

11 CALCUL DE L'OURDIS

11-1 Généralités

Le tablier est constitué d'un grillage solidaire de poutres et entretoises, cela va partager l'ourdis en des panneaux rectangulaires dont on distingue 2 familles :

1- Les panneaux intermédiaires : Ce sont des dalles rectangulaires qui s'appuient sur 4 côtés, leurs dimensions sont $(l_x \times l_y)$

Où l_x est la distance entre nues de 2 poutres consécutives.

l_y est la distance entre nues de 2 entretoises consécutives.

2- Les panneaux de rives : Ce sont des dalles en consoles qui sont encastrées dans la poutre de rive, elles sont calculées par 1 mètre linéaire de largeur.

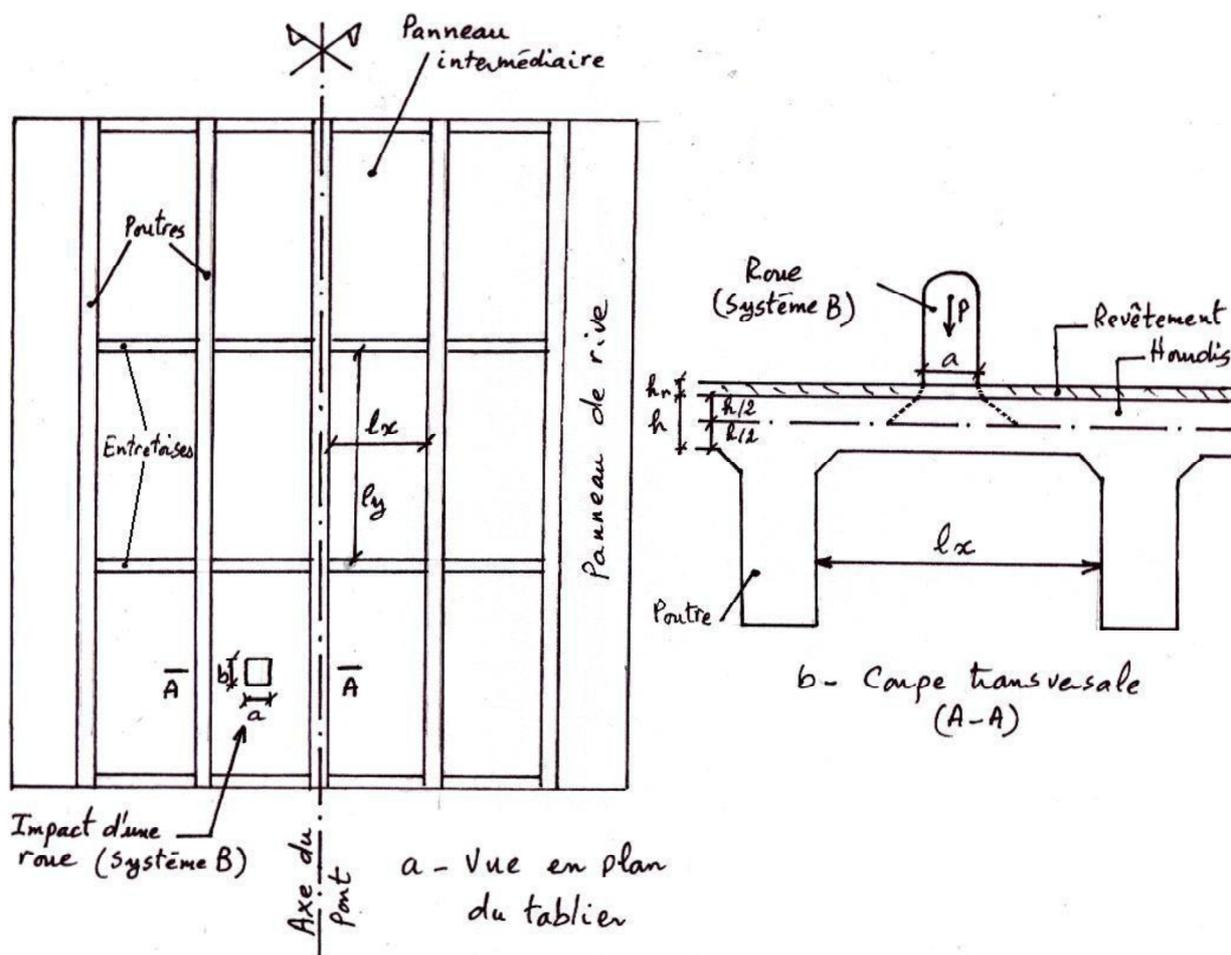


Fig. 47 Constitution d'un tablier de pont à poutres sous chaussée.

Les calculs de l'ourdis se font à partir de son plan moyen, de ce fait la charge P transmise par la roue d'impact initiale (a x b) aura après diffusion un impact final (u x v), ce dernier sera pris en considérations dans les calculs (fig. 49). On a

$$\text{et } \left. \begin{aligned} e &= h_r \cdot \operatorname{tg} \beta \\ f &= \frac{h}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha \end{aligned} \right\} \quad (57)$$

Où h_r est l'épaisseur du revêtement

β est l'angle de diffusion des charges dans le revêtement : $\beta = \text{artg} (3/4) \approx 37^\circ$

h est l'épaisseur de l'hourdis

α est l'angle de diffusion des charges dans l'hourdis : $\alpha = 45^\circ$

En remplaçant les valeurs de α et β dans la relation 57, on obtient

$$\text{et } \left. \begin{array}{l} e = 0.75 h \\ f = \frac{h}{2} \end{array} \right\} (58)$$

D'après la figure 48, le rectangle après diffusion a les dimensions

$$\text{et Selon } x : u = a + 1.5 h_r + h \quad (59)$$

$$\text{Selon } y : v = b + 1.5 h_r + h$$

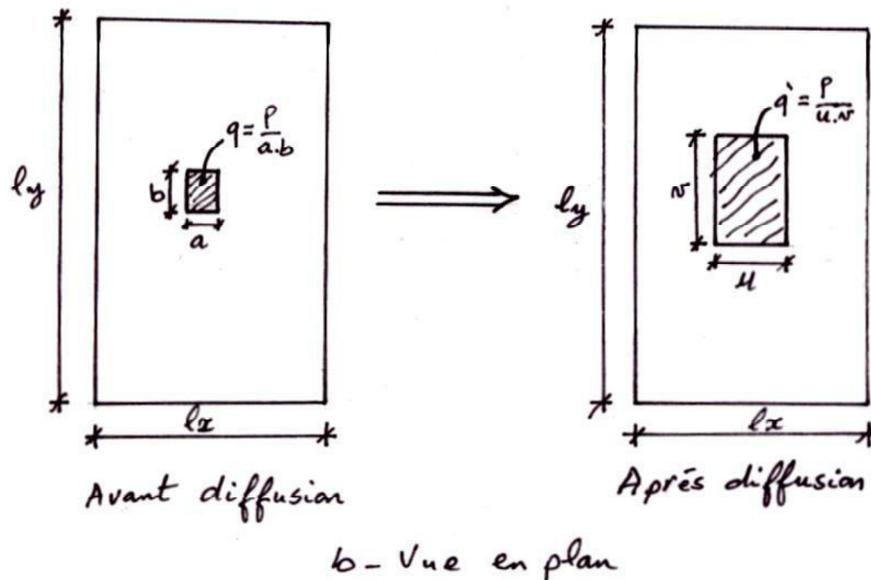
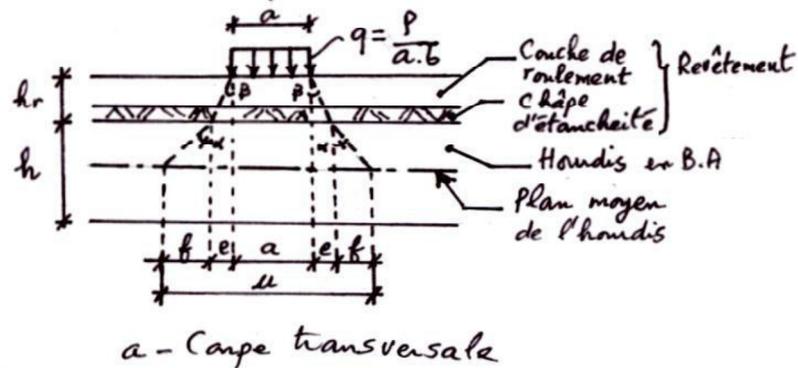


Fig. 48 Diffusion des charges dans un hourdis.

11-2 Calcul de l'hourdis intermédiaire par la méthode de PIGEAUD

11-2-1 Moment fléchissant en cas d'une charge centrée

On se propose de calculer les moments fléchissants M_x et M_y sur une bande de 1 ml au centre du panneau ($l_x \times l_y$), sachant que $l_x < l_y$. On suppose que la charge P est uniformément répartie au niveau du plan moyen de l'hourdis sur le rectangle d'impact ($u \times v$) concentrique au panneau ($l_x \times l_y$).

Etapes :

1- Calcul des 3 coefficients : $\rho = \frac{l_x}{l_y}$ (on a toujours $\rho \leq 1$).

$\frac{u}{l_x}$ (on a toujours $\frac{u}{l_x} \leq 1$).

$\frac{v}{l_y}$ (on a toujours $\frac{v}{l_y} \leq 1$).

2- $\left(\rho, \frac{u}{l_x}, \frac{v}{l_y} \right) \xrightarrow{\text{Tableau de PIGEAUD}} (M_1, M_2)$

$$M_x = P \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_y = P \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

Où 0.15 est le coefficient de poisson du béton.

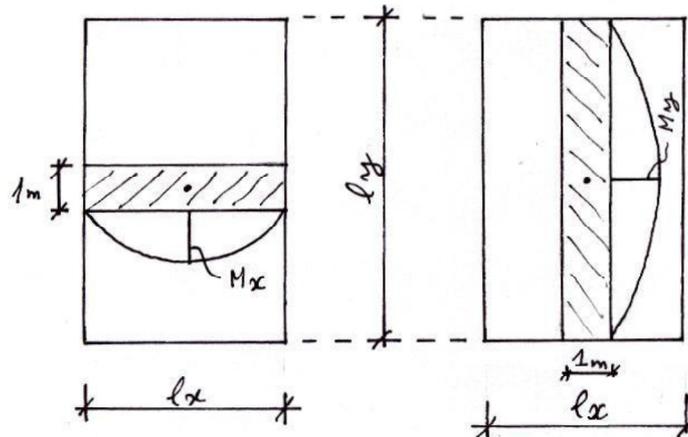


Fig. 49 Point d'application et directions des moments M_x et M_y .

Une fois les moments fléchissants M_x et M_y calculés, les moments en appuis et en travée seront donnés par

$$\text{et } \left. \begin{array}{l} \text{En appui : } M_a = -0.5 M_0 \\ \text{En travée : } M_t = 0.8 M_0 \end{array} \right\} \quad (60)$$

Où M_0 est le moment fléchissant calculé par la méthode de PIGEAUD, il est égal soit à M_x soit à M_y selon le cas envisagé.

Exercice 3

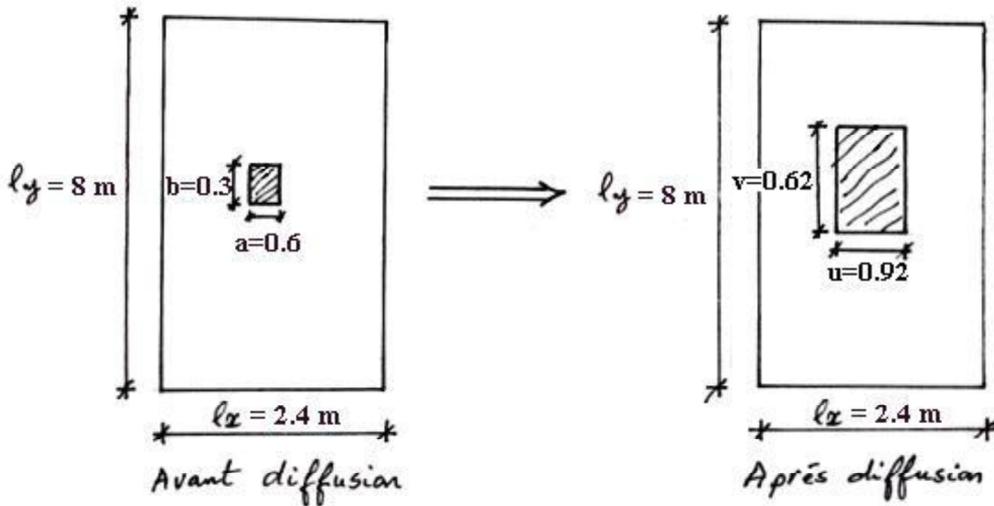
Calculer par la méthode de PIGEAUD les moments en travée et en appuis selon les 2 directions x et y, sous la charge d'une roue B_r dans un panneau d'hourdis rectangulaire de dimensions $l_x = 2.4 \text{ m}$ et $l_y = 8 \text{ m}$. L'épaisseur de l'hourdis est de 20 cm, celle du revêtement est de 8 cm. Le coefficient de majoration dynamique est $\delta_{B_r} = 1.14$.

Solution

Pour une roue B_r , $a = 0.6 \text{ m}$ et $b = 0.3 \text{ m}$.

Selon x : $u = a + 1.5 h_r + h \Rightarrow u = 0.6 + 1.5 \times 0.08 + 0.2 = 0.92 \text{ m}$

Selon y : $v = b + 1.5 h_r + h \Rightarrow v = 0.3 + 1.5 \times 0.08 + 0.2 = 0.62 \text{ m}$



$\rho = \frac{l_x}{l_y} = \frac{2.4}{8} = 0.3$; $\frac{u}{l_x} = \frac{0.92}{2.4} = 0.383$; $\frac{v}{l_y} = \frac{0.62}{8} = 0.078$

Valeur de M_1 : Interpolation $\rightarrow M_1 = 0.165$

	0.3	0.383	0.4
0.0	0.191	0.174	0.170
0.078		0.165	
0.1	0.178	0.163	0.160

$\frac{x - 0.191}{0.383 - 0.3} = \frac{0.170 - 0.191}{0.1} \Rightarrow x = 0.174$

$\frac{x - 0.178}{0.383 - 0.3} = \frac{0.16 - 0.178}{0.1} \Rightarrow x = 0.163$

$\frac{x - 0.174}{0.078 - 0} = \frac{0.163 - 0.174}{0.1} \Rightarrow x = 0.165$

Valeur de M_2 : Interpolation $\rightarrow M_2 = 0.110$

	0.3	0.383	0.4
0.0	0.193	0.176	0.172
0.078		0.110	
0.1	0.100	0.092	0.09

$\frac{x - 0.193}{0.383 - 0.3} = \frac{0.172 - 0.193}{0.1} \Rightarrow x = 0.176$

$\frac{x - 0.1}{0.383 - 0.3} = \frac{0.09 - 0.1}{0.1} \Rightarrow x = 0.092$

$\frac{x - 0.176}{0.078 - 0} = \frac{0.092 - 0.176}{0.1 - 0} \Rightarrow x = 0.110$

$$M_x = P \cdot \delta_{Br} \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_x = 100 \times 1.14 \times (0.165 + 0.15 \times 0.110) \Rightarrow M_x = 20.691 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$M_y = P \cdot \delta_{Br} \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

$$M_y = 100 \times 1.14 \times (0.110 + 0.15 \times 0.165) \Rightarrow M_y = 15.362 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$\begin{cases} M_x^t = 0.8 M_x = 16.553 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \\ M_y^t = 0.8 M_y = 12.290 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \end{cases}$$

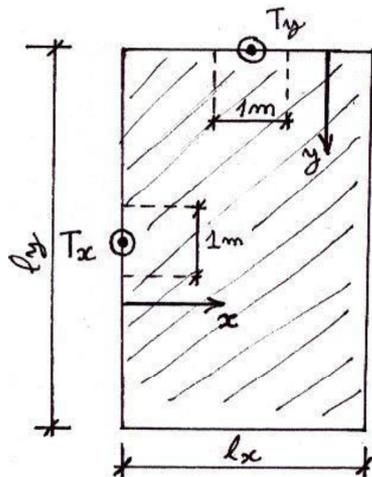
$$\begin{cases} M_x^a = -0.5 M_x = -10.346 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \\ M_y^a = -0.5 M_y = -7.681 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \end{cases}$$

11-2-2 Effort tranchant en cas d'une charge centrée

L'effort tranchant est toujours maximal au voisinage de la charge qu'elle soit répartie ou localisée.

a- Charge uniformément répartie sur toute la dalle

L'effort tranchant est calculé pour une bande de 1m de largeur

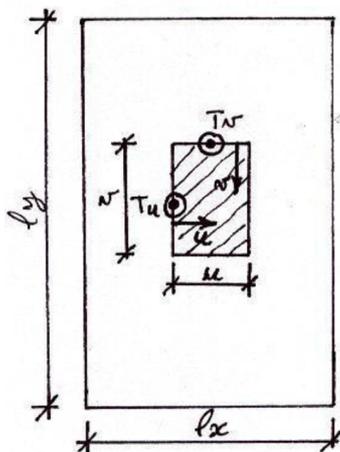


$$\left. \begin{aligned} \text{Selon } x : T_x &= \frac{P}{2l_y + l_x} \\ \text{Selon } y : T_y &= \frac{P}{3l_y} \end{aligned} \right\} (61)$$

Fig. 50 Effort tranchant dans une dalle uniformément chargée

b- Charge localisée

L'effort tranchant est calculé au voisinage des côtés u et v sur une bande de 1m de largeur



$$u < v : \left\{ \begin{aligned} \text{Selon } u : T &= \frac{P}{2v + u} \\ \text{Selon } v : T &= \frac{P}{3v} \end{aligned} \right. (62)$$

$$u > v : \left\{ \begin{aligned} \text{Selon } u : T &= \frac{P}{3u} \\ \text{Selon } v : T &= \frac{P}{2u + v} \end{aligned} \right. (63)$$

Fig. 51 Effort tranchant du à une charge localisée

Exercice 4 : (Suite de l'exercice 3)

Calculer l'effort tranchant sous l'effet de :

1- La charge permanente.

2- La roue B_r .

Le revêtement a une épaisseur de (6+2) cm.

Solution

1- Couche de roulement : $g_1 = 0.06 \times 24 = 1.440 \text{ KN} / \text{m}^2$.

Chape d'étanchéité : $g_2 = 0.02 \times 23 = 0.460 \text{ KN} / \text{m}^2$.

Hourdis : $g_3 = 0.2 \times 25 = 5.000 \text{ KN} / \text{m}^2$;

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = 6.900 \text{ KN} / \text{m}^2$$

$$G = g \cdot l_x \cdot l_y$$

$$G = 6.90 \times 2.4 \times 8 = 132.48 \text{ KN}$$

Selon

$$\frac{x : T_x = \frac{G}{2 l_y + l_x}}{132.48}$$

$$T_x = \left(\frac{G}{2 l_y + l_x} \right) = 7.200 \text{ KN} / \text{ml}$$

Selon y : $T_y = \frac{G}{3 l_y}$

$$= \frac{132.48}{3 \times 8} = 5.520 \text{ KN} / \text{ml}$$

2- $u = 0.92 \text{ m} > v = 0.62 \text{ m}$

$$\text{Selon } u : T_u = \frac{P \cdot \delta_{B_r}}{3u}$$

$$T_u = \frac{100 \times 1.14}{3 \times 0.92} = 41.304 \text{ KN} / \text{ml}$$

$$\text{Selon } v : T_v = \frac{P \cdot \delta_{B_r}}{2u + v}$$

$$T_v = \frac{100 \times 1.14}{(2 \times 0.92 + 0.62)} = 46.341 \text{ KN} / \text{ml}$$

11-2-3 Cas spécifiques

a- Cas de 2 charges symétriques

Si l'hourdis est sollicité par 2 charges identiques de valeur P symétriques par rapport à l'axe des x (fig. 52), on considère séparément les cas (1) et (2), et les moments réels M_x et M_y sont obtenus par soustraction des 2 cas : (1)-(2). Soit

$$\left. \begin{aligned} M_x &= M_x^{(1)} - M_x^{(2)} \\ M_y &= M_y^{(1)} - M_y^{(2)} \end{aligned} \right\} \quad (64)$$

Les charges totales P_1 et P_2 sont calculées de la manière suivante :

- On calcule la charge répartie

$$q = \frac{P}{u \cdot v} \quad (65)$$

- On calcule P_1 et P_2 :

$$P = q \cdot u \cdot v \quad (66)$$

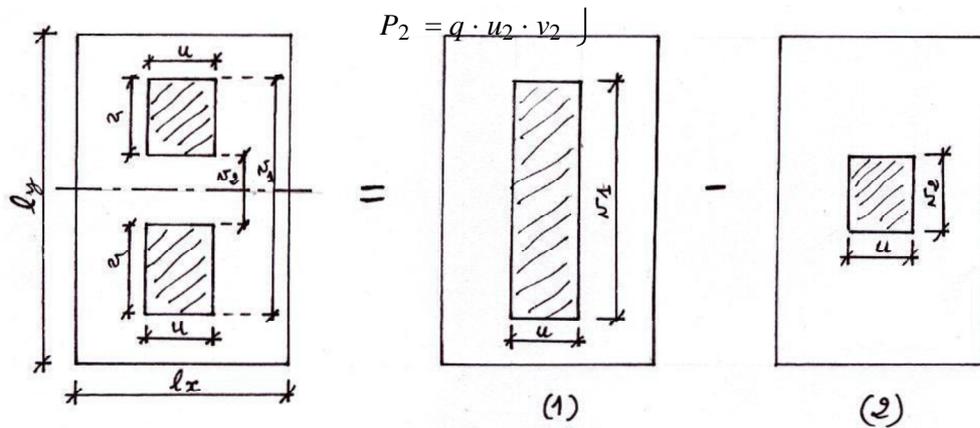


Fig. 52 Décomposition d'un chargement symétrique en 2 charges concentriques.

b- Cas général

Quelle que soit la position de la charge localisée ; en A, B ou C, le système est toujours une combinaison des charges concentriques I, II, III et IV.

D'après les figures 53 et 54, les effets A, B et C sont équivalents à

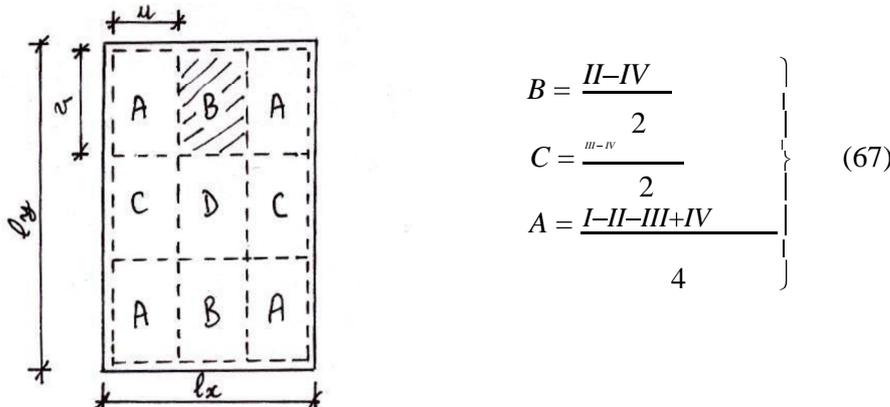


Fig. 53 Charge réelle en A, B ou C

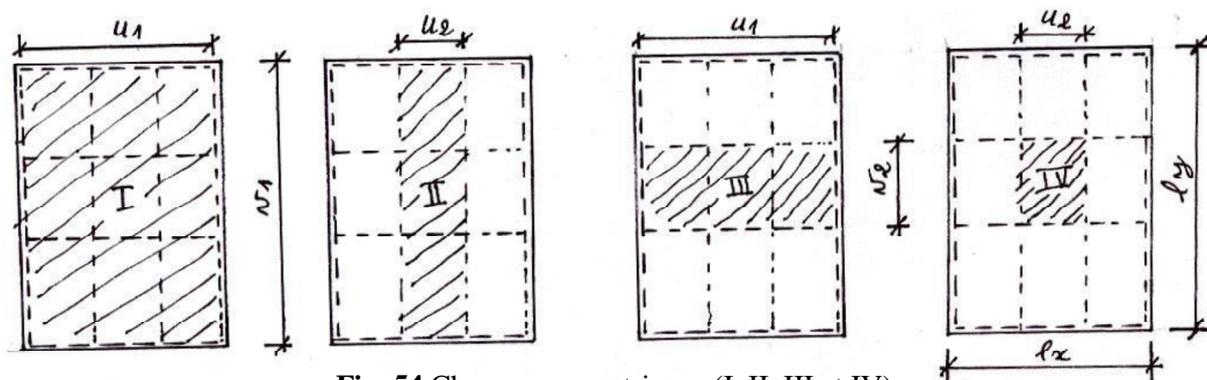


Fig. 54 Charges concentriques (I, II, III et IV).

Exercice 5

Calculer les moments fléchissants dans l'hourdis intermédiaire du pont à poutres sous chaussée en B.A représenté dans la figure 55. Les sollicitations considérées sont :

- a- La charge permanente G.
- b- La charge d'exploitation due au système B_c .

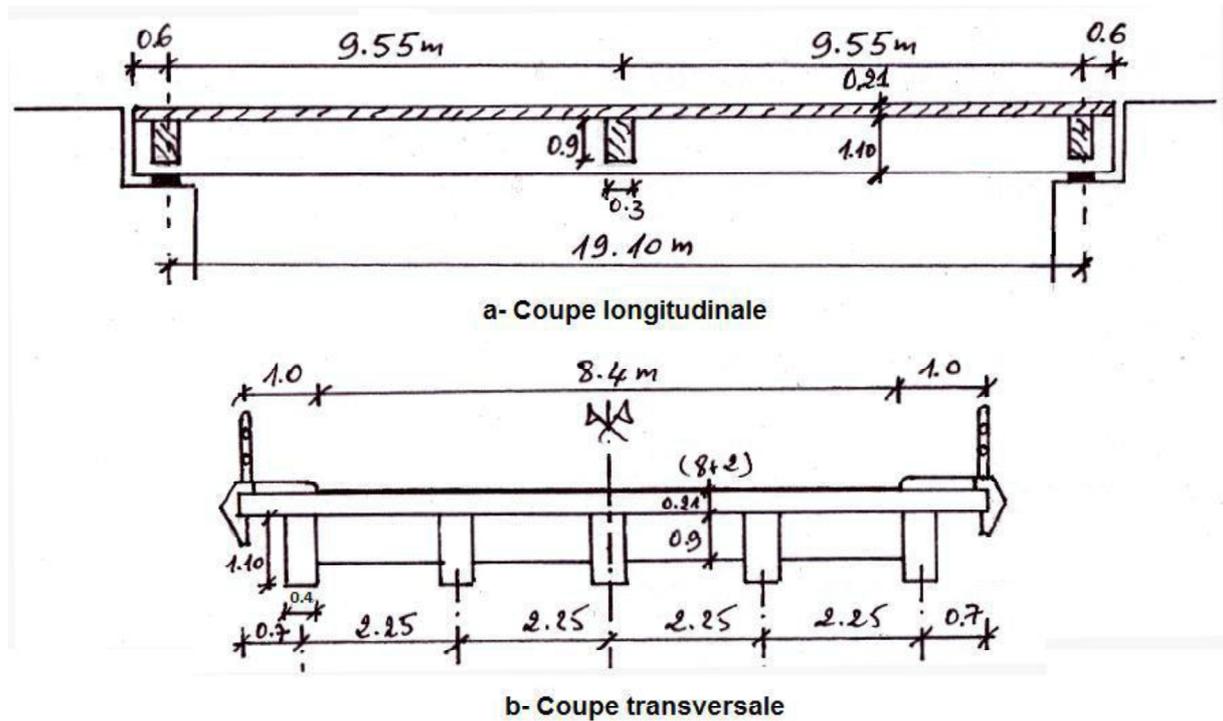


Fig. 55 Détails du pont à poutres sous chaussée en B.A.

Solution

a- Moments fléchissants dus à la charge permanente G :

La charge permanente d'1 m² de l'hourdis :

- Hourdis en B.A : $g_1 = 0.21 \times 25 = 5.250 \text{ KN} / \text{m}^2$
- Chape d'étanchéité : $g_2 = 0.02 \times 23 = 0.460 \text{ KN} / \text{m}^2$
- Couche de roulement en B.B : $g_3 = 0.08 \times 24 = 1.920 \text{ KN} / \text{m}^2$

Au total : $g = \sum_{i=1}^3 g_i = 7.630 \text{ KN} / \text{m}^2$

Les dimensions d'un panneau intermédiaire sont les distances entre nus des poutres et des entretoises.

$l_x = 2.25 - 0.4 \Rightarrow l_x = 1.85 \text{ m}$; $l_y = 9.55 - 0.3 \Rightarrow l_y = 9.25 \text{ m}$

$G = g \cdot l_x \cdot l_y$

$G = 7.63 \times 1.85 \times 9.25 \Rightarrow G = 130.568 \text{ KN}$

$\rho = \frac{l_x}{l} = \frac{1.85}{9.25} = 0.2 \xrightarrow{\text{Tab. 1}} M_1 = 0.0245$

$\frac{1}{\rho} = 5 \xrightarrow{\text{Tab. 1}} M_2 = 0.0030$

$$M_x = G \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_x = 130.568 \times (0.0245 + 0.15 \times 0.003) \Rightarrow M_x = 3.258 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_x^t = 0.8 M_x = 2.606 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \\ M_x^a = -0.5 M_x = -1.629 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \end{array} \right.$$

$$M_y = G \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

$$M_y = 130.568 \times (0.0030 + 0.15 \times 0.0245) \Rightarrow M_y = 0.872 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M_y^t = 0.8 M_y = 0.698 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \\ M_y^a = -0.5 M_y = -0.436 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \end{array} \right.$$

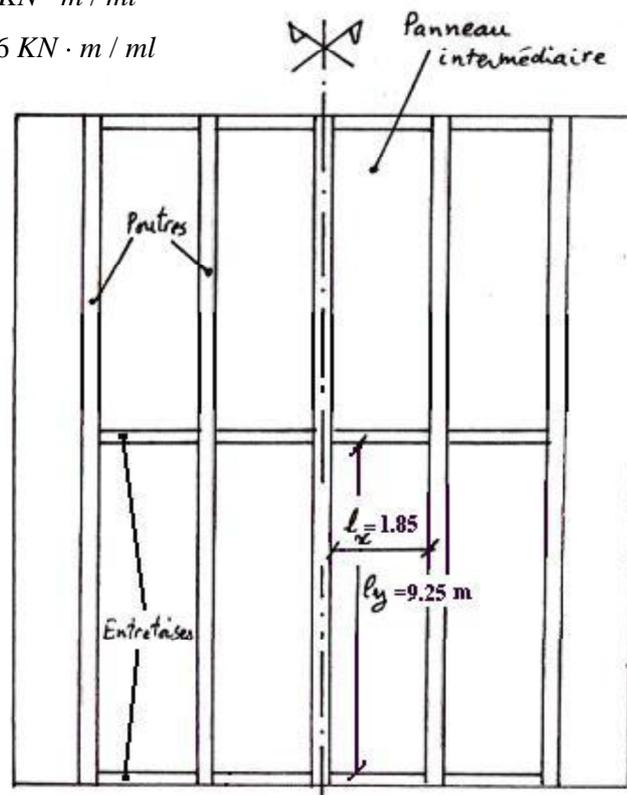


Fig. 56 Vue en plan de l'ouvrage

b- Moments fléchissants dus au système Bc :

Calculons la charge permanente supportée par l'hourdis

- Hourdis en B.A : $g_1 = 0.21 \times 10.4 \times 25 = 54.600 \text{ KN} / \text{ml}$
- Chape d'étanchéité : $g_2 = 0.02 \times 8.4 \times 23 = 3.864 \text{ KN} / \text{ml}$
- Couche de roulement en B.B : $g_3 = 0.08 \times 8.4 \times 24 = 16.128 \text{ KN} / \text{ml}$
- Trottoir et corniche : $g_4 = 2 \times 11.25 = 22.500 \text{ KN} / \text{ml}$
- Garde corps métallique : $g_5 = 2 \times 1 = 2.000 \text{ KN} / \text{ml}$

La charge permanente totale supportée par l'hourdis : $g_h = \sum_{i=1}^5 g_i = 99.092 \text{ KN} / \text{ml}$

$L_r = 8.4 \text{ m} > 7 \text{ m} \longrightarrow \text{Pont de classe I}$

$$L_c = L_r = 8.4 \text{ m}$$

$$n = \text{int} \left\lfloor \frac{L}{3} \right\rfloor + 2$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Classe I} \\ n = 2 \end{array} \right\} \rightarrow b_c = 1.1$$

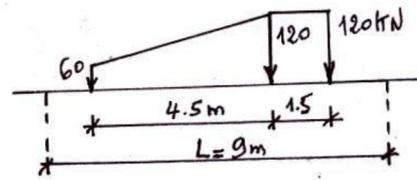


Fig. 57 Disposition d'un camion B_c longitudinalement

$$L = \text{Inf} [L_p ; \text{sup} (L_r, L_B)]$$

$$L = \text{Inf} [19.10 ; \text{sup} (8.4, 9)] \Rightarrow \boxed{L = 9 \text{ m}}$$

La charge permanente sur la longueur $L = 9 \text{ m}$:

$$G = g_h \cdot L$$

$$G = 99.092 \times 9 \Rightarrow \boxed{G = 891.828 \text{ KN}}$$

Sur la longueur $L = 9 \text{ m}$ on ne peut disposer qu'un seul camion B_c , mais transversalement le nombre de files est $n = 2$.

S

$$B_c = n \cdot B_c \cdot b_c$$

$$S_{B_c} = 2 \times 300 \times 1.1 \Rightarrow \boxed{S_{B_c} = 660 \text{ KN}}$$

Le coefficient de majoration dynamique du système B_c est

$$\delta_{B_c} = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 L} + \frac{0.6}{\frac{G}{S_{B_c}}}$$

$$\delta_{B_c} = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 \times 9} + \frac{0.6}{1 + 4 \times \frac{891.828}{660}} \Rightarrow \boxed{\delta_{B_c} = 1.237}$$

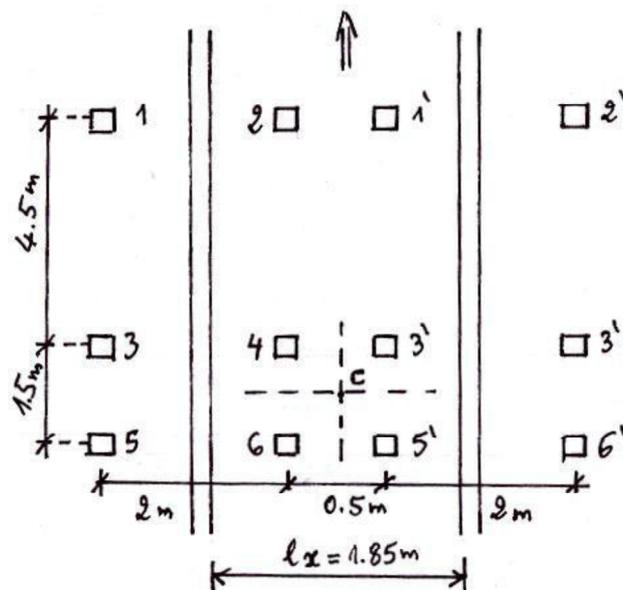


Fig. 58 Vu en plan de 2 camions accolés transversalement.

On suppose que 2 camions B_c sont accolés transversalement l'un à l'autre. Seul l'effet des roues (4), (6), (3'), et (5') est considéré, on néglige l'effet des roues (2) et (1') du fait qu'elles sont éloignées du centre C de la dalle.

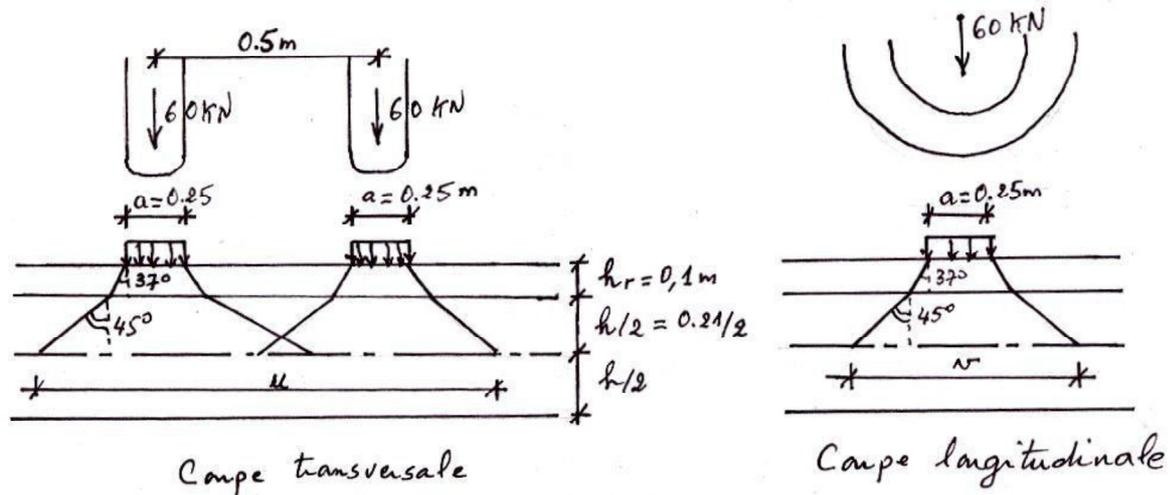


Fig. 59 Coupes sur la file de roues (6), (5').

Pour les roues (6) et (5') on a :

Selon x : $u = 0.5 + a + 1.5 h_r + h$

Selon y : $v = b + 1.5 h_r + h$

$u = 0.5 + 0.25 + 1.5 \times 0.1 + 0.21$

$v = 0.25 + 1.5 \times 0.1 + 0.21$

$u = 1.11 \text{ m}$
 $v = 0.61 \text{ m}$

$q = \frac{P \cdot b_c \cdot \delta_{B_c}}{u \cdot v}$

$q = \frac{120 \times 1.1 \times 1.237}{1.11 \times 0.61} \Rightarrow q = 241.152 \text{ KN/m}^2$

1er Cas : (Roues B_c centrées)

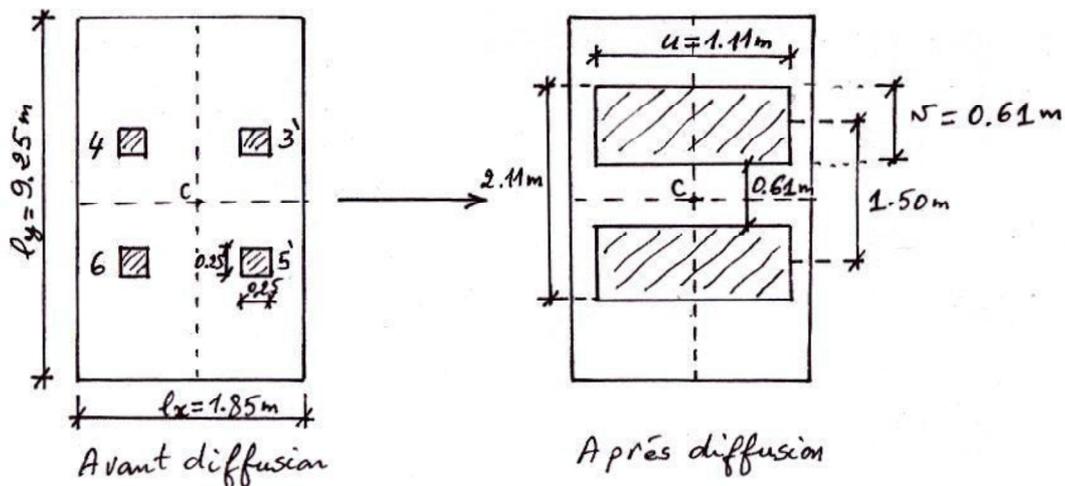


Fig. 60 Diffusion de charge du système B_c centré.

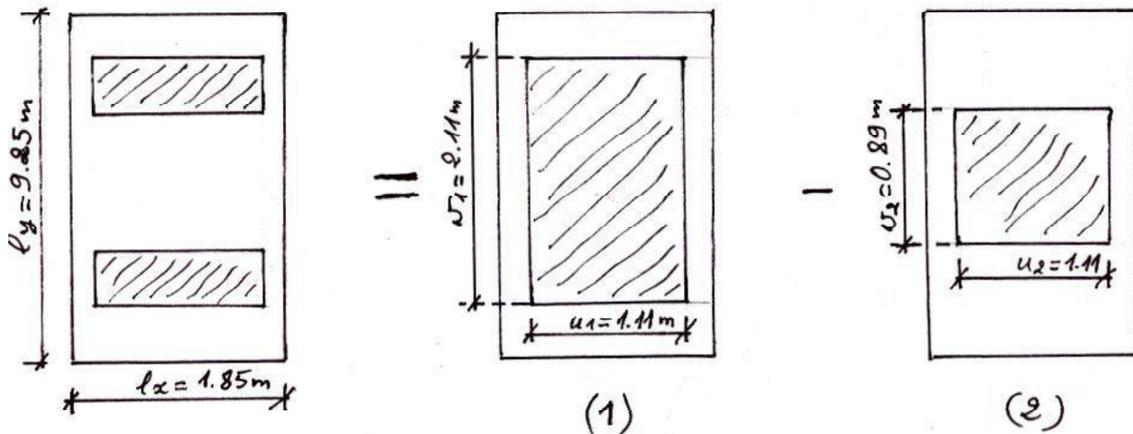


Fig. 61 Décomposition de la charge réelle en 2 charges concentriques.

$$\begin{cases} M_x = M_x^{(1)} - M_x^{(2)} \\ M_y = M_y^{(1)} - M_y^{(2)} \end{cases}$$

$$\rho = \frac{l_x}{l_y} = \frac{1.85}{9.25} \Rightarrow \boxed{\rho = 0.2}$$

Effet 1 :

$$P_1 = q \cdot u_1 \cdot v_1$$

$$P_1 = 241.152 \times 1.11 \times 2.11 \Rightarrow \boxed{P_1 = 564.802 \text{ KN}}$$

$$\left[\begin{array}{l} \rho = 0.2 ; \quad u_1 = 1.11 = 0.600 ; \quad v_1 = 2.11 \\ \frac{u_1}{l_x} = \frac{1.11}{1.85} ; \quad \frac{v_1}{l_y} = \frac{2.11}{9.25} \end{array} \right] \longrightarrow \begin{cases} M_1 = 0.106 \\ M_2 = 0.024 \end{cases}$$

$$M_x^{(1)} = P_1 \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_x^{(1)} = 564.802 \times (0.106 + 0.15 \times 0.024) \Rightarrow \boxed{M_x^{(1)} = 61.902 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}}$$

$$M_y^{(1)} = P_1 \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

$$M_y^{(1)} = 564.802 \times (0.024 + 0.15 \times 0.106) \Rightarrow \boxed{M_y^{(1)} = 22.536 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}}$$

Effet 2 :

$$P_2 = q \cdot u_2 \cdot v_2$$

$$P_2 = 241.152 \times 1.11 \times 0.89 \Rightarrow \boxed{P_2 = 238.234 \text{ KN}}$$

$$\left[\begin{array}{l} \rho = 0.2 ; \quad u_2 = 1.11 = 0.600 ; \quad v_2 = 0.89 \\ \frac{u_2}{l_x} = \frac{1.11}{1.85} ; \quad \frac{v_2}{l_y} = \frac{0.89}{9.25} \end{array} \right] \longrightarrow \begin{cases} M_1 = 0.126 \\ M_2 = 0.072 \end{cases}$$

$$M_x^{(2)} = P_2 \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_x^{(2)} = 238.234 \times (0.126 + 0.15 \times 0.072) \Rightarrow \boxed{M_x^{(2)} = 32.590 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}}$$

$$M_y^{(2)} = P_2 \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

$$M_y^{(2)} = 238.234 \times (0.072 + 0.15 \times 0.126) \Rightarrow \boxed{M_y^{(2)} = 21.655 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}}$$

Cas réel :

$$M_x = M_x^{(1)} - M_x^{(2)}$$

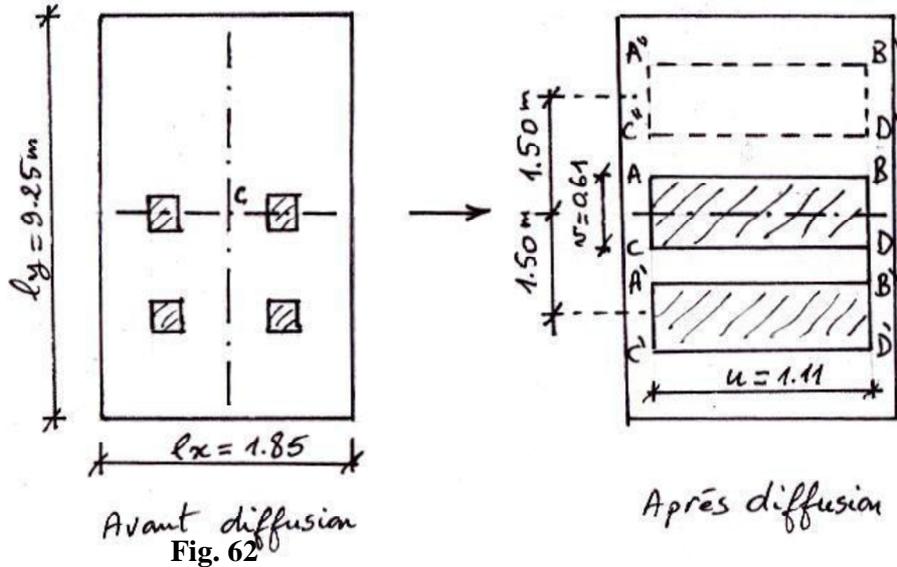
$$M_y = M_y^{(1)} - M_y^{(2)}$$

$$M_x = 61.902 - 32.59$$

$$M_y = 22.536 - 21.655 \Rightarrow$$

$$\begin{cases} M_x = 29.312 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \\ M_y = 0.881 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \end{cases}$$

2^e Cas : (Roues B_c excentrées)



Diffusion de charge du système B_c excentré.

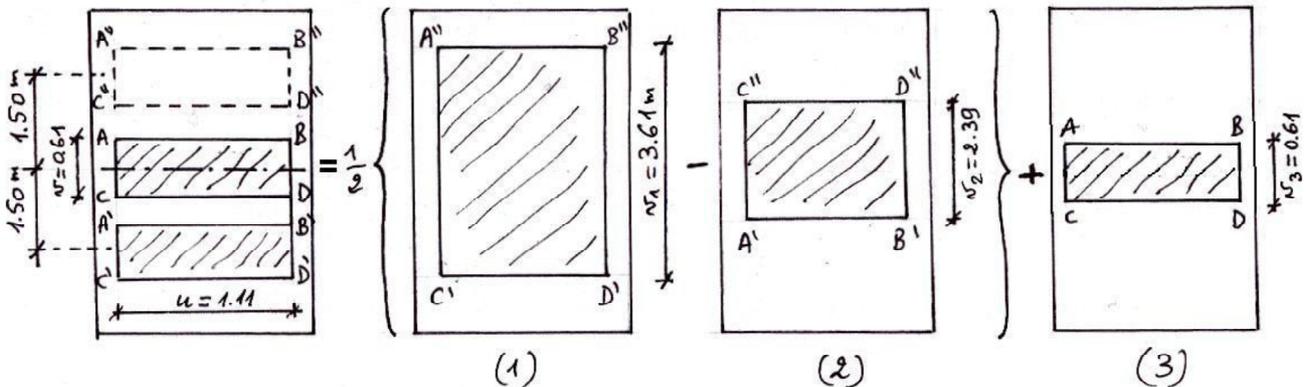


Fig. 63 Décomposition de la charge réelle en 3 charges concentriques.

Effet 1 :

$$P = q \cdot u \cdot v$$

$$P = 241.152 \times 1.11 \times 3.61 \Rightarrow P = 966.320 \text{ KN}$$

$$\left[\begin{array}{l} \rho = 0.2 \quad ; \quad \frac{u}{l_x} = \frac{1.11}{1.85} = 0.600 \quad ; \quad \frac{v}{l_y} = \frac{3.61}{9.25} = 0.390 \\ \left. \vphantom{\frac{u}{l_x}} \right\} \end{array} \right] \longrightarrow \begin{cases} M_1 = 0.081 \\ M_2 = 0.0056 \end{cases}$$

$$M_x^{(1)} = P \cdot (M_1 + 0.15M_2)$$

$$M_x^{(1)} = 966.32 \times (0.081 + 0.15 \times 0.0056) \Rightarrow M_x^{(1)} = 79.084 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$M_y^{(1)} = P \cdot (M_2 + 0.15M_1)$$

$$M_y^{(1)} = 966.32 \times (0.0056 + 0.15 \times 0.081) \Rightarrow M_y^{(1)} = 17.152 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

Effet 2 :

$$P_2 = q \cdot u_2 \cdot v_2$$

$$P_2 = 241.152 \times 1.11 \times 2.39 \Rightarrow P_2 = 639.752 \text{ KN}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 0.2 ; \quad \frac{u}{l_x} = \frac{1.11}{1.85} = 0.600 ; \quad \frac{v}{l_y} = \frac{2.39}{9.25} \\ \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{PIGEAUD}} \left\{ \begin{array}{l} M_1 = 0.101 \\ M_2 = 0.019 \end{array} \right.$$

$$M_x^{(2)} = P_2 \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_x^{(2)} = 639.752 \times (0.101 + 0.15 \times 0.019) \Rightarrow M_x^{(2)} = 66.438 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$M_y^{(2)} = P_2 \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

$$M_y^{(2)} = 639.752 \times (0.019 + 0.15 \times 0.101) \Rightarrow M_y^{(2)} = 21.848 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

Effet 3 :

$$P_3 = q \cdot u_3 \cdot v_3$$

$$P_3 = 241.152 \times 1.11 \times 0.61 \Rightarrow P_3 = 163.284 \text{ KN}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 0.2 ; \quad \frac{u}{l_x} = \frac{1.11}{1.85} = 0.600 ; \quad \frac{v}{l_y} = \frac{0.61}{9.25} = 0.066 \\ \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{PIGEAUD}} \left\{ \begin{array}{l} M_1 = 0.129 \\ M_2 = 0.091 \end{array} \right.$$

$$M_x^{(3)} = P_3 \cdot (M_1 + 0.15 M_2)$$

$$M_x^{(3)} = 163.284 \times (0.129 + 0.15 \times 0.091) \Rightarrow M_x^{(3)} = 23.292 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$M_y^{(3)} = P_3 \cdot (M_2 + 0.15 M_1)$$

$$M_y^{(3)} = 163.284 \times (0.091 + 0.15 \times 0.129) \Rightarrow M_y^{(3)} = 18.018 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

Cas réel :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_x = \frac{1}{2} (M_x^{(1)} - M_x^{(2)}) + M_x^{(3)} \\ M_y = \frac{1}{2} (M_y^{(1)} - M_y^{(2)}) + M_y^{(3)} \\ \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} M_x = 29.615 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \\ M_y = 15.670 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml} \end{array} \right.$$

Conclusion :

Pour le ferrailage de l'hourdis dans les deux sens, en appuis et en travée, on utilise le système B et le Mc120.

$$\text{E.L.U : } M_u = 1.35 M_G + \max \left\{ \begin{array}{l} 1.605 \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} M_{Bc} \\ M_{Br} \end{array} \right\} \\ 1.35 M_{c120} \end{array} \right.$$

$$\underline{\text{E.L.S}} : M_s = M_G + \begin{cases} M \\ 1.2 \begin{cases} M_{Bc} \\ M_{Bt} \\ M_{Br} \end{cases} \\ M \\ M_{c120} \end{cases}$$

11-3 Calcul de l'hourdis de rive

C'est une dalle en console encadrée dans la poutre de rive. On peut distinguer de types :

- Console simple : c'est une dalle simple en castrée dans la poutre de rive.
- Console nervurée : c'est une dalle renforcée par de petites poutres transversales et des nervures, même les entretoises peuvent sortir en sailli.

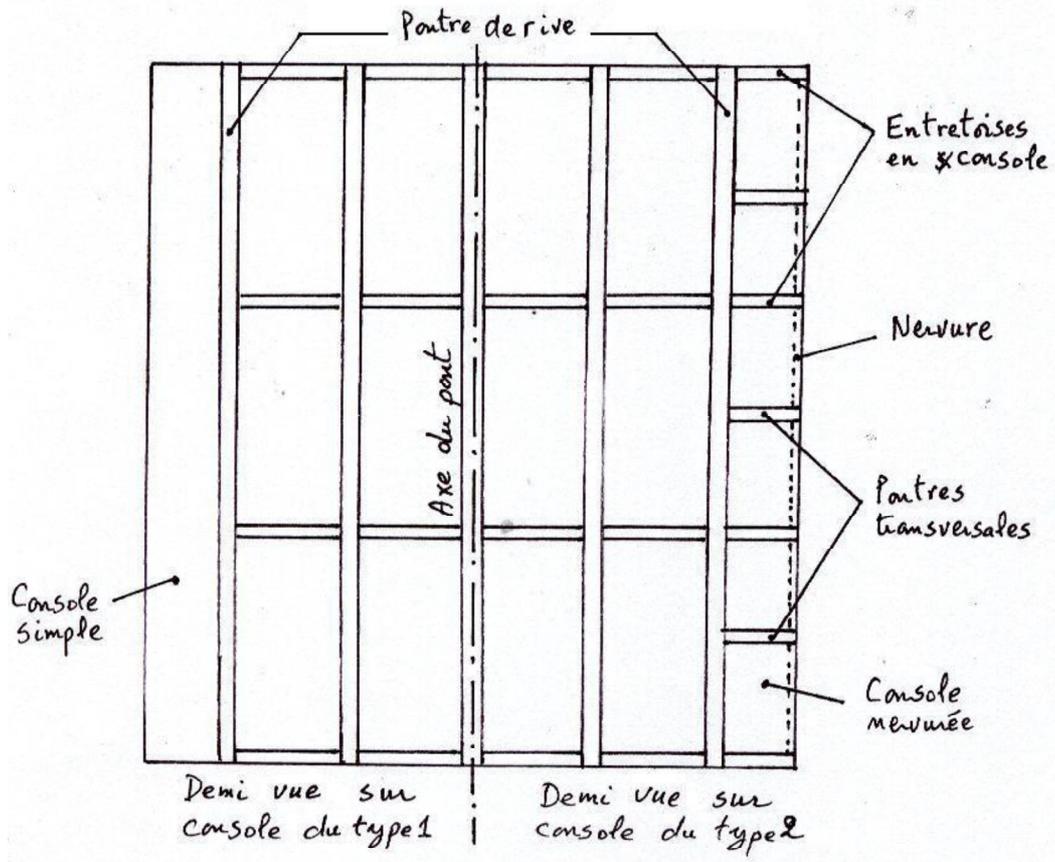


Fig. 64 Vue en plan des 2 types de l'hourdis de rive.

11-3-1 Charges permanente (G)

On étudie la console sur une bande de 1m de large. D'après la figure 66, le moment d'encastrement est

$$M_g = -G \cdot (l + f) - g \cdot l \cdot \left(\frac{l}{2} + f \right) - g \cdot \frac{(l + f)^2}{2} - g \cdot \frac{f^2}{2} \quad (68)$$

Où l_t est la largeur du trottoir.

f est la largeur de la partie de chaussée appartenant à la console. G_1 est le poids propre de 1 ml du garde corps.

g_t est le poids propre du trottoir sur une bande de 1 m de large.

g_h est le poids propre de l'hourdis sur une bande de 1 m de large.

g_r est le poids propre du revêtement sur une bande de 1 m de large.

L'effort tranchant à l'encastrement est donné par

$$T_g = -G_1 - g_t \cdot l_t - g_h \cdot (l_t + f) - g_r \cdot f \quad (69)$$

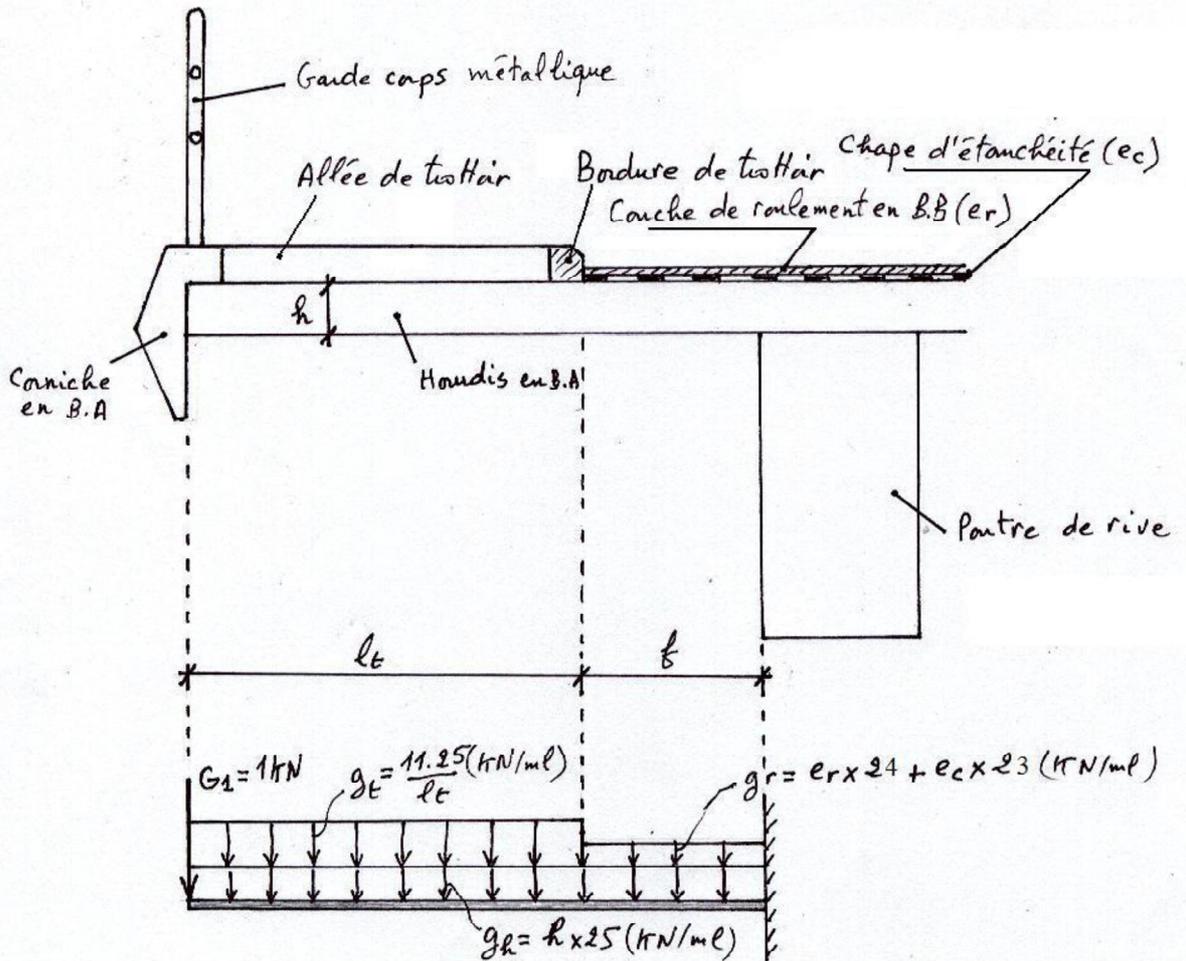


Fig. 65 Charges permanentes sur un hourdis de rive de 1 ml de large.

11-3-2 Charges d'exploitation (Q)

a- Surcharges locales du trottoir (St)

Puisqu'on travaille sur 1 ml de largeur de la console la surcharge locale du trottoir devient

$$S_t = 4.50 \text{ KN / ml} \quad (70)$$

Les effets de S_t peuvent être cumulés avec ceux des systèmes A, B et M pour le calcul de l'hourdis, longerons, entretoises, pièces de pont etc., mais non pour le calcul des poutres principales. D'après la figure 67, On a le moment d'encastrement

$$M_{s_t} = -S_t \cdot l_t \cdot \left(\frac{l_t}{2} + f \right) \quad (71)$$

Et l'effort tranchant à l'encastrement

$$T_{St} = -S_t \cdot l_t \quad (72)$$

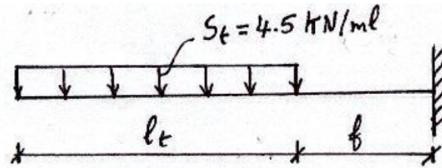


Fig. 66 Schéma statique de la charge St.

b- Roue isolée (r_t)

Dans les trottoirs franchissables qui ne sont pas protégés de la chaussée par une poutre maîtresse ou une barrière lourde, on peut utiliser comme charge de trottoir une roue isolée de poids égal à 60 kN et dont la surface d'impact est (0.25 x 0.25) m².

$$r_t = 60 \text{ kN} \quad (73)$$

Les effets de r_t ne sont pas cumulés avec ceux des systèmes A, B et M.

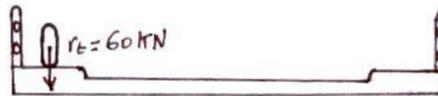


Fig. 67 La roue r_t actionnant sur l'allée de trottoir.

N.B : Les trottoirs équipés de bordures, glissières de sécurité ou barrières légères sont considérés comme franchissables.

D'après la figure 69, On a le moment d'encastrement maximal qui n'actionne pas forcément sur une bande de 1m de large, est donné en éloignant la roue r_t de l'encastrement ; elle sera accolée au garde corps.

$$M_{r_t}^{\max} = -r_t \cdot c_1 \quad (74)$$

Avec c₁ le bras de levier de la force r_t par rapport à l'encastrement

$$c_1 = l_t + f - \frac{0.25}{2} \quad (75)$$

L'effort tranchant maximal à l'encastrement

$$T_{r_t}^{\max} = -r_t \quad (76)$$

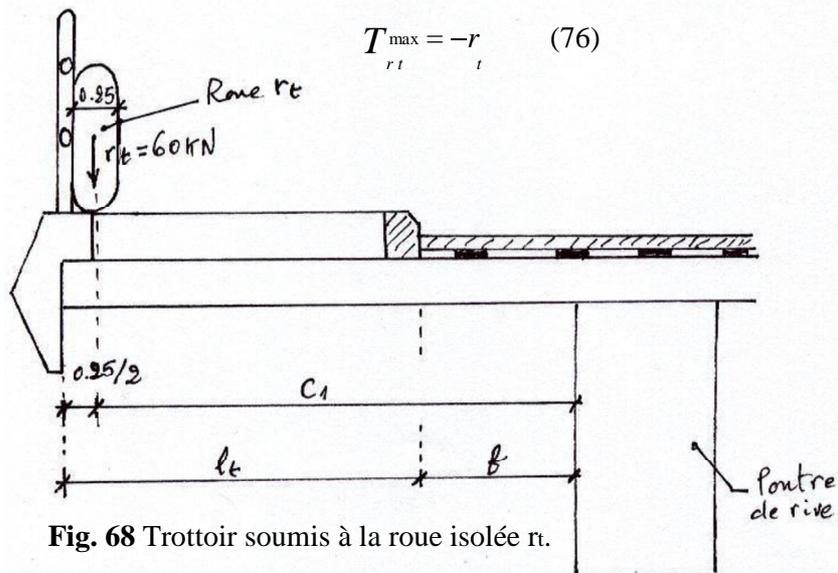


Fig. 68 Trottoir soumis à la roue isolée r_t.

Le moment fléchissant et l'effort tranchant maximaux sont répartis sur une bande de largeur d définie par la figure 69.

Le moment fléchissant et l'effort tranchant par mètre linéaire sont calculée par

$$M_{rt} = \frac{M_{rt}^{\max}}{d} \Rightarrow M_{rt} = \frac{-r \cdot c}{d} \quad (77)$$

$$T_{rt} = \frac{T_{rt}^{\max}}{d} \Rightarrow T_{rt} = \frac{-r}{d} \quad (78)$$

Où d est la largeur de diffusion qui d'après la figure 69 est

$$d = 2c_1 + v \quad (79)$$

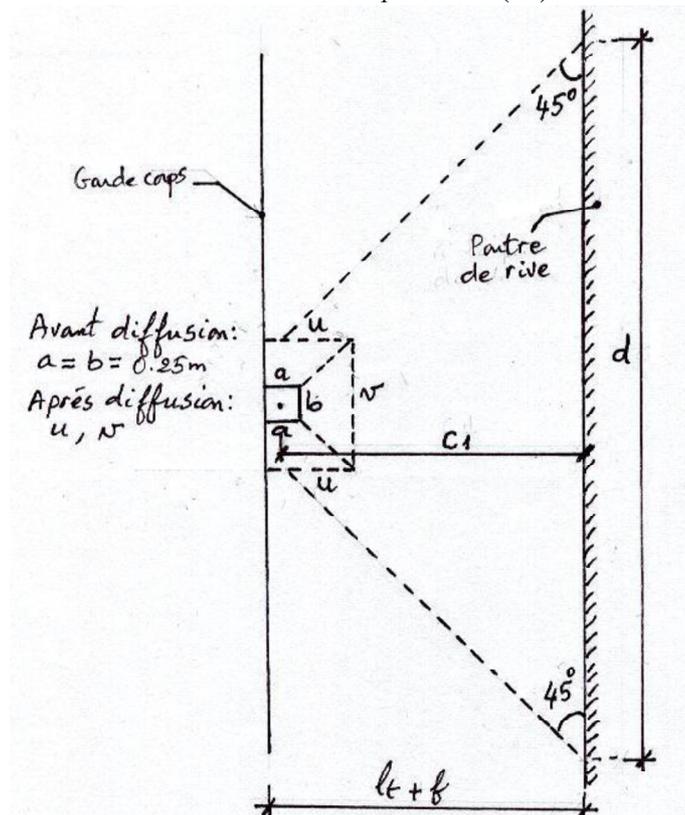


Fig. 69 Diffusion en plan de la charge de la roue isolée sur un panneau de rive.

b- Roue Bc

L'impact de roues Bc peut être appliqué sur la partie de la chaussée revenant à la console c'est-à-dire sur la largeur f . On peut considérer 2 cas possibles ; celui d'une seule roue ou 2 roues.

1^{er} Cas : 1 seule roue Bc

Après diffusion de la charge P d'une roue, la totalité de cette charge peut ne pas se trouver à gauche de l'encastrement de la poutre de rive, il ne va rester qu'une portion de charge notée P' qui peut être calculée selon la figure 70.

$$q = \frac{P}{u \cdot v} \quad (80)$$

$$P' = q \cdot c \cdot v \quad (81)$$

Où c la longueur de la zone d'influence se trouvant à gauche de l'encastrement. En remplaçant l'équation 77 dans 78, il vient

$$P' = \frac{P \cdot c}{u} \quad (82)$$

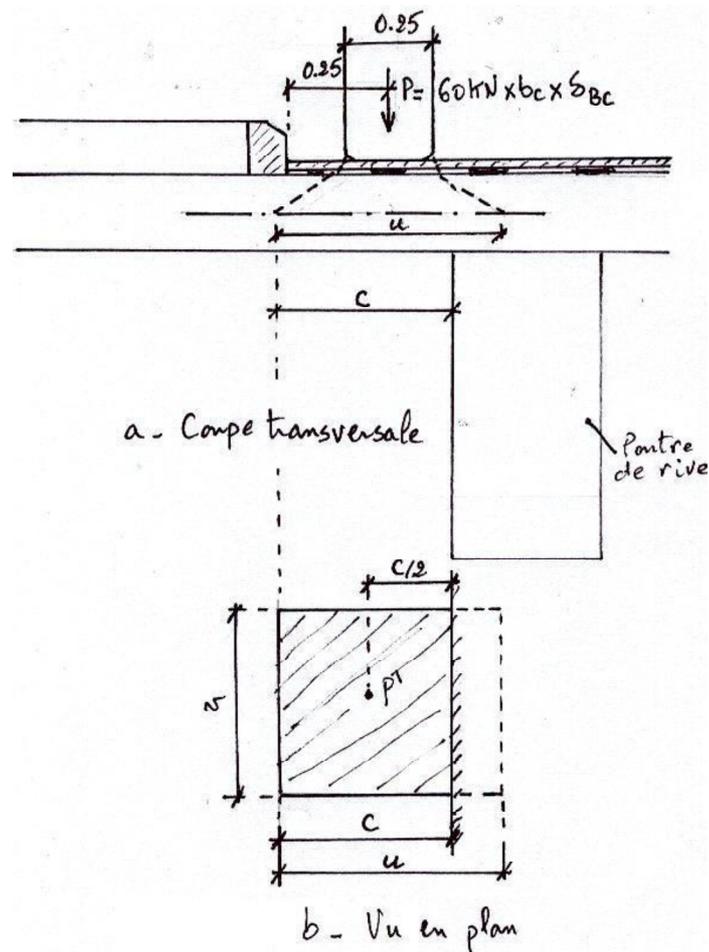


Fig. 70 Console chargée par une roue B_c .

Le moment fléchissant maximal d'encastrement sera

$$M_{Bc}^{\max} = -P' \cdot \frac{c}{2} \quad (83)$$

Ou bien

$$M_{Bc}^{\max} = -\frac{P c^2}{2 u} \quad (84)$$

Soit pour une bande de 1 ml de largeur

$$M_{Bc} = \frac{M_{Bc}^{\max}}{d} \quad (85)$$

Ou bien

$$M_{Bc} = -\frac{P c^2}{2 u d} \quad (86)$$

L'effort tranchant maximal d'encastrement est

$$T_{Bc}^{\max} = -P' \quad (87)$$

En remplaçant P' par son expression,

$$T_{Bc}^{\max} = -\frac{Pc}{u} \quad (88)$$

Pour une bande de 1 ml de largeur

$$T_{Bc} = \frac{T_{Bc}^{\max}}{d} \quad (89)$$

Soit

$$T_{Bc} = -\frac{Pc}{ud} \quad (90)$$

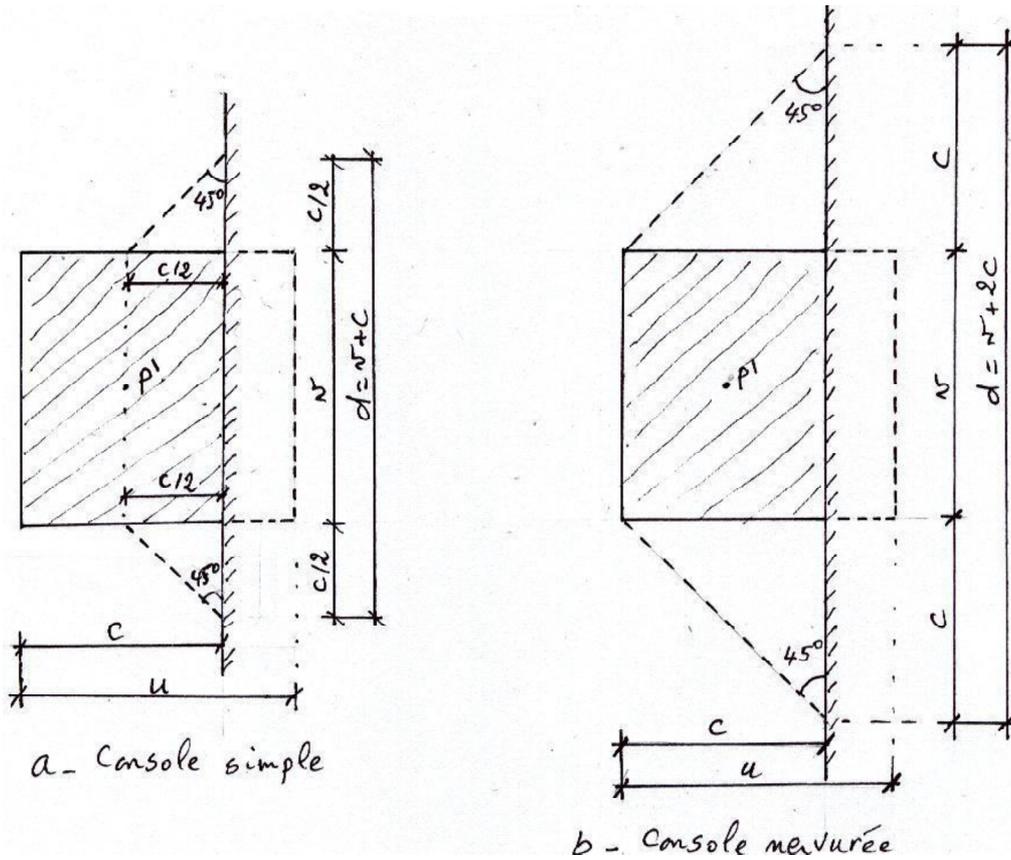


Fig. 71 Diffusion de charge d'une roue B_c .

2^e Cas : 2 roues B_c

Si les zones de diffusion des 2 roues arrière d'un camion B_c se chevauchent cela peut donner un cas contraignant à prendre en considération.

D'après la figure 72, pour qu'il y ait chevauchement on, il faut que : $v + c > 1.5 m$

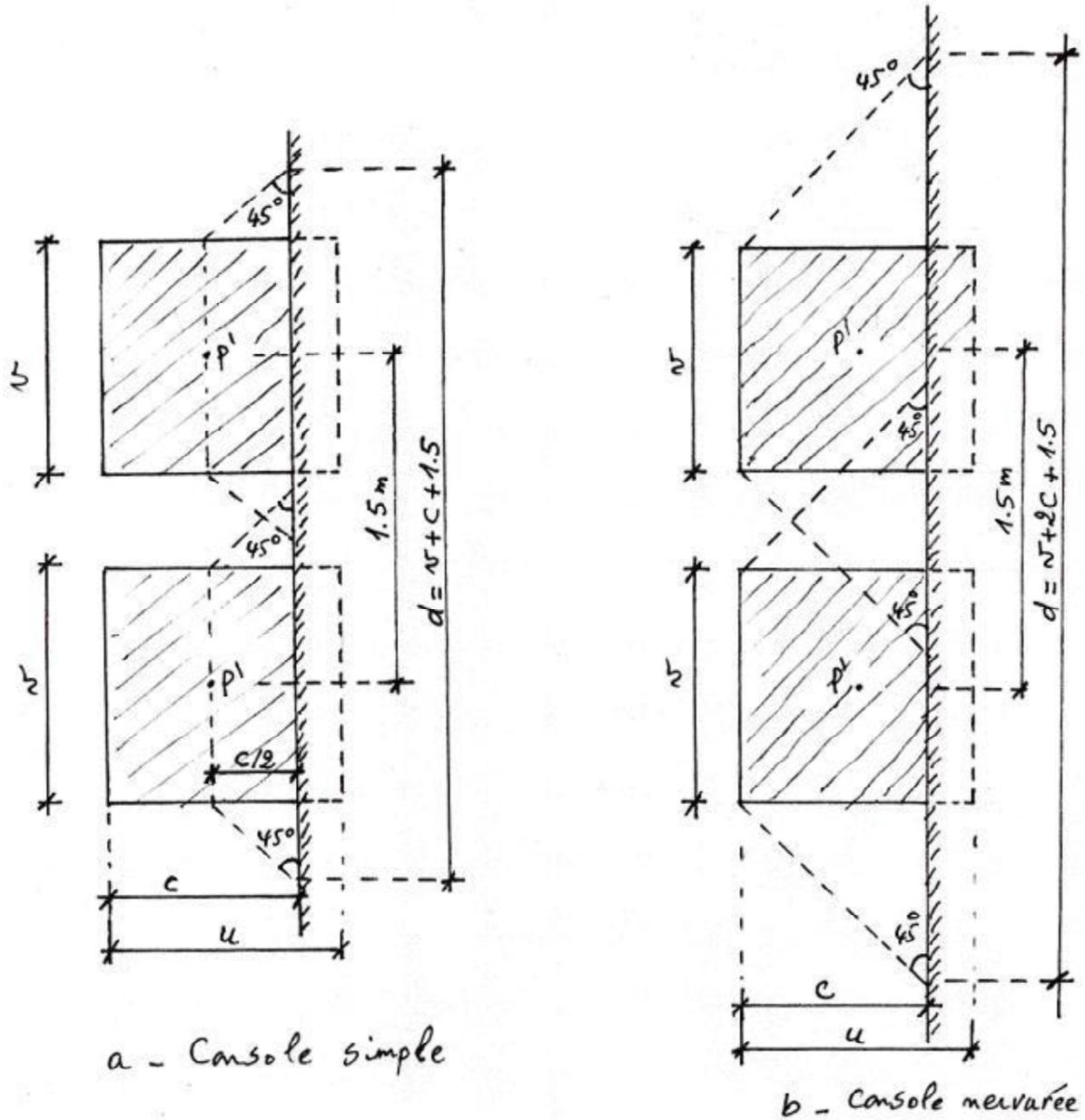
$$M_{Bc} = -\frac{2Pc^2}{2ud}$$

D'où

$$M_{Bc} = -\frac{Pc^2}{ud} \quad (91)$$

Et

$$T_{Bc} = - \frac{2 P c}{u d} \quad (92)$$



Condition de chevauchement :
 $v + c \geq 1.5 \text{ m}$

Condition de chevauchement :
 $v + 2c \geq 1.5 \text{ m}$

Fig. 72 Diffusion de charge de 2 roues B_c.

c- Roue B_t

Deux cas sont à considérer.

1^{er} Cas : 1 seule roue B_t

La diffusion se fait de la même manière que la roue B_c, sauf les dimensions changent.

$$M_{B_t} = -\frac{P c^2}{2 u d} \quad (93)$$

Et

$$T_{B_t} = -\frac{P c}{u d} \quad (94)$$

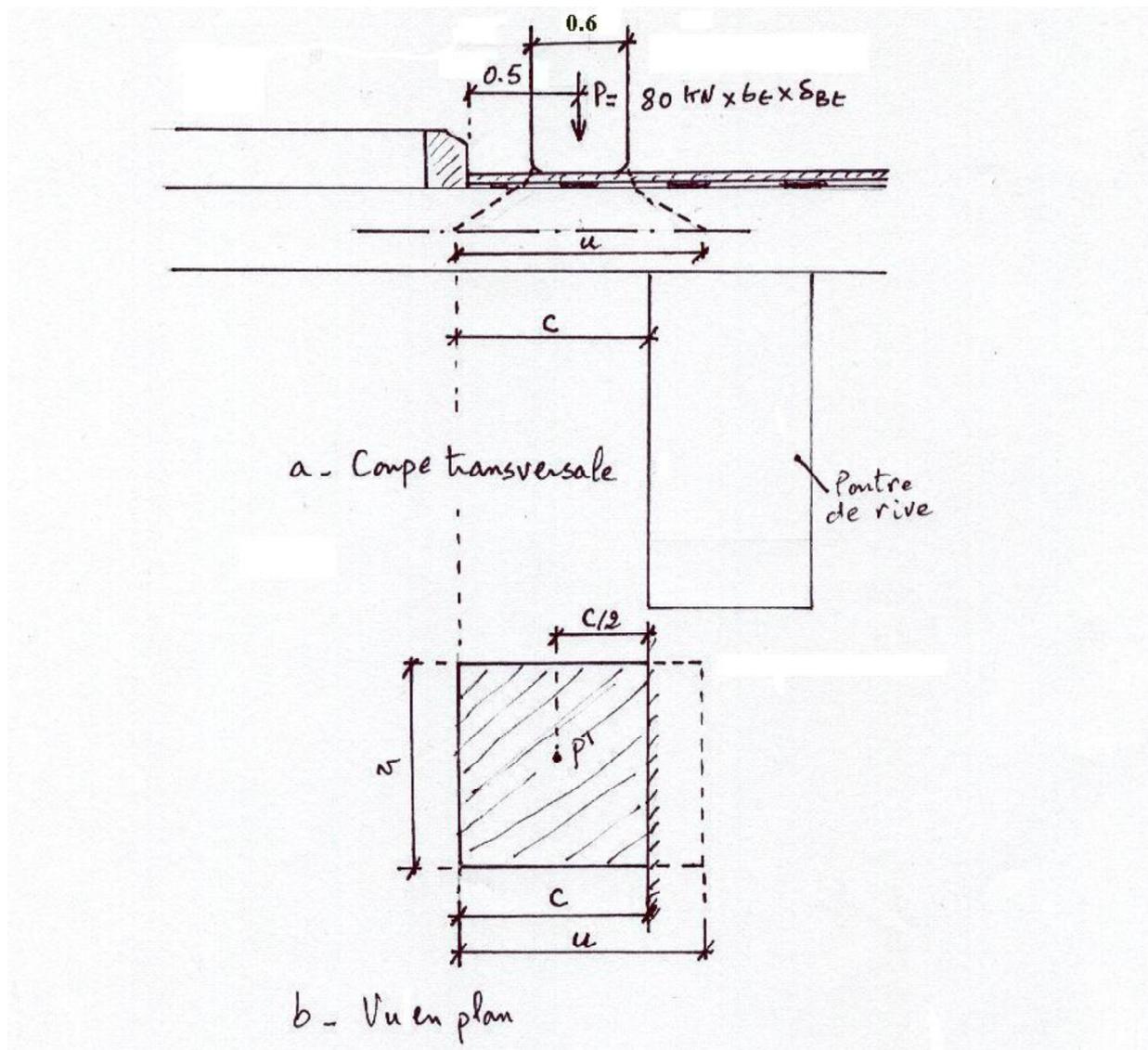


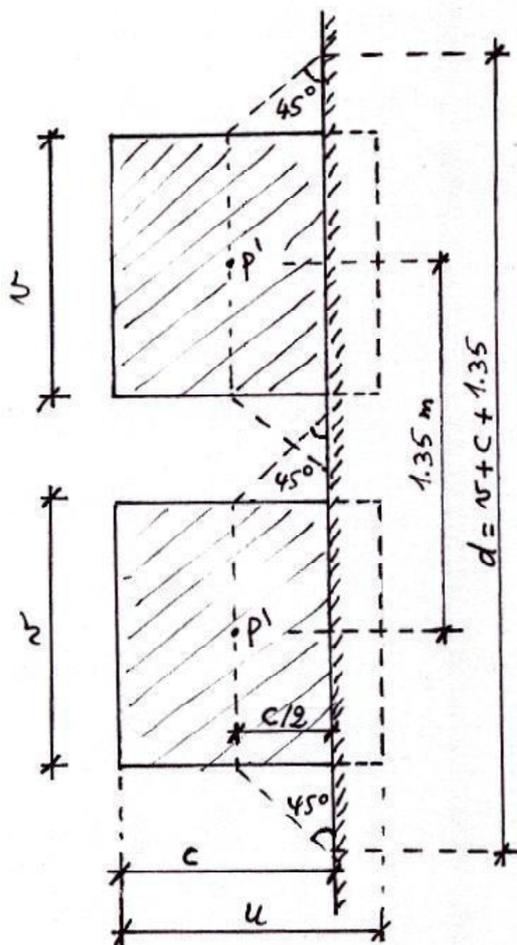
Fig. 73 Console chargée par une roue B_t.

2^e Cas : 2 roues Bt

$$M_{Bt} = -\frac{P c^2}{u d} \quad (95)$$

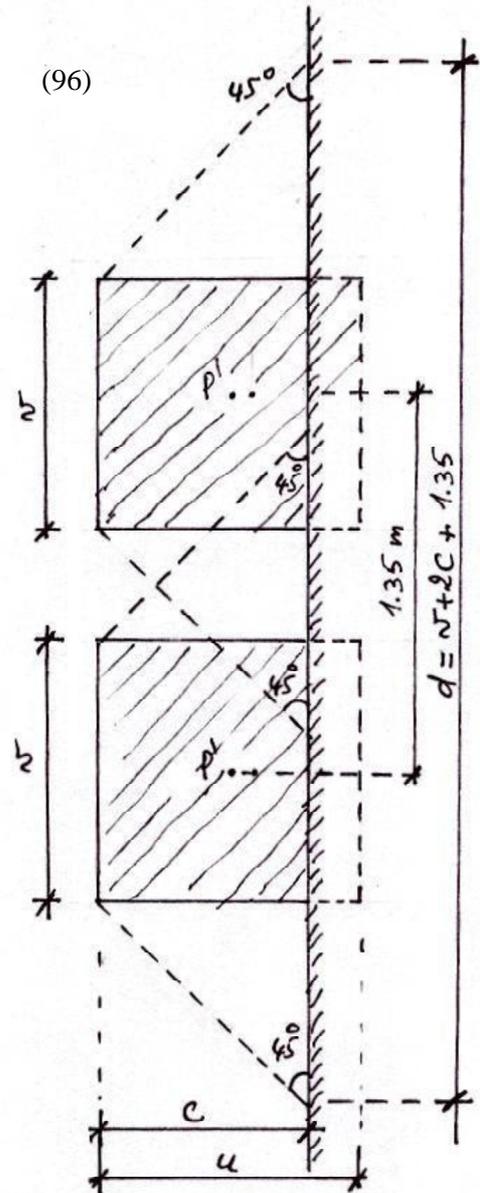
Et

$$T_{Bt} = -\frac{2 P c}{u d} \quad (96)$$



a - Console simple

Condition de chevauchement :
 $v + c \geq 1.35 \text{ m}$



b - Console nervurée

Condition de chevauchement :
 $v + 2c \geq 1.35 \text{ m}$

Fig. 74 Diffusion de charge de 2 roues Bt.

Conclusion

Pour le ferrailage de l'hourdis en console, on cherche le moment fléchissant maximal d'encastrement sur une bande de 1 ml de large.

$$\underline{\text{E.L.U}} : M_u = 1.35 M_G + 1.605 \times \max \left\{ \begin{array}{l} M_{St} \\ M_{rt} \\ \max(M_{Bc1}, M_{Bc2}) \\ \max(M_{Bt1}, M_{Bt2}) \end{array} \right.$$

$$\underline{\text{E.L.S}} : M_s = \left\{ \begin{array}{l} M_{rt} \\ 1.2 \times \left(\begin{array}{l} M_{Bc1}, M_{Bc2} \\ M_{Bt1}, M_{Bt2} \end{array} \right) \\ M_{St} \end{array} \right.$$

Exercice 6

Calculer le moment fléchissant et l'effort tranchant maximaux à l'encastrement pour 1 ml de largeur d'un hourdis de pont-route en console.

$b_c = 1.1$; $\delta_{Bc} = 1.20$.

$b_t = 1.0$; $\delta_{Bt} = 1.18$.

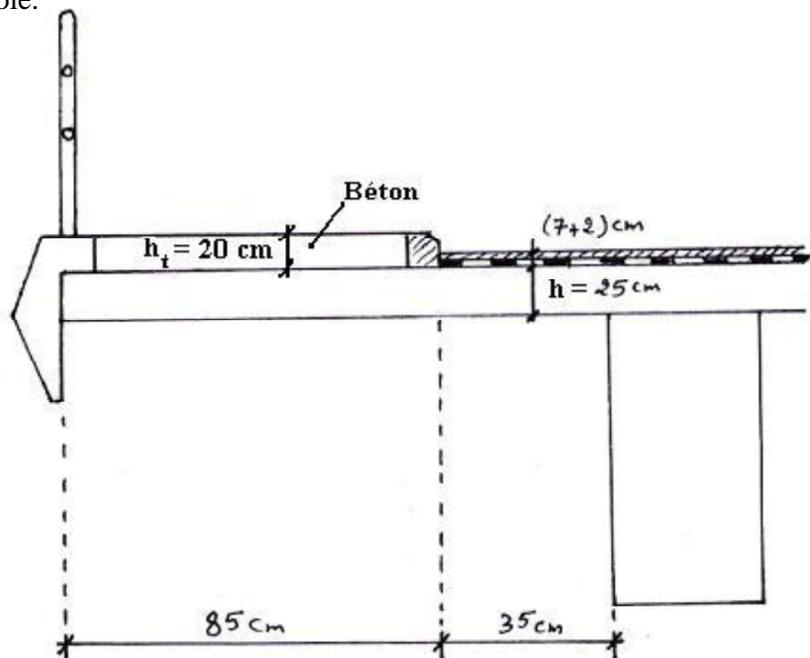


Fig. 75 Hourdis en console d'un pont-route.

Solution

1)- Charge permanente : (g)

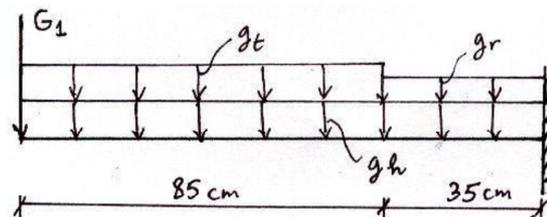
$g_h = 0.25 \times 25 = 6.25 \text{ KN / ml}$

$g_t = 11.25 / 0.85 = 13.235 \text{ KN / ml}$

$g_r = e_r \times 24 + e_c \times 23$

$g_r = 0.07 \times 24 + 0.02 \times 23 = 2.14 \text{ KN / ml}$

$G_1 = 1 \text{ KN}$



$$M_s = -G_1 \times (0.85 + 0.35) - g_t \times 0.85 \times \left(\frac{0.85 + 0.35}{2} \right) - g_h \times \frac{(0.85 + 0.35)^2}{2} - g_r \times \frac{(0.35)^2}{2}$$

$$M_g = -1 \times (0.85 + 0.35) - 13.235 \times 0.85 \times \left(\frac{0.85}{2} + 0.35 \right) - 6.25 \times \frac{(0.85 + 0.35)^2}{2} - 2.14 \times \frac{(0.35)^2}{2}$$

$$M_g = -16.088 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$T_g = -G_1 - g_t \times 0.85 - g_h \times (0.85 + 0.35) - g_r \times (0.35)$$

$$T_g = -1 - 13.235 \times 0.85 - 6.25 \times (0.85 + 0.35) - 2.14 \times (0.35) : \quad T_g = -20.499 \text{ KN} / \text{ml}$$

2)- Surcharges locales du trottoir : (S_t)

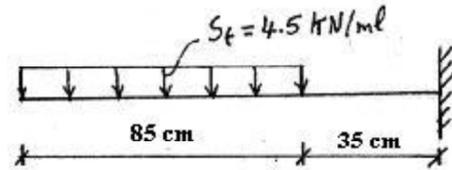
$$M_{S_t} = -S_t \times 0.85 \times \left(\frac{0.85}{2} + 0.35 \right)$$

$$M_{S_t} = -4.5 \times 0.85 \times \left(\frac{0.85}{2} + 0.35 \right)$$

$$M_{S_t} = -2.964 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$T_{S_t} = -S_t \times 0.85$$

$$T_{S_t} = -4.5 \times 0.85 \Rightarrow T_{S_t} = -3.825 \text{ KN} / \text{ml}$$



3)- Surcharges due à la roue isolée du trottoir : (r_t)

$$a = b = 0.25 \text{ m}$$

$$u = a + h_t + h / 2$$

$$u = 0.25 + 0.2 + 0.125 \Rightarrow u = 0.575 \text{ m}$$

$$v = b + 2 h_t + h$$

$$v = 0.25 + 2 \times 0.2 + 0.25 \Rightarrow v = 0.90 \text{ m}$$

$$M_{r_t}^{\max} = -r \cdot c$$

$$M_{r_t}^{\max} = -60 \times 1.075 \Rightarrow M_{r_t}^{\max} = -64.5 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$d = 2 c_1 + v$$

$$d = 2 \times 1.075 + 0.9 \Rightarrow d = 3.05 \text{ m}$$

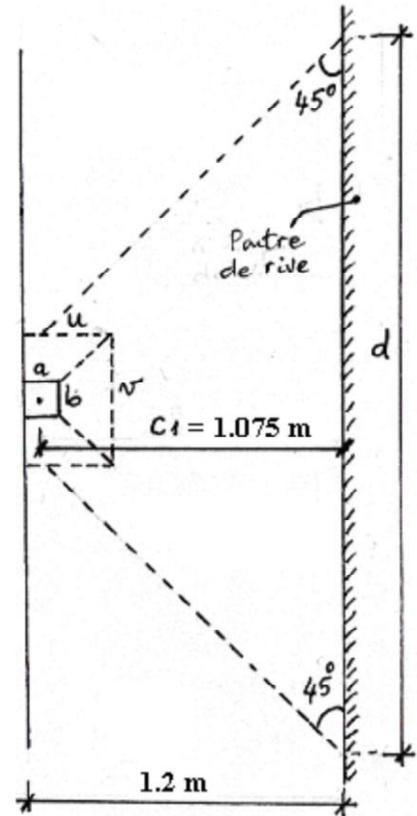
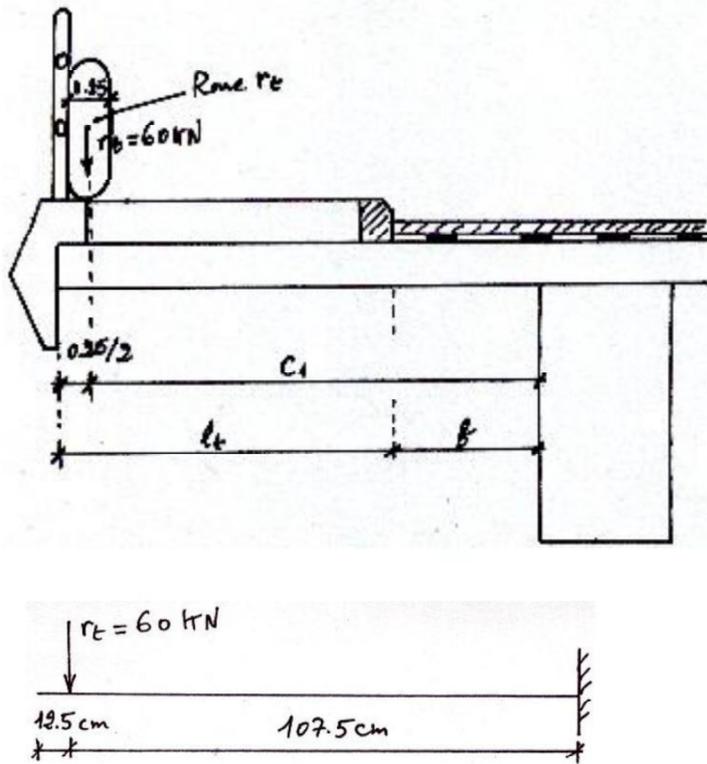
$$M_{r_t} = \frac{M_{r_t}^{\max}}{d}$$

$$M_{r_t} = \frac{-64.5}{3.05} \Rightarrow M_{r_t} = -21.148 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}$$

$$T_{r_t}^{\max} = -r \Rightarrow T_{r_t}^{\max} = -60 \text{ KN}$$

$$T_{r_t} = \frac{T_{r_t}^{\max}}{d}$$

$$T_{r_t} = \frac{-60}{3.05} \Rightarrow T_{r_t} = -19.672 \text{ KN} / \text{ml}$$



4)- Surcharges due à une roue B_c : (B_{c1})

$$a = b = 0.25 \text{ m}$$

$$u = a + 1.5 h_r + h$$

$$u = 0.25 + 1.5 \times 0.09 + 0.25 \Rightarrow u = 0.635 \text{ m} \quad v =$$

$$u \Rightarrow v = 0.635 \text{ m}$$

$x_p = 0.35 - 0.25 = 0.1 \text{ m}$; $x_p < u \Rightarrow$ débordement de la charge de la roue à droite de l'encastrement.

$$c = x_p + u / 2 \Rightarrow c = 0.1 + 0.635 / 2 = 0.4175 \text{ m} .$$

$v + c = 1.0525 \text{ m} < 1.5 \text{ m} \Rightarrow$ Il n'y a pas de chevauchement entre les 2 roues B_c.

Donc 1 seule roue est plus défavorable que 2 roues.

$$d = v + c = \Rightarrow \boxed{d = 1.0525 \text{ m}}$$

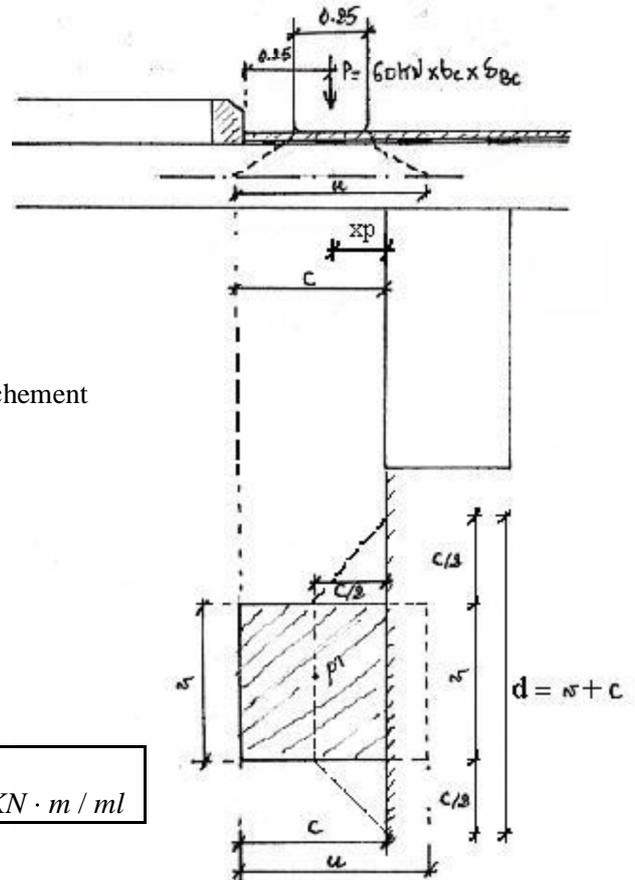
$$P = 60 \times \delta_{B_c} \times b_c$$

$$P = 60 \times 1.20 \times 1.1 \Rightarrow \boxed{P = 79.2 \text{ KN}}$$

$$M_{B_c} = -\frac{P c^2}{2 u d}$$

$$M_{B_c} = -\frac{79.2 \times (0.4175)^2}{2 \times 0.635 \times 1.0525} \Rightarrow \boxed{M_{B_c} = -10.328 \text{ KN} \cdot \text{m} / \text{ml}}$$

$$T_{B_c} = -\frac{P c}{u d}$$



$$T_{Bc} = -\frac{79.2 \times 0.4175}{0.635 \times 1.0525} \Rightarrow T_{Bc} = -49.475 \text{ KN/ml} : c = f - 0.25 + \frac{u}{2}$$

4)- Surcharges due à une roue B_t : (B_{t1})

$a = 0.6 \text{ m}$ et $b = 0.25 \text{ m}$

$$u = a + 1.5 h_r + h : u = 0.6 + 1.5 \times 0.09 + 0.25 \Rightarrow u = 0.985 \text{ m}$$

$$v = 0.25 + 1.5 \times 0.09 + 0.25 \Rightarrow v = 0.635 \text{ m}$$

$$x_p = 0.35 - 0.5 = -0.15 \text{ m} < 0 \Rightarrow P \text{ se trouve à droite de l'encastrement.}$$

$$c = x_p + u/2 \Rightarrow c = -0.15 + 0.985/2 = 0.3425 \text{ m.}$$

$v + c = 0.9775 \text{ m} < 1.35 \text{ m} \Rightarrow$ Il n'y a pas de chevauchement entre les 2 roues B_t .

Donc 1 seule roue est plus défavorable que 2 roues.

$$d = v + c \Rightarrow d = 0.9775 \text{ m}$$

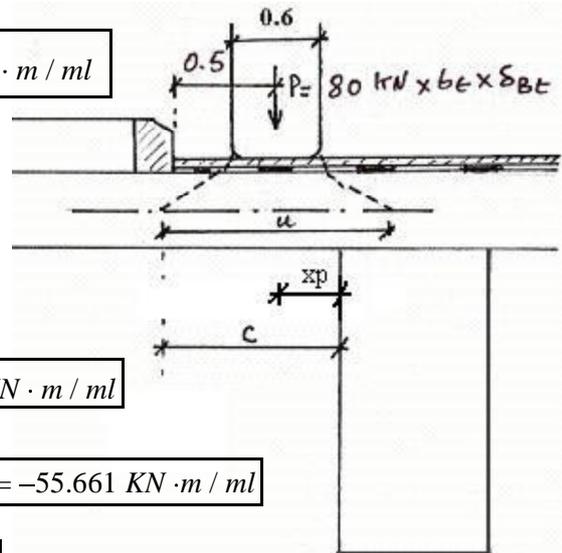
$$P = 80 \times \delta_{Bt} \times b_t : P = 80 \times 1.18 \times 1.0 \Rightarrow P = 94.4 \text{ KN}$$

$$M_{Bt} = -\frac{P c^2}{2 u d} : c = f - 0.5 + \frac{u}{2}$$

$$M_{Bt} = -\frac{94.4 \times (0.3425)^2}{2 \times 0.985 \times 0.9775} \Rightarrow M_{Bt} = -5.751 \text{ KN} \cdot \text{m/ml}$$

$$T_{Bt} = -\frac{P c}{u d}$$

$$T_{Bt} = -\frac{94.4 \times 0.3425}{0.985 \times 0.9775} \Rightarrow T_{Bt} = -33.580 \text{ KN/ml}$$



$$M_u^{\max} = \text{Sup}(M_{St}, M_{rt}, M_{Bc}, M_{Bt}) = M_{rt} = -21.148 \text{ KN} \cdot \text{m/ml}$$

$$M_u = 1.35 M_g + 1.605 M_{rt}$$

$$M_u = 1.35 \times (-16.088) + 1.605 \times (-21.148) \Rightarrow M_u = -55.661 \text{ KN} \cdot \text{m/ml}$$

$$T_u^{\max} = \text{Sup}(T_{St}, T_{rt}, T_{Bc}, T_{Bt}) = T_{Bc} = -49.475 \text{ KN/ml}$$

$$T_u = 1.35 T_g + 1.605 T_{Bc}$$

$$T_u = 1.35 \times (-20.499) + 1.605 \times (-49.475) \Rightarrow T_u = -107.081 \text{ KN/ml}$$

12 CONCLUSION

Le béton reste le matériau le plus utilisé dans les ponts vu les avantages et les qualités qu'il représente. Son principal inconvénient est son poids propre considérable, mais le constructeur essaie toujours de contourner cet handicap en utilisant la précontrainte et en usant de nouvelles méthodes de construction qui permettent de réaliser des ouvrages ayant des portées de plus en plus grande.