

Tableau 120 : Efforts horizontaux dus au retrait, fluage et variation de température

	Appuis	(1/Ki)	Ki (t/mm)	di (mm)	Ui (mm)	Hi (T)
Retrait et fluage	Culée	1.815	0.551	0.000	-2.583	-1.424
	Pile	6.490	0.155	11.763	9.180	1.423
Variation de température à court terme	Culée	0.908	1.102	0.000	-2.104	-2.319
	Pile	2.481	0.404	7.842	5.738	2.319
Variation de température à long terme	Culée	1.815	0.551	0.000	-2.583	-1.424
	Pile	6.490	0.155	11.763	9.180	1.423

XIII.1.2. Vérification des appareils d'appui

a) Efforts sur les appareils d'appui

▪ Efforts verticaux :

- Poids propre du tablier :

$$N_g = \frac{gL}{2n'} \quad (XIII.16)$$

n' : Nombre d'appareils d'appui

AN :

$$N_g = \frac{14.56 \times 39.21}{2 \times 3}$$

$$N_g = 95.150 \text{ t}$$

- La surcharge A(l) :

$$N_{A(l)} = \frac{A(l) b L}{2 n'} \quad (XIII.17)$$

AN :

$$N_{A(l)} = \frac{0.84 \times 6 \times 39.21}{2 \times 3}$$

$$N_{A(l)} = 32.937 \text{ t}$$

- la surcharge Bc :

$$N_{Bc} = \frac{4 \sum P_i}{2 n'} \quad (XIII.18)$$

AN :

$$N_{Bc} = \frac{4 \times 30}{2 \times 3}$$

$$N_{Bc} = 20 \text{ t}$$

- la surcharge de trottoir :

$$N_{A(t)} = \frac{2 A(t) L b_t}{2 n'} \quad (XIII. 19)$$

AN :

$$N_{A(t)} = \frac{2 \times 0.15 \times 39.21 \times 0.75}{2 \times 3}$$

$$N_{A(t)} = 1.471 \text{ t}$$

Ainsi la somme des efforts verticaux est :

$$N_{max} = N_g + \max[N(A(l); N(Bc))] + N(A(t)) \quad (XIII. 20)$$

AN :

$$N_{max} = 95.150 + \max[N(32.937; 20)] + 1.471$$

$$N_{max} = 129.558 \text{ t}$$

- Efforts horizontaux :

$$H_{max} = H_{freinage} + H_{fluage} + H_{var \text{ temp à court terme}} \quad (XIII. 21)$$

AN : Pour la culée :

$$H_{max,culée} = 10.976 - 1.424 - 2.319$$

$$H_{max,culée} = 7.233 \text{ t}$$

De même pour la pile nous trouvons

$$H_{max,pile} = 7.766 \text{ t}$$

b) Vérification de non glissement

Il faut que :

$$H_{max} < f N_{max} \quad (XIII. 22)$$

Avec :

$$f = 0,1 + \frac{0,6 a b}{N_{max}} \quad (XIII. 23)$$

AN :

$$f = 0,1 + \frac{0,6 \times 0.25 \times 0.45}{129.558}$$

$$f = 0.101$$

$$f N_{max} = 0.101 \times 129.558$$

$$f N_{max} = 13.082 \text{ t} > 7.766 \text{ t}$$

Ainsi :

$$H_{max} < f N_{max}$$

Le glissement n'est pas à craindre

c) Vérification de l'épaisseur des frettes

Il faut que :

$$t_s \geq \max\left(\frac{a N_{max}}{C_f \sigma_e a b}; 2[mm]\right) \quad (XIII.24)$$

AN :

$$t_s \geq \max\left(\frac{0.25 \times 129.558 \times 10}{8.036 \times 245 \times 0.25 \times 0.45}; 2[mm]\right)$$

$$t_s \geq \max(1.462; 2)$$

$$t_s \geq 2 \text{ mm}$$

Or $t_s = 3 \text{ mm}$ alors l'épaisseur des frettes est correcte.

d) Vérification des contraintes

Il faut que :

$$\frac{N}{a b} < 15 \text{ [MPa]} : \text{Limitation de la contrainte de compression ;} \quad (XIII.25)$$

$$\frac{N}{a b} > 2 \text{ [MPa]} : \text{Condition de non glissement ;} \quad (XIII.26)$$

$$\tau_N = \frac{1,5N}{c_f a b} > \tau_\alpha \quad (XIII.27)$$

$$\tau_{H1} = \frac{G_v U_i}{T} < 0,5 G_v \quad (XIII.28)$$

$$\tau_H = \tau_{H1} + \tau_{H2} < 0,7 G_v \quad (XIII.29)$$

$$\tau = \tau_N + \tau_H + \tau_\alpha \quad (XIII.30)$$

Avec :

- $G_v = 0,8 \text{ [MPa]}$: Module d'élasticité transversal du béton ;
- τ_N : la contrainte de cisaillement due à l'effort normal ;
- τ_{H1} : La contrainte de cisaillement due au retrait, fluage et la variation de température ;
- $\tau_{H2} = \frac{H_f}{a b}$: La contrainte de cisaillement due à l'effort de freinage ;
- $\tau_\alpha = \frac{G}{2} \left(\frac{a}{t}\right)^2 \frac{\alpha_T}{n}$: la contrainte de cisaillement due à la rotation de l'appareil d'appui ;

- $\frac{\alpha_T}{n}$: L'angle de rotation d'un feuillet d'élastomère en radian

$$\alpha_{T(G+R)} = -0,0091 \text{ [rad]} \text{ et } \alpha_{T(Q)} = 0,0053 \text{ [rad]}$$

La détermination du cas défavorable se fait par la considération des différentes combinaisons d'actions suivantes :

Cas 1 : charge permanente + retrait et fluage + variation de température à court terme à court terme;

Cas 2 : charge permanente + retrait et fluage + variation de température à long terme ;

Cas 3 : charge permanente + charge d'exploitation maximale + retrait et fluage + variation de température à court terme ;

Cas 4 : charge permanente + charge d'exploitation maximale + retrait et fluage + variation de température à long terme.

Le tableau suivant montre la vérification des contraintes :

Tableau 121 : Vérification des contraintes [MPa] vis-à-vis des appareils d'appui

Appuis	N° cas de charge	Contraintes normales	τ_n	τ_α	τ_{H_1}	τ_{H_2}	τ_H	τ	Vérifications
Culée	1	8.126	1.517	-0.569	-0.077	0	-0.077	0.871	ok
	2	8.205	1.532	-0.569	-0.085	0	-0.085	0.878	ok
	3	11.053	2.064	0.332	-0.077	0.309	0.232	2.628	ok
	4	11.133	2.078	0.332	-0.085	0.309	0.224	2.634	ok
Pile	1	8.791	1.641	-0.569	0.244	0	0.244	1.316	ok
	2	8.711	1.626	-0.569	0.300	0	0.300	1.357	ok
	3	11.719	2.188	0.332	0.244	0.114	0.358	2.878	ok
	4	11.639	2.173	0.332	0.300	0.114	0.414	2.919	ok

Ainsi les dimensions des appareils d'appui sont correctes.

XIII.2. Etude de la culée

XIII.2.1. Etude de stabilité de la culée

Cette étude de stabilité de la culée nous permettra de garder ou de changer les dimensions présupposées des éléments de la culée. Ces dimensions sont celles vues lors de l'étude de variantes. Nous admettons qu'avant la mise en œuvre de la superstructure, les pieux sous la culée assurent suffisamment la stabilité de celle-ci.

La stabilité de la culée vis-à-vis du renversement sera étudiée par rapport au point O montré sur le schéma suivant :

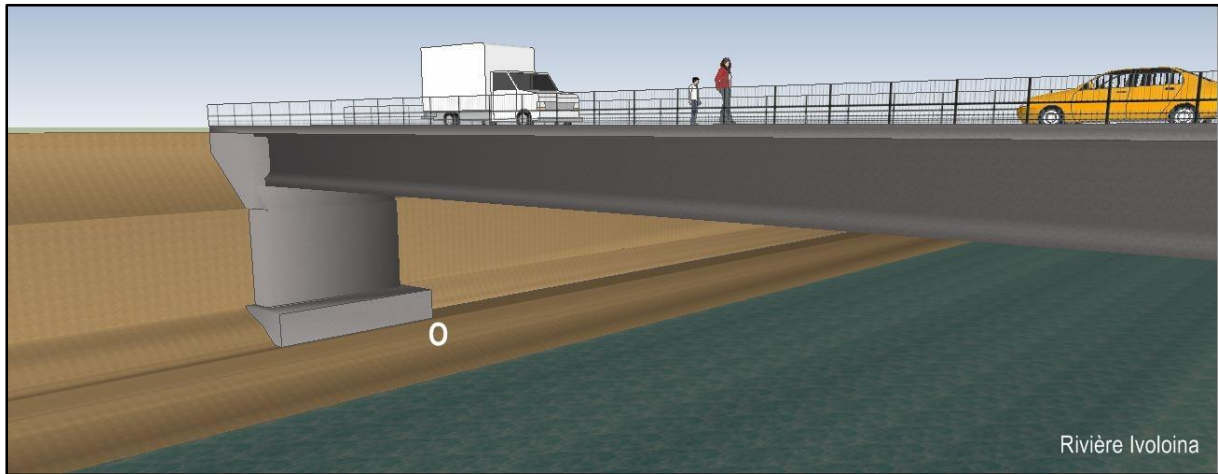


Figure 46 : Point de renversement O de la culée

a) Stabilité de la culée dans le sens longitudinal du pont

▪ Vis-à-vis du renversement

Le pont sera étudié à vide, c'est-à-dire sans les charges d'exploitation, car l'effet de ces charges est avantageux pour la stabilité au renversement de la culée.

Le moment M_i engendré par une charge F_i a pour expression :

$$M_i = F_i d_i \quad (XIII.31)$$

Avec :

F_i : Charge engendrant le moment M_i

d_i : Bras de levier par rapport au point de renversement O

AN : Exemple : Pour le poids du mur garde-grève :

$$F_{gg} = \rho_b L_{gg} h_{gg} l_{gg} \quad (XIII.32)$$

$$F_{gg} = 2.5 \times 7.5 \times 2.70 \times 0.34$$

$$F_{gg} = 17.213 \text{ t}$$

$$d_{gg} = \frac{1}{2} (e_{gg} + e_{fr} + l_{sem}) \quad (XIII.33)$$

AN :

$$d_{gg} = \frac{1}{2} (0.34 + 1.1 + 5)$$

$$d_{gg} = 3.22 \text{ m}$$

Alors

$$M_{gg} = 17.213 \times 3.220$$

$$M_{gg} = 55.426 \text{ tm}$$

La détermination des différentes charges considérées est traitée plus bas lors des études des éléments de la culée.

Le tableau suivant présente les différents moments influant sur l'équilibre de la culée vis-à-vis du renversement dans le sens longitudinal du pont.

Tableau 122 : Stabilité de la culée vis-à-vis du renversement dans le sens longitudinal du pont

Désignation	Charges (t)	Bras de levier (m)	Moment stabilisant (tm)	Moment renversant (tm)
mur garde grève	17.213	3.220	55.426	
sommier	27.125	2.500	67.813	
mur en retour	13.875	4.475	62.091	
mur de front	92.813	2.500	232.031	
dalle de transition	16.875	4.775	80.578	
semelle sous culée	159.375	2.500	398.438	
poids du demi-tablier	285.429	2.500	713.573	
Q1	39.158	7.379		288.939
Q2	55.491	3.152		174.903
Déformation du tablier	2.848	9.760		27.796
TOTAL			1609.949	491.639

La stabilité est assurée si :

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 1,5 \quad (XIII.34)$$

AN :

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{1609.949}{491.639}$$

$$\frac{M_s}{M_r} = 3.275 \geq 1,5$$

Donc la stabilité de la culée vis-à-vis du renversement dans le sens longitudinal du pont est assurée.

▪ Vis-à-vis du glissement

La stabilité vis-à-vis du glissement est assurée si :

$$f \frac{F_V}{F_H} \geq 1,5 \quad (XIII.35)$$

Où :

$f = 0.6$: Coefficient de frottement entre le béton et le sol de fondation

F_V : Somme des forces verticales agissant sur la culée

F_H : Somme des forces horizontales agissant sur la culée

Tableau 123 : Stabilité de la culée vis-à-vis du glissement dans le sens longitudinal du pont

Désignation	F_V (t)	F_H (t)
mur garde grève	17.213	
sommier	27.125	
mur en retour	13.875	
mur de front	92.813	
dalle de transition	16.875	
semelle sous culée	159.375	
poids du demi-tablier	285.429	
Surcharge A(l)	98.809	
Surcharge de trottoir	13.233	
Q1		39.158
Q2		55.491
Freinage		10.980
Déformation		2.848
TOTAL	724.747	108.477

Ainsi :

$$f \frac{F_V}{F_H} = 0.6 \frac{724.747}{108.477}$$

$$f \frac{F_V}{F_H} = 4 \geq 1,5$$

Donc la stabilité de la culée vis-à-vis du glissement dans le sens longitudinal du pont est assurée.

b) Stabilité de la culée dans le sens transversal du pont

▪ Vis-à-vis du renversement

Le pont sera étudié à vide, c'est-à-dire sans les charges d'exploitation, car l'effet de ces charges est avantageux pour la stabilité au renversement de la culée.

Le procédé de calcul des moments est le même que précédemment et nous avons le tableau suivant qui présente les différents moments influant sur l'équilibre de la culée dans le sens transversal du pont :

Tableau 124 : Stabilité de la culée vis-à-vis du renversement dans le sens transversal du pont

Désignation	Charges (t)	Bras de levier (m)	Moment stabilisant (tm)	Moment renversant (tm)
mur garde grève	17.213	4.250	73.155	
sommier	27.125	4.250	115.281	
mur en retour	13.875	4.250	58.969	
mur de front	92.813	4.250	394.453	
dalle de transition	16.875	4.250	71.719	
semelle sous culée	159.375	4.250	377.344	
poids du demi-tablier	285.429	4.250	1213.074	
Effet du vent sur le tablier	20.624	11.135		229.653
Effet du vent sur le mur de front	0.440	3.750		1.650
Effet du vent sur le mur en retour	2.775	7.295		20.244
Effet du vent sur le sommier	0.62	6.500		4.030
Effet du vent sur le mur garde grève	0.3672	8.350		3.066
TOTAL			2603.995	258.643

La stabilité est assurée si :

$$\frac{M_s}{M_r} \geq 1,5 \quad (XIII.36)$$

AN :

$$\frac{M_s}{M_r} = \frac{2603.995}{258.643}$$

$$\frac{M_s}{M_r} = 10.068 \geq 1,5$$

Donc la stabilité de la culée vis-à-vis du renversement dans le sens transversal du pont est assurée.

▪ Vis-à-vis du glissement

Le procédé de calcul se fait comme précédemment.

Tableau 125 : Stabilité de la culée vis-à-vis du glissement dans le sens transversal du pont

Désignation	Fv (t)	Fh (t)
mur garde grève	17.213	
sommier	27.125	
mur en retour	13.875	
mur de front	92.813	
dalle de transition	16.875	
semelle sous culée	159.375	
poids du demi-tablier	285.429	
Effet du vent sur le tablier		20.624
Effet du vent sur le mur de front		0.440

Désignation	Fv (t)	Fh (t)
Effet du vent sur le mur en retour		2.775
Effet du vent sur le sommier		0.620
Effet du vent sur le mur garde grève		0.367
TOTAL	612.705	24.827

Ainsi

$$f \frac{F_V}{F_H} = 0.6 \frac{570.205}{24.827}$$

$$f \frac{F_V}{F_H} = 2.603 \geq 1,5$$

Donc la stabilité de la culée vis-à-vis du glissement dans le sens transversal du pont est assurée.

Cette étude de stabilité nous a permis de retenir les dimensions vues lors de l'étude des variantes. Nous pouvons maintenant passer au dimensionnement des différents éléments de la culée.

XIII.2.2. Etude du mur garde grève

Le mur garde grève a comme dimensions :

$$L_{gg} = 7.5 \text{ m}$$

$$h_{gg} = 2.70 \text{ m}$$

$$e_{gg} = 0.34 \text{ m}$$

Il est soumis à :

- la poussée des terres ;
- la poussée due aux surcharges des remblais d'accès ;
- les effets de freinage.

a) Sollicitations

▪ Poussée des terres

Les caractéristiques du sol sont:

- Poids volumique humide : $\gamma = 1,75 \text{ t/m}^3$
- Nature du terrain : sol pulvérulent (sablonneux)
- Angle de frottement interne : $\phi = 30^\circ$
- Cohésion : $C = 0$

La poussée des terres exercée par le remblai d'accès sur un écran vertical a pour expression:

$$Q_p = k_{ay} \gamma \frac{h_{gg}^2}{2} \quad (XIII.37)$$

Avec :

$$k_{ay} = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad (XIII.38)$$

AN :

$$k_{ay} = \frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30}$$
$$k_{ay} = 0.333$$

Alors

$$Q_p = 0.333 \times 1.75 \times \frac{2.70^2}{2}$$
$$Q_p = 2.124 \text{ t/m.l}$$

Ainsi l'effort tranchant maximal dû à cette poussée vaut :

$$T_p = Q_p = 2.124 \text{ t/m.l}$$

Le moment maximal d'encastrement vaut :

$$M_p = Q_p \frac{h_{gg}}{3} \quad (XIII.39)$$

AN :

$$M_p = 2.172 \times \frac{2.70}{3}$$
$$M_p = 1.912 \text{ Tm/m.l}$$

▪ Poussée due aux surcharges des remblais d'accès

La poussée due aux surcharges de remblai d'accès est :

$$Q_r = k_{aq} q h_{gg} \quad (XIII.40)$$

Avec :

$$k_{aq} = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \quad (XIII.41)$$

AN :

$$k_{aq} = \frac{1 - \sin 30}{1 + \sin 30}$$

$$k_{aq} = 0.333$$

Alors

$$Q_r = 0.333 \times 1 \times 2.70$$

$$Q_r = 0.899 \text{ t/m.l}$$

Ainsi l'effort tranchant maximal vaut :

$$T_r = Q_r = 0.899 \text{ t/m.l}$$

Le moment maximal d'encastrement vaut :

$$M_r = Q_r \frac{h_{gg}}{2} \quad (XIII.42)$$

AN :

$$M_r = 2.172 \times \frac{2.70}{2}$$

$$M_r = 1.214 \text{ tm/m.l}$$

▪ Effet de la force de freinage

Pour 1 ml de longueur du mur, on considère l'effet de freinage d'un camion type Bc, qui équivaut à une charge de $P=6t$ uniformément répartie sur un rectangle d'impact de $0.25m \times 0.75m$ et transmise sur la hauteur du mur sous un angle de 45° .

L'effort tranchant vaut ainsi:

$$T_f = \frac{P}{L_{gg}} \quad (XIII.43)$$

AN :

$$T_f = \frac{6}{7.5}$$

$$T_f = 0.8 \text{ t/m.l}$$

Et le moment fléchissant vaut :

$$M_f = \frac{Ph_{gg}}{0,25 + 2h_{gg}} \quad (XIII.44)$$

AN :

$$M_f = \frac{6 \times 2.70}{0,25 + 2 \times 2.70}$$

$$M_f = 2.868 \text{ tm/m.l}$$

b) Combinaisons d'actions

▪ ELU

$$M_u = 1,35 M_p + 1,5 (M_r + M_f) \quad (XIII.45)$$

AN :

$$M_u = 1,35 \times 1.912 + 1,5 (1.124 + 2.868)$$

$$M_u = 8.704 \text{ tm/m.l}$$

$$T_u = 1,35 T_p + 1,5 (T_r + T_f) \quad (XIII.46)$$

AN :

$$T_u = 1,35 \times 2.124 + 1,5 (0.899 + 0.800)$$

$$T_u = 5.417 \text{ t/m.l}$$

▪ ELS

$$M_{ser} = M_p + M_r + M_f \quad (XIII.47)$$

AN :

$$M_{ser} = 1.912 + 1.124 + 2.868$$

$$M_{ser} = 5.994 \text{ tm/m.l}$$

$$T_{ser} = T_p + T_r + T_f \quad (XIII.48)$$

AN :

$$T_{ser} = 2.124 + 0.899 + 0.800$$

$$T_{ser} = 3.824 \text{ t/m.l}$$

c) Armatures

▪ Armatures principales

La détermination des armatures au mètre linéaire du mur garde grève est similaire à celle d'une poutre de largeur unité que nous avons déjà vue lors de l'étude de la dalle, en suivant l'organigramme de calcul donné en Annexe D1-3.

Le tableau suivant montre le récapitulatif de la détermination des armatures principales du mur garde grève: