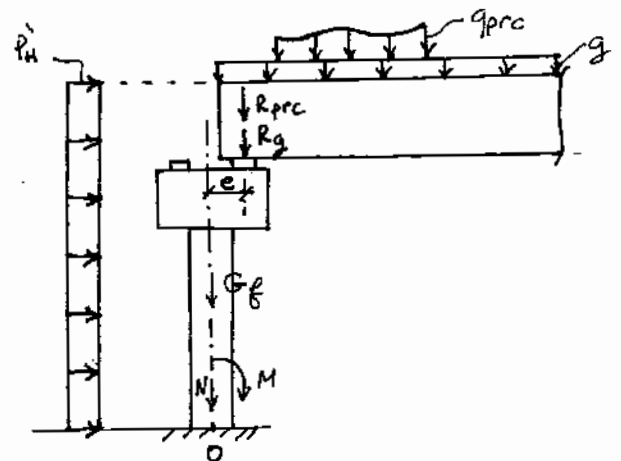


Fig. A-39 Sollicitations du fût en construction (longitudinalement).

à l'ELS:

$$\begin{cases} N_{ser} = G_f + R_g + R_{prc} \\ M_{ser} = M_{Rg} + M_{R_{prc}} + M_w \end{cases} \dots (A-38)$$

où G_f est le poids propre du fût plus le chevêtre.

b/ En exploitation

d'une ou les 2 travées sont chargées par (q_r), avec l'existence éventuelle du freinage (F_{fr}) et la déformation longitudinale différée du tablier (F_{d1}, F_{d2}).

b1/ 1er cas : la plus grande des 2 travées est chargée par q_r (la travée), (Fig A-40)

à l'ELU:

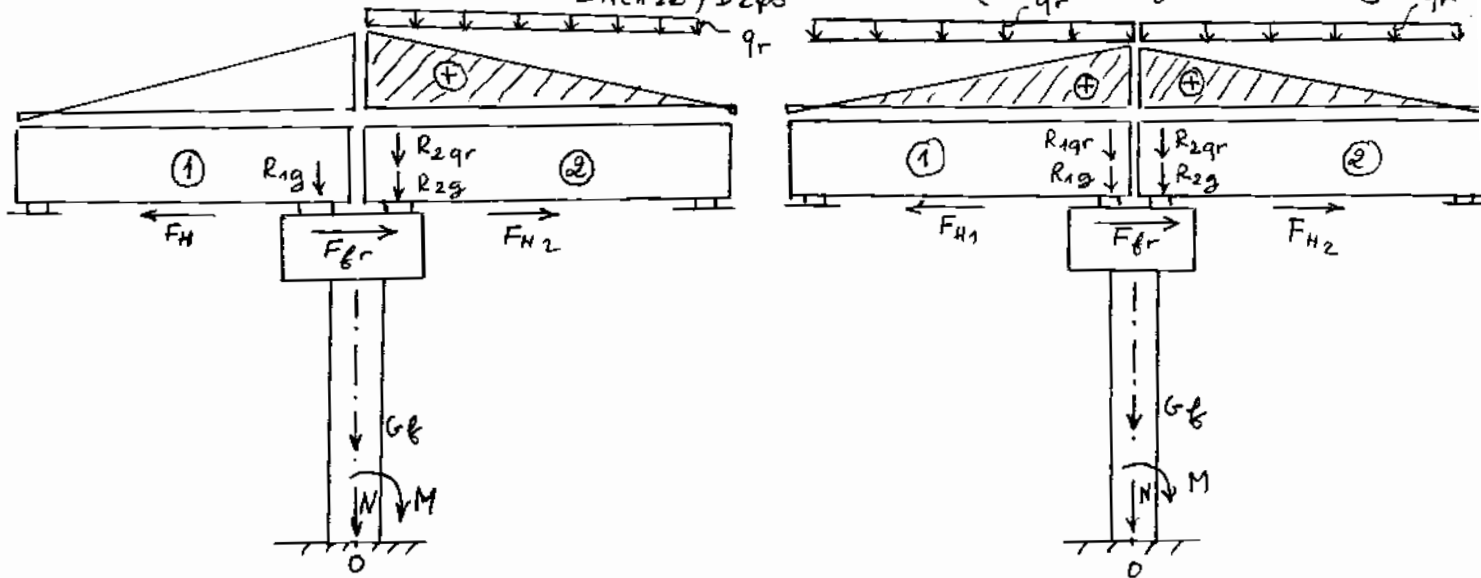
$$\begin{cases} N_u = 1.35 G_f + 1.35 R_g + 1.35 R_{2g} + \begin{cases} 1.605(R_{2AC}), B + R_{2st} \\ 1.35(R_{2MC120}, D240) \end{cases} \\ M_u = 1.35 (M_{R_{2g}} - M_{R_{1g}}) + \begin{cases} 1.605(M_{R_{2AC}), B + M_{R_{2st}}} \\ 1.35(M_{R_{2MC120}}, M_{R_{2D240}}) \end{cases} + \begin{cases} 1.35(M_{F_2} - M_{F_1}) \\ 1.605 M_{F_{fr}} \end{cases} \end{cases} \dots (A-39)$$

A-38 -

a) l'ELS:

$$N_{ser} = G_f + R_{1g} + R_{2g} + \left\{ 1,2 R_{2A(1),B} + R_{2st} \right. \\ \left. R_{2MC120,D240} \right\} \dots (A-40)$$

$$M_{ser} = (M_{R2g} - M_{R1g}) + \left\{ (1,2 M_{R2A(1),B} + M_{R2st}) + \left\{ 1,2 M_{Fgr} + (M_{FH2} - M_{FH1}) \right\} \right\}$$



b_1 - Une seule travée est chargée.

b_2 - Les deux travées sont chargées.

Fig. A-40 Sollicitations du fût longitudinalement en exploitation.

$b_2 / 2^e$ cas : Les 2 travées sont chargées par q_r .

a) l'ELU:

$$\begin{cases} N_u = 1,35 G_f + 1,35 (R_{1g} + R_{2g}) + \left\{ 1,605 (R_{1A(1),B} + R_{1st} + R_{2A(1),B} + R_{2st}) \right. \\ \left. 1,35 (R_{1MC120,D240} + R_{2MC120,D240}) \right\} \\ M_u = 1,35 (M_{R2g} - M_{R1g}) + \left\{ 1,605 (M_{R2} - M_{R1})_{A(1),B} + 1,605 (M_{R2} - M_{R1})_{st} + \left\{ 1,35 (M_{R2} - M_{R1}) \right. \right. \\ \left. \left. 1,605 M_{Fgr} \right\} \right\} \dots (A-41) \end{cases}$$

a) l'ELS:

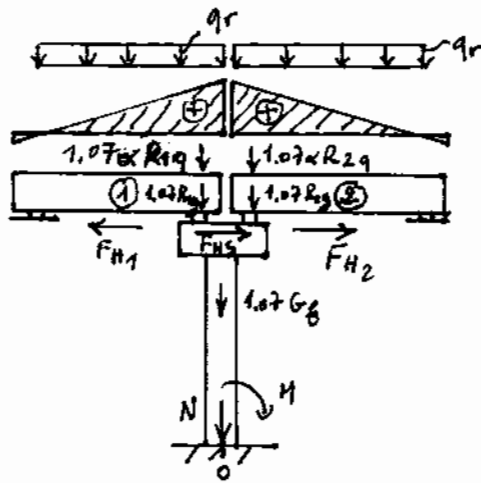
$$\begin{cases} N_{ser} = G_f + R_{1g} + R_{2g} + \left\{ 1,2 (R_{1A(1),B} + R_{1st} + R_{2A(1),B} + R_{2st}) \right. \\ \left. (R_{1A(1),B} + R_{1st} + R_{2A(1),B} + R_{2st})_{MC120,D240} \right\} \\ M_{ser} = (M_{R2g} - M_{R1g}) + \left\{ 1,2 (M_{R2} - M_{R1})_{A(1),B} + (M_{R2} - M_{R1})_{st} + \left\{ (M_{R2} - M_{R1}) \right. \right. \\ \left. \left. (M_{R2} - M_{R1})_{MC120,D240} \right\} + \left\{ (M_{F2} - M_{F1}) + 1,2 M_{Fgr} \right\} \right\} \dots (A-42) \end{cases}$$

c) En seisme

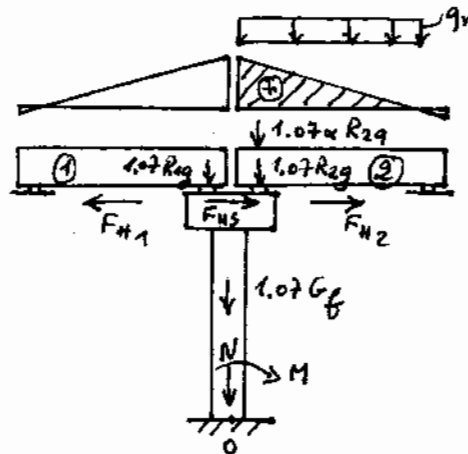
Il existe 3 cas : soit les 2 travées sont chargées, soit une (la plus longue) est chargée, soit les 2 travées sont vides (fig. A-41).

La force sismique horizontale (F_{Hs}) est

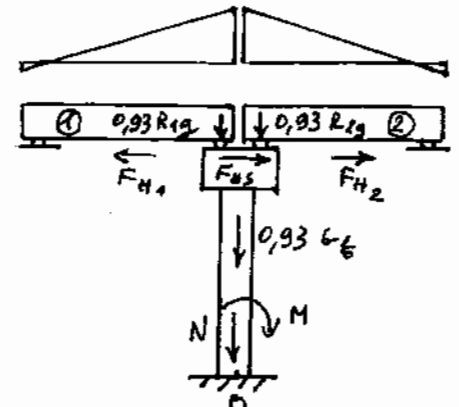
$$F_{Hs} = \frac{1}{10} \left(\frac{G_1}{2} + \frac{G_2}{2} + G_f \right) \dots (A-42)$$



C1 - des 2 travées sont chargées (seisme descendant).



C2 - l'une des 2 travées est chargée (seisme descendant).



C3 - des 2 travées ne sont pas chargées (seisme ascendant).

Fig. A-41 Sollicitations du fût en cas de seisme longitudinal.

Cas C1:

$$\bar{a} \text{ l'ELU: } \begin{cases} N_u = 1,07 G_f + 1,07 (R_{1g} + R_{2g}) + 1,07 \alpha (R_{1g} + R_{2g}) \\ M_u = 1,07 (M_{R_{2g}} - M_{R_{1g}}) + 1,07 \alpha (M_{R_{2g}} - M_{R_{1g}}) + (M_{F_{H2}} - M_{F_{H1}}) + M_{F_{H3}} \end{cases} \quad \text{--- (A-43)}$$

Cas C2:

$$\bar{a} \text{ l'ELU: } \begin{cases} N_u = 1,07 G_f + 1,07 (R_{1g} + R_{2g}) + 1,07 \alpha R_{2g} \\ M_u = 1,07 (M_{R_{2g}} - M_{R_{1g}}) + 1,07 \alpha M_{R_{2g}} + (M_{F_{H2}} - M_{F_{H1}}) + M_{F_{H3}} \end{cases} \quad \text{--- (A-44)}$$

Cas C3:

$$\bar{a} \text{ l'ELU: } \begin{cases} N_u = 0,93 G_f + 0,93 (R_{1g} + R_{2g}) \\ M_u = 0,93 (M_{R_{2g}} - M_{R_{1g}}) + (M_{F_{H2}} - M_{F_{H1}}) + M_{F_{H3}} \end{cases} \quad \text{--- (A-45)}$$

5-5-2-2 Transversalement

a) En construction: la pile est supposée supporter les 2 travées, avec l'existence de la surcharge de chantier q_{prc} excentrée (fig A.42).

$\bar{a}$ l'ELU:

$$\begin{cases} N_u = G_f + R_{1g} + R_{2g} + 1,35 R_{1prc} + 1,35 R_{2prc} \\ M_u = 1,35 M_{prc} + 1,5 M_w + 1,5 M_d \end{cases} \quad \text{--- (A-46)}$$

où M_d est le moment dû à la force hydrodynamique.

$$F_d = \frac{1}{2} \kappa \rho_e v^2 b h \quad \text{--- (A-47)}$$

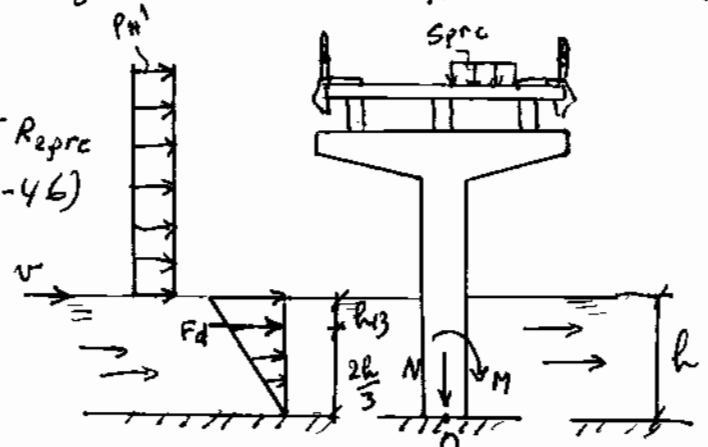


Fig. A-42 sollicitations transversales d'un fût en phase de construction.

où $v(b)$ est la vitesse d'écoulement de l'eau à sa surface libre,
 b, h dimensions de la partie immergée de la pile,
 K : coefficient de forme.

Pile carrée : $K = 1.44$

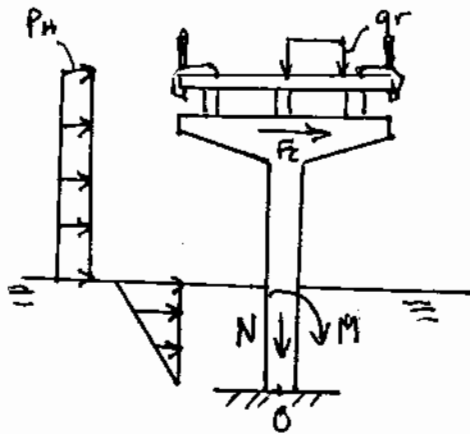
" circulaire : $K = 0.77$

Pile avec avant bec : $K = 0.52$ } (A-48)

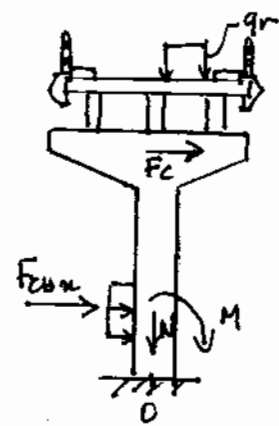
à l'ELS:

$$\begin{cases} N_{se} = G_f + R_{1g} + R_{2g} + R_{1prc} + R_{2prc} \\ M_{se} = M_{prc} + M_w + M_d \end{cases} \text{ --- (A-49)}$$

b/ En exploitation : Les 2 travées supportées par la pile sont chargées par q_r , mais cette dernière est excentrée. Cela peut être accompagné par le vent, la force centrifuge F_c (en cas de ponts courbes en plan), la force hydrodynamique F_d et la force de choc F_{ch} (cf. CHAP 4 - 3.17).



b1 - Flexion transversale du fût avec vent et pression hydrodynamique

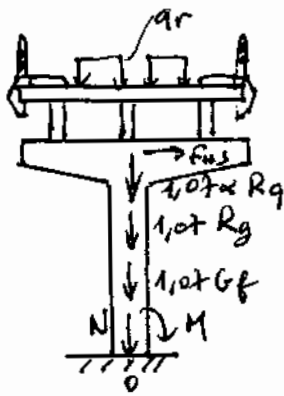


b2 - Flexion transversale du fût sans le choc contre le fût.

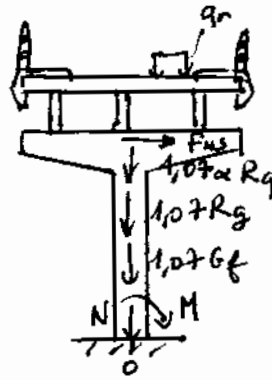
Fig. A-43 Sollicitations transversales du fût en phase d'exploitation.

c/ En cas de séisme :

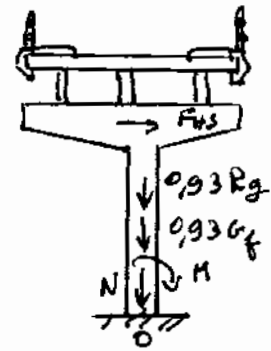
3 cas de charges peuvent se présenter (fig. A-44).



C1 - q_r centrée avec
séisme descendant.



C2 - q_r excentrée avec
séisme descendant.



C3 - tablier non
chargé avec
séisme ascendant.

Fig. A-44 Sollicitations transversales
du fût en cas de séisme.

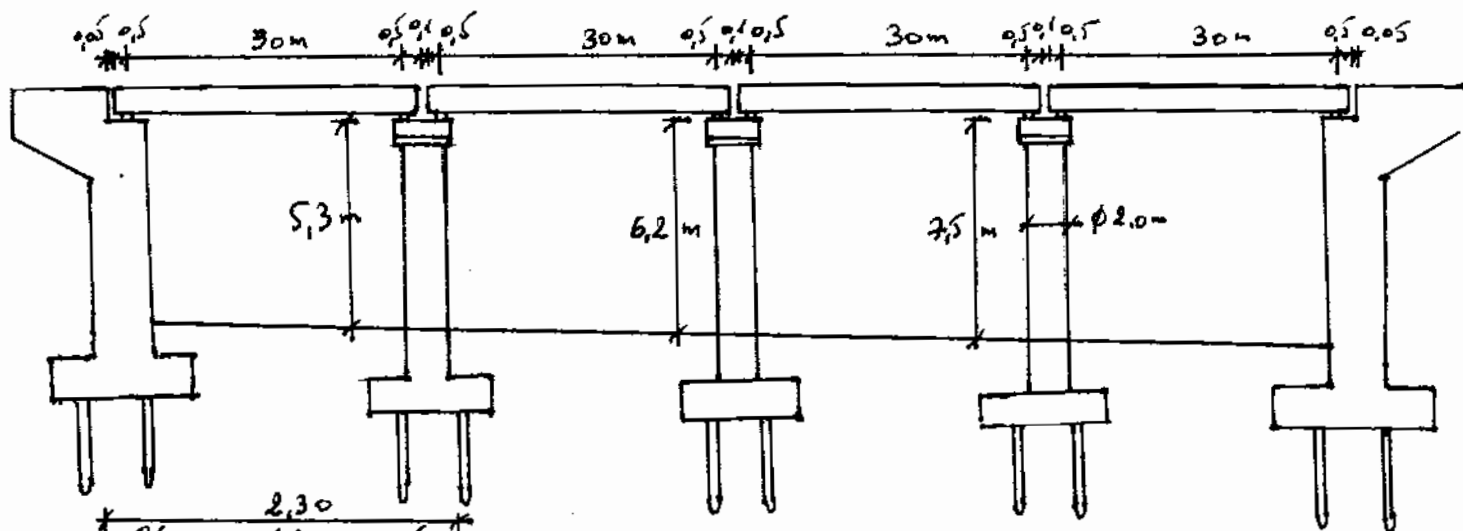
Exercice 7:

Un pont urbain à 4 travées de 30 m traverse une aire de stationnement. On se propose de vérifier le fût vis-à-vis le flambement et de calculer ses effets vis-à-vis la flexion composée.

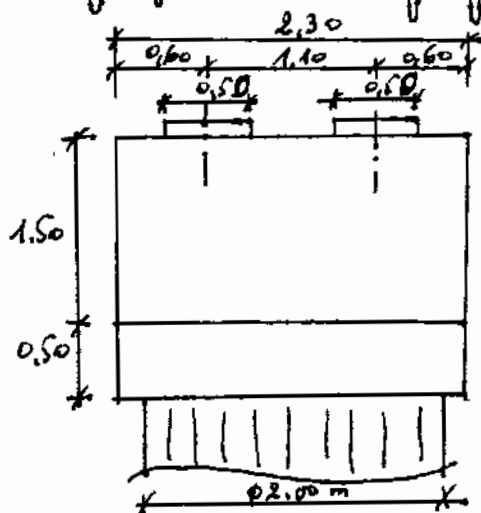
Données : - poids propre du tablier : $g = 17.5 \text{ kN/ml}$

- en construction : $s_{prc} = 8 \text{ kN/m}^2$; $L_{prc} = 10 \text{ m}$, $B_{prc} = 5 \text{ m}$

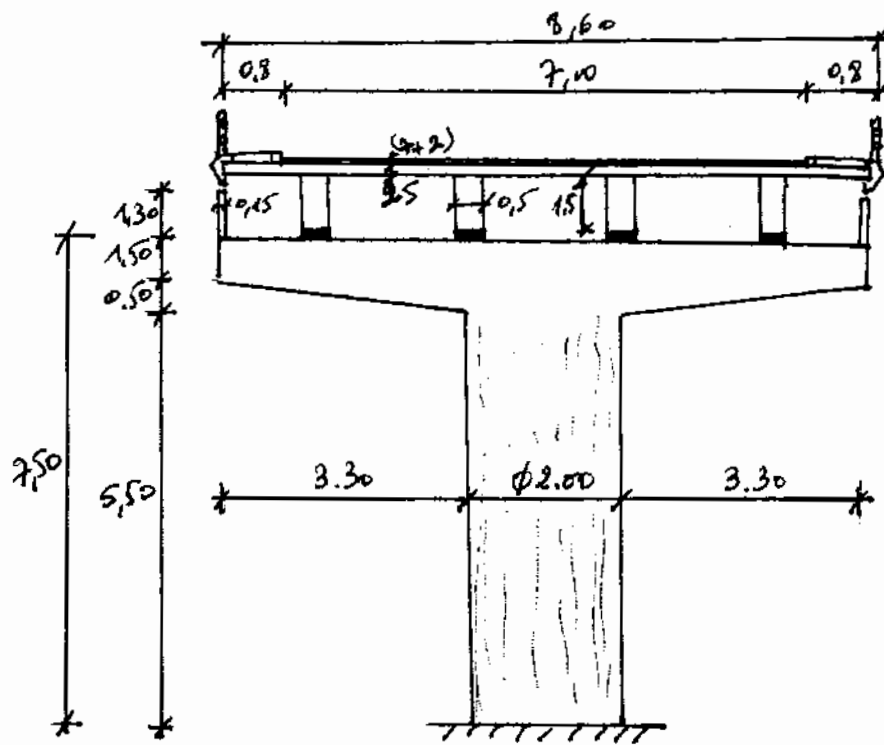
- en exploitation : on utilise A(1) et 5f.



a - Coupe longitudinale



b - Détail du chevêtre



C - coupe transversale

Fig. A-45 Détail de flouage

Solution:

On étudie la pile la plus élancée, soit $h = 7,5\text{ m}$.

1) Flambement:

Le fût est lié au chevet : $l_f = 0,707 l_0$

$$l_f = 0,707 \times 7,5 = 5,3\text{ m}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{B}} : i = \sqrt{\frac{\pi D^4/64}{\pi D^2/4}} = D/4 : i = 2/4 = 0,5\text{ m}$$

$$\lambda = \frac{l_f}{i} \Rightarrow \lambda = \frac{5,3}{0,5} = 10,6 < 50$$

Le calcul au flambement n'est pas nécessaire.

2) Flexion composée: (N, M)

2-1) En construction:

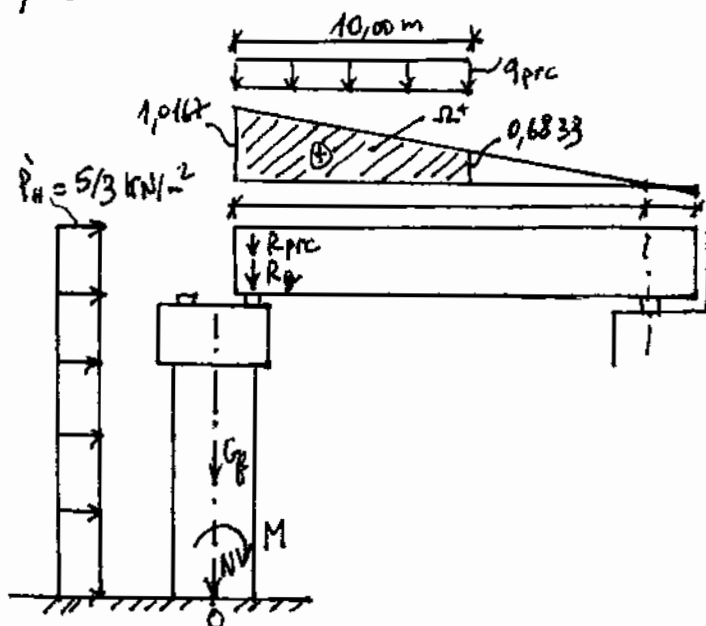
2-1-a/ Longitudinalement

$$* R_g = g \frac{l_0}{2}$$

$$R_g = 175 \times \frac{31}{2} \Rightarrow R_g = 2712,5\text{ kN}$$

$$* q_{prc} = S_{prc} \times B_g$$

$$q_{prc} = 8 \times 5 \Rightarrow q_{prc} = 40\text{ kN/ml}$$



$$\Omega^+ = \frac{(1,0167 + 0,6833)}{2} \times 10 = 8,5$$

$$R_{prc} = q_{prc} \times \Omega^+$$

$$R_{prc} = 40 \times 8,5 \Rightarrow R_{prc} = 340 \text{ kN}$$

* Fût + chevêtre

$$\text{chevêtre : } \left[\frac{(1,5+2)}{2} \times 3,3 \times 2,3 \times 2 + 2 \times 2 \times 2,3 \right] \times 25 = 894,125 \text{ kN}$$

$$\text{murettes latérales : } 0,15 \times 1,3 \times 2,3 \times 2 \times 25 = 22,425 \text{ kN}$$

$$\text{dés d'appuis : } 0,15 \times 0,5^2 \times 8 \times 25 = 7,5 \text{ kN}$$

$$\text{fût : } \pi \times \frac{2^2}{4} \times 5,5 \times 25 = 431,75 \text{ kN}$$

$$G_f = 1355,8 \text{ kN}$$

* Vent

$$\text{sur tablier : } F_{w1} = \frac{5}{3} \times 8,6 \times 1,75 = 25,083 \text{ kN}$$

$$\text{sur chevêtre : } F_{w2} = \left[\frac{(1,5+2)}{2} \times 3,3 \times 2 + 2 \times 2 \right] \times \frac{5}{3} = 25,917 \text{ kN}$$

$$\text{sur fût : } F_{w3} = \frac{5}{3} \times 2 \times 5,5 = 18,333 \text{ kN}$$

à l'ELU:

Désignation	V(kN)	H(kN)	d(m)	M(kN.m)
- Tablier : $R_g \times (1,35)$ $2712,5 \times (1,35)$	3661,875	—	0,55	2014,031
- Sprc : $R_{prc} \times (1,35)$ $340 \times (1,35)$	459,000	—	0,55	252,450
- G_f : $G_f \times (1,35)$ $1355,8 \times (1,35)$	1830,33	—	0	0
- Vent : $F_{w1} \times (1,5) = 25,083 \times (1,5)$	—	37,625	8,525	320,753
$F_{w2} \times (1,5) = 25,917 \times (1,5)$	—	38,876	6,50	252,694
$F_{w3} \times (1,5) = 18,333 \times (1,5)$	—	27,500	2,75	75,625

$\Sigma =$

$$N_u = 5951,205 \text{ kN}$$

$$M_u = 2915,553 \text{ kN.m}$$

à l'ELS:

Désignation	V(kN)	H(kN)	d(m)	M(kN.m)
- Tablier : $R_g \times (1.0) = 2712,5 \times (1.0)$	2712,500	—	0,55	1491,875
- Sprc : $R_{prc} \times (1.0) = 340 \times (1.0)$	340,000	—	0,55	187,000
- Gf : $G_f \times (1.0) = 1355,8 \times (1.0)$	1355,8	—	0	0
- Vent : $F_{w1} \times (1.0) = 25,083 \times (1.0)$	—	25,083	8,525	213,833
$F_{w2} \times (1.0) = 25,917 \times (1.0)$	—	25,917	6,50	168,461
$F_{w3} \times (1.0) = 18,333 \times (1.0)$	—	18,333	2,75	50,416

$$\Sigma = N_{ser} = 4408,3 \text{ kN} \quad M_{ser} = 2111,585$$

2-1-b / Transversalement

Pour avoir l'effet le plus défavorable, on suppose que la pile supporte les 2 travées.

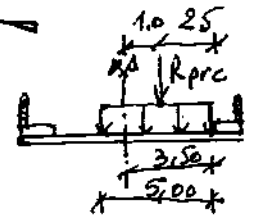
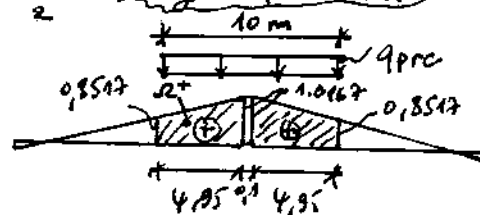
$$* R_g = 2 \times g \frac{lt}{2} : R_g = 2 \times 175 \times \frac{31}{2} \Rightarrow R_g = 5425 \text{ kN}$$

$$* R_{prc} = q_{prc} \times 2l^+$$

$$2l^+ = \frac{(1,0167 + 0,8517)}{2} \times 4,95 \times 2 + 0,1 \times 1,067$$

$$2l^+ = 9,452$$

$$R_{prc} = 40 \times 9,452 \Rightarrow R_{prc} = 378,080 \text{ kN}$$



$$* \text{Vent : sur tablier : } F_{w1} = \frac{5}{3} \times 2 \times \frac{31}{2} \times 1,75 = 90,417 \text{ kN}$$

$$\text{sur cheville : } F_{w2} = \frac{5}{3} \times 2,3 \times 2 = 7,667 \text{ kN}$$

$$\text{sur fût : } F_{w3} = 18,333 \text{ kN}$$

à l'ELU:

Désignation	V(kN)	H(kN)	d(m)	M(kN.m)
- Tablier : $R_g \times (1.0) = 5425 \times (1.0)$	5425,000	—	0	0
- Sprc : $R_{prc} \times (1.35) = 378,080 \times (1.35)$	510,408	—	1,0	510,408
- Gf : $G_f \times (1.0) = 1355,8 \times (1.0)$	1355,8	—	0	0
- Vent : $F_{w1} \times (1.5) = 90,417 \times (1.5)$	—	135,625	8,525	1156,203
$F_{w2} \times (1.5) = 7,667 \times (1.5)$	—	11,500	6,50	74,750
$F_{w3} \times (1.5) = 18,333 \times (1.5)$	—	27,500	2,75	75,625

$$\Sigma = N_u = 7291,208 \text{ kN} \quad M_u = 1846,986$$

Désignation	V(kN)	H(kN)	d(m)	M(kN.m)
- Tablier : $R_g \times (1.0) = 5425 \times (1.0)$	5425,000	—	0	0
- Sprc : $R_{prc} \times (1.0) = 378,080 \times (1.0)$	378,080	—	1,0	378,080
- Gf : $G_f \times (1.0) = 1355,8 \times (1.0)$	1355,8	—	0	0
- Vent : $F_{w1} \times (1.0) = 90,417 \times (1.0)$	—	90,417	8,525	770,805
$F_{w2} \times (1.0) = 7,667 \times (1.0)$	—	7,667	6,50	49,835
$F_{w3} \times (1.0) = 18,333 \times (1.0)$	—	18,333	2,75	50,416

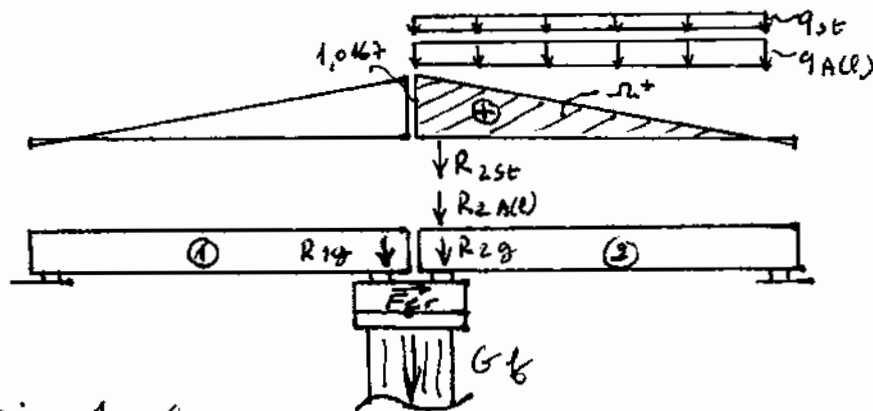
$$\Sigma = N_{ser} = 7158,88 \text{ kN} \quad M_{ser} = 1249,136$$

A-45-

2-2) En exploitation :

2-2-a/ Longitudinalement :

1^{er} cas : 1 seule travée est chargée par $A(\ell)$ et St , avec l'existence de la force de freinage F_{fr} .



D'après l'exercice 1, $\ell = 30,5 \text{ m} \Rightarrow A_2(\ell) = 10,771 \text{ kN/m}^2$

* $q_{A(\ell)} = A_2(\ell) \times L_c : q_{A(\ell)} = 10,771 \times 7 \Rightarrow q_{A(\ell)} = 75,397 \text{ kN/m}$

$\omega^+ = \frac{1}{2} \times 30,5 \times 1,0167 = 15,505$

$R_{2A(\ell)} = q_{A(\ell)} \times \omega^+ : R_{2A(\ell)} = 75,397 \times 15,505 = 1169,030 \text{ kN}$

* $q_{st} = St \times L_f : q_{st} = 1,50 \times (0,8 + 0,8) = 2,4 \text{ kN/m}$

$R_{2st} = q_{st} \times \omega^+ : R_{2st} = 2,4 \times 15,505 = 37,212 \text{ kN}$

* $F_{fr} = \frac{300}{2} = 150 \text{ kN}$ (la freinage se produit dans une seule travée).

à l'ELU:

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier : $R_{1g} \times (1,35) = 2712,5 \times (1,35)$	3661,875	—	-0,55	-2014,031
$R_{2g} \times (1,35) = 2712,5 \times (1,35)$	3661,875	—	0,55	2014,031
- $G_f : G_f \times (1,35) = 1355,8 \times (1,35)$	1839,33	—	0	0
- $A(\ell) : R_{2A(\ell)} \times (1,605) = 1169,030 \times (1,605)$	1876,293	—	0,55	1031,961
- $St : R_{2st} \times (1,605) = 37,212 \times (1,605)$	59,725	—	0,55	32,849
- Freinage : $F_{fr} \times (1,605) = 150 \times (1,605)$	—	240,750	7,50	1805,625

à l'ELS:

$\Sigma = N_u = 11090,098$

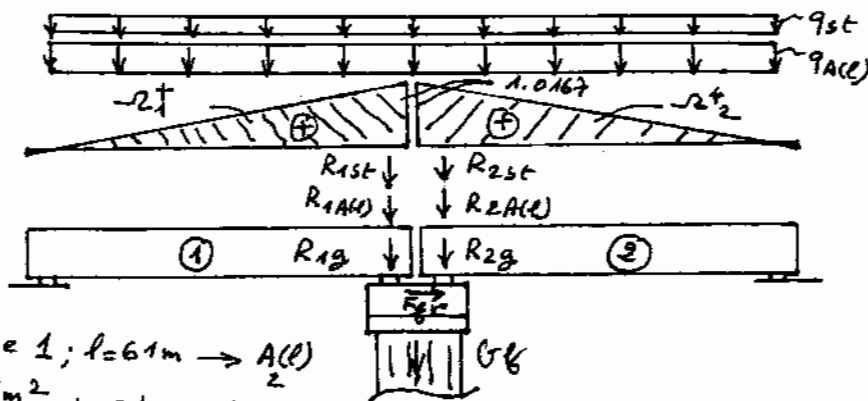
$M_u = 2870,435$

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier : $R_{1g} \times (1,0) = 2712,5 \times (1,0)$	2712,5	—	-0,55	-1491,875
$R_{2g} \times (1,0) = 2712,5 \times (1,0)$	2712,5	—	0,55	1491,875
- $G_f : G_f \times (1,0) = 1355,8 \times (1,0)$	1355,8	—	0	0
- $A(\ell) : R_{2A(\ell)} \times (1,20) = 1169,03 \times (1,20)$	1402,836	—	0,55	771,560
- $St : R_{2st} \times (1,0) = 37,212 \times (1,0)$	37,212	—	0,55	20,467
- Freinage : $F_{fr} \times (1,20) = 150 \times (1,20)$	—	180	7,50	1350,00

$\Sigma = N_{ser} = 8220,848 \text{ kN}$

$M_{ser} = 2142,027$

2^e cas: les 2 travées sont chargées par $A(l)$, st avec F_{gr} .



D'après l'exercice 1; $l=61m \rightarrow A(l)$

$$A(l) = 7,231 \text{ kN/m}^2 ; \alpha_1^+ = \alpha_2^+ = 15,505 ; q_{A(l)} = A(l) \times l_c = 7,231 \times 7 = 50,617 \text{ kN/m}$$

$$R_{1A(l)} = R_{2A(l)} = q_{A(l)} \times \alpha_1^+ \Rightarrow R_{1A(l)} = R_{2A(l)} = 50,617 \times 15,505 = 784,817 \text{ kN}$$

$$R_{1st} = R_{2st} = q_{st} \times \alpha_1^+ \Rightarrow R_{1st} = R_{2st} = 2,4 \times 15,505 = 37,212 \text{ kN}$$

$F_{gr} = 150 \text{ kN}$ (Le freinage se produit dans une seule travée).

à l'ELU:

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $R_{1g} \times (1.35) = 2712,5 \times (1.35)$	3661,875	—	-0,55	-2014,031
$R_{2g} \times (1.35) = 2712,5 \times (1.35)$	3661,875	—	+0,55	+2014,031
- $G_f: G_f \times (1.35) = 892,925 \times (1.35)$	1205,449	—	0	0
- $A(l): R_{1A(l)} \times (1.605) = 784,817 \times (1.605)$	1259,631	—	-0,55	-692,797
$R_{2A(l)} \times (1.605) = 784,817 \times (1.605)$	1259,631	—	+0,55	+692,797
- $St: R_{1st} \times (1.605) = 37,212 \times (1.605)$	59,725	—	-0,55	-32,849
$R_{2st} \times (1.605) = 37,212 \times (1.605)$	59,725	—	+0,55	+32,849
- Freinage: $F_{gr} \times (1.605) = 150 \times (1.605)$	—	240,750	7,50	1805,625

$$N_u = 11167,911 \text{ kN}$$

$$M_u = 1805,625$$

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $R_{1g} \times (1.0) = 2712,5 \times (1.0)$	2712,5	—	-0,55	-1491,875
$R_{2g} \times (1.0) = 2712,5 \times (1.0)$	2712,5	—	+0,55	+1491,875
- $G_f: G_f \times (1.0) = 892,925 \times (1.0)$	892,925	—	0	0
- $A(l): R_{1A(l)} \times (1.2) = 784,817 \times (1.2)$	941,780	—	-0,55	-517,979
$R_{2A(l)} \times (1.2) = 784,817 \times (1.2)$	941,780	—	+0,55	+517,979
- $St: R_{1st} \times (1.0) = 37,212 \times (1.0)$	37,212	—	-0,55	-20,467
$R_{2st} \times (1.0) = 37,212 \times (1.0)$	37,212	—	+0,55	+20,467
- Freinage: $F_{gr} \times (1.2) = 150 \times (1.2)$	—	180	7,50	1350,00

$$N_{ser} = 8275,909$$

$$M_{ser} = 1350,00$$

2-2-b Transversalement:

On suppose que la pile supporte les 2 travées. Seuls le trottoir et la voie de droite sont chargés.

$$* R_{A(l)} = 784,817 \text{ kN}$$

$$* R_{st} = 37,212 \text{ kN}$$

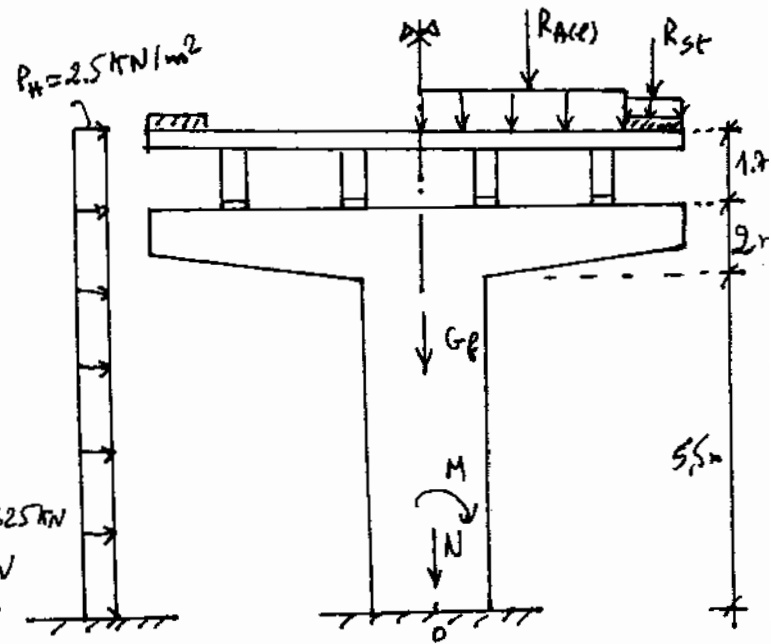
$$* \text{de vent: } P_H = 2,5 \text{ kN/m}^2 \text{ (chap. 4)}$$

$$\text{sur tablier: } F_{w1} = 2,5 \times 2 \times \frac{3,1}{2} \times 1,75 = 135,625 \text{ kN}$$

$$\text{sur cheville: } F_{w2} = 2,5 \times 2,3 \times 2 = 11,5 \text{ kN}$$

$$\text{sur fait: } F_{w3} = 2,5 \times 2 \times 5,5 = 27,5 \text{ kN}$$

$$\text{à l'ELU: } G + 1,605(A(l) + st) + 1,5 W$$



Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $2 \times R_{lg} \times (1.0) = 2 \times 2712,5 \times (1.0)$	5425,00	—	0	0
- A(l): $2 \times R_{A(l)} \times \frac{1}{2} \times (1.605) = 784,817 \times (1.605)$	1259,631	—	1,75	2204,354
- St: $2 \times R_{st} \times \frac{1}{2} \times (1.605) = 37,212 \times (1.605)$	59,725	—	3,9	232,928
- Gf: $G_f \times (1.0) = 892,925 \times (1.0)$	892,925	—	0	0
- Vent: $F_{w1} \times (1.5) = 135,625 \times (1.5)$	—	203,438	8,525	1734,309
$F_{w2} \times (1.5) = 11,5 \times (1.5)$	—	17,25	6,50	112,125
$F_{w3} \times (1.5) = 27,5 \times (1.5)$	—	41,25	2,75	113,438

$$\Sigma = N_u = 7637,281$$

$$M_u = 4397,154$$

$$\text{à l'ELS: } G + 1,2 A(l) + st + W$$

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $2 \times R_{lg} \times (1.0) = 2 \times 2712,5 \times (1.0)$	5425,00	—	0	0
- A(l): $2 \times R_{A(l)} \times \frac{1}{2} \times (1.2) = 784,817 \times (1.2)$	941,780	—	1,75	1648,115
- St: $2 \times R_{st} \times \frac{1}{2} \times (1.0) = 37,212 \times (1.0)$	37,212	—	3,9	145,127
- Gf: $G_f \times (1.0) = 892,925 \times (1.0)$	892,925	—	0	0
- Vent: $F_{w1} \times (1.0) = 135,625 \times (1.0)$	—	135,625	8,525	1156,203
$F_{w2} \times (1.0) = 11,5 \times (1.0)$	—	11,50	6,50	74,75
$F_{w3} \times (1.0) = 27,5 \times (1.0)$	—	27,50	2,75	75,625

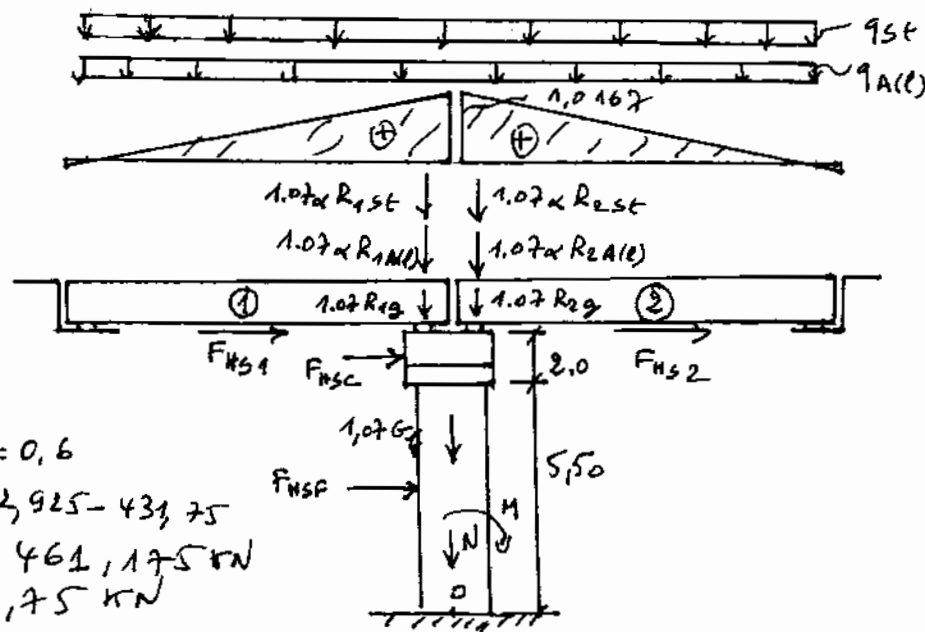
$$\Sigma = N_{se} = 7296,917$$

$$M_{se} = 3099,820$$

2-3) En cas de seisme

2-3-a/ Longitudinalement

1^{er} cas: Les 2 travées sont chargées par A(ℓ), st. de seisme est descendu



Classe I : $\alpha = 0,6$

$G_{chevêtre} = 892,925 - 431,75$

$G_{chevêtre} = 461,175 \text{ kN}$

$G_{fût} = 431,75 \text{ kN}$

⇒ l'ELU:

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier : $1,07 \times R_{1st} \times (1,0) = 1,07 \times 2712,5 \times (1,0)$	2902,375	—	-0,55	-1596,306
$1,07 \times R_{2st} \times (1,0) = 1,07 \times 2712,5 \times (1,0)$	2902,375	—	+0,55	1596,306
- G_f : $1,07 \times G_f \times (1,0) = 1,07 \times 892,925 \times (1,0)$	955,430	—	0	0
- A(ℓ) : $1,07 \times R_{1A(ℓ)} \times (1,0) = 1,07 \times 0,6 \times 784,817 \times (1,0)$	503,853	—	-0,55	-277,119
$1,07 \times R_{2A(ℓ)} \times (1,0) = 1,07 \times 0,6 \times 784,817 \times (1,0)$	503,853	—	+0,55	277,119
- St : $1,07 \times R_{1st} \times (1,0) = 1,07 \times 0,6 \times 37,212 \times (1,0)$	23,890	—	-0,55	-13,140
$1,07 \times R_{2st} \times (1,0) = 1,07 \times 0,6 \times 37,212 \times (1,0)$	23,890	—	+0,55	13,140
- Seisme : $F_{HS1} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{HS2} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{HSC} = \frac{1}{10} \times (461,175) \times (1,0)$	—	46,118	6,50	299,767
$F_{HSF} = \frac{1}{10} \times (431,75) \times (1,0)$	—	43,175	2,75	118,731

$$\Sigma = N_u = 7815,666$$

$$M_u = 4487,248$$

2^e cas: 1 seule travée est chargée par A(ℓ), s(H). Le seisme est descendant

$$R_{2A(ℓ)} = 1169,030 \text{ kN} \quad R_{1A(ℓ)} = 0$$

$$R_{2st} = 37,212 \text{ kN} ; R_{1st} = 0$$

à l'ELU:

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $1,07 R_{1g} \times (1,0) = 1,07 \times 2712,5 \times (1,0)$	2902,375	—	-0,55	-1596,306
$1,07 R_{2g} \times (1,0) = 1,07 \times 2712,5 \times (1,0)$	2902,375	—	+0,55	1596,306
- G_f : $1,07 G_f \times (1,0) = 1,07 \times 892,925 \times (1,0)$	955,430	—	0	0
- $A(l)$: $1,07 \alpha R_{2A(l)} \times (1,0) = 1,07 \times 0,6 \times 1169,030 \times (1,0)$	750,517	—	0,55	412,784
- S_t : $1,07 \alpha R_{2S_t} \times (1,0) = 1,07 \times 0,6 \times 37,212 \times (1,0)$	23,890	—	0,55	13,140
- Seisme: $F_{Hs1} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{Hs2} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{Hsc} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 461,175 \times (1,0)$	—	46,118	6,50	299,767
$F_{Hsf} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 431,75 \times (1,0)$	—	43,175	2,75	118,731

$$\Sigma = N_u = 7534,587$$

$$M_u = 4913,172$$

3^e cas: Les 2 travées ne sont pas chargées. Le seisme est ascendant.

à l'ELU:

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $0,93 \times R_{1g} \times (1,0) = 0,93 \times 2712,5 \times (1,0)$	2522,625	—	-0,55	-1387,444
$0,93 \times R_{2g} \times (1,0) = 0,93 \times 2712,5 \times (1,0)$	2522,625	—	+0,55	1387,444
- G_f : $0,93 \times G_f \times (1,0) = 0,93 \times 892,925 \times (1,0)$	830,420	—	0	0
- Seisme: $F_{Hs1} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{Hs2} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{Hsc} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 461,175 \times (1,0)$	—	46,118	6,50	299,767
$F_{Hsf} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 431,75 \times (1,0)$	—	43,175	2,75	118,731

$$\Sigma = N_u = 5875,67$$

$$M_u = 4487,248$$

2-3-b/ Transversalement:

1^{er} cas: Les 2 travées sont chargées par $A(l)$ et S_t . Le seisme est descendant.

Ce cas est similaire au 1^{er} cas de longitudinalement. (Fig A-44-c1)

$$N_u = 7815,666 \text{ kN} \text{ et } M_u = 4487,248 \text{ kN.m}$$

2^e cas: Seuls le trottoir et voie de droite qui sont chargés par $A(l)$ et S_t . Le seisme est descendant. (Fig A-44-c2)

3^e cas: Les 2 travées ne sont pas chargées. Il donne les mêmes résultats que la 3^e cas longitudinalement (Fig A-44-c3)

$$\text{soit } N_u = 5875,67 \text{ kN} \text{ et } M_u = 4487,248 \text{ kN.m}$$

à l'ELU: (2^e cas)

Désignation	V (kN)	H (kN)	d (m)	M (kN.m)
- Tablier: $2 \times 1,07 R_{1g} \times (1,0) = 2 \times 1,07 \times 2712,5 \times (1,0)$	5804,75	—	0	0
- G _f : $1,07 G_f \times (1,0) = 1,07 \times 892,925 \times (1,0)$	955,430	—	0	0
- A(l) = $2 \times 1,07 \times \frac{1}{2} R_{1A(l)} \times \alpha \times (1,0)$ = $1,07 \times 0,6 \times 784,817 \times (1,0)$	503,853	—	1,75	881,743
- S _t = $2 \times 1,07 \times \frac{1}{2} R_{1St} \times (1,0)$ = $1,07 \times 0,6 \times 37,212 \times (1,0)$	23,890	—	3,9	93,171
- Seisme: $F_{Hs1} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{Hs2} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 2712,5 \times (1,0)$	—	271,25	7,50	2034,375
$F_{HsC} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 461,175 \times (1,0)$	—	46,118	6,50	299,767
$F_{HsF} \times (1,0) = \frac{1}{10} \times 431,75 \times (1,0)$	—	43,175	2,75	118,731

$$N_u = 7287,923$$

$$M_u = 5462,162$$

6) Conclusion:

Dans un ouvrage donné, la détermination des positions des piles ainsi que leur nombre dépend de l'étude globale faite sur cet ouvrage. La forme des piles est liée directement aux contraintes naturelles et fonctionnelles du site tout en prenant en considération les aspects; économique et esthétique. Par ailleurs le mode de liaison entre la pile et le tablier joue un rôle important dans le comportement mécanique de ce dernier, selon que la liaison soit un appui simple ou double, un encastrement partiel ou total.