

1 05

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL



PROJET DE FIN D'ETUDES  
Tome 1

SUJET

PONT MIXTE

Proposé par :

SAPTA

Etudié par :

N.E. NEBBACHE  
H. CHENITI

Dirigé par :

M. KORDJANI



PROMOTION : JAN 85

# DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

المدرسة الوطنية  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## 1/ Generalités:

Le projet mis au point en mars 1984 par le bureau d'études techniques de la société algérienne des ponts et travaux d'art (SAPTA) portait donc sur un ouvrage en béton précontraint long de près de 430m, large de 20m et à 6 travées inégales de longueur moyenne de 29m reposant sur un sol mou qui se caractérise par une contrainte de 0,7 bar

En outre, le biais des axes d'appui par rapport à l'axe longitudinal de l'ouvrage est de 78,856° qui n'est prononcé. Ce qui nous a permis d'étudier l'ouvrage en droit.

## 2/ Tablier:

### a/ Structures

Le tablier est essentiellement constitué de 31 poutres en béton précontraint qui allourdissent la structure. La première solution qu'on a apportée est de remplacer les poutres précontraintes par 5 poutres métalliques de hauteur constante en élévation, disposées sous la chaussée avec un écartement de 3,6m d'entre axe et reliées en tête par une dalle en béton armé formant couverture et épousant le profil en travers de la chaussée.

### b/ Couverture:

Le platelage est constitué par une dalle en béton armé d'épaisseur constante égale à 20cm et connectée à la structure métallique à l'aide de connecteurs de type goujons pour participer à la flexion d'ensemble.

### c/ Poutres Principales

Les poutres principales sont des profils reconstitués par soudure en forme de I isostatiques

#### d/ Encorbellement:

Les encorbellements sont symétriques par rapport à l'axe longitudinal de la chaussée et supportent une largeur de chaussée de 2,3 m

#### e/ Entretoises:

On a deux types d'entretoises: Entretoises d'about (sur Pile et Pile Culée) et entretoises intermédiaires.

Les entretoises intermédiaires au nombre de 5 sont formées par une triangulation à l'aide de cornières. Elles sont placées entre les poutres principales afin de solidariser le contour métallique et assurer son indéformabilité.

Les entretoises d'about sont à âme pleine. Elles permettent en outre, par verinage entre les poutres principales, un remplacement éventuel des appareils d'appuis en cours d'exploitation.

#### f/ Trottoirs:

Chaque trottoir comporte des bordures <sup>en béton</sup> et des garde-corps en métal. L'espace intermédiaire étant comblé par des dalles amovibles reposant sur des supports en béton.

#### g/ Revêtement:

Le revêtement de la chaussée est réalisé par une couche de bitume de 7cm d'épaisseur

#### Protection anticorrosion:

Toutes les surfaces de la charpente sont protégées contre la corrosion au moyen de couches de peinture

#### 3/ Appuis:

Les piles et les culées sont en béton armé avec des fondations profondes.

On a remplacé la culée par une pile culée afin de minimiser les efforts sur les pieux.

a/ Piles:

La pile est constituée par un chevron rectangulaire reposant sur 2 fûts évidés en béton armé qui sont encastrés dans une semelle de repartition reposant sur des pieux verticaux.

Initialement, il a été prévu 10 pieux par semelle. De ce fait, vu que l'on a allégé l'ouvrage, on a prévu une semelle de 8 pieux.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MATERIAUX

## 1 BETON

Le béton utilisé est dosé à  $400 \text{ daN/m}^3$  de CPA 325 avec contrôle strict

$$\sigma'_{25} = 300 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}'_b = 180 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}'_{b_0} = 90 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}_b = 7,5 \text{ bar}$$

## 2 ACIERS

L'acier utilisé est à haute adhérence de nuance FE 40

| $\phi$ mm | $\sigma_{en}$ ( $\text{kg/cm}^2$ ) | $\bar{\sigma}_a$ ( $\text{kg/cm}^2$ ) |
|-----------|------------------------------------|---------------------------------------|
| $\leq 20$ | 4200                               | 2800                                  |
| $> 20$    | 4000                               | 2667                                  |

$$\bar{\sigma}_a = \min \left\{ \frac{2}{3} \sigma_{en}; \max(\sigma_1, \sigma_2) \right\}$$

$$\sigma_1 = k \frac{\eta}{\phi} \frac{\bar{w}_f}{1 + 10 \bar{w}_f} ; \quad \sigma_2 = 2,4 \sqrt{k \frac{\eta}{\phi} \bar{\sigma}_s}$$

## 3 CHARPENTE

L'acier utilisé est de nuance FE 24 :  $\sigma_{en} = 2400 \text{ bar}$

Le boulonnage est à haute résistance et à serrage contrôlé.

La contrainte nominale des boulons utilisés (type HR 10/9) est :  $\sigma_0 = 88 \text{ daN/mm}^2$

Remarque :  $1 \text{ bar} = 1 \text{ kg/cm}^2$

## SYSTEME DE SURCHARGES

Les surcharges prises en compte dans les différentes étapes de calcul sont conformes aux règles CPC: cahier de prescription communes algérien.

### Type de surcharges:

#### A / Surcharges civiles:

A1 - Système de surcharge A

A2 - Système de surcharge B :  $B_c, B_t, B_n$

A3 - Système de surcharge sur les trottoirs: générale, locale, route isolée

A4 - Système de surcharges exceptionnel D

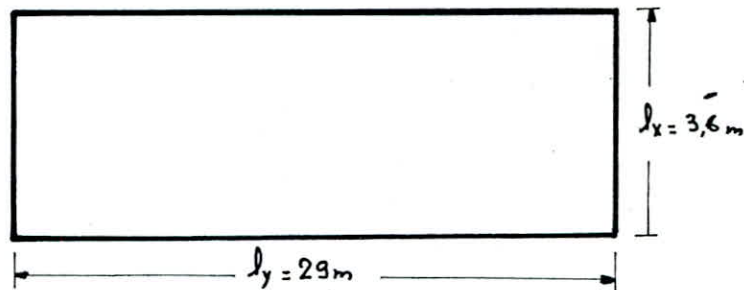
#### B / Surcharges militaires:

Système de surcharge  $M_{c120}$  (le plus prépondérant)

C'est un élément de répartition de charges et participe à la flexion d'ensemble mais dans la justification du panneau de dalle, on peut faire abstraction de son rôle de table de compression de poutre (art 39.2 CCBA68)

## Coffrage:

Notre panneau de dalle repose sur les entretoises d'about et non pas sur les entretoises intermédiaires donc on a un élément rectangulaire de dimension  $l_x \times l_y$  ( $l_x < l_y$ )



Épaisseur de la dalle :  $h_0 = 20 \text{ cm}$  (en béton armé)

Épaisseur du revêtement :  $e = 7 \text{ cm}$

## Détermination de L:

$$L = \min [\max (l_r, l), L']$$

$l_r$  : largeur non labile  $l_r = 14,4 \text{ m}$

$l$  : distance entre axe des poutres principales et rive  $l = 14,4 \text{ m}$

$L'$  : portée des poutres principales  $L' = 29 \text{ m}$

$$L = \min [\max (14,4 ; 14,4) , 29] = 14,4 \text{ m}$$

### Détermination du poids propre du platelage:

- Dalle en béton armé :  $0,2 \times 18,733 \times 2,5 = 9,3665 \text{ KdaN/ml}$
- Goussets :  $5 \times \frac{0,6+0,5}{2} \times 0,05 \times 2,5 = 0,3475 \text{ KdaN/ml}$
- Revêtement chaussée :  $0,07 \times 14,4 \times 2,5 = 2,2176 \text{ KdaN/ml}$
- Corniches :  $2 \times \left(\frac{0,25+0,1}{2}\right) (0,4+0,1) \times 2,5 = 0,438 \text{ KdaN/ml}$
- Baletts :  $2 \times [(0,05 \times 0,73325) \times 2] \times 2,5 = 0,366625 \text{ KdaN/ml}$
- Appuis des baletts :  $2 [2(0,1 \times 0,3) + (0,15 \times 0,2)] \times 2,5 = 0,75 \text{ KdaN/ml}$
- Revêtement trottoir :  $2 \times 0,05 \times 1,9165 \times 2,2 = 0,42163 \text{ KdaN/ml}$
- Garde corps : =  $0,1 \text{ KdaN/ml}$
- Bordures de trottoirs :  $2 \times 0,25 \times 0,3 \times 2,5 = 0,375 \text{ KdaN/ml}$

---


$$\Sigma = 14,379 \text{ KdaN/ml}$$

$$\text{donc } P = 14,379 \times 14,4 = 207,06 \text{ KdaN}$$

### Détermination des surcharges maximales:

Les surcharges maximales doivent être prises dans la surface  $S = L \times L = (14,4)^2 = 207,36 \text{ m}^2$

#### Surcharge $B_c$ :

$$L = 14,4 \text{ m}$$

$$N = \left[\frac{L}{3}\right] = \left[\frac{14,4}{3}\right] = 4 \quad N = 4 \text{ voies} \rightarrow b_c = 0,8$$

On ne peut disposer sur la distance  $L = 14,4 \text{ m}$  que 54 KdaN par voie

$$\text{Soit } 4 \times 54 = 216 \text{ KdaN sur } N = 4 \text{ voies}$$

$$\text{donc } S = b_c \cdot 216 = 0,8 \times 216 = 172,8 \text{ KdaN}$$

#### Surcharge $B_t$ :

On ne peut disposer que 2 tandems :

$$\text{donc } S = b_t \times B_t = 1 \times 64 = 64 \text{ KdaN}$$

#### Surcharge militaire Mc120:

On ne peut disposer que d'un seul char  $\rightarrow S = 110 \text{ KdaN}$



### Calcul du Coefficient de majoration dynamique:

Ce coefficient  $\delta$  tient compte de la rapidité de l'application des surcharges mobiles qui ne s'épandent pas parfaitement sur la chaussée (irrégularités de surface et qui risquent de produire un effet dynamique : chocs). Ces phénomènes sont pris en compte en multipliant les surcharges par un coefficient  $\delta > 1$

Ce coefficient de majoration dynamique  $\delta$  est défini comme suit:

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2L} + \frac{0,6}{1 + 4 \frac{P}{S}}$$

### Surcharge $B_c$ :

$$P = 207,06 \text{ kdaN} ; S = 172,8 \text{ kdaN} ; L = 14,4 \text{ m}$$

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \cdot 14,4} + \frac{0,6}{1 + 4 \cdot \frac{207,06}{172,8}} = 1,207$$

### Surcharge $B_t$ :

$$P = 207,06 \text{ kdaN} ; S = 64 \text{ kdaN} ; L = 14,4 \text{ m}$$

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \cdot 14,4} + \frac{0,6}{1 + 4 \cdot \frac{207,06}{64}} = 1,146$$

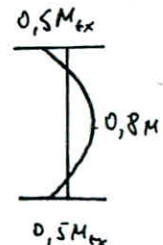
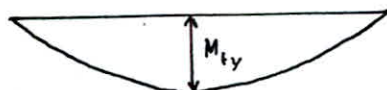
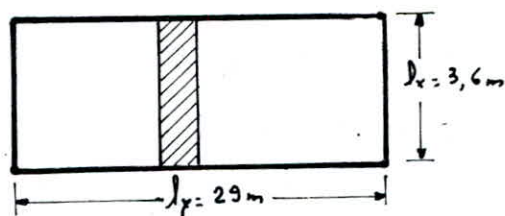
$$\rightarrow \delta_{\max B} = 1,207$$

### Surcharge MC120:

$$P = 207,06 \text{ kdaN} ; S = 110 \text{ kdaN} ; L = 14,4 \text{ m}$$

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2 \cdot 14,4} + \frac{0,6}{1 + 4 \cdot \frac{207,06}{110}} = 1,173$$

### Calcul des sollicitations:



$$\beta = \frac{l_x}{l_y} = \frac{3,6}{29} = 0,12413 < 0,4$$

La dalle travaille dans le sens de la petite portée. Elle se comporte comme une poutre appuyée sur 2 côtés.

### Evaluation des moments flechissants:

\* Charges permanentes (Abaques de PIGEAUD) ( $\gamma = 0,15$  B.A)

Dalle en béton armé :  $0,2 \times 2,5 = 0,5 \text{ kdaN/m}^2$

Revetement chaussée :  $0,07 \times 2,2 = 0,154 \text{ kdaN/m}^2$

---


$$\sigma = 0,654 \text{ kdaN/m}^2$$

$$P = \sigma \cdot l_x \cdot l_y = 0,654 \times 3,6 \times 29 = 68,2776 \text{ kdaN}$$

$$\beta_1 = 0,12413 \rightarrow M_1 = 0,016$$

$$\beta_2 = \frac{1}{\beta_1} = 8,056 \rightarrow M_2 = 0,003$$

$$M_x = (M_1 + \gamma M_2) P = (0,016 + 0,15 \cdot 0,003) 68,2776 = 1,1232 \text{ m kdaN/ml}$$

$$M_y = (M_2 + \gamma M_1) P = (0,003 + 0,15 \cdot 0,016) 68,2776 = 0,2294 \text{ m kdaN/ml}$$

### Moments dus aux différentes surcharges (CPC + Bulletin n°1 de SETRA)

Les abaquages de la SETRA nous donnent les valeurs des moments les plus défavorables non pondérés et non majorés en fonction des données géométriques de la dalle :  $a = 3,6 \text{ m}$  ;  $b = 29 \text{ m}$  ;  $E = \frac{3}{4} e + \frac{h_0}{2} = \frac{3}{4} \cdot 7 + 10 = 15,25 \text{ cm}$

On procédera par interpolation pour la détermination des moments.

exemple : système  $B_c$  : Sens longitudinal

$$E = 0,14 \rightarrow M_{b1} = 2140 \text{ mdaN/ml}$$

$$E = 0,1525 \rightarrow M'_b = \frac{M_{b1} \Delta E_2 + M_{b2} \Delta E_1}{\Delta E_1 + \Delta E_2} = 2129,6 \text{ mdaN/ml}$$

$$E = 0,2 \rightarrow M_{b2} = 2090 \text{ mdaN/ml}$$

$$\text{avec } \Delta E_1 = 0,1525 - 0,14 = 0,0125 \quad ; \quad \Delta E_2 = 0,2 - 0,1525$$

$$\text{d'où } M_b = 1,2 \cdot b_f \cdot S \cdot M'_b = 1,2 \cdot 1 \cdot 1,207 \cdot 2129,6 = 3084,5 \text{ mdaN/ml}$$

(art 7.5 CCBA 68)

Résultat des moments dus aux différentes surcharges  $\rightarrow$  voir tableau

## Moments transversaux $M_a$

| Moment Système | Moment absolu $\frac{m \cdot \text{kgm}}{m}$ | coeff. de majoration | coeff. de pondération $\frac{b_c}{b_e}$ | $\delta$ | M maj pond (en $\frac{\text{daN}}{m}$ ) |
|----------------|--|----------------------|---|----------|---|
| Bc             | 3781,9                                       | 1,2                  | 0,8                                     | 1,207    | 4382,2                                  |
| Bt             | 4220   | 1,2                  | 1                                       | 1,207    | 6122,2                                  |
| Br             | 2247,5                                       | 1,2                  |   | 1,207    | 3255,3                                  |
| Mc120          | 5430   | 1,2                  |   | 1,173    | 7643,3                                  |

## Moments Longitudinaux $M_b$

| Moment Système | Moment absolu $\frac{m \cdot \text{kgm}}{m}$ | coeff. de majoration | coeff. de pondération | $\delta$ | M maj pond (en $\frac{\text{daN}}{m}$ ) |
|----------------|--|----------------------|-----------------------|----------|---|
| Bc             | 2090,1                                       | 1,2                  | 1                     | 1,207    | 2421,8                                  |
| Bt             | 2129,6                                       | 1,2                  |                       | 1,207    | 3084,5                                  |
| Br             | 1722,5                                       | 1,2                  |                       | 1,207    | 2495                                    |

## Moments de continuité $M_{cp}$ $A = \frac{1}{2} \cdot \text{largeur semelle sup} = 30 \text{ cm}$

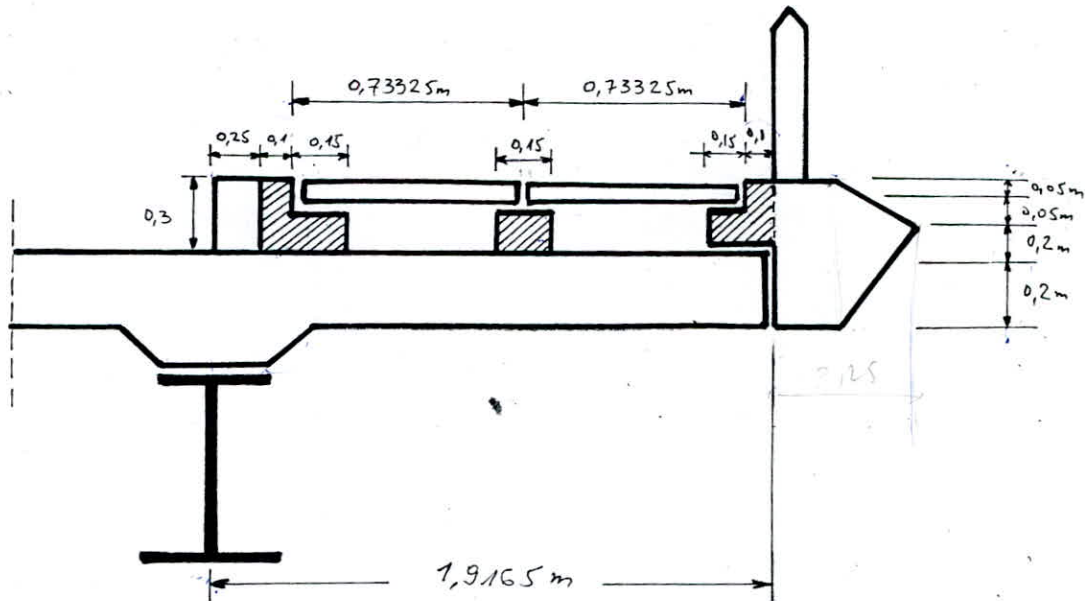
| Moment Système | Moment absolu $\frac{m \cdot \text{kgm}}{m}$ | coeff. de majoration | coeff. de pondération | $\delta$ | M maj. pond (en $\frac{\text{daN}}{m}$ ) |
|----------------|--|----------------------|-----------------------|----------|--|
| Bc             | 4400   | 1,2                  | 0,8                   | 1,207    | 5098,4                                   |
| Bt             | 3975,8                                       | 1,2                  | 1                     | 1,207    | 5758,6                                   |
| Mc120          | 5323,3                                       | 1,2                  |                       | 1,173    | 7493                                     |

## Dalle en encorbellement:

La dalle repose sur les membrures supérieures des poutres principales.

Elle supporte :

- Son poids propre
- Les surcharges  $\left\{ \begin{array}{l} \text{une surcharge uniforme de } 450 \text{ daN/m}^2 \\ \text{une roue isolée de } 6 \text{ kdaN} \end{array} \right.$



Poids propre du trottoir /ml :

|                       |  |                                |
|-----------------------|--|--------------------------------|
| - dalle               | : $0,2 \times 1,9165 \times 2500$  | = 958,25 daN/ml                |
| - dalles              | : $2 \times 0,05 \times 0,73325 \times 2500$   | = 183,3 daN/ml                 |
| - Corniche            | : $\left[ \frac{0,25+0,1}{2} \times 0,4 + \frac{0,25+0,1}{2} \times 0,1 \right] \times 2500$ | = 219 daN/ml                   |
| - Garde corp          | :  | = 50 daN/ml                    |
| - Appui des dalles    | : $\left[ 2 \times (0,1 \times 0,3 + 0,15 \times 0,2) + 0,15 \times 0,2 \right] \times 2500$ | = 375 daN/ml                   |
| - Bordure de trottoir | : $0,25 \times 0,3 \times 2500$  | = 187,5 daN/ml                 |
| - Revêtement trottoir | : $0,05 \times 1,9165 \times 2200$   | = 210,815 daN/ml               |
|                       |  | <hr/>                          |
|                       |  | $\Sigma = 2184 \text{ daN/ml}$ |

La charge par  $m^2$  est donc :

$$q = \frac{2184}{1,9165} = 1139,6 \text{ daN/m}^2$$

Calcul des sollicitations :

\* Charge permanente :

$$M_{PP} = - q \cdot \frac{l^2}{2} \quad (\text{console})$$

$$M_{PP} = - 1139,6 \cdot \frac{1,9165^2}{2} = - 2092,8 \text{ mdaN/ml}$$

$$T_{PP} = ql = 1139,6 \cdot 1,9165 = 2184 \text{ daN/ml}$$

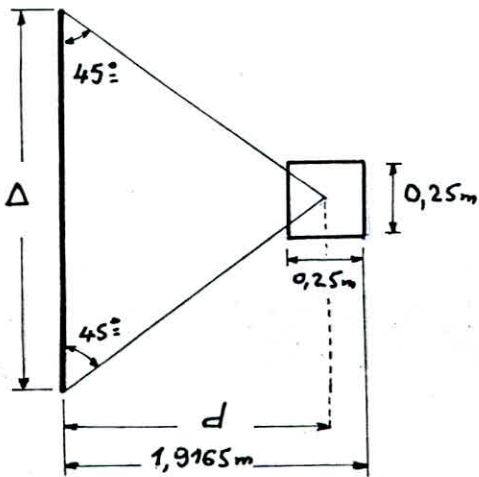
\* Surcharge uniforme de 450 daN/m<sup>2</sup>:

$$M = -q \cdot \frac{l^2}{2} = -1,2 \cdot 450 \cdot \frac{1,9165^2}{2} = -991,7 \text{ m daN/ml}$$

$$T = ql = 1,2 \cdot 450 \cdot 1,9165 = 1034,9 \text{ daN/ml}$$

\* Roue isolée de 6 kdaN:

Les bulletins de la SETRA proposent une répartition de 45° sous l'effet de la charge localisée. Pour avoir l'effet le plus défavorable, cette roue doit être appliquée à l'extrémité du trottoir (cas d'une console chargée à son extrémité libre)



$$d = 1,9165 - \frac{0,25}{2} = 1,7915 \text{ m}$$

$$\Delta = 2d = 3,583 \text{ m}$$

$$M = - \frac{1,2 \cdot 6 \cdot 1,7915}{3,583} = -3,6 \text{ m KdaN/ml}$$

$$T = \frac{1,2 \cdot 6}{3,583} = 2,01 \text{ KdaN/ml}$$

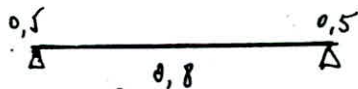
Repartition des moments:

A/ Moments transversaux:

a/ En encorbellement:

$$M = M_{pp} + M_{roue\ isolée} = -(2092,8 + 3600) = -5692,8 \text{ m daN/ml}$$

b/ En travée:  $M_{xt}$  (art 39.42 CCBA 68)



On doit vérifier:  $M_t + \frac{M_e + M_w}{2} \geq 1,15 M_0$  (art 55,31 CCBA 68)

$$0,8 + \frac{0,5 + 0,5}{2} = 1,3 > 1,15 \text{ vérifié}$$

$$M > 0 \quad M_{xt} = 0,8 (M_{pp} + M_{cro}) = 0,8 (1123,2 + 7643,3) = 7013,2 \text{ m daN/ml}$$

c/ Sur appui  $M_{xa}$

$$M < 0 \quad M_{xa} = -0,5 (M_{pp} + M_{cro}) = -0,5 (1123,2 + 7643,3) = -4383,3 \text{ m KdaN/ml}$$

d/ Sur appui intermédiaire:

$$M_{xai} = -(0,5M_{pp} + M_{c20}(\text{continuité})) = -(0,5 \cdot 1123,2 + 7493) = -8054,6 \text{ mdaN/ml}$$

Donc pour les appuis on retiendra  $M_{appui} = -8054,6 \text{ mdaN/ml}$

B/ Moments longitudinaux:

a/ En travée:

$$M_{yt} = 0,8(M_{pp} + M_{ot}) = 0,8(229,4 + 3084,5) = 2651,2 \text{ mdaN/ml}$$

b/ Sur appui:

$$M_{ay} = M_{ax} = -8054,6 \text{ mdaN/ml} \quad (\text{art 39.42. CCBA68})$$

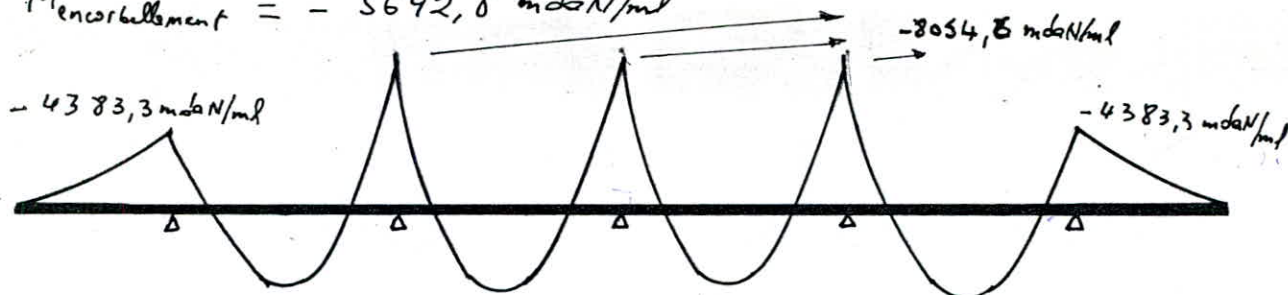
Vérifications particulières: (Art 27.13. CCBA68)

$$M_{yt} > \frac{1}{3} M_{xt} \quad \text{soit} \quad 2651,2 > \frac{1}{3} \cdot 7013,2 = 2337,8 \text{ mdaN/ml}$$

Recapitulation:

$$M_{xt} = 7013,2 \text{ mdaN/ml}; \quad M_{yt} = 2651,2 \text{ mdaN/ml}; \quad M_{ax} = M_{ay} = -8054,6 \text{ mdaN/ml}$$

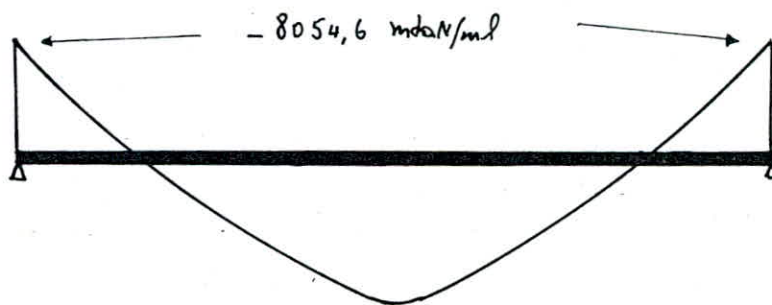
$$M_{encorbellement} = -5692,8 \text{ mdaN/ml}$$



transversalement

$$7013,2 \text{ mdaN/ml}$$

longitudinalement



$$-8054,6 \text{ mdaN/ml}$$

$$2651,2 \text{ mdaN/ml}$$

## Ferraillage avec le système Me120:

### Détermination des armatures

Le diamètre des barres utilisées est au plus égal à  $\frac{h_0}{10} = \frac{200}{10} = 20 \text{ mm}$  (art 29.14 CCBA68)

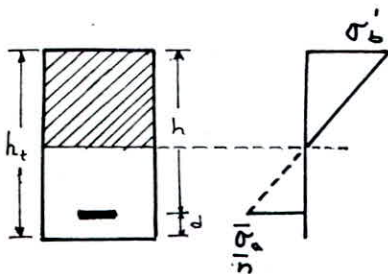
$$h_x = h_0 - e - \frac{\phi}{2} = 20 - 2 - \frac{1,6}{2} = 17,2 \text{ cm} \quad e : \text{enrobage}$$

$$h_y = h_x - \phi = 17,2 - 1,6 = 15,6 \text{ cm} \quad (\text{art } 29.14. \text{ CCBA68})$$

### Exposé de la méthode:

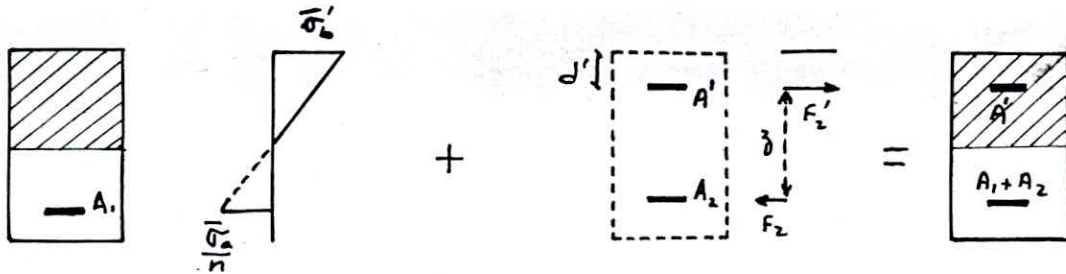
Elle est basée sur la notion du moment résistant du béton  $M_{rb}$

1/  $M_{ex} < M_{rb}$  ( $A' = 0$ )



$$A = \frac{M_{ex}}{\gamma \bar{\sigma}_a} = \frac{M_{ex}}{\gamma h \bar{\sigma}_a}$$

2/  $M_{ex} > M_{rb}$  ( $A' \neq 0$ )



$$A = A_1 + A_2 = \frac{M_{rb}}{\gamma h \bar{\sigma}_a} + \frac{\Delta M}{(h-d') \bar{\sigma}_a} \quad \text{avec } \Delta M = M_{ex} - M_{rb}$$

$$A' = \frac{\Delta M}{(h-d') \bar{\sigma}_a'} \quad \text{avec } \bar{\sigma}_a' = n \bar{\sigma}_b' \left( \frac{\alpha h - d'}{\alpha h} \right)$$

$$\text{avec : } M_{rb} = K b h^2 \quad ; \quad K = \frac{1}{2} \bar{\sigma}_b' \alpha \bar{\gamma} \quad ; \quad \alpha = \frac{n \bar{\sigma}_b'}{n \bar{\sigma}_b' + \bar{\sigma}_a} \quad ; \quad \bar{\gamma} = 1 - \frac{\alpha}{3}$$

### Vérification des contraintes:

Posons :  $\theta = \frac{M_{max}}{I}$

$$\bar{\sigma}_b' = \theta y_1$$

$$\bar{\sigma}_a' = n \theta (y_1 - d')$$

$$\bar{\sigma}_a = n \theta (h - y_1)$$

Contraintes admissibles

$$\bar{\sigma}_b' = 180 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}_a = 2800 \text{ bar}$$

exemple:

Armatures longitudinales en travée

$$M_{ex} = M_{tx} = 7013,2 \text{ m daN/ml}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{15 \cdot 180}{15 \cdot 180 + 2800} = 0,491 \longrightarrow \bar{\gamma} = 1 - \frac{\bar{\alpha}}{3} = 0,83636$$

$$\bar{K} = \frac{1}{2} \times 0,491 \times 0,83636 \times 180 = 36,95$$

$$M_{rb} = 36,95 \cdot 1 \cdot (17,2)^2 = 10678,55 \text{ m daN/ml}$$

$$M_{rb} > M_{ex} \longrightarrow \Delta M = 0 \quad (A' = 0)$$

$$K = \frac{M_{ex}}{b h^2} = \frac{7013,2}{100 \cdot (17,2)^2} = 23,7 \xrightarrow{\text{abaque}} \sigma'_b = 135$$

$$\alpha = \frac{n \sigma'_b}{n \sigma'_b + \bar{\sigma}_c} = \frac{15 \cdot 135}{15 \cdot 135 + 2800} = 0,42 \longrightarrow \gamma = 0,86$$

$$A = \frac{7013,2}{0,86 \cdot 17,2 \cdot 2800} = 16,93 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$\text{on adopte } 3 \text{ HA } 16 = 18,09 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Position de l'axe neutre:

Equation du moment statique:

$$\frac{b y_1^2}{2} + n A' (y_1 - d') - n A (h - y_1) = 0 \quad (A' = 0)$$

$$y_1^2 + \frac{2n}{b} A y_1 - \frac{2n}{b} A h = 0$$

$$y_1^2 + 5,427 y_1 - 0,3 \cdot 18,09 \cdot 17,2 = 0 \longrightarrow y_1 = 7,32 \text{ cm}$$

Moment d'inertie:

$$I = \frac{b y_1^3}{12} + n A' (y_1 - d')^2 + n A (h - y_1)^2 \quad (A' = 0)$$

$$I = \frac{100 \cdot (7,32)^3}{12} + 15 \cdot 18,09 (17,2 - 7,32)^2 = 39561,8 \text{ cm}^4$$



### Tableau de ferrailage

| Section et armature                    | $M_{ex}$<br>molan/ml | $M_{yB}$<br>molan/ml | K     | $\alpha$ | $\delta$ | $h_a$<br>(mm) | $A_{min}$<br>cm <sup>2</sup> | Achois: |
|--|----------------------|----------------------|-------|----------|----------|---------------|------------------------------|---------|
| Section entravée<br>$A_{tx}$           | 7013,2               | 10678,5              | 23,70 | 0,4215   | 0,86     | 17,2          | 16,93                        | 9HA16   |
| Section sur appui<br>$A_{ax} = A_{ay}$ | 8054,6               | 10678,5              | 27,22 | 0,432    | 0,856    | 17,2          | 19,54                        | 10HA16  |
| Section encorbellement<br>$A_e$        | 5692,8               | 10678,5              | 19,24 | 0,38     | 0,87     | 17,2          | 13,58                        | 7HA16   |
| Section entravée<br>$A_{ty}$           | 2651,2               | 10678,5              | 10,9  | 0,30     | 0,90     | 15,6          | 6,74                         | 4HA16   |

Espacement: (art 57.33 CCBA68)

Cas de Charges Concentrées:

$$\text{sens X: } e_{max} = \min(2h_t, 22\text{cm}) = \min(40\text{cm}, 22\text{cm}) = 22\text{cm}$$

$$\text{sens Y: } e_{max} = \min(3h_t, 33\text{cm}) = \min(60\text{cm}, 33\text{cm}) = 33\text{cm}$$

Verification des Contraintes:

| section                 | $A_{chois}$<br>cm <sup>2</sup> /ml | espacement<br>$e$<br>(cm) | $y_1$ (cm) | $I$ (cm <sup>4</sup> ) | $\sigma'_b$ (bar) | $\sigma_a$ (bar) |
|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|------------|------------------------|-------------------|------------------|
| $A_{tx}$                | 18,06                              | 11                        | 7,32       | 39561,8                | 129,76            | 2627             |
| $A_{ax} = A_{ay}$       | 20,17                              | 10                        | 7,61       | 42515,3                | 144,17            | 2725             |
| encorbellement<br>$A_e$ | 14,07                              | 14                        | 6,67       | 33292,8                | 114               | 2700,8           |
| $A_{ty}$                | 8,04                               | 25                        | 5,04       | 17716                  | 75,5              | 2370,5           |

$$(\sigma'_b)_i < \bar{\sigma}'_b \quad ; \quad (\sigma_a)_i < \bar{\sigma}_a = 2800 \text{ bar}$$

donc les contraintes sont vérifiées.

Verification de la fleche: (art 61.22. CCBA68)

On se dispense de cette verification si les 2 conditions suivantes sont satisfaites:

$$1/ \quad \frac{h_0}{l_x} > \frac{1}{20} \frac{M_t}{M_x} \Leftrightarrow \frac{20}{360} = 0,055 > \frac{1}{20} \cdot \frac{0,8 \cdot M_x}{M_x} = 0,04 \quad \text{OK}$$

$$2/ \quad \bar{w}_s = \frac{A}{bh} < \frac{20}{\sigma_{ten}} \Leftrightarrow \frac{18,09}{100 \cdot 17,2} = 0,0105 < \frac{20}{4200} = 0,004 \quad \text{Non vérifiée}$$

La 2<sup>ème</sup> condition n'étant pas réalisée, on doit donc vérifier la flèche en utilisant le même procédé que pour les poutres.

$$\Delta f_t = f_{g_{\infty}} + f_{q_0} - f_{g_0}$$

$f_{g_{\infty}}$  : flèche due à la déformation instantanée et différée sous l'effet des charges permanentes.

$f_{q_0}$  : flèche instantanée sous l'effet de l'ensemble des surcharges.

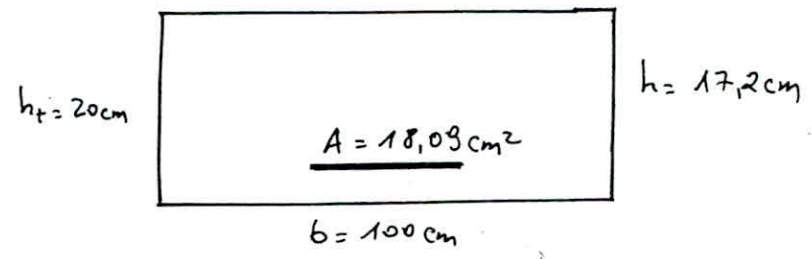
$f_{g_0}$  : flèche instantanée sous l'effet des charges permanentes seules.

$$M_q = 0,8(1123,2 + 6369,4) = 5994 \text{ m daN/ml}$$

$$M_g = 0,8 \cdot 1123,2 = 898,5 \text{ m daN/ml}$$

Inertie totale:

On suppose que la section est non fissurée (stage de service : la dalle est collaboration)



$$J_t = J_{g_{\infty}} + J_{q_0} - J_{g_0}$$

$$J_{g_{\infty}} = \frac{bh^3}{3} = 100 \cdot \frac{20^3}{3} = 266666,67 \text{ cm}^4$$

$$J_{q_0} = nAh^2 = 15 \cdot 18,09 \cdot 17,2^2 = 80276,19 \text{ cm}^4$$

$$J_{g_0} = S \cdot z \quad \text{avec } S: \text{moment statique}$$

$$z = \frac{S}{A(\Delta)} \quad \text{avec } A(\Delta) = \text{section d'acier et de béton.}$$

$$A(\Delta) = bh_0 + nA = 100 \times 20 + 15 \cdot 18,09 = 2271,4 \text{ cm}^2$$

$$S = A(\Delta) \frac{h_0}{2} + nAh = 2271,4 \times \frac{20}{2} + 15 \cdot 18,09 \cdot 17,2 = 27381,2 \text{ cm}^3$$

$$z = \frac{S}{A(\Delta)} = \frac{27381,2}{2271,4} = 12,05 \text{ cm}$$

$$J_{g_0} = S \cdot z = 27381,2 \times 12,05 = 329943,46 \text{ cm}^4$$

$$J_t = J_{g_{\infty}} + J_{g_0} - J_{g_0}$$

$$J_t = 266666,67 + 80276,19 - 329943,46 = 16999,4 \text{ cm}^4$$

Valeurs de  $\lambda$  et  $\mu$  :

$$\bar{w} = \frac{A}{bh} = \frac{18,09}{100 \times 17,2} = 0,0105174$$

a/ Pour les charges de faible durée d'application :

$$\lambda_i = \frac{\bar{\sigma}_b}{72(2+3\frac{b_0}{b})\bar{w}} = \frac{7,5}{72(2+3)0,0105174} = 1,9808$$

b/ Pour les charges de longue durée d'application :

$$\lambda_v = \frac{\lambda_i}{2,5} = \frac{1,9808}{2,5} = 0,7923$$

c/ Pour la charge  $q$ , la contrainte dans les aciers tendus est :

$$\sigma_a = \frac{M_q}{\gamma h A} = \frac{5994 \cdot 10^2}{0,86 \cdot 17,2 \cdot 18,09} = 2240 \text{ bar}$$

$$\mu = 1 - \frac{5\bar{\sigma}_b}{4\bar{w}\sigma_a + 3\bar{\sigma}_b} = 1 - \frac{5 \cdot 7,5}{4 \cdot 0,0105174 \cdot 2240 + 3 \cdot 7,5} = 0,678$$

d/ Pour la charge  $g$ , la contrainte dans les aciers tendus est :

$$\sigma_a = \frac{M_g}{\gamma h A} = \frac{898,5 \cdot 10^2}{0,86 \cdot 17,2 \cdot 18,06} = 335,78 \text{ bar}$$

$$\mu = 1 - \frac{5\bar{\sigma}_b}{4\bar{w}\sigma_a + 3\bar{\sigma}_b} = 1 - \frac{5 \cdot 7,5}{4 \cdot 0,0105174 \cdot 335,78 + 3 \cdot 7,5} = -0,0238 \rightarrow 0$$

Module de deformation longitudinal (art 9.6 CCBA68)

$$E_v = 7000 \sqrt{1,2 \sigma_{2,8}} = 7000 \sqrt{1,2 \cdot 300} = 132815,66 \text{ daN/cm}^2$$

$$E_i = 3 E_v = 398447 \text{ daN/cm}^2$$

a/ Calcul de  $f_{g_{\infty}}$  :

$$I_{f_v} = \frac{I_t}{1 + \lambda_v \mu} = \frac{16999,4}{1 + 0,7923 \cdot 0} = 16999,4 \text{ cm}^4$$

$$f_{g_{\infty}} = \frac{M_g l^2}{10 E_v I_{f_v}} = \frac{898,5 \cdot 10^2 \cdot 360^2}{10 \cdot 132815,66 \cdot 16999,4} = 0,5157 \text{ cm}$$

b/ Calcul de  $f_{g_0}$ :

$$I_{f_i} = \frac{I_c}{1 + \lambda_i \mu} = \frac{16999,4}{1 + 1,9808 \cdot 0,678} = 7255,45 \text{ cm}^4$$

$$f_{g_0} = \frac{M_g l^2}{10 E_i I_{f_i}} = \frac{5994 \cdot 10^2 \cdot \overline{360}^2}{10 \cdot 398447 \cdot 7255,45} = 2,687 \text{ cm}$$

La flèche totale est donc:

$$\Delta f_c = f_{g_{\infty}} + f_{g_0} - f_{g_0} = 0,5157 + 2,687 - 0,1719 = 3,031 \text{ cm}$$

Condition de non fragilité (art 52.2 CCBA68)

Il faut vérifier les 2 conditions suivantes:

$$* \frac{A_x}{b h_x} \geq \frac{\psi_4}{2} (2 - \rho) \frac{\overline{\sigma}_b}{\overline{\sigma}_a} \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^2 \quad \forall \rho$$

$$* \frac{A_y}{b h_y} \geq 0,35 \psi_4 \frac{\overline{\sigma}_b}{\overline{\sigma}_a} \left( \frac{h_0}{h_y} \right)^2 \quad \text{pour } \rho \leq 0,4$$

$A_x$  et  $A_y$  sont les sections d'armatures tendues disposées suivant les directions  $l_x$  et  $l_y$

$$\rho = \frac{l_x}{l_y} = \frac{3,6}{29} = 0,124 < 0,4$$

$$\overline{\sigma}_b : \text{Contrainte de traction du béton} \quad \overline{\sigma}_b = 7,5 \text{ bar}$$

$$\overline{\sigma}_a : \text{Contrainte de traction de l'acier} \quad \overline{\sigma}_a = 2800 \text{ bar}$$

$h_0$ : hauteur totale de la dalle

$$\psi_4 : \text{Coefficient relatif à l'acier ecroui} \quad \psi_4 = 0,54$$

$$\frac{A_x}{b h_x} = \frac{A_x}{100 \cdot 17,2} \geq \frac{0,54}{2} (2 - 0,124) \cdot \frac{7,5}{2800} \left( \frac{20}{17,2} \right)^2$$

$$\Rightarrow A_x \geq 3,155 \text{ cm}^2/\text{ml} \quad \text{O.K.}$$

$$\frac{A_y}{100 \cdot 15,6} \geq 0,35 \cdot 0,54 \cdot \frac{7,5}{2800} \left( \frac{20}{15,6} \right)^2 \Rightarrow A_y \geq 1,29 \text{ cm}^2/\text{ml} \quad \text{O.K.}$$

## Verification de la fissuration (art 49.22 CCBA68)

$$\sigma_1 = \frac{K \eta}{\phi} \frac{\bar{w}_f}{1 + 10 \bar{w}_f}$$

$$\sigma_2 = 2,4 \sqrt{\frac{\pi}{\phi} K \bar{\sigma}_b}$$

$\phi$ : diametre nominal en mm de la plus grande barre tendue

$\eta$ : Coefficient de fissuration :  $\eta = 1,6$  pour les aciers à haute adhesion.

$K = 10^6$  : fissuration nuisible

$\bar{w}_f$  : pourcentage de fissuration  $\bar{w}_f = \frac{A}{B_f}$

$$B_f = 7,2 \times 100 = 720$$

$$\bar{w}_f = \frac{A}{B_f} = \frac{43,78}{720} = 0,0608$$

$$\sigma_1 = \frac{1,6 \cdot 10^6}{16} \cdot \frac{0,0608}{1 + 0,608} = 3781,09 \text{ bar}$$

$$\sigma_2 = 2,4 \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^6}{16} \cdot 7,5} = 2078,5 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}_a = \min \left\{ \frac{2}{3} \sigma_{in}, \max(\sigma_1, \sigma_2) \right\} = \min \left\{ 2800, \max(3781,09; 2078,5) \right\}$$

$$\bar{\sigma}_a = 2800 \text{ bar}$$

Ceci pour un panneau de dalle desolidarisee de la poutre metallique.

Par contre en realite, (state d'exploitation), la dalle et la poutre travaillent ensemble. La dalle participe par une largeur suffisante pour que l'axe neutre ne s'eloigne pas de la fibre superieure de la poutre metallique (position ideal)

Ce qui permet aux 2 materiaux de travailler en 2 regimes differents a savoir:

- dalle entierement comprimee (beton comprime 20 fois meilleur que le beton tendu)
- Poutre en acier entierement tendue.

### Vérification au poinçonnement (art 39.54 CCBA 68)

Il faut s'assurer que la contrainte maximale de cisaillement  $\sigma_{max}$  reste inférieure à la contrainte admissible de traction  $\bar{\sigma}_b$

$$\sigma_{max} = \frac{1,5 P}{1,2 f_c h_0} \leq \bar{\sigma}_b$$

$P$ : charge localisée

$h_0$ : épaisseur de la dalle

$f_c$ : périmètre de diffusion sur le plan moyen de la dalle situé à  $\frac{h_0}{2}$

$\bar{\sigma}_b$ : contrainte de référence de traction du béton.

Les surcharges qui peuvent poinçonner sont les surcharges: D, Mc120, Br

$$E = \frac{3}{4} e + \frac{h_0}{2} = 15,25 \text{ cm}$$

$$u' = u + 2E$$

$$v' = v + 2E$$

$$P_c = 2(u' + v')$$

| Surcharge | $u$ (cm) | $v$ (cm) | $u'$ (cm) | $v'$ (cm) | $P$ (kN)         | $P_c$ (cm) | $\sigma_{max}$ (bar) | $\bar{\sigma}_b$ (bar) |
|-----------|----------|----------|-----------|-----------|------------------|------------|----------------------|------------------------|
| Mc120     | 100      | 610      | 130,5     | 640,5     | $55 \cdot 10^3$  | 1542       | 2,23                 | 7,5                    |
| Br        | 60       | 30       | 90,5      | 60,5      | $10 \cdot 10^3$  | 302        | 2,07                 | 7,5                    |
| D         | 320      | 1860     | 350,5     | 1890,5    | $240 \cdot 10^3$ | 8263       | 1,815                | 7,5                    |

### Arrêt des armatures:

Les règles CCBA 68 prévoient que la totalité des barres sont prolongées jusqu'aux appuis lorsque la dalle est soumise à l'action des charges concentrées mobiles. Cette prescription vise surtout les ouvrages d'art en particulier les ponts.

### Recouvrement des armatures:

Etant donné que les longueurs des barres ne font que 12 m ou 14 m et que les armatures calculées filent jusqu'aux appuis, on doit alors assurer un recouvrement pour assurer la continuité des contraintes.

La jonction de deux barres parallèles identiques est assurée par recouvrement lorsque leurs extrémités se chevauchent sur une longueur au moins égale à leur longueur de scellement droit dans le cas où leur distance entre axes est ou plus égale à cinq fois leur diamètre (art 30.52 CCBA 68)

$$l_d = \frac{\phi}{4} \frac{\bar{\sigma}_a}{\bar{\sigma}_d} \quad \text{en traction}$$

$$l'_d = \frac{\phi}{4} \frac{\bar{\sigma}'_a}{\bar{\sigma}_d} \quad \text{en compression.}$$

$$\bar{\sigma}_a = \bar{\sigma}'_a \rightarrow l_d = l'_d$$

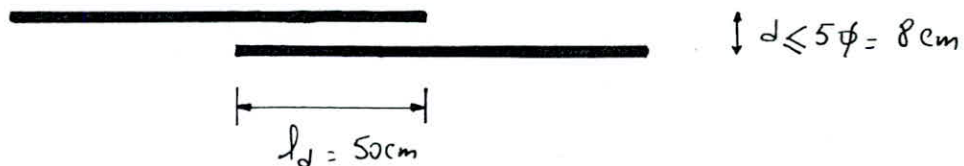
$$\bar{\sigma}_d = 2,5 \psi_d \cdot \bar{\sigma}_b = 2,5 \times 1,5 \times 7,5 = 28,125 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}_a = 2800 \text{ bar} \quad \phi = 16 \text{ mm}$$

$$l_d = \frac{16}{4} \cdot \frac{2800}{28,125} = 39,8 \text{ cm}$$

On adopte donc :  $l_d = l'_d = 50 \text{ cm}$

La transmission directe des efforts se fait par adhérence.



# annexe dalle

## Verification sous la sollicitation du second genre SP2:

Soit:  $SP_2 = G + 1,5P$

$SP_2'' = G + P + SI$  avec  $SI = 10\% (CP + CCP)$  (SETRA)

$SI = 0,1 (16,25) = 1,625 \text{ kdaN/ml}$

avec  $\sigma_a \leq \sigma_{en}$  (art 10.42 CCBA68)

$\sigma_b' \leq 1,5 \bar{\sigma}_b'$  (art 9.47 CCBA68)

### En travée:

$SP_2 \rightarrow M = 0,8 (M_{PP} + 1,5 M_{c120}) = 0,8 (1123,2 + \frac{1,5}{1,2} \cdot 7643,3) = 8542 \text{ m daN/ml}$

$SP_2'' \rightarrow M = 0,8 (M_{PP} + \frac{1}{1,2} \cdot 7643,3 + 1,625) = 7234 \text{ m daN/ml}$

donc  $SP_2$  est plus defavorable que  $SP_2''$

$\bar{w} = \frac{100A}{bh} = \frac{100 \cdot 18,09}{100 \cdot 17,2} = 1,05174 \text{ charon} \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,8582 \\ k = 20,25 \end{cases}$

$\sigma_a = \frac{M}{AEh} = \frac{8542 \cdot 10^2}{18,09 \cdot 0,8582 \cdot 17,2} = 3198,9 \text{ bar} < \sigma_{en} = 4200 \text{ bar}$

$\sigma_b' = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{3198,9}{20,25} = 156 \text{ bar} < 1,5 \bar{\sigma}_b' = 270 \text{ bar}$

### Sur appui:

$SP_2^{sur} \rightarrow M = 0,5 M_{PP} + \frac{1,5}{1,2} M_{c120} = 0,5 \cdot 1123,2 + \frac{1,5}{1,2} \cdot 7493 = 9928 \text{ m daN}$

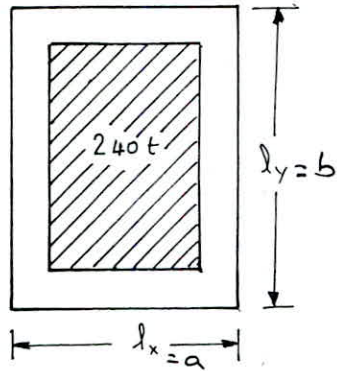
$\bar{w} = \frac{100A}{bh} = \frac{100 \cdot 20,17}{100 \cdot 17,2} = 1,1726 \text{ charon} \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,8524 \\ k = 18,88 \end{cases}$

$\sigma_a = \frac{M}{AEh} = \frac{9928 \cdot 10^2}{20,17 \cdot 0,8524 \cdot 17,2} = 3357,2 \text{ bar} < \sigma_{en} = 4200 \text{ bar}$

$\sigma_b' = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{3357,2}{18,88} = 177,8 < 1,5 \bar{\sigma}_b' = 180 \times 1,5 = 270 \text{ bar}$



Remarque: Il nous a été demandé tardivement de ferrailer la dalle avec le système D



Diffusion  $u = 3,2\text{m}$  ;  $v = 18,6\text{m}$

$$u' = u + h_0 + 1,5e_r = 3,505\text{m}$$

$$v' = v + h_0 + 1,5e_r = 18,905\text{m}$$

$$\frac{u'}{a} = 0,9736 ; \quad \frac{v'}{b} = 0,652 ; \quad \beta = 0,124$$

donc on a :

$$M_x = 1,2(M_1 + \gamma M_2)P = 17579\text{ mdaN/ml}$$

$$M_y = 1,2(M_2 + \gamma M_1)P = 6726\text{ mdaN/ml}$$

\* Moments transversaux

• en travée :  $M_{ta} = 0,8(M_{pp} + M_x) = 14961\text{ mdaN/ml}$

• sur appuis :  $M_{ar} = -0,5(M_{pp} + M_x) = -9350\text{ mdaN/ml}$

• En encorbellement :  $M_{ea} = -5692,8\text{ mdaN/ml}$

\* Moments longitudinaux :

• En travée :  $M_{tb} = 0,8(229,4 + 6726) = 5564\text{ mdaN/ml}$

• Sur appui :  $M_{ab} = -0,5(229,4 + 6726) = -3478\text{ mdaN/ml}$

Ce qui donne le ferrailage suivant :

| Section et armature              | M <sub>ext</sub><br>mdaN/m | M <sub>r6</sub><br>mdaN/m | $\Delta M$<br>mdaN/m | K     | $\alpha$ | $\gamma$ | f  | A <sub>ca</sub> /m <sup>2</sup><br>nécessaire | A' <sub>ca</sub> /m <sup>2</sup><br>nécessaire |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------|-------|----------|----------|----|---|--|
| A <sub>tx</sub>                  | 14961                      | 10678                     | 4283                 | 36,95 | 0,491    | 0,836    | 17 | 37,61   | 17,68  |
| A <sub>ax</sub> =A <sub>ay</sub> | 9350                       | 10678                     | <0                   | 31,60 | 0,472    | 0,842    | 17 | 23,32   |  |
| A <sub>ty</sub>                  | 5564                       | 10678                     | <0                   | 22,86 | 0,412    | 0,862    | 15 | 14,94   |  |
| encastrement                     | 5692,8                     | 10678                     | <0                   | 19,24 | 0,381    | 0,873    | 17 | 13,69   |  |

| Section                          | A <sub>ca</sub> /m <sup>2</sup><br>choisi | e<br>(cm) | A' <sub>ca</sub> /m <sup>2</sup><br>choisi | e'<br>(cm) | y <sub>1</sub><br>(cm) | I<br>(cm <sup>4</sup> ) | $\sigma'_b$<br>bar | $\sigma'_a$<br>bar | $\sigma_a$<br>bar |
|----------------------------------|---|-----------|--|------------|------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| A <sub>tx</sub>                  | 12HA20                                    | 8,3       | 6HA20                                      | 16         | 8,29                   | 69777,5                 | 177,3              | 1701,3             | 2801              |
| A <sub>ax</sub> =A <sub>ay</sub> | 8HA20                                     | 12,5      |  |            | 8,16                   | 47568                   | 162                | 1521,4             | 2606,4            |
| A <sub>ty</sub>                  | 5HA20                                     | 20        |  |            | 6,37                   | 26155                   | 135,5              | 1075,3             | 2753,8            |
| encastrement                     | 5HA20                                     | 20        |  |            | 6,89                   | 34974                   | 112,1              | 949,7              | 2468,4            |

Les contraintes sont vérifiées à la limite.

Le système D entraîne des aciers tendus et comprimés en travers chose qui est peu pratique. Il aura fallu avoir une épaisseur de dalle de 21 cm pour éviter cela.

## Evaluation de l'effort tranchant

Poids propre:

$$a = 3,6 \text{ m} ; b = 2,9 \text{ m} \quad a < b$$

\* au milieu du petit côté de dimension a

$$T_y = \frac{P}{3l_y} = \frac{74,19}{3 \times 2,9} = 0,853 \text{ KdaN/ml}$$

\* au milieu du grand côté de dimension b

$$T_x = \frac{P}{2l_y + l_x} = \frac{74,19}{2 \times 2,9 + 3,6} = 1,204 \text{ KdaN/ml}$$

Surcharge A:

$$A = K A_L \frac{l_o}{l_v}$$

$$A_L = 230 + \frac{36000}{L+12} = 230 + \frac{36000}{2,9+12} = 1108 \text{ daN/m}^2$$

$$K = 0,75 ; l_o = 3,5 \text{ m} \quad l_v = 3,6 \text{ m}$$

$$A = 0,75 \cdot 1108 \cdot \frac{3,5}{3,6} = 854,74 \text{ daN/m}^2$$

\* au milieu du petit côté de dimension a

$$T_y = 1,2 \cdot \frac{1}{3} A \cdot l_x = 1,2 \times \frac{1}{3} \times 854,74 \times 3,6 = 1231 \text{ daN/ml}$$

\* au milieu du grand côté de dimension b

$$T_x = 1,2 \times A \frac{l_x l_y}{2l_y + l_x} = 1,2 \cdot 854,74 \cdot \frac{3,6 \times 2,9}{2 \times 2,9 + 3,6} = 1738,4 \text{ daN/ml}$$

Surcharge B<sub>n</sub>:

$$u = 60 \text{ cm} ; v = 30 \text{ cm}$$

diffusion :

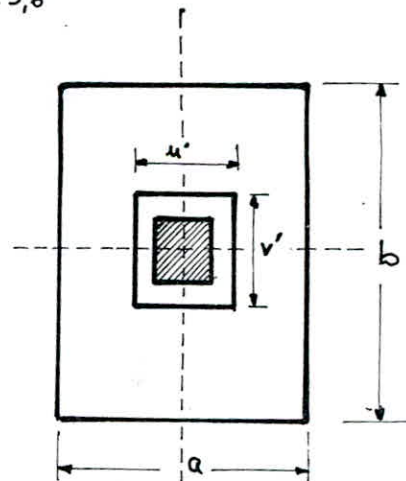
$$u' = u + h_0 + 1,5e_r = 60 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 90,5 \text{ cm}$$

$$v' = v + h_0 + 1,5e_r = 30 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 60,5$$

$$P = 10t \quad u' > v'$$

$$T_{u'} = \frac{P}{2u' + v'} = \frac{10^4}{2 \cdot 0,905 + 0,605} = 4141 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v'} = \frac{P}{3u'} = \frac{10^4}{3 \cdot 0,905} = 3683 \text{ daN/ml}$$



$T$  majoré et pondéré

$$T_x = 1,25 \times 1,2 \times 1,207 \times 4141 = 7497 \text{ daN/ml}$$

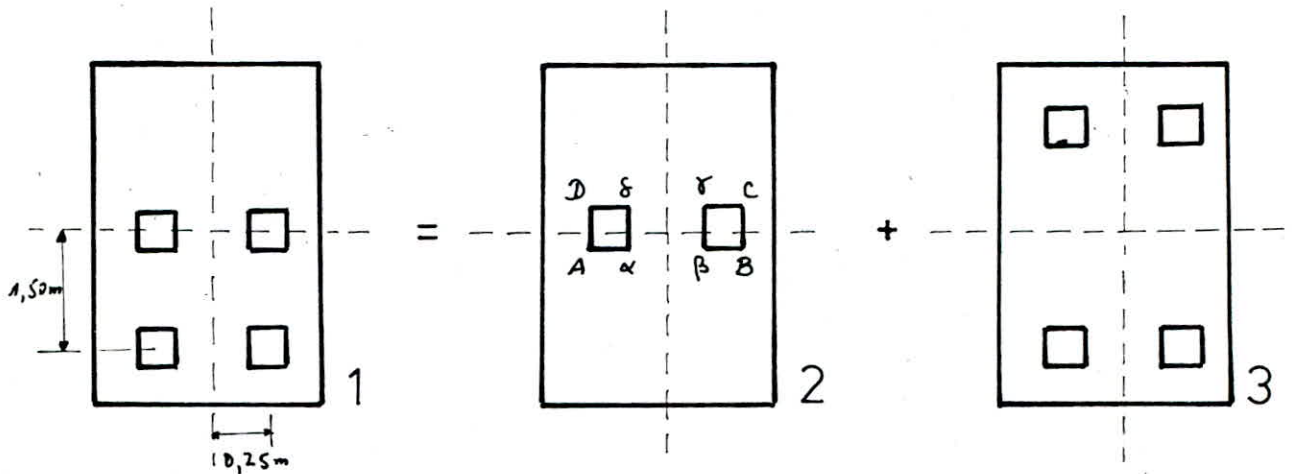
$$T_y = 1,25 \times 1,2 \times 1,207 \times 3683 = 6668 \text{ daN/ml}$$

Surcharge  $B_c$ :

$$u = v = 25 \text{ cm} ; h_0 = 20 \text{ cm}$$

$$u' = u + h_0 + 1,5e_r = 25 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 55,5 \text{ cm}$$

$$v' = v + h_0 + 1,5e_r = 25 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 55,5 \text{ cm}$$



Vérification d'interférence:

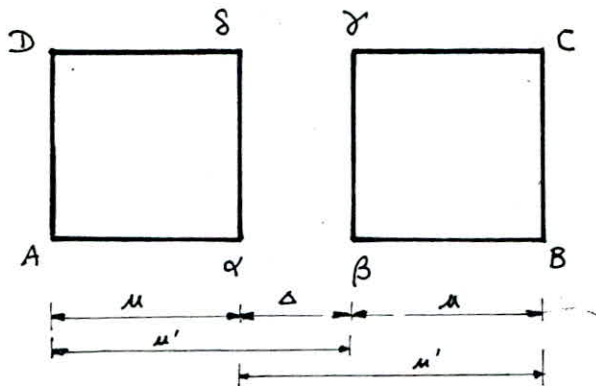
$$\frac{u'}{2} = \frac{55,5}{2} = 27,75 \text{ cm} > 25 \text{ cm} \Rightarrow \text{il existe une interférence}$$

$$\frac{v'}{2} = \frac{55,5}{2} = 27,75 \text{ cm} < 75 \text{ cm} \Rightarrow \text{pas d'interférence.}$$

Pression de répartition sur le plan moyen:

$$p = \frac{P}{u' \times v'} = \frac{6000}{(55,5)^2} = 1,948 \text{ bar}$$

Considérons le système (E):



Surface ABCD:

$$u_1 = 2u' - \Delta \quad ; \quad v_1 = v'$$

$$\Delta = 2 \left( \frac{u'}{2} - \frac{v_0}{2} \right) = u' - 50 = 55,5 - 50 = 5,5 \text{ cm}$$

$$u_1 = 2 \cdot 55,5 - 5,5 = 105,5 \text{ cm}$$

$$v_1 = 55,5 \text{ cm}$$

$$u_1 > v_1$$

$$P_1 = \sigma u_1 \cdot v_1 = 1,948 \times 105,5 \times 55,5 = 11406 \text{ daN}$$

$$T_{u_1} = \frac{P_1}{2u_1 + v_1} = \frac{11406}{(2 \cdot 105,5 + 55,5) \cdot 10^{-2}} = 4280 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_1} = \frac{P_1}{3u_1} = \frac{11406}{3 \cdot 105,5 \cdot 10^{-2}} = 3600 \text{ daN/ml}$$

Surface  $\alpha\beta\gamma\delta$ :

$$u_2 = \Delta = 5,5 \text{ cm} \quad ; \quad v_2 = v' = 55,5 \text{ cm}$$

$$v_2 > u_2 \quad ; \quad P_2 = \sigma \cdot u_2 \cdot v_2 = 1,948 \times 5,5 \times 55,5 = 595 \text{ daN}$$

$$T_{u_2} = \frac{P_2}{3v_2} = \frac{595}{3 \cdot 55,5 \cdot 10^{-2}} = 357 \text{ daN/ml}$$

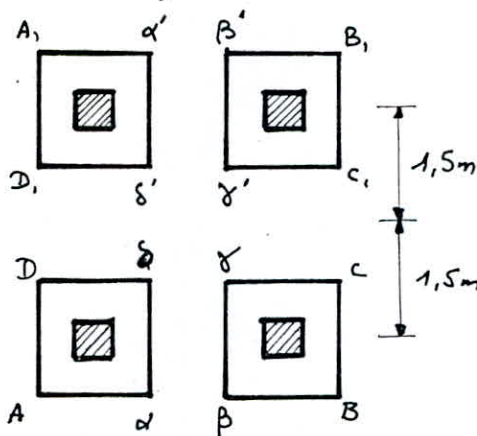
$$T_{v_2} = \frac{P_2}{2v_2 + u_2} = \frac{595}{(2 \cdot 55,5 + 5,5) \cdot 10^{-2}} = 511 \text{ daN/ml}$$

En définitif, pour le système (2), on a:

$$T_{u(2)} = T_{u_1} + T_{u_2} = 4280 + 357 = 4637 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v(2)} = T_{v_1} + T_{v_2} = 3600 + 511 = 4111 \text{ daN/ml}$$

Considérons le système (3):



Surface ABB<sub>1</sub>A<sub>1</sub>:

$$u_1 = 2u' - \Delta = 2 \times 55,5 - 5,5 = 105,5 \text{ cm}$$

$$v_1 = v' + 2 \times 1,50 = 55,5 + 300 = 355,5 \text{ cm}$$

$$P_1 = \sigma u_1 v_1 = 1,948 \times 105,5 \times 355,5 = 73,06 \text{ KdaN}$$

$$u_1 < v_1$$

$$T_{u_1} = \frac{P_1}{3v_1} = \frac{73,06}{3 \cdot 355,5} = 6850 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_1} = \frac{P_1}{2v_1 + u_1} = \frac{73,06}{2 \cdot 355,5 + 105,5} = 8948 \text{ daN/ml}$$

Surface DD<sub>1</sub>CC<sub>1</sub>:

$$u_2 = 2u' - \Delta = 2 \cdot 55,5 - 5,5 = 105,5 \text{ cm}$$

$$v_2 = 300 - 2 \cdot \frac{v'}{2} = 300 - 55,5 = 244,5 \text{ cm}$$

$$P_2 = \sigma \cdot u_2 \cdot v_2 = 1,948 \cdot 105,5 \cdot 244,5 = 50,248 \text{ KdaN/ml}$$

$$v_2 > u_2$$

$$T_{u_2} = \frac{P_2}{3v_2} = \frac{50,248}{3 \cdot 244,5} = 6850 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_2} = \frac{P_2}{2v_2 + u_2} = \frac{50,248}{2 \cdot 244,5 + 105,5} = 8452 \text{ daN/ml}$$

Surface  $\alpha\beta\alpha'\beta'$ :

$$u_3 = \Delta = 5,5 \text{ cm} ; v_3 = v_1 = 355,5 \text{ cm} \quad v_3 > u_3$$

$$P_3 = \sigma \cdot u_3 \cdot v_3 = 1,948 \cdot 5,5 \cdot 355,5 = 3809 \text{ daN}$$

$$T_{u_3} = \frac{P_3}{3v_3} = \frac{3809}{3 \cdot 355,5} = 357 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_3} = \frac{P_3}{2v_3 + u_3} = \frac{3809}{2 \cdot 355,5 + 5,5} = 532 \text{ daN/ml}$$

Surface  $\delta\gamma\delta'\gamma'$ :

$$u_4 = \Delta = 5,5 \text{ cm} ; v_4 = v_2 = 244,5 \text{ cm} \quad v_4 > u_4$$

$$P_4 = \sigma \cdot u_4 \cdot v_4 = 1,948 \cdot 5,5 \cdot 244,5 = 2619 \text{ daN}$$

$$T_{u_4} = \frac{P_4}{3v_4} = \frac{2619}{3 \cdot 244,5} = 357 \text{ daN/ml} ; T_{v_4} = \frac{P_4}{2v_4 + u_4} = \frac{2619}{2 \cdot 244,5 + 5,5} = 529 \text{ daN/ml}$$

Donc pour le système ③; on a:

$$Tu_{\text{③}} = \frac{Tu_1 - Tu_2 + Tu_3 - Tu_4}{2} = \frac{6850 - 6850 + 0,357 - 0,357}{2} = 0$$

$$Tv_{\text{③}} = \frac{Tv_1 - Tv_2 + Tv_3 - Tv_4}{2} = \frac{8948 - 8452 + 532 - 529}{2} = 2495 \text{ daN/ml}$$

Ainsi pour le système ①, on a:

$$Tu = Tu_{\text{②}} + Tu_{\text{③}} = 4637 \text{ daN/ml}$$

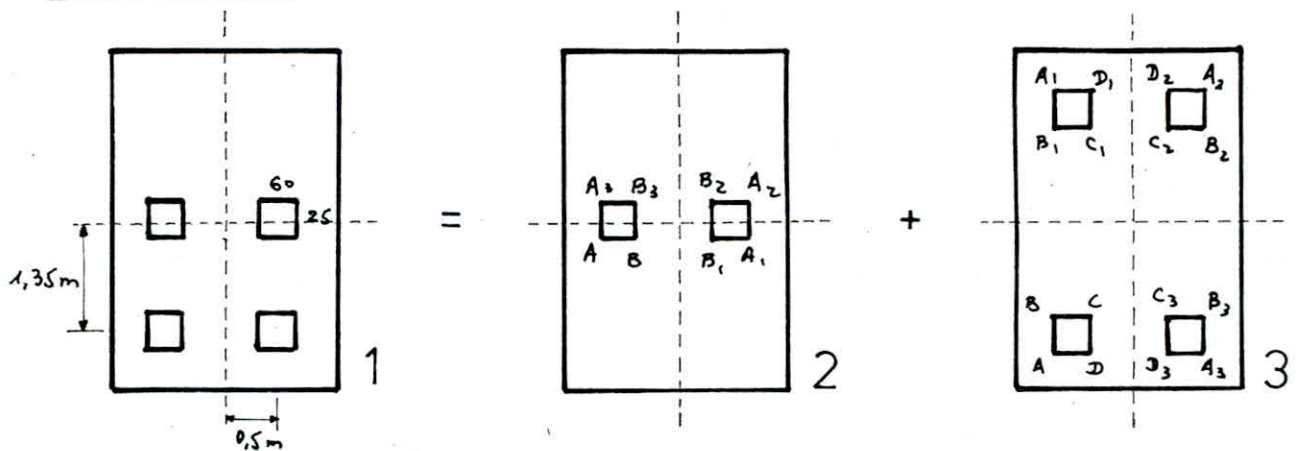
$$Tv = Tv_{\text{②}} + Tv_{\text{③}} = 4111 + 2495 = 4360,5 \text{ daN/ml}$$

Ponderé et majoré

$$Tx = 1,25 \times 1,2 \times 1,207 \times 4637 = 8395 \text{ daN/ml}$$

$$Ty = 1,25 \times 1,2 \times 1,207 \times 4360,5 = 7894,6 \text{ daN/ml}$$

Système B<sub>f</sub>:



Diffusion des charges sur le plan moyen:

$$u' = u + h_0 + 1,5e_r = 60 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 90,5 \text{ cm}$$

$$v' = v + h_0 + 1,5e_r = 25 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 55,5 \text{ cm}$$

Vérification de l'interférence:

$$\frac{u'}{2} = \frac{90,5}{2} = 45,25 \text{ cm} < 50 \text{ cm} \Rightarrow \text{pas d'interférence}$$

$$\frac{v'}{2} = \frac{55,5}{2} = 27,75 \text{ cm} < \frac{135}{2} = 67,5 \text{ cm} \Rightarrow \text{pas d'interférence}$$

Pression de répartition sur le plan moyen:

$$\sigma = \frac{P}{u'v'} = \frac{8000}{90,5 \times 55,5} = 1,593 \text{ bar}$$

Systeme (2):

Surface AA<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>:

$$u_1 = 100 + 90,5 = 190,5 \text{ cm} ; v_1 = v' = 55,5 \text{ cm} \quad u_1 > v_1$$

$$P_1 = \sigma \cdot u_1 \cdot v_1 = 1,593 \times 190,5 \times 55,5 = 16,842 \text{ KdaN}$$

$$T_{u_1} = \frac{P_1}{2u_1 + v_1} = \frac{16,842}{2 \cdot 1,905 + 0,555} = 3858 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_1} = \frac{P_1}{3u_1} = \frac{16,842}{3 \cdot 1,905} = 2947 \text{ daN/ml}$$

Surface BB<sub>1</sub>B<sub>2</sub>B<sub>3</sub>:

$$u_2 = 100 - u' = 100 - 90,5 = 9,5 \text{ cm} ; v_2 = v' = 55,5 \text{ cm} \quad u_2 < v_2$$

$$P_2 = 1,593 \times 9,5 \times 55,5 = 840 \text{ daN/ml}$$

$$T_{u_2} = \frac{P_2}{3v_2} = \frac{840}{3 \cdot 0,555} = 504,5 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_2} = \frac{P_2}{2v_2 + u_2} = \frac{840}{2 \cdot 0,555 + 0,095} = 697 \text{ daN/ml}$$

donc pour le systeme (2), on a :

$$T_{u(2)} = T_{u_1} - T_{u_2} = 3858 - 504,5 = 3353,5 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v(2)} = T_{v_1} - T_{v_2} = 2947 - 697 = 2250 \text{ daN/ml}$$

Systeme (3):

Surface AA<sub>1</sub>A<sub>2</sub>A<sub>3</sub>:

$$u_1 = 100 + u' = 100 + 90,5 = 190,5 \text{ cm}$$

$$v_1 > u_1$$

$$v_1 = 2 \times 135 + v' = 270 + 55,5 = 325,5 \text{ cm}$$

$$P_1 = \sigma \cdot u_1 \cdot v_1 = 1,593 \times 190,5 \times 325,5 = 98,778 \text{ KdaN}$$

$$T_{u_1} = \frac{P_1}{3v_1} = \frac{98,778}{3 \cdot 325,5 \cdot 10^{-2}} = 10,115 \text{ KdaN/ml}$$

$$T_{v_1} = \frac{P_1}{2v_1 + u_1} = \frac{98,778}{2 \cdot 3,255 + 1,905} = 11,738 \text{ KdaN/ml}$$



Surface BB<sub>1</sub>B<sub>2</sub>B<sub>3</sub>:

$$u_2 = u_1 = 100 + u' = 190,5 \text{ cm}$$

$$v_2 = 2 \times 1,35 - v' = 270 - 55,5 = 214,5 \text{ cm}$$

$$v_2 > u_2$$

$$P_2 = \sigma \cdot u_2 \cdot v_2 = 1,593 \times 190,5 \times 214,5 = 65,1 \text{ kdaN}$$

$$T_{u_2} = \frac{P_2}{3v_2} = \frac{65,1}{3 \times 214,5} = 10,116 \text{ kdaN/ml}$$

$$T_{v_2} = \frac{P_2}{2v_2 + u_2} = \frac{65,1}{2 \times 214,5 + 190,5} = 10,508 \text{ kdaN/ml}$$

Surface CC<sub>1</sub>C<sub>2</sub>C<sub>3</sub>:

$$u_3 = 100 - u' = 100 - 90,5 = 9,5 \text{ cm}$$

$$v_3 = 2 \times 1,35 - v' = 270 - 55,5 = 214,5 \text{ cm}$$

$$v_3 > u_3$$

$$P_3 = \sigma \cdot u_3 \cdot v_3 = 1,593 \times 9,5 \times 214,5 = 3246 \text{ daN}$$

$$T_{u_3} = \frac{P_3}{3v_3} = \frac{3246}{3 \times 214,5} = 504 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_3} = \frac{P_3}{2v_3 + u_3} = \frac{3246}{2 \times 214,5 + 9,5} = 740 \text{ daN/ml}$$

Surface DD<sub>1</sub>D<sub>2</sub>D<sub>3</sub>:

$$u_4 = 100 - u' = 100 - 90,5 = 9,5 \text{ cm}$$

$$v_4 = 2 \times 1,35 + v' = 270 + 55,5 = 325,5 \text{ cm}$$

$$v_4 > u_4$$

$$P_4 = \sigma \cdot u_4 \cdot v_4 = 1,593 \times 9,5 \times 325,5 = 4926 \text{ daN}$$

$$T_{u_4} = \frac{P_4}{3v_4} = \frac{4926}{3 \times 325,5} = 504 \text{ daN/ml}$$

$$T_{v_4} = \frac{P_4}{2v_4 + u_4} = \frac{4926}{2 \times 325,5 + 9,5} = 746 \text{ daN/ml}$$

Pour le système ③, on a :

$$T_{u③} = \frac{T_{u_1} - T_{u_2} + T_{u_3} - T_{u_4}}{2} = \frac{10,115 - 10,116 + 0,504 - 0,504}{2} = 0$$

$$T_{v③} = \frac{T_{v_1} - T_{v_2} + T_{v_3} - T_{v_4}}{2} = \frac{11,738 - 10,508 + 740 - 746}{2} = 6,15 \text{ daN/ml}$$

Donc pour le système ①, on a :

$$T_u = T_{u②} + T_{u③} = 3353 \text{ daN/ml}$$

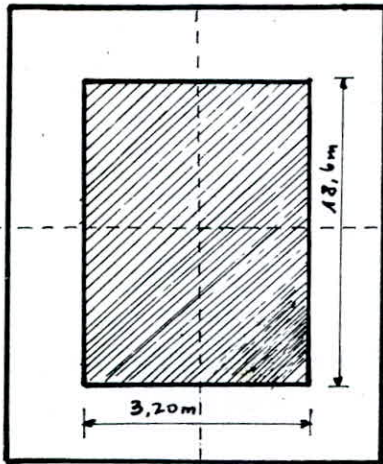
$$T_v = T_{v②} + T_{v③} = 2250 + 615 = 2865 \text{ daN/ml}$$

T majorée et pondérée :

$$T_x = 1,25 \times 1,2 \times 1,207 \times 3353 = 6070,6 \text{ daN/ml}$$

$$T_y = 1,25 \times 1,2 \times 1,207 \times 2865 = 5187 \text{ daN/ml}$$

Surcharge D :



$$u' = u + h_0 + 1,5e_r = 320 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 350,7 \text{ cm}$$

$$v' = v + h_0 + 1,5e_r = 1860 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 1890,5 \text{ cm}$$

$$P = 240 \text{ kdaN} \quad u' \leq v'$$

$$T_u = \frac{P}{3v'} = \frac{240}{3 \cdot 18,905} = 4,2317 \text{ kdaN/ml}$$

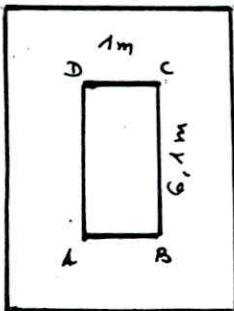
$$T_v = \frac{P}{2v' + u'} = \frac{240}{2 \cdot 18,905 + 3,507} = 5,81 \text{ kdaN/ml}$$

Le système D n'est ni majoré ni pondéré.

$$T_x = 1,25 \times 1,2 \times 4,2317 = 6,347 \text{ kdaN/ml}$$

$$T_y = 1,25 \times 1,2 \times 5,81 = 8,715 \text{ kdaN/ml}$$

Surcharge militaire Mc120 :



$$u' = u + h_0 + 1,5e_r = 100 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 130,5 \text{ cm}$$

$$v' = v + h_0 + 1,5e_r = 610 + 20 + 1,5 \cdot 7 = 640,5 \text{ cm}$$

$$v' > u' \quad ; \quad P = 55 \text{ kdaN}$$

$$T_u = \frac{P}{3v'} = \frac{55}{3 \cdot 6,405} = 2,862 \text{ kdaN/ml}$$

$$T_v = \frac{P}{2v' + u'} = \frac{55}{2 \cdot 6,405 + 1,305} = 3,896 \text{ kdaN/ml}$$

T majorée et pondérée

$$T_x = 1,25 \times 1,2 \times 1,173 \times 2,862 = 5,035 \text{ kdaN/ml}$$

$$T_y = 1,25 \times 1,2 \times 1,173 \times 3,896 = 6,855 \text{ kdaN/ml}$$

Recapitulation des efforts tranchant majorés et pondérés :

| charges         | CP    | A     | Bc     | Bt    | Br    | Mc120 | D     |
|-----------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $T_x$ (KdaN/ml) | 1,204 | 1,738 | 8,395  | 6,071 | 7,497 | 5,035 | 6,347 |
| $T_y$ (KdaN/ml) | 0,853 | 1,231 | 7,8946 | 5,187 | 6,668 | 6,855 | 8,715 |

$$T = T_{cp} + T_{surcharge\ max}$$

$$T_x = 1,204 + 8,395 = 9,599 \text{ KdaN/ml}$$

$$T_y = 0,853 + 8,715 = 9,568 \text{ KdaN/ml}$$

$$T_{max} = \max(T_x, T_y) = 9,599 \text{ KdaN/ml}$$

Verification au cisaillement: (art 27.2 CCBA 68)

$$\sigma_{max} < \bar{\sigma}_b = 1,15 \bar{\sigma}_b$$

$$\sigma_{max} = \frac{T}{b \cdot z} \quad \text{avec } z = \frac{7}{8} h$$

$$\sigma_{max} = \frac{9599}{100 \cdot \frac{7}{8} \cdot 17} = 6,45 \text{ bar/ml}$$

$$1,15 \bar{\sigma}_b = 1,15 \cdot 7,5 = 8,625 \text{ bar}$$

donc  $\sigma_{max} < \bar{\sigma}_b \Rightarrow$  les armatures transversales ne sont pas nécessaires

Verification de l'adhérence: (art 28 CCBA 68)

$$\text{Il s'agit de vérifier que : } \sigma_d = \frac{T}{P_c \cdot z} \leq \bar{\sigma}_d$$

$$\bar{\sigma}_d = 2,5 \psi_d \cdot \bar{\sigma}_b \quad (\text{art 29.11 CCBA 68})$$

$T$ : effort tranchant

$P_c$ : perimetre utile de l'armature

$z$ : bras de levier  $z = \frac{7}{8} h$

$\psi_d = 1,5$  (acier HA)

$$\sigma_{dx} = \frac{T_x}{P_c \cdot z_x} \quad \text{avec } T_x = 9,599 \text{ KdaN/ml} ; h_x = 17,2 \text{ cm}$$

$$A_{ax} = A_{ay} = 6 \text{ HA } 16 \rightarrow P_c = 1,6 \times 3,14 \times 6 = 30,114 \text{ cm}$$

$$\sigma_{dx} = \frac{9599}{30,114 \cdot \frac{7}{8} \cdot 17,2} = 21,158 \text{ bar}$$

$$T_y = 9,568 \text{ kdaN/ml} \quad ; \quad h_y = 15,6 \text{ cm}$$

$$\sigma_{dy} = \frac{9568}{30,114 \cdot \frac{7}{8} \cdot 15,6} = 23,258 \text{ bar}$$

$$\sigma_d = \max(\sigma_{dx}, \sigma_{dy}) = 23,258 \text{ bar}$$

$$\bar{\sigma}_d = 2,5 \cdot 1,5 \cdot 7,5 = 28,125 \text{ bar}$$

$$\sigma_d < \bar{\sigma}_d \Rightarrow \text{l'adhérence est vérifiée.}$$

ETUDE  
DES  
POUTRES PRINCIPALES

## CALCUL DES CHARGES

Poids propre du tablier:

- Avant prise du béton (charges permanentes CP)

|  |   |   |                          |
|--|---|---|--------------------------|
| • OSSATURE métallique ( $140 \text{ Kg/m}^2$ ) : | $140 \times 18,733$                     | = | $2622,62 \text{ Kg/ml}$  |
| • Dalle en béton armé :                          | $0,2 \times 2500 \times 18,733$         | = | $9366,5 \text{ Kg/ml}$   |
| • Goussets :                                     | $5 \times 0,05 \times 0,55 \times 2500$ | = | $343,75 \text{ Kg/ml}$   |
| • Coffrage métallique ( $70 \text{ Kg/m}^2$ ) :  | $70 \times 18,733$                      | = | $1311,31 \text{ Kg/ml}$  |
|  |   |   | <hr/>                    |
|  | $P_{CP}$                                | = | $13644,18 \text{ Kg/ml}$ |

- Après prise du béton (complément de charges permanentes CCP)

|                                   |   |   |                          |
|-----------------------------------|---|---|--------------------------|
| • Coffrage métallique :           |   | = | $-1311,31 \text{ Kg/ml}$ |
| • revêtement chaussée :           | $0,07 \times 2200 \times 14,4$            | = | $2217,6 \text{ Kg/ml}$   |
| • revêtement trottoir :           | $2 \times 1,9165 \times 2200 \times 0,05$ | = | $421,63 \text{ Kg/ml}$   |
| • Corniche :                      |   | = | $438 \text{ Kg/ml}$      |
| • Dalettes :                      |   | = | $366,625 \text{ Kg/ml}$  |
| • MURETS (bordures de trottoir) : |   | = | $375 \text{ Kg/ml}$      |
| • Garde Corps :                   |   | = | $100 \text{ Kg/ml}$      |
|                                   |   |   | <hr/>                    |
|                                   | $P_{CCP}$                                 | = | $2607,545 \text{ Kg/ml}$ |

Poids total :  $P = (P_{CP} + P_{CCP}) \text{ l}$

$$P = (13644,18 + 2607,545) \text{ l} = 471,3 \text{ t}$$

$$P = 471,3 \text{ t}$$

## CALCUL DES SURCHARGES

### - Système $B_c$

- Sens longitudinal : 2 camions
- Sens transversal : 4 camions

$$S_{B_c} = b_c \times 4 \times (2 \times 30) = 0,8 \times 240 = 192 \text{ t}$$

### - Système $B_t$

- Sens longitudinal : 1 tandem
- Sens transversal : 2 tandems

$$S_{B_t} = b_t \times 2 \times 32 = 1 \times 64 = 64 \text{ t}$$

### - Système D

1 convoi de 240 t

$$S_D = 240 \text{ t}$$

### - Système $M_{c120}$

1 char  $M_{c120}$

$$S_{M_{c120}} = 110 \text{ t}$$

## COEFFICIENT DE MAJORATION DYNAMIQUE

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1 + 0,2L} + \frac{0,6}{1 + 4 \frac{P}{S}}$$

surcharges civiles

$$\delta = 1,114$$

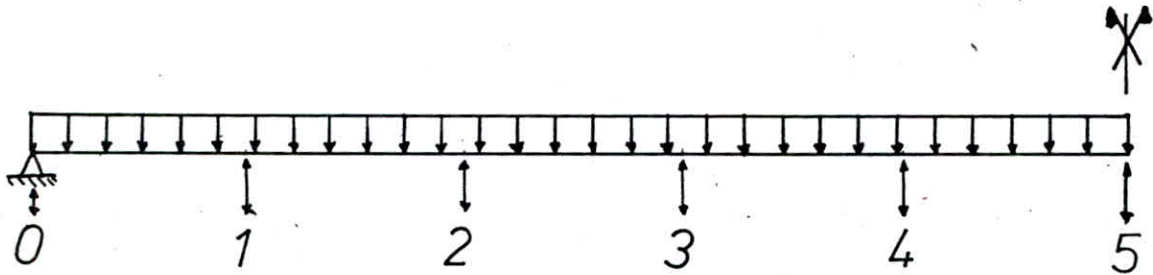
surcharges militaires

$$\delta = 1,092$$

## EVALUATION DES EFFORTS

- Calcul des efforts avant prise du béton (CP)

On calculera les efforts dans 11 sections de la poutre. C'est à dire tous les  $\frac{l}{10} = 2,9m$



Pour chaque section, on aura :

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx$$

avec  $q = 13,644 \text{ t/ml}$  ;  $l = 29m$

| Section          | 0      | 1      | 2      | 3       | 4       | 5       |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| $x \text{ (m)}$  | 0      | 2,9    | 5,8    | 8,7     | 11,6    | 14,5    |
| $M \text{ (tm)}$ | 0      | 516,36 | 917,97 | 1204,83 | 1376,95 | 1434,32 |
| $T \text{ (t)}$  | 197,84 | 158,27 | 118,71 | 79,13   | 39,57   | 0       |

- Calcul des efforts après prise du béton (CCP)

$q = 2,607 \text{ t/ml}$  ;  $l = 29m$

| Section          | 0    | 1     | 2     | 3      | 4     | 5      |
|------------------|------|-------|-------|--------|-------|--------|
| $x \text{ (m)}$  | 0    | 2,9   | 5,8   | 8,7    | 11,6  | 14,5   |
| $M \text{ (tm)}$ | 0    | 98,66 | 175,4 | 230,21 | 263,1 | 274,06 |
| $T \text{ (t)}$  | 37,8 | 30,24 | 22,68 | 15,12  | 7,56  | 0      |



Surcharge A:

$$A = 854,74 \text{ kg/m}^2$$

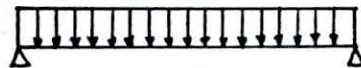
On chargera les 4 voies pour avoir le cas le plus défavorable

$$\text{donc } q = A \cdot l_s = 854,74 \times 14,4 = 12,31 \text{ t/ml}$$

| Section | 0 | 1      | 2      | 3    | 4      | 5      |
|---------|---|--------|--------|------|--------|--------|
| x(m)    | 0 | 2,9    | 5,8    | 8,7  | 11,6   | 14,5   |
| M(tm)   | 0 | 465,87 | 828,22 | 1087 | 1242,3 | 1294,1 |

EFFORT tranchant

Pour avoir le plus grand effort tranchant, il faut charger longitudinalement entre les zéros de la ligne d'influence et transversalement les 4 voies

Section 0:

$$z = 1$$

$$T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z$$

$$T_0 = 12,31 \cdot \frac{29}{2} \cdot 1 = 178,495 \text{ t}$$

Section 1:

$$L' = 29 - 2,9 \text{ m} = 26,1 \text{ m}$$

$$A_L = 230 + \frac{36000}{26,1 + 12} = 1174,88 \text{ kg/m}^2$$

$$A = K A_L \frac{l_0}{l_v} = 0,75 \cdot 1174,88 \cdot \frac{3,5}{3,6} = 856,68 \text{ kg/m}^2$$

$$q = A l_s = 856,68 \times 14,4 = 12,336 \text{ t/ml}$$

$$T_1 = q \frac{l}{2} z \quad ; \quad \frac{z}{26,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,9$$

$$T_1 = 144,88 \text{ t}$$

Section 2:

$$L = 29 - 5,8 = 23,2 \text{ m}$$

$$A_L = 230 + \frac{36000}{23,2+12} = 1252,73 \text{ Kg/m}^2$$

$$A = K A_L \frac{l_0}{l_v} = 0,75 \times 1252,73 \cdot \frac{3,5}{3,6} = 913,45 \text{ Kg/m}^2$$

$$q = A \cdot l_s = 913,45 \times 14,4 = 13,153 \text{ t/ml}$$

$$\frac{z}{23,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,8$$

$$T_2 = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 13,153 \cdot \frac{23,2}{2} \cdot 0,8 = 122,06 \text{ t}$$

Section 3:

$$L = 29 - 8,7 = 20,3 \text{ m}$$

$$A_L = 230 + \frac{36000}{20,3+12} = 1344,55 \text{ Kg/m}^2$$

$$A = K A_L \frac{l_0}{l_v} = 0,75 \cdot 1344,55 \cdot \frac{3,5}{3,6} = 980,4 \text{ Kg/m}^2$$

$$q = A \cdot l_s = 980,4 \times 14,4 = 14,118 \text{ t/ml}$$

$$\frac{z}{20,3} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,7$$

$$T_3 = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 14,118 \cdot \frac{20,3}{2} \cdot 0,7 = 100,31 \text{ t}$$

Section 4:

$$L = 29 - 11,6 = 17,4 \text{ m}$$

$$A_L = 230 + \frac{36000}{17,4+12} = 1454,5 \text{ Kg/m}^2$$

$$A = K A_L \frac{l_0}{l_v} = 0,75 \cdot 1454,5 \cdot \frac{3,5}{3,6} = 1060,57 \text{ Kg/m}^2$$

$$q = A \cdot l_s = 1060,57 \cdot 14,4 = 15,27 \text{ t/ml}$$

$$\frac{z}{17,4} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,6$$

$$T_4 = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 15,27 \cdot \frac{17,4}{2} \cdot 0,6 = 79,72 \text{ t}$$

Section 5:

$$L = 14,5 \text{ m}$$

$$A_L = 230 + \frac{36000}{14,5 + 12} = 1588,49 \text{ Kg/m}^2$$

$$A = K A_L \frac{l_0}{l_s} = 0,75 \cdot 1588,49 \cdot \frac{3,5}{3,6} = 1158,27 \text{ Kg/m}^2$$

$$q = A l_s = 1158,27 \cdot 14,4 = 16,68 \text{ t/ml}$$

$$\frac{z}{14,5} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,5$$

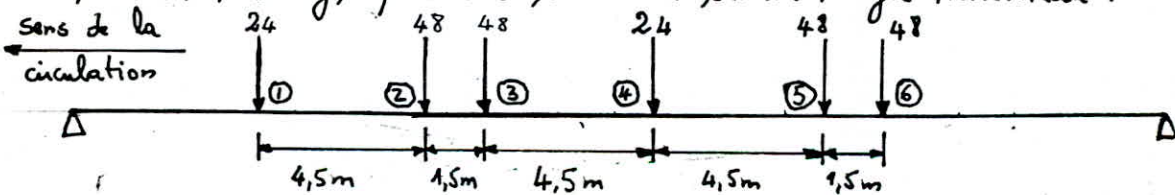
$$T_5 = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 16,68 \cdot \frac{14,5}{2} \cdot 0,5 = 60,46 \text{ t}$$

|         |         |        |        |        |       |       |
|---------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Section | 0       | 1      | 2      | 3      | 4     | 5     |
| x (m)   | 0       | 2,9    | 5,8    | 8,7    | 11,6  | 14,5  |
| T (t)   | 178,495 | 144,88 | 122,06 | 100,31 | 79,72 | 60,46 |

Surcharges Bc:

On assimile notre pont à une poutre. La charge verticale sur la poutre est égale à

la somme des charges ponctuelles se trouvant sur la rangée transversale.



Resultante :  $R = 240 \text{ t}$

Recherche de la section dangereuse:

La charge  $P_k$  sous laquelle se produira le plus grand des moments max réalisé au droit de chaque charge est celle qui satisfait l'inégalité suivante:

$$\sum_1^{k-1} P_k \leq \frac{R}{2} \leq \sum_1^k P_k$$

- ①  $0 \leq \frac{240}{2} \leq 24$  non  
 ②  $24 \leq \frac{240}{2} \leq 72$  non  
 ③  $72 \leq \frac{240}{2} \leq 120$  oui  
 ④  $120 \leq \frac{240}{2} \leq 144$  oui  
 ⑤  $144 \leq \frac{240}{2} \leq 192$  non  
 ⑥  $192 \leq \frac{240}{2} \leq 240$  non

Donc les sections susceptibles de donner le max des moments max sont les sections ③ et ④

Pour obtenir la section dangereuse, nous devons placer tout le convoi dans toutes les positions qui vérifient le théorème de BARRÉ pour les sections se trouvant au droit de ces charges.

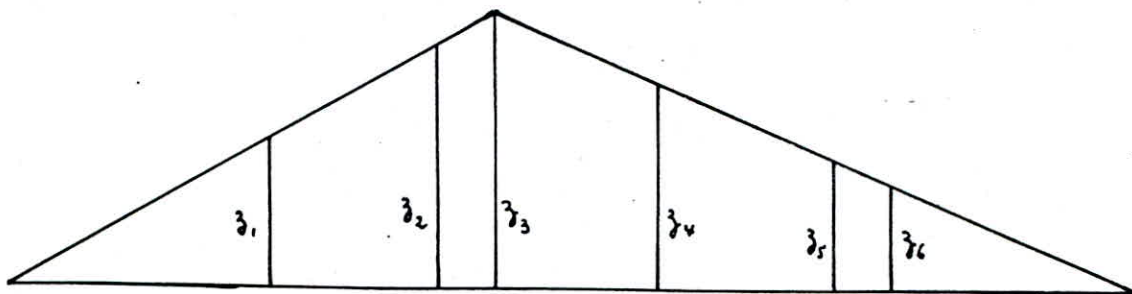
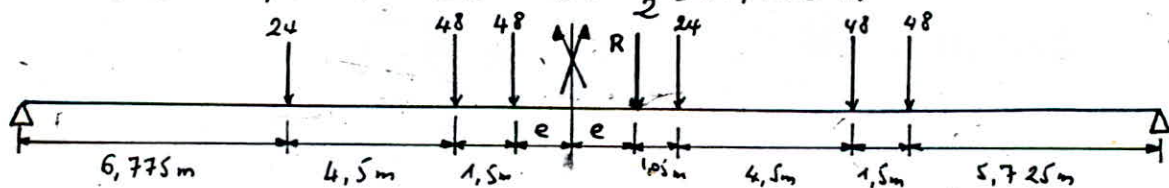
Pour chaque section, il y aura un moment max. La section dangereuse sera celle des moments max trouvés.

Section ③ :

$$\sum M_{/③} = 0 :$$

$$24 \times 6 + 48 \times 1,5 - 24 \times 1,5 - 48 \times 9 - 48 \times 10,5 = 240 \text{ DE}$$

$$\rightarrow x = -3,45 \text{ m} \quad \rightarrow e = \frac{x}{2} = -1,725 \text{ m}$$



$$\frac{z_1}{6,775} = \frac{16,225}{29} \rightarrow z_1 = 3,79 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{11,275} = \frac{16,225}{29} \rightarrow z_2 = 6,31 \text{ m}$$

$$\frac{z_3}{12,775} = \frac{16,225}{29} \rightarrow z_3 = 7,15 \text{ m}$$

$$\frac{z_4}{11,725} = \frac{12,775}{29} \rightarrow z_4 = 5,16 \text{ m}$$

$$\frac{z_5}{7,225} = \frac{12,775}{29} \rightarrow z_5 = 3,18 \text{ m}$$

$$\frac{z_6}{5,725} = \frac{12,775}{29} \rightarrow z_6 = 2,52 \text{ m}$$

$$M_{\max} = \sum P_i z_i = 24(3,79 + 5,16) + 48(6,31 + 7,15 + 3,18 + 2,52)$$

$$M_{\max} = 1134,48 \text{ m kdaN}$$

Section ④:

$$\sum M / \textcircled{4} = 0 :$$

$$24 \cdot 10,5 + 48 \cdot 6 + 48 \cdot 4,5 - 48 \cdot 4,5 - 48 \cdot 6 = 240x$$

$$\rightarrow x = 1,05 \text{ m} \rightarrow e = \frac{x}{2} = 0,525 \text{ m}$$

$$\frac{z_1}{4,525} = \frac{13,975}{29} \rightarrow z_1 = 2,18 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{9,025} = \frac{13,975}{29} \rightarrow z_2 = 4,35 \text{ m}$$

$$\frac{z_3}{10,525} = \frac{13,975}{29} \rightarrow z_3 = 5,07 \text{ m}$$

$$\frac{z_4}{15,025} = \frac{13,975}{29} \rightarrow z_4 = 7,24 \text{ m}$$

$$\frac{z_5}{9,475} = \frac{15,025}{29} \rightarrow z_5 = 4,91 \text{ m}$$

$$\frac{z_6}{7,975} = \frac{15,025}{29} \rightarrow z_6 = 4,13 \text{ m}$$

$$M_{\max} = \sum P_i z_i = 24(2,18 + 7,24) + 48(4,35 + 5,07 + 4,91 + 4,13)$$

$$M_{\max} = 1112,16 \text{ m kdaN}$$

Le max des moments max est déterminé en prenant comme section dangereuse la section ③ c'est à dire le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion. Cette section est située à 1,725m de l'axe de symétrie de la poutre

### Évaluation des moments dans chaque section

Le moment fléchissant est max au droit de la section "S" si en plaçant une charge  $P_i$  au droit de cette section et de telle manière que quand on passe de gauche à droite de cette charge, l'inégalité suivante change de signe:

$$\frac{1}{a} \sum_{i=1}^{h=i-1} P_G \leq \frac{1}{b} \sum_{j=i+1}^n P_D$$

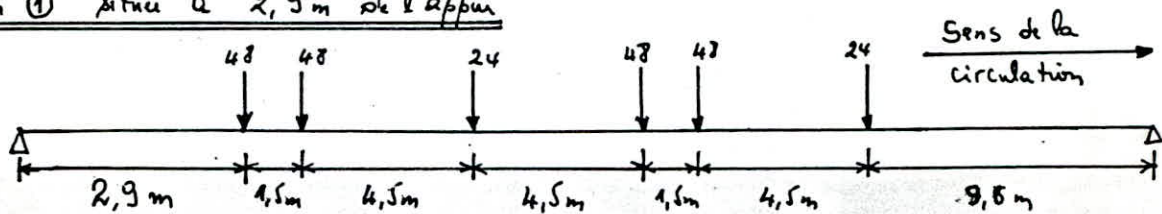
$a$ : distance de l'appui gauche à la section "S"

$b$ : distance de l'appui de droite à la section "S"

$P_G$ : charges se trouvant à gauche de "S"

$P_D$ : charges se trouvant à droite de "S"

Section ① situé à 2,9 m de l'appui



$$a = 2,9 \text{ m} ; b = 26,1 \text{ m}$$

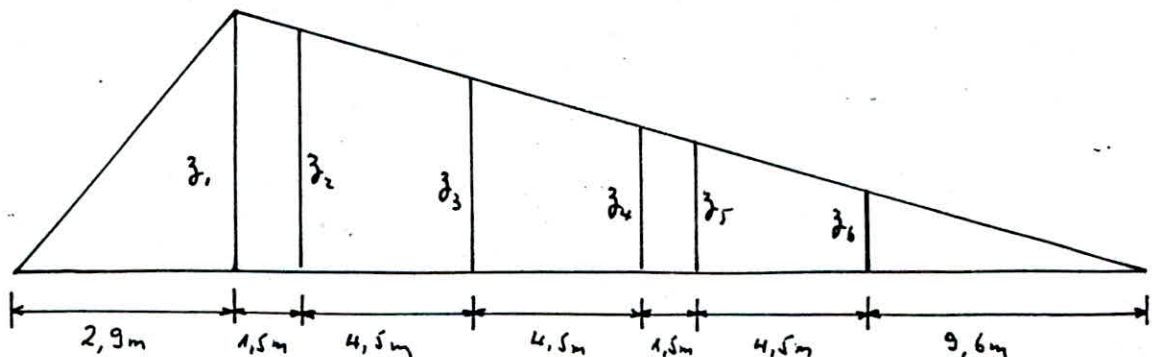
1<sup>er</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion se trouve à droite de "S":

$$0 \leq \frac{240}{26,1}$$

2<sup>ème</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion se trouve à gauche de "S":

$$\frac{48}{2,9} = 16,55 > \frac{192}{26,1} = 7,36$$

Donc l'inégalité change de signe sous le 3<sup>ème</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion.



$$\frac{z_0}{2,9} = \frac{26,1}{29} \rightarrow z_1 = 2,61 \text{ m} \quad \left\| \quad \frac{z_4}{15,6} = 0,1 \rightarrow z_4 = 1,56 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{24,6} = \frac{26,1}{26,1} \rightarrow z_2 = 2,46 \text{ m} \quad \left\| \quad \frac{z_5}{14,1} = 0,1 \rightarrow z_5 = 1,41 \text{ m}$$

$$\frac{z_3}{20,1} = 0,1 \rightarrow z_3 = 2,01 \text{ m} \quad \left\| \quad \frac{z_6}{9,6} = 0,1 \rightarrow z_6 = 0,96 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i \cdot z_i = 24(0,96 + 2,01) + 48(2,61 + 2,46 + 1,56 + 1,41)$$

$$M = 457,2 \text{ mKdaN} \rightarrow M_{B_c \textcircled{1}} = 0,8 \cdot M = 365,76 \text{ mKdaN}$$

Section ② située à 5,8 m de l'appui.

$$a = 5,8 \text{ m} ; b = 23,2 \text{ m}$$

1<sup>er</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion se trouve à droite de "S" -

$$0 < \frac{240}{23,2}$$

2<sup>ème</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion se trouve à gauche de "S"

$$\frac{48}{5,8} = 8,27 = \frac{192}{23,2}$$

Donc l'inégalité change de sens sous le 3<sup>ème</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion

$$\frac{z_1}{5,8} = \frac{23,2}{29} \rightarrow z_1 = 4,64 \text{ m} \quad \left\| \quad \frac{z_4}{12,7} = \frac{4,64}{23,2} \rightarrow z_4 = 2,54 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{21,7} = \frac{4,64}{23,2} \rightarrow z_2 = 4,34 \text{ m} \quad \left\| \quad \frac{z_5}{11,2} = \frac{4,64}{23,2} \rightarrow z_5 = 2,24 \text{ m}$$

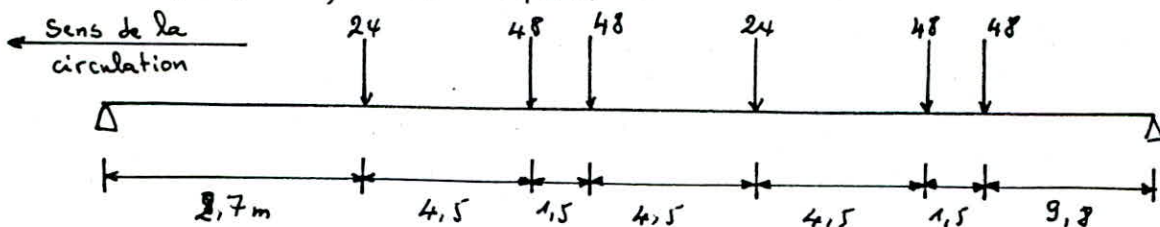
$$\frac{z_3}{17,2} = \frac{4,64}{23,2} \rightarrow z_3 = 3,44 \text{ m} \quad \left\| \quad \frac{z_6}{6,7} = \frac{4,64}{23,2} \rightarrow z_6 = 1,34 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i \cdot z_i = 24(3,44 + 1,34) + 48(4,64 + 4,34 + 2,54 + 2,24)$$

$$M = 775,2 \text{ mKdaN} \rightarrow M_{B_c \textcircled{2}} = 0,8 \cdot M = 620,16 \text{ mKdaN}$$

Section ③ située à 8,7 m de l'appui.

$$a = 8,7 \text{ m} ; b = 20,3 \text{ m}$$



1<sup>er</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion se trouve à droite de "S"

$$\frac{72}{8,7} = 8,27 > \frac{168}{20,3}$$

2<sup>e</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion se trouve à gauche de "S"

$$\frac{120}{8,7} > \frac{120}{20,3}$$

Donc l'inégalité change de sens sous le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion

$$\begin{array}{l} \frac{z_1}{2,7} = \frac{20,3}{29} \rightarrow z_1 = 1,89 \text{ m} \\ \frac{z_2}{7,2} = \frac{20,3}{29} \rightarrow z_2 = 5,04 \text{ m} \\ \frac{z_3}{8,7} = \frac{20,3}{29} \rightarrow z_3 = 6,09 \text{ m} \end{array} \quad \left\| \quad \begin{array}{l} \frac{z_4}{15,8} = \frac{8,7}{29} \rightarrow z_4 = 4,74 \text{ m} \\ \frac{z_5}{11,3} = \frac{8,7}{29} \rightarrow z_5 = 3,39 \text{ m} \\ \frac{z_6}{9,8} = \frac{8,7}{29} \rightarrow z_6 = 2,94 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$M = \sum P_i z_i = 24(1,89 + 4,74) + 48(5,04 + 6,09 + 3,39 + 2,94)$$

$$M = 997,2 \text{ mkdaN} \rightarrow M_{B, \text{④}} = 0,8 \cdot M = 797,76 \text{ mkdaN}$$

Section ④ située à 11,6 m de l'appui:

$$a = 11,6 \text{ m} ; b = 17,4 \text{ m}$$

1<sup>er</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion se trouve à droite de "S"

$$\frac{72}{11,6} = 6,21 < \frac{168}{17,4} = 9,65$$

2<sup>e</sup> cas: Le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion se trouve à gauche de "S"

$$\frac{120}{11,6} > \frac{120}{17,4}$$

Donc l'inégalité change de sens sous le 3<sup>ème</sup> essieu du 1<sup>er</sup> camion

$$\begin{array}{l} \frac{z_1}{5,6} = \frac{17,4}{29} \rightarrow z_1 = 3,36 \text{ m} \\ \frac{z_2}{10,1} = \frac{17,4}{29} \rightarrow z_2 = 6,06 \text{ m} \\ \frac{z_3}{11,6} = \frac{17,4}{29} \rightarrow z_3 = 6,96 \text{ m} \end{array} \quad \left\| \quad \begin{array}{l} \frac{z_4}{12,9} = \frac{11,6}{29} \rightarrow z_4 = 5,16 \text{ m} \\ \frac{z_5}{8,4} = \frac{11,6}{29} \rightarrow z_5 = 3,36 \text{ m} \\ \frac{z_6}{6,9} = \frac{11,6}{29} \rightarrow z_6 = 2,76 \text{ m} \end{array} \right.$$



$$M = \sum P_i z_i = 24(3,36 + 5,16) + 48(6,06 + 6,96 + 3,36 + 2,76)$$

$$M = 1123,2 \text{ m kdaN} \rightarrow M_{B_c \textcircled{4}} = 0,8 \cdot M = 898,56 \text{ m kdaN}$$

Section ⑤ à mi-travée:  $a = b = 14,5 \text{ m}$

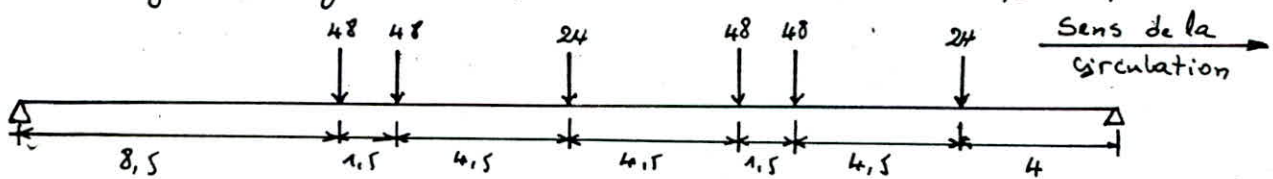
1<sup>er</sup> cas: Le 1<sup>er</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion se trouve à droite de "S"

$$\frac{96}{14,5} < \frac{144}{14,5}$$

2<sup>es</sup> cas: Le 1<sup>er</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion se trouve à gauche de "S"

$$\frac{120}{14,5} = \frac{120}{14,5}$$

Donc l'inégalité change de sens sous le 1<sup>er</sup> essieu du 2<sup>ème</sup> camion



$$\frac{z_1}{8,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_1 = 4,25 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{10} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_2 = 5 \text{ m}$$

$$\frac{z_3}{14,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_3 = 7,25 \text{ m}$$

$$\frac{z_4}{10} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_4 = 5 \text{ m}$$

$$\frac{z_5}{8,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_5 = 4,25 \text{ m}$$

$$\frac{z_6}{4} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_6 = 2 \text{ m}$$

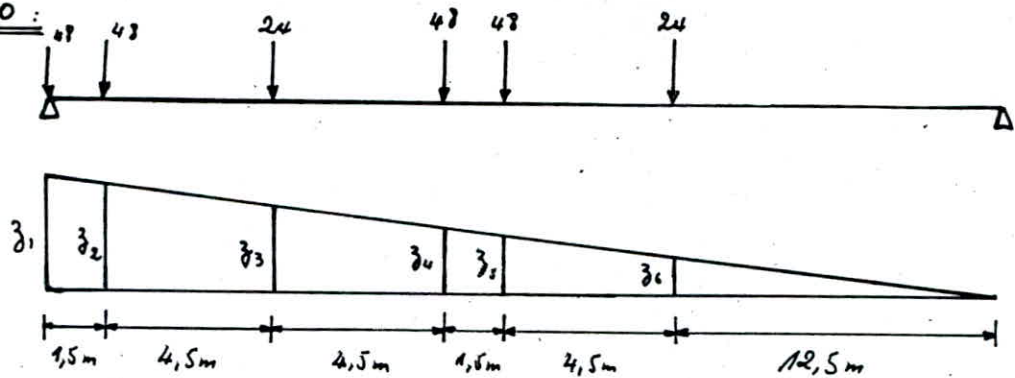
$$M = \sum P_i z_i = 24(7,25 + 2) + 48(4,25 + 5 + 5 + 4,25)$$

$$M = 1110 \text{ m kdaN} \rightarrow M_{B_c \textcircled{5}} = 0,8 \cdot M = 888 \text{ m kdaN}$$

## Evaluation des efforts tranchants dans chaque section

43

Section 0 :



$$z_1 = 1$$

$$z_2 = z_1 \cdot \frac{27,5}{29} = 0,948$$

$$z_3 = z_1 \cdot \frac{23}{29} = 0,793$$

$$z_4 = z_1 \cdot \frac{18,5}{29} = 0,638$$

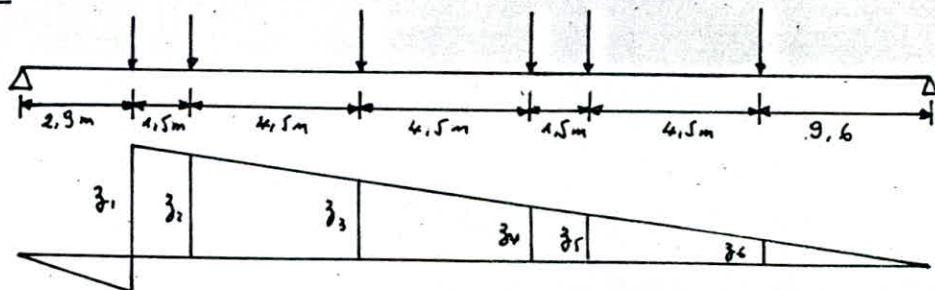
$$z_5 = z_1 \cdot \frac{17}{29} = 0,586$$

$$z_6 = z_1 \cdot \frac{12,5}{29} = 0,431$$

$$T = \sum P_i z_i = 24(0,793 + 0,431) + 48(1 + 0,948 + 0,638 + 0,586)$$

$$T = 181,632 \text{ KdaN} \rightarrow T_{Dc_0} = 0,8 \cdot T = 145,3 \text{ KdaN}$$

Section 1 :



$$\frac{z_1}{26,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,9$$

$$\frac{z_2}{24,6} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,848$$

$$\frac{z_3}{20,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z_3 = 0,693$$

$$\frac{z_4}{15,6} = \frac{1}{29} \rightarrow z_4 = 0,538$$

$$\frac{z_5}{14,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z_5 = 0,486$$

$$\frac{z_6}{9,6} = \frac{1}{29} \rightarrow z_6 = 0,331$$

$$T = \sum P_i z_i = 24(0,693 + 0,331) + 48(0,9 + 0,848 + 0,538 + 0,486)$$

$$T = 157,632 \text{ KdaN} \rightarrow T_{Dc_1} = 0,8T = 126,1 \text{ KdaN}$$

Section 2:

$$\begin{array}{l} \frac{z_1}{23,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,8 \\ \frac{z_2}{21,7} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,748 \\ \frac{z_3}{17,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z_3 = 0,593 \end{array} \quad \left\| \quad \begin{array}{l} \frac{z_4}{12,7} = \frac{1}{29} \rightarrow z_4 = 0,438 \\ \frac{z_5}{11,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z_5 = 0,386 \\ \frac{z_6}{6,7} = \frac{1}{29} \rightarrow z_6 = 0,231 \end{array} \right.$$

$$T = \sum P_i z_i = 24(0,593 + 0,231) + 48(0,8 + 0,748 + 0,438 + 0,386)$$

$$T = 133,632 \text{ kDaN} \rightarrow T_{B_{L_2}} = 0,8 \cdot T = 106,9 \text{ kDaN}$$

Section 3:

$$\begin{array}{l} \frac{z_1}{20,3} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,7 \\ \frac{z_2}{18,8} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,648 \\ \frac{z_3}{14,3} = \frac{1}{29} \rightarrow z_3 = 0,493 \end{array} \quad \left\| \quad \begin{array}{l} \frac{z_4}{9,8} = \frac{1}{29} \rightarrow z_4 = 0,338 \\ \frac{z_5}{8,3} = \frac{1}{29} \rightarrow z_5 = 0,286 \\ \frac{z_6}{3,8} = \frac{1}{29} \rightarrow z_6 = 0,131 \end{array} \right.$$

$$T = \sum P_i z_i = 24(0,493 + 0,131) + 48(0,7 + 0,648 + 0,338 + 0,286)$$

$$T = 109,632 \text{ kDaN} \rightarrow T_{B_{L_3}} = 0,8 \cdot T = 87,7 \text{ kDaN}$$

Section 4:

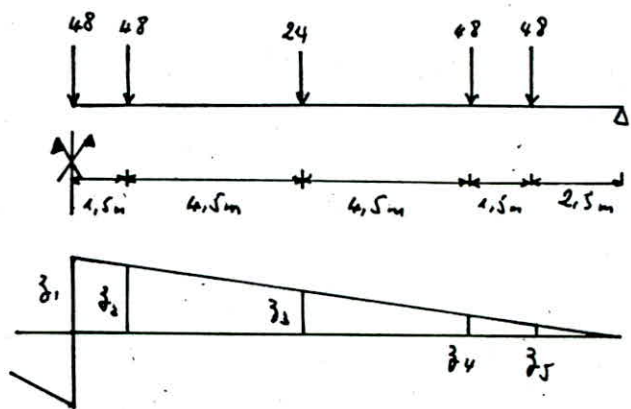
$$\begin{array}{l} \frac{z_1}{17,4} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,6 \\ \frac{z_2}{15,9} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,548 \\ \frac{z_3}{11,4} = \frac{1}{29} \rightarrow z_3 = 0,393 \end{array} \quad \left\| \quad \begin{array}{l} \frac{z_4}{6,9} = \frac{1}{29} \rightarrow z_4 = 0,238 \\ \frac{z_5}{5,4} = \frac{1}{29} \rightarrow z_5 = 0,186 \\ \frac{z_6}{0,9} = \frac{1}{29} \rightarrow z_6 = 0,03 \end{array} \right.$$

$$T = \sum P_i z_i = 24(0,393 + 0,03) + 48(0,6 + 0,548 + 0,238 + 0,186)$$

$$T = 85,608 \text{ kDaN} \rightarrow T_{B_{L_4}} = 0,8 \cdot T = 68,486 \text{ kDaN}$$

Section 5:

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{14,5} &= \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,5 \\ \frac{z_2}{13} &= \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,448 \\ \frac{z_3}{8,5} &= \frac{1}{29} \rightarrow z_3 = 0,293 \\ \frac{z_4}{4} &= \frac{1}{29} \rightarrow z_4 = 0,138 \\ \frac{z_5}{2,5} &= \frac{1}{29} \rightarrow z_5 = 0,086 \end{aligned}$$



$$T = \sum P_i z_i = 24 \cdot 0,293 + 48(0,5 + 0,448 + 0,138 + 0,086)$$

$$T = 63,288 \text{ kdaN} \rightarrow T_{Bc5} = 0,8 \cdot T = 50,63 \text{ kdaN}$$

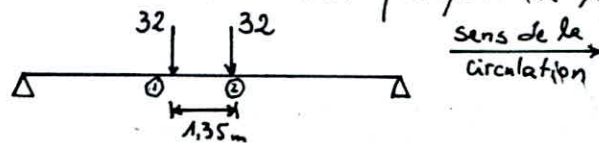
Surcharge  $B_E$ :

Longitudinalement, on place un tandem par file

Transversalement on place 2 tandems

Recherche de la section dangereuse

On procedera de la même manière que pour le systeme  $B_c$



$$R = 64 \text{ kdaN} \quad \frac{R}{2} = 32 \text{ kdaN}$$

$$\sum_{i=1}^{k-1} P_k \leq \frac{R}{2} \leq \sum_{i=1}^n P_k$$

section ①:  $0 < 32 \leq 32$  vérifié

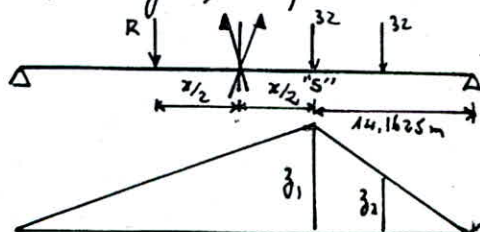
section ②:  $32 \leq 32 < 64$  vérifié

La section ① donne les mêmes résultats que si l'on considère la section ②

Point d'application de  $R$  par rapport à la section ①

$$R \cdot x = 32 \cdot 1,35 \rightarrow x = \frac{32 \cdot 1,35}{64} = 0,675 \text{ m}$$

1<sup>er</sup> cas: Les charges sont placées au droit de la section "S"

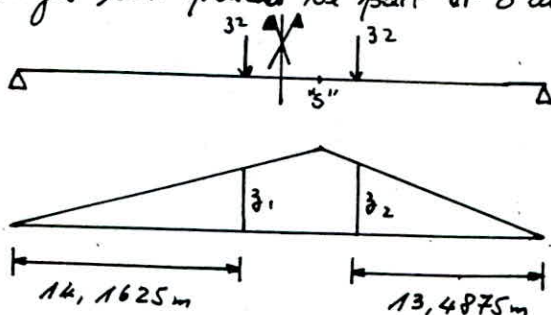


$$\frac{z_1}{14,1625} = \frac{14,8375}{29} \rightarrow z_1 = 7,246 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{12,8125} = \frac{14,8375}{29} \rightarrow z_2 = 6,555 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i z_i = 32(7,246 + 6,555) = 441,632 \text{ m kdaN}$$

2<sup>o</sup> cas : Les charges sont placées de part et d'autre de la section "S"



$$\frac{z_1}{14,1625} = \frac{15,5125}{29} \rightarrow z_1 = 7,5757 \text{ m}$$

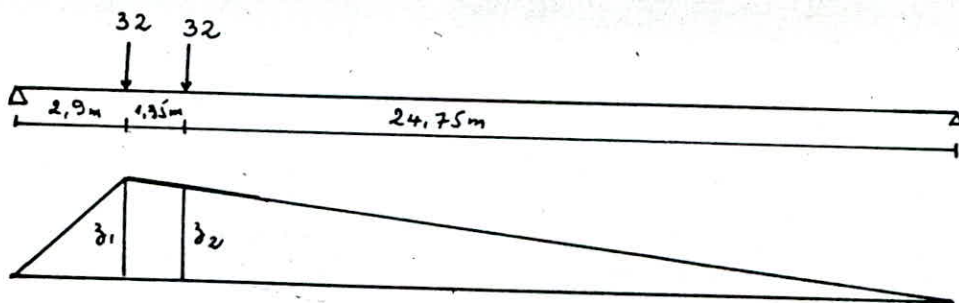
$$\frac{z_2}{13,4875} = \frac{15,5125}{29} \rightarrow z_2 = 7,2146 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i z_i = 32(7,5757 + 7,2146) = 473,29 \text{ m kdaN}$$

On retiendra donc le 2<sup>ème</sup> cas

Évaluation des moments fléchissants dans chaque section :

Section ① :



$$\frac{z_1}{2,9} = \frac{26,1}{29} \rightarrow z_1 = 2,61 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{24,75} = \frac{2,9}{29} \rightarrow z_2 = 2,475 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i z_i = 32(2,61 + 2,475) = 162,72 \text{ m kdaN}$$

Section ② :

$$\frac{z_1}{5,8} = \frac{23,2}{29} \rightarrow z_1 = 4,64 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{21,85} = \frac{5,8}{29} \rightarrow z_2 = 4,37 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i z_i = 32(4,64 + 4,37) = 288,32 \text{ m kdaN}$$

Section ③:

$$\frac{z_1}{8,7} = \frac{20,3}{29} \rightarrow z_1 = 6,09 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{18,95} = \frac{8,7}{29} \rightarrow z_2 = 5,685 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i z_i = 32 (6,09 + 5,685) = 376,8 \text{ mKdaN}$$

Section ④:

$$\frac{z_1}{11,6} = \frac{17,4}{29} \rightarrow z_1 = 6,96 \text{ m}$$

$$\frac{z_2}{16,05} = \frac{11,6}{29} \rightarrow z_2 = 6,42 \text{ m}$$

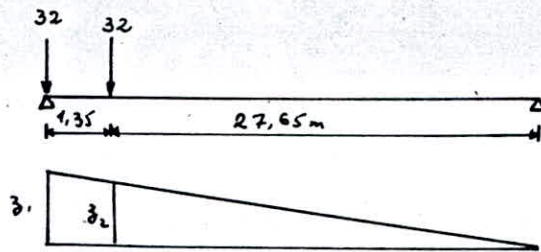
$$M = \sum P_i z_i = 32 (6,96 + 6,42) = 428,16 \text{ mKdaN}$$

Section ⑤:

$$\frac{z_1}{14,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_1 = 7,25 \text{ m}$$

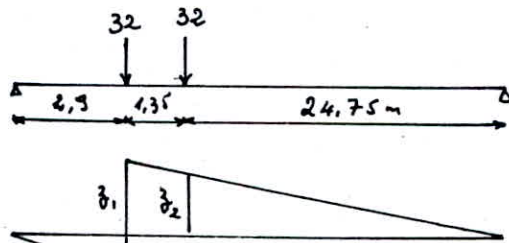
$$\frac{z_2}{13,15} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z_2 = 6,575 \text{ m}$$

$$M = \sum P_i z_i = 32 (7,25 + 6,575) = 442,4 \text{ mKdaN}$$

Evaluation de l'effort tranchant:Section 0:

$$z_1 = 1 \quad ; \quad \frac{z_2}{27,65} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,953$$

$$T = \sum P_i z_i = 32 (1 + 0,953) = 62,51 \text{ kdaN}$$

Section ①:

$$\frac{z_1}{26,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,9$$

$$\frac{z_2}{24,75} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,853$$

$$T = \sum P_i z_i = 32 (0,9 + 0,853) = 56,11 \text{ kdaN}$$

Section ②:

$$\frac{z_1}{23,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,8$$

$$\frac{z_2}{21,85} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,753$$

$$T = \sum P_i z_i = 32(0,8 + 0,753) = 49,71 \text{ kdaN}$$

Section ③:

$$\frac{z_1}{20,3} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,7$$

$$\frac{z_2}{18,95} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,653$$

$$T = \sum P_i z_i = 32(0,7 + 0,653) = 43,31 \text{ kdaN}$$

Section ④:

$$\frac{z_1}{17,4} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,6$$

$$\frac{z_2}{16,05} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,553$$

$$T = \sum P_i z_i = 32(0,6 + 0,553) = 36,91 \text{ kdaN}$$

Section ⑤:

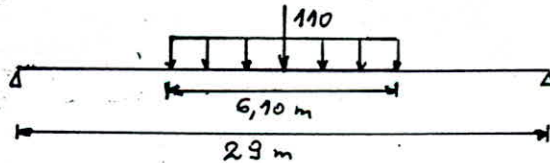
$$\frac{z_1}{14,5} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,5$$

$$\frac{z_2}{13,15} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,453$$

$$T = \sum P_i z_i = 32(0,5 + 0,453) = 30,51 \text{ kdaN}$$

Surcharge MC120

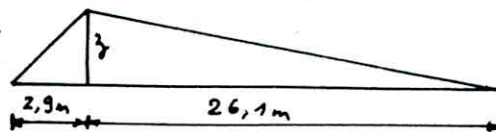
On place un seul char sur une travée de manière à avoir l'effet le plus défavorable



Recherche de la section dangereuse

Dans ce cas, la section dangereuse se trouve à mi-travée soit à 14,5 m de l'appui.

Evaluation des moments flechissant dans chaque section:

Section ①:

$$\frac{z}{26,1} = \frac{2,9}{29} \rightarrow z = 2,61$$

$$M = P \cdot z = 110 \cdot 2,61 = 287,1 \text{ m kdaN}$$

Section ②:

$$\frac{z}{23,2} = \frac{5,8}{29} \rightarrow z = 4,64 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 110 \cdot 4,64 = 510,4 \text{ mKdaN}$$

Section ③:

$$\frac{z}{20,3} = \frac{8,7}{29} \rightarrow z = 6,09 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 110 \cdot 6,09 = 669,9 \text{ mKdaN}$$

Section ④:

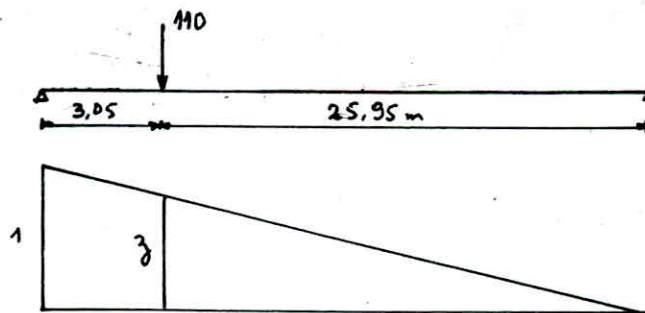
$$\frac{z}{17,4} = \frac{11,6}{29} \rightarrow z = 6,96 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 110 \cdot 6,96 = 765,6 \text{ mKdaN}$$

Section ⑤:

$$\frac{z}{14,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z = 7,25 \text{ m}$$

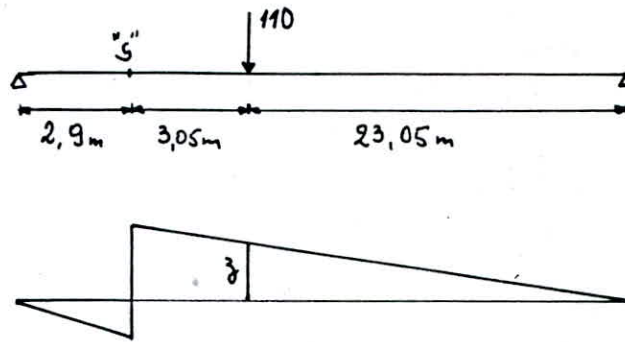
$$M = P \cdot z = 110 \cdot 7,25 = 797,5 \text{ mKdaN}$$

Evaluation des efforts tranchants:Section 0: Cette section est située à 3,05 m de l'appui

$$\frac{z}{25,95} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,894$$

$$T = P \cdot z = 110 \cdot 0,894 = 98,43 \text{ KdaN}$$



Section ①:

$$\frac{\zeta}{23,05} = \frac{1}{29} \rightarrow \zeta_1 = 0,795$$

$$T = P \cdot \zeta = 110 \cdot 0,795 = 87,43 \text{ kdaN}$$

Section ②:

$$\frac{\zeta}{20,15} = \frac{1}{29} \rightarrow \zeta = 0,695$$

$$T = P \cdot \zeta = 110 \cdot 0,695 = 76,43 \text{ kdaN}$$

Section ③:

$$\frac{\zeta}{17,25} = \frac{1}{29} \rightarrow \zeta = 0,595$$

$$T = P \cdot \zeta = 110 \cdot 0,595 = 65,43 \text{ kdaN}$$

Section ④:

$$\frac{\zeta}{14,35} = \frac{1}{29} \rightarrow \zeta = 0,495$$

$$T = P \cdot \zeta = 110 \cdot 0,495 = 54,43 \text{ kdaN}$$

Section ⑤:

$$\frac{\zeta}{11,45} = \frac{1}{29} \rightarrow \zeta = 0,395$$

$$T = P \cdot \zeta = 110 \cdot 0,395 = 43,43 \text{ kdaN}$$

Efforts dus aux surcharges de trottoir:

Pour le calcul des poutres principales, la surcharge de trottoir est de  $150 \text{ kg/m}^2$

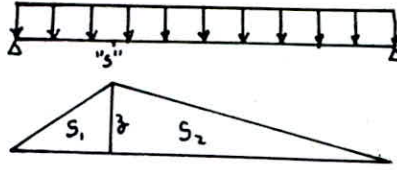
Un que nos trottoirs sont identiques, on distinguera un seul cas.

On utilisera les lignes d'influence pour la détermination des efforts.

Surcharge de trottoir:

$$q = 150 \times 2,1665 = 325 \text{ kg/ml}$$

Évaluation du moment fléchissant dans chaque section:



Section ①:

$$\frac{z}{2,9} = \frac{26,1}{29} \rightarrow z = 2,61 \text{ m}$$

$$M = (S_1 + S_2) \cdot q = \left[ \frac{1}{2} (2,9 \times 2,61) + \frac{1}{2} (2,61 \times 26,1) \right] \times 325 = 12,29 \text{ mKdaN}$$

Section ②:

$$\frac{z}{5,8} = \frac{23,2}{29} \rightarrow z = 4,64 \text{ m}$$

$$M = (S_1 + S_2) q = \left[ \frac{1}{2} (5,8 \times 4,64) + \frac{1}{2} (4,64 \times 23,2) \right] \times 325 = 21,86 \text{ mKdaN}$$

Section ③:

$$\frac{z}{8,7} = \frac{20,3}{29} \rightarrow z = 6,09 \text{ m}$$

$$M = (S_1 + S_2) q = \left[ \frac{1}{2} (8,7 \times 6,09) + \frac{1}{2} (6,09 \times 20,3) \right] \times 325 = 28,7 \text{ mKdaN}$$

Section ④:

$$\frac{z}{11,6} = \frac{17,4}{29} \rightarrow z = 6,96 \text{ m}$$

$$M = (S_1 + S_2) q = \left[ \frac{1}{2} (11,6 \times 6,96) + \frac{1}{2} (6,96 \times 17,4) \right] \times 325 = 32,79 \text{ mKdaN}$$

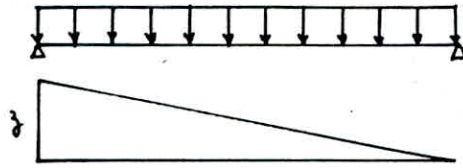
Section ⑤:

$$\frac{z}{14,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z = 7,25 \text{ m}$$

$$M = (S_1 + S_2) q = \left[ \frac{1}{2} (14,5 \times 7,25) + \frac{1}{2} (7,25 \times 14,5) \right] \times 325 = 34,17 \text{ mKdaN}$$

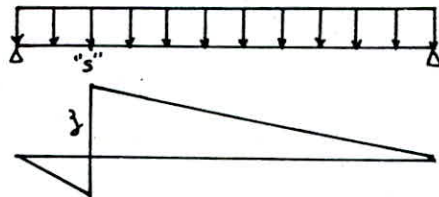
## Évaluation de l'effort tranchant

Section 0:



$$z = 1 \quad T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 325 \cdot \frac{29}{2} \cdot 1 = 4,71 \text{ kdaN}$$

Section ①:



$$\frac{z}{26,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,9$$

$$T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 325 \cdot \frac{29}{2} \cdot 0,9 = 4,24 \text{ kdaN}$$

Section ②:

$$\frac{z}{23,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,8$$

$$T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 325 \cdot \frac{29}{2} \cdot 0,8 = 3,77 \text{ kdaN}$$

Section ③:

$$\frac{z}{20,3} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,7$$

$$T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 325 \cdot \frac{29}{2} \cdot 0,7 = 3,3 \text{ kdaN}$$

Section ④:

$$\frac{z}{17,4} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,6$$

$$T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 325 \cdot \frac{29}{2} \cdot 0,6 = 2,83 \text{ kdaN}$$

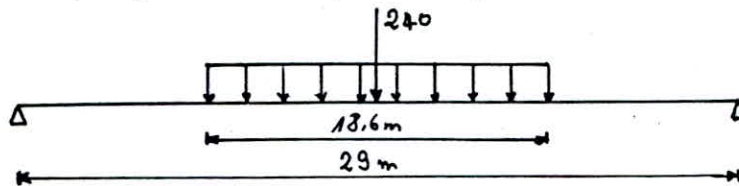
Section ⑤:

$$\frac{z}{14,5} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,5$$

$$T = q \cdot \frac{l}{2} \cdot z = 325 \cdot \frac{29}{2} \cdot 0,5 = 2,36 \text{ kdaN}$$

Systeme D

On place un seul convoi sur la travée

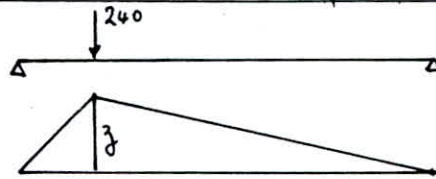


Recherche de la section dangereuse:

Dans ce cas, la section dangereuse se trouve à mi-travée soit à 14,5 m de l'appui

Evaluation des moments fléchissants dans chaque section:

Section ①:



$$\frac{z}{26,1} = \frac{2,9}{29} \rightarrow z = 2,61 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 240 \times 2,61 = 626,4 \text{ mKdaN}$$

Section ②:

$$\frac{z}{23,2} = \frac{5,8}{29} \rightarrow z = 4,64 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 240 \times 4,64 = 1113,6 \text{ mKdaN}$$

Section ③:

$$\frac{z}{20,3} = \frac{8,7}{29} \rightarrow z = 6,06 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 240 \times 6,06 = 1461,6 \text{ mKdaN}$$

Section ④:

$$\frac{z}{17,4} = \frac{11,6}{29} \rightarrow z = 6,96 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 240 \times 6,96 = 1670,4 \text{ mKdaN}$$

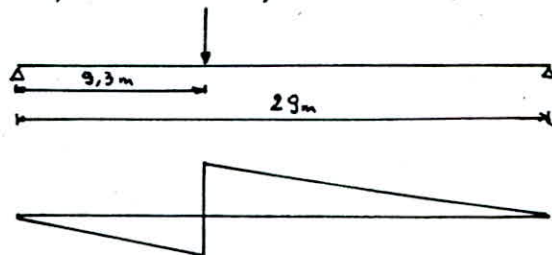
Section ⑤:

$$\frac{z}{14,5} = \frac{14,5}{29} \rightarrow z = 7,25 \text{ m}$$

$$M = P \cdot z = 240 \times 7,25 = 1740 \text{ mKdaN}$$

### Evaluation de l'effort tranchant :

Section 0 : Cette section sera située à 9,3 m de l'appui



$$\frac{z}{19,7} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,679$$

$$T = P \cdot z = 240 \times 0,679 = 163,03 \text{ kdaN}$$

Section ① :

$$\frac{z}{16,8} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,579$$

$$T = P \cdot z = 240 \times 0,579 = 139,03 \text{ kdaN}$$

Section ② :

$$\frac{z}{14,9} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,514$$

$$T = P \cdot z = 240 \times 0,514 = 123,3 \text{ kdaN}$$

Section ③ :

$$\frac{z}{12} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,414$$

$$T = P \cdot z = 240 \times 0,414 = 99,3 \text{ kdaN}$$

Section ④ :

$$\frac{z}{9,1} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,314$$

$$T = P \cdot z = 240 \times 0,314 = 75,3 \text{ kdaN}$$

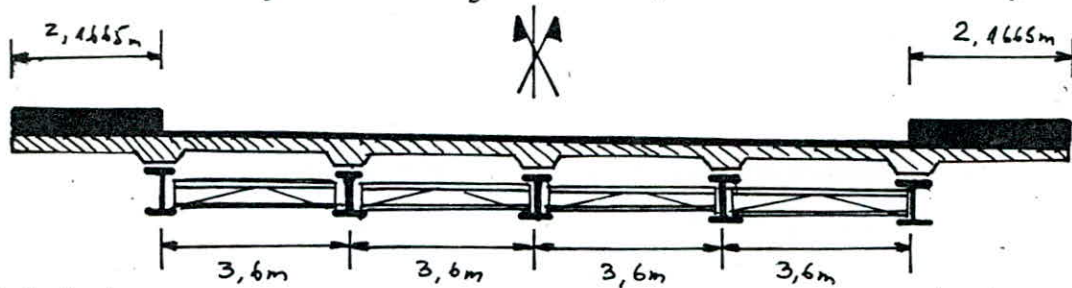
Section ⑤ :

$$\frac{z}{6,2} = \frac{1}{29} \rightarrow z = 0,214$$

$$T = P \cdot z = 240 \times 0,214 = 51,3 \text{ kdaN}$$

Le calcul des coefficients de repartition sur les poutres principales pour le cas d'un pont à poutres multiples sous chaussée se fera suivant la methode de COURBON dont la theorie suppose que :

- Les entretoises sont infiniment rigides.
- Les entretoises reposent sur des appuis elastiques  
(ces appuis forment la jonction poutres-entretoises)



Calcul des coefficients de Repartition:

Les efforts revenant à la poutre  $i$  sont donnés par les formules suivantes:

$$M_i = \frac{M}{n} \left[ 1 - \frac{6(n+1-2i)}{n^2-1} \frac{e}{\lambda} \right]$$

$$T_i = \frac{T}{n} \left[ 1 - \frac{6(n+1-2i)}{n^2-1} \frac{e}{\lambda} \right]$$

avec:

$M_i$ : represente le moment revenant à la poutre  $i$

$M$ : represente le moment revenant à  $n$  poutres

$n$ : nombre de poutres principales de même inertie

$i$ : numero de la poutre étudiée.

$e$ : distance entre l'axe de symetrie du systeme porteur et la resultante des forces.

$\lambda$ : espacement de deux poutres principales successives

$T_i$ : represente l'effort tranchant revenant à la poutre  $i$

$T$ : represente l'effort tranchant revenant à  $n$  poutres

Le coefficient de répartition est:

$$f = \frac{M_i}{M} = \frac{T_i}{T}$$

$$f = \frac{1}{n} \left[ 1 - \frac{6(n+2i)}{n^2-1} \frac{e}{\lambda} \right]$$

$$n = 5 ; \quad \lambda = 3,6 \text{ m}$$

$$\text{donc } f = \frac{1}{5} \left[ 1 - \frac{(3-i)e}{7,2} \right]$$

$$\text{Poutre Principale n}^\circ \text{ ① : } f = \frac{1}{5} \left( 1 - \frac{e}{3,6} \right)$$

$$\text{Poutre Principale n}^\circ \text{ ② : } f = \frac{1}{5} \left( 1 - \frac{e}{7,2} \right)$$

$$\text{Poutre Principale n}^\circ \text{ ③ : } f = \frac{1}{5} \quad \forall \text{ Le chargement}$$

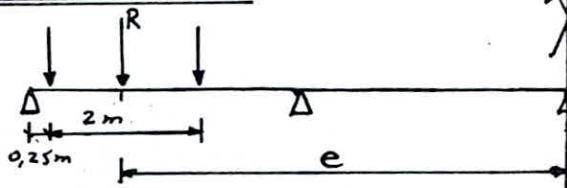
$$\text{Poutre Principale n}^\circ \text{ ④ : } f = \frac{1}{5} \left( 1 + \frac{e}{7,2} \right)$$

$$\text{Poutre Principale n}^\circ \text{ ⑤ : } f = \frac{1}{5} \left( 1 + \frac{e}{3,6} \right)$$

Calcul de l'excentricité e sous les différents cas de charge et surcharge:

1/ Surcharge Bc:

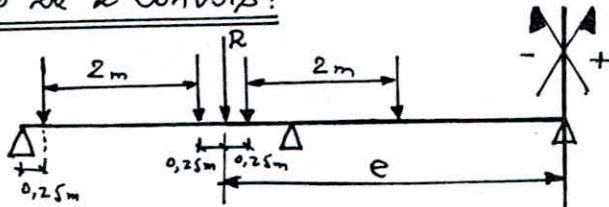
a/ Cas d'un convoi:



on place le convoi le plus à gauche possible à 0,25m de la bordure du trottoir

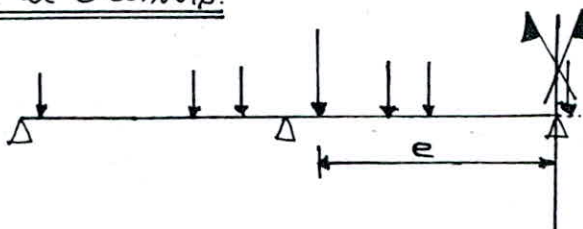
$$e = -7,2 + 0,25 + 1 = -5,95 \text{ m}$$

b/ Cas de 2 convois:



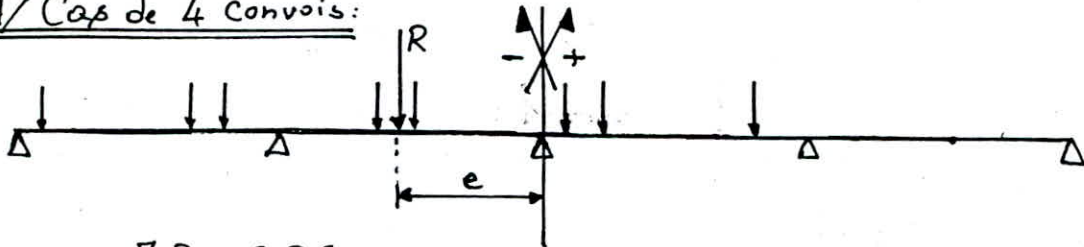
$$e = -7,2 + 0,25 + 2 + 0,25 = -4,7 \text{ m}$$

c/ Cas de 3 convois:



$$e = -7,2 + 0,25 + 2 + 0,5 + 1 = -3,45 \text{ m}$$

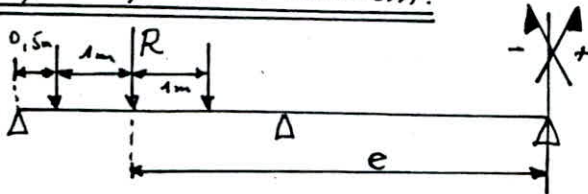
d/ Cas de 4 convois:



$$e = -7,2 + 0,25 + 2 + 0,5 + 2 + 0,25 = -2,2 \text{ m}$$

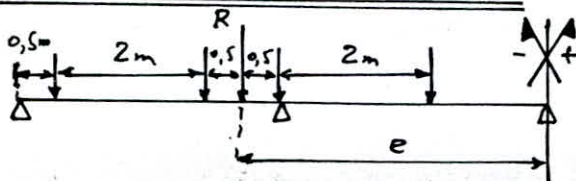
2/ Surcharge B<sub>t</sub>:

a/ Cas d'un tandem:



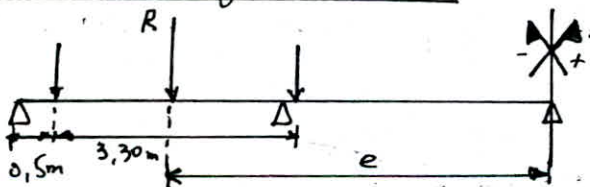
$$e = -7,2 + 0,5 + 1 = -5,7 \text{ m}$$

b/ Cas de deux tandems:



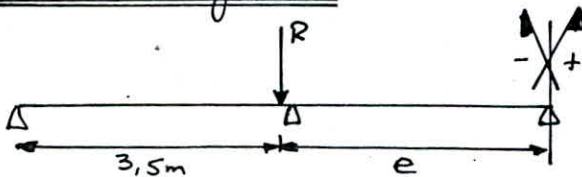
$$e = -7,2 + 0,5 + 2 + 0,5 = -4,2 \text{ m}$$

3/ Surcharge Mc 120:



$$e = -7,2 + 0,5 + \frac{3,3}{2} = -5,05 \text{ m}$$

4/ Surcharge D:

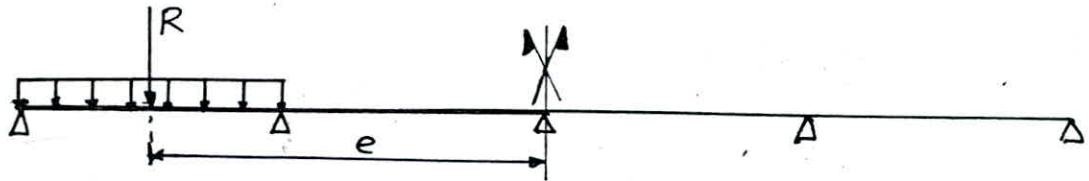


$$e = -7,2 + 3,5 = -3,7 \text{ m}$$



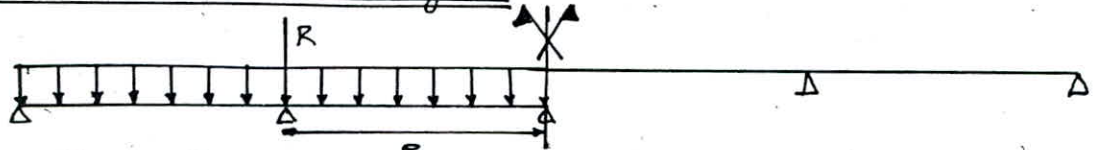
5/ Surcharge A:

a/ Cas d'une voie chargée:



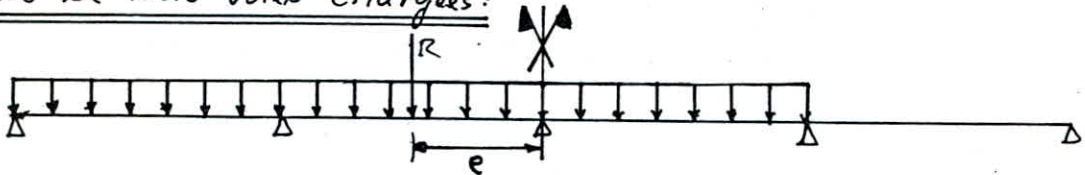
$$e = -7,2 + \frac{3,6}{2} = -5,4 \text{ m}$$

b/ Cas de deux voies chargées:



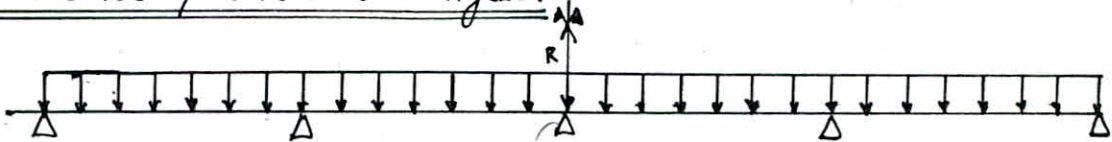
$$e = -7,2 + 3,6 = -3,6 \text{ m}$$

c/ Cas de trois voies chargées:



$$e = -7,2 + \frac{3}{2} \cdot 3,6 = -1,8 \text{ m}$$

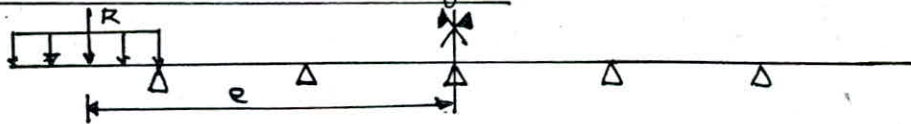
d/ Cas de quatre voies chargées:



$$e = 0$$

6/ Surcharges de trottoir (Surcharges générales)

a/ Cas d'un trottoir chargé:



$$e = -7,2 - \frac{2,1665}{2} = -8,28 \text{ m}$$

b/ Cas de 2 trottoirs chargés

$e = 0$  (car on a 2 trottoirs symétriques / PP n° ③ et identiques)

Calcul des coefficients de répartition:

voir tableau

Tableau des moments fléchissants non pondérés et non majorés

| Section              |             | 0 | 1      | 2      | 3       | 4       | 5       |
|----------------------|-------------|---|--------|--------|---------|---------|---------|
| Surcharges           |             |   |        |        |         |         |         |
| CP                   |             | 0 | 516,36 | 917,97 | 1204,83 | 1376,95 | 1434,32 |
| CCP                  |             | 0 | 98,66  | 175,4  | 230,21  | 263,1   | 274,06  |
| A                    | 1 voie      | 0 | 116,47 | 207,05 | 271,75  | 310,57  | 323,52  |
|                      | 2 voies     | 0 | 232,93 | 414,11 | 543,5   | 621,15  | 647,05  |
|                      | 3 voies     | 0 | 349,4  | 621,16 | 815,25  | 931,72  | 970,57  |
|                      | 4 voies     | 0 | 465,87 | 828,22 | 1087    | 1242,3  | 1294,1  |
| BC                   | 1 voie      | 0 | 137,16 | 232,56 | 299,16  | 336,96  | 333     |
|                      | 2 voies     | 0 | 251,46 | 426,36 | 548,46  | 617,76  | 610,5   |
|                      | 3 voies     | 0 | 325,75 | 552,33 | 710,5   | 800,28  | 790,87  |
|                      | 4 voies     | 0 | 365,76 | 620,16 | 797,76  | 898,56  | 888     |
| Bt                   | 1 tandem    | 0 | 81,36  | 144,16 | 188,4   | 214,08  | 221,2   |
|                      | 2 tandems   | 0 | 162,72 | 288,32 | 376,8   | 428,16  | 442,4   |
| D                    |             | 0 | 626,4  | 1113,6 | 1461,6  | 1670,4  | 1740    |
| Mc120                |             | 0 | 287,1  | 510,4  | 669,9   | 765,6   | 797,5   |
| Surcharges trottoirs | 1 trottoir  | 0 | 12,29  | 21,86  | 28,7    | 32,79   | 34,17   |
|                      | 2 trottoirs | 0 | 24,58  | 43,73  | 57,4    | 65,58   | 68,34   |

Tableau des efforts tranchants non pondérés et non majorés

| Section                 |             | 0       | 1      | 2      | 3      | 4      | 5     |
|-------------------------|-------------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Surcharges              |             |         |        |        |        |        |       |
| CP                      |             | 197,84  | 158,27 | 118,71 | 79,13  | 39,57  | 0     |
| CCP                     |             | 37,8    | 30,24  | 22,68  | 15,12  | 7,56   | 0     |
| A                       | 1 voie      | 44,62   | 36,22  | 30,51  | 25,08  | 19,93  | 15,11 |
|                         | 2 voies     | 89,25   | 72,44  | 61,03  | 50,15  | 39,86  | 30,23 |
|                         | 3 voies     | 133,87  | 108,66 | 91,54  | 75,23  | 59,79  | 45,34 |
|                         | 4 voies     | 178,495 | 144,88 | 122,06 | 100,31 | 79,72  | 60,46 |
| BC                      | 1 voie      | 54,49   | 47,29  | 40,08  | 32,89  | 25,68  | 18,98 |
|                         | 2 voies     | 99,89   | 86,7   | 73,5   | 60,3   | 47,08  | 34,81 |
|                         | 3 voies     | 129,41  | 112,31 | 95,21  | 78,11  | 61     | 45,09 |
|                         | 4 voies     | 145,3   | 126,1  | 106,9  | 87,7   | 68,486 | 50,63 |
| Bt                      | 1 tandem    | 31,25   | 28,05  | 24,85  | 21,65  | 18,45  | 15,25 |
|                         | 2 tandem    | 62,51   | 56,11  | 49,71  | 43,31  | 36,91  | 30,51 |
| D                       |             | 163,03  | 139,03 | 123,3  | 99,3   | 75,3   | 51,3  |
| Mc 120                  |             | 98,43   | 87,43  | 76,43  | 65,43  | 54,43  | 43,43 |
| Surcharges<br>frottoirs | 1 frottoir  | 4,71    | 4,24   | 3,77   | 3,3    | 2,83   | 2,36  |
|                         | 2 frottoirs | 9,42    | 8,48   | 7,54   | 6,6    | 5,66   | 4,72  |

Tableau des coefficients de repartition dans les poutres principales

| Poutre<br>chargement   |             | 1      | 2      | 3   | 4      | 5      |
|------------------------|-------------|--------|--------|-----|--------|--------|
| CP                     |             | 0,2    | 0,2    | 0,2 | 0,2    | 0,2    |
| CCP                    |             | 0,2    | 0,2    | 0,2 | 0,2    | 0,2    |
| A                      | 1 voie      | 0,5    | 0,35   | 0,2 | 0,35   | 0,5    |
|                        | 2 voies     | 0,4    | 0,3    | 0,2 | 0,3    | 0,4    |
|                        | 3 voies     | 0,3    | 0,25   | 0,2 | 0,25   | 0,3    |
|                        | 4 voies     | 0,2    | 0,2    | 0,2 | 0,2    | 0,2    |
| BC                     | 1 voie      | 0,5305 | 0,3653 | 0,2 | 0,3653 | 0,5305 |
|                        | 2 voies     | 0,4611 | 0,3305 | 0,2 | 0,3305 | 0,4611 |
|                        | 3 voies     | 0,3916 | 0,2958 | 0,2 | 0,2958 | 0,3916 |
|                        | 4 voies     | 0,3222 | 0,2611 | 0,2 | 0,2611 | 0,3222 |
| Bt                     | 1 tandem    | 0,5166 | 0,3583 | 0,2 | 0,3583 | 0,5166 |
|                        | 2 tandem    | 0,4333 | 0,3166 | 0,2 | 0,3166 | 0,4333 |
| D                      |             | 0,4055 | 0,3028 | 0,2 | 0,3028 | 0,4055 |
| Mc 120                 |             | 0,4805 | 0,3403 | 0,2 | 0,3403 | 0,4805 |
| Surcharge<br>trottoirs | 1 trottoir  | 0,66   | 0,43   | 0,2 | 0,43   | 0,66   |
|                        | 2 trottoirs | 0,2    | 0,2    | 0,2 | 0,2    | 0,2    |

SECTION : 0

POUTRE PRINCIPALE 1 - 5

| charges                     | Coeff. de répartition | M (mKdan) | T (Kdan) | S     | M majoré | T majoré | Coeff. de Pondération | M maj. pond | T maj. pond |       |
|-----------------------------|-----------------------|-----------|----------|-------|----------|----------|-----------------------|-------------|-------------|-------|
| CP                          | 0,2                   | 0         | 39,568   | 1     | 0        | 39,568   | 1,32                  | 0           | 52,23       |       |
| CCP                         | 0,2                   | 0         | 7,56     | 1     | 0        | 7,56     | 1,32                  | 0           | 9,98        |       |
| Surcharge A                 | 1 voie                | 0,5       | 0        | 22,31 | 1        | 0        | 22,31                 | 1,6         | 0           | 35,7  |
|                             | 2 voies               | 0,4       | 0        | 35,7  | 1        | 0        | 35,7                  | 1,6         | 0           | 57,12 |
|                             | 3 voies               | 0,3       | 0        | 40,16 | 1        | 0        | 40,16                 | 1,6         | 0           | 64,26 |
|                             | 4 voies               | 0,2       | 0        | 35,7  | 1        | 0        | 35,7                  | 1,6         | 0           | 57,12 |
| Surcharge BC                | 1 voie                | 0,5305    | 0        | 28,9  | 1,114    | 0        | 32,2                  | 1,6         | 0           | 51,5  |
|                             | 2 voies               | 0,4611    | 0        | 46,06 | 1,114    | 0        | 51,31                 | 1,6         | 0           | 82,09 |
|                             | 3 voies               | 0,3916    | 0        | 50,67 | 1,114    | 0        | 56,45                 | 1,6         | 0           | 90,33 |
|                             | 4 voies               | 0,3222    | 0        | 46,82 | 1,114    | 0        | 52,15                 | 1,6         | 0           | 83,44 |
| Surcharge M                 | 1 travée              | 0,5166    | 0        | 16,14 | 1,114    | 0        | 17,98                 | 1,6         | 0           | 28,77 |
|                             | 2 travées             | 0,4333    | 0        | 27,08 | 1,114    | 0        | 30,17                 | 1,6         | 0           | 48,28 |
| Surcharge D                 | 0,4055                | 0         | 66,11    | 1     | 0        | 66,11    | 1,32                  | 0           | 87,26       |       |
| Surcharge M <sub>c120</sub> | 0,4805                | 0         | 47,29    | 1,092 | 0        | 51,65    | 1,32                  | 0           | 68,17       |       |
| Surcharges de trottoir      | 1 trottoir            | 0,66      | 0        | 3,11  | 1        | 0        | 3,11                  | 1,6         | 0           | 4,97  |
|                             | 2 trottoirs           | 0,2       | 0        | 1,884 | 1        | 0        | 1,884                 | 1,6         | 0           | 3,01  |

# SECTION : 1 POUTRES PRINCIPALES 1 - 5

| charges   | Coef. de repartition | M (mKdAN) | T (KdAN) | S     | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de pondération | M <sub>maj pond</sub> | T <sub>maj pond</sub> |       |
|-----------|----------------------|-----------|----------|-------|------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP        | 0,2                  | 103,272   | 31,65    | 1     | 103,272          | 31,65            | 1,32                 | 136,32                | 41,78                 |       |
| CCP       | 0,2                  | 19,73     | 6,05     | 1     | 19,73            | 6,05             | 1,32                 | 26,05                 | 7,98                  |       |
| A         | 1 voie               | 0,5       | 58,235   | 18,11 | 1                | 58,235           | 18,11                | 1,6                   | 93,176                | 28,98 |
|           | 2 voies              | 0,4       | 93,172   | 28,98 | 1                | 93,172           | 28,98                | 1,6                   | 149,07                | 46,36 |
|           | 3 voies              | 0,3       | 104,82   | 32,6  | 1                | 104,82           | 32,6                 | 1,6                   | 167,71                | 52,16 |
|           | 4 voies              | 0,2       | 93,174   | 28,98 | 1                | 93,174           | 28,98                | 1,6                   | 149,08                | 46,36 |
| BC        | 1 voie               | 0,5305    | 72,76    | 25,09 | 1,114            | 81,06            | 27,95                | 1,6                   | 129,7                 | 44,7  |
|           | 2 voies              | 0,4611    | 119,95   | 39,98 | 1,114            | 129,16           | 44,53                | 1,6                   | 206,67                | 71,25 |
|           | 3 voies              | 0,3916    | 127,56   | 43,98 | 1,114            | 142,1            | 49                   | 1,6                   | 227,37                | 78,35 |
|           | 4 voies              | 0,3222    | 117,85   | 40,63 | 1,114            | 131,28           | 45,26                | 1,6                   | 210,05                | 72,42 |
| Bt        | 1 travée             | 0,5166    | 42,03    | 14,5  | 1,114            | 46,82            | 16,14                | 1,6                   | 74,91                 | 25,83 |
|           | 2 travées            | 0,4333    | 70,5     | 24,3  | 1,114            | 78,54            | 27,08                | 1,6                   | 125,67                | 43,3  |
| D         | 0,4055               | 254       | 56,37    | 1     | 254              | 56,37            | 1,32                 | 335,3                 | 74,4                  |       |
| MC120     | 0,4805               | 137,95    | 42       | 1,092 | 150,64           | 45,87            | 1,32                 | 198,84                | 60,55                 |       |
| frottoirs | 1 frottoir           | 0,66      | 8,11     | 2,8   | 1                | 8,11             | 2,8                  | 1,6                   | 12,98                 | 4,48  |
|           | 2 frottoirs          | 0,2       | 4,916    | 1,7   | 1                | 4,916            | 1,7                  | 1,6                   | 7,86                  | 2,7   |

## SECTION : 2 POUTRES PRINCIPALES 1-5

| Charges | coeff de repartition | M (mkdaN) | T (KdaN) | S     | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | coeff. de pondération | M <sub>maj-pond</sub> | T <sub>maj-pond</sub> |       |
|---------|----------------------|-----------|----------|-------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP      | 0,2                  | 183,6     | 23,74    | 1     | 183,6            | 23,74            | 1,32                  | 242,34                | 31,34                 |       |
| CCP     | 0,2                  | 35,08     | 4,54     | 1     | 35,08            | 4,54             | 1,32                  | 46,3                  | 7,26                  |       |
| A       | 1v                   | 0,5       | 103,5    | 15,25 | 1                | 103,5            | 15,25                 | 1,6                   | 165,64                | 24,41 |
|         | 2v                   | 0,4       | 165,64   | 24,41 | 1                | 165,64           | 24,41                 | 1,6                   | 265                   | 39,06 |
|         | 3v                   | 0,3       | 186,35   | 27,46 | 1                | 186,35           | 27,46                 | 1,6                   | 298,15                | 43,94 |
|         | 4v                   | 0,2       | 165,64   | 24,41 | 1                | 165,64           | 24,41                 | 1,6                   | 265                   | 39,06 |
| BC      | 1v                   | 0,5305    | 123,4    | 21,26 | 1,114            | 137,44           | 23,68                 | 1,6                   | 219,9                 | 37,9  |
|         | 2v                   | 0,4611    | 196,6    | 33,9  | 1,114            | 219              | 37,75                 | 1,6                   | 350,4                 | 60,41 |
|         | 3v                   | 0,3916    | 216,3    | 37,28 | 1,114            | 240,95           | 41,63                 | 1,6                   | 385,52                | 68,45 |
|         | 4v                   | 0,3222    | 199,82   | 34,44 | 1,114            | 225,6            | 38,37                 | 1,6                   | 356,15                | 61,4  |
| Bt      | 1tracl.              | 0,5166    | 74,47    | 12,84 | 1,114            | 82,96            | 14,3                  | 1,6                   | 132,74                | 22,88 |
|         | 2tracl.              | 0,4333    | 124,93   | 21,54 | 1,114            | 139,17           | 24                    | 1,6                   | 222,67                | 38,4  |
| D       | 0,4055               | 451,56    | 50       | 1     | 451,56           | 50               | 1,32                  | 596,06                | 66                    |       |
| Mc120   | 0,4805               | 245,25    | 36,72    | 1,092 | 267,81           | 40,1             | 1,32                  | 353,51                | 52,94                 |       |
| tracl.  | 1tracl.              | 0,66      | 14,43    | 2,49  | 1                | 14,43            | 2,49                  | 1,6                   | 23,08                 | 3,98  |
|         | 2tracl.              | 0,2       | 8,746    | 1,51  | 1                | 8,746            | 1,51                  | 1,6                   | 14                    | 2,41  |

# SECTION : 3 POUTRES PRINCIPALES 1-5

| charges   | coeff. de repartition | M (mkdan) | T (Kdan) | S     | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | coeff. de Ponderation | M <sub>maj.pond</sub> | T <sub>maj.pond</sub> |       |
|-----------|-----------------------|-----------|----------|-------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP        | 0,2                   | 240,97    | 15,83    | 1     | 240,97           | 15,83            | 1,32                  | 318,07                | 20,9                  |       |
| CCP       | 0,2                   | 46,04     | 3,02     | 1     | 46,04            | 3,02             | 1,32                  | 60,77                 | 4                     |       |
| A         | 1V                    | 0,5       | 135,875  | 12,54 | 1                | 135,875          | 12,54                 | 1,6                   | 217,4                 | 20    |
|           | 2V                    | 0,4       | 217,4    | 20,06 | 1                | 217,4            | 20,06                 | 1,6                   | 347,84                | 32,1  |
|           | 3V                    | 0,3       | 244,575  | 22,57 | 1                | 244,575          | 22,57                 | 1,6                   | 391,32                | 36,11 |
|           | 4V                    | 0,2       | 217,4    | 20,06 | 1                | 217,4            | 20,06                 | 1,6                   | 347,84                | 32,1  |
| BC        | 1V                    | 0,5305    | 158,7    | 17,45 | 1,114            | 176,8            | 19,44                 | 1,6                   | 282,9                 | 31,1  |
|           | 2V                    | 0,4611    | 252,9    | 27,8  | 1,114            | 271,7            | 30,97                 | 1,6                   | 450,76                | 49,56 |
|           | 3V                    | 0,3916    | 278,23   | 30,59 | 1,114            | 309,95           | 34,07                 | 1,6                   | 495,9                 | 54,52 |
|           | 4V                    | 0,3222    | 257,04   | 28,26 | 1,114            | 286,34           | 31,48                 | 1,6                   | 458,14                | 50,36 |
| Bt        | 1 tandem              | 0,5166    | 97,33    | 11,84 | 1,114            | 108,42           | 12,46                 | 1,6                   | 173,48                | 19,93 |
|           | 2 tandem              | 0,4333    | 163,27   | 18,76 | 1,114            | 181,88           | 20,9                  | 1,6                   | 291                   | 33,45 |
| D         | 0,4055                | 592,68    | 40,26    | 1     | 592,68           | 40,26            | 1,32                  | 782,34                | 53,14                 |       |
| MC120     | 0,4805                | 321,89    | 31,44    | 1,092 | 351,5            | 34,33            | 1,32                  | 464                   | 45,32                 |       |
| trottoirs | 1 trottoir            | 0,66      | 18,94    | 2,18  | 1                | 18,94            | 2,18                  | 1,6                   | 30,31                 | 3,48  |
|           | 2 trottoirs           | 0,2       | 11,48    | 1,32  | 1                | 11,48            | 1,32                  | 1,6                   | 18,4                  | 2,11  |



## SECTION : 4 POUTRES PRINCIPALES 1-5

| charges  | Coef. de répartition | M (m.kdan) | T (Kdan) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de pondération | M <sub>maj. pond</sub> | T <sub>maj. pond</sub> |       |
|----------|----------------------|------------|----------|----------|------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| CP       | 0,2                  | 275,39     | 7,914    | 1        | 275,39           | 7,914            | 1,32                 | 363,5                  | 10,45                  |       |
| CCP      | 0,2                  | 52,62      | 1,512    | 1        | 52,62            | 1,512            | 1,32                 | 69,46                  | 2                      |       |
| A        | 1 V                  | 0,5        | 155,28   | 9,965    | 1                | 155,28           | 9,965                | 1,6                    | 248,46                 | 15,94 |
|          | 2 V                  | 0,4        | 248,46   | 15,94    | 1                | 248,46           | 15,94                | 1,6                    | 397,54                 | 25,5  |
|          | 3 V                  | 0,3        | 279,52   | 17,94    | 1                | 279,52           | 17,94                | 1,6                    | 447,22                 | 28,7  |
|          | 4 V                  | 0,2        | 248,46   | 15,94    | 1                | 248,46           | 15,94                | 1,6                    | 397,54                 | 25,5  |
| BC       | 1 V                  | 0,5305     | 178,76   | 13,62    | 1,114            | 199,14           | 15,17                | 1,6                    | 318,62                 | 24,28 |
|          | 2 V                  | 0,4611     | 284,85   | 21,71    | 1,114            | 317,32           | 24,18                | 1,6                    | 507,71                 | 38,7  |
|          | 3 V                  | 0,3916     | 313,39   | 23,89    | 1,114            | 349,12           | 26,61                | 1,6                    | 558,58                 | 42,6  |
|          | 4 V                  | 0,3222     | 289,52   | 22,07    | 1,114            | 322,5            | 24,6                 | 1,6                    | 516,03                 | 39,33 |
| Bt       | 1 tandem             | 0,5166     | 110,6    | 9,53     | 1,114            | 123,2            | 10,62                | 1,6                    | 197,12                 | 17    |
|          | 2 tandem             | 0,4333     | 185,52   | 16       | 1,114            | 206,67           | 17,81                | 1,6                    | 330,67                 | 28,5  |
| D        | 0,4055               | 677,35     | 30,53    | 1        | 677,35           | 30,53            | 1,32                 | 894,1                  | 40,3                   |       |
| MC120    | 0,4805               | 367,87     | 26,15    | 1,092    | 401,71           | 28,56            | 1,32                 | 530,26                 | 37,7                   |       |
| trottoir | 1 trottoir           | 0,66       | 21,64    | 1,87     | 1                | 21,64            | 1,87                 | 1,6                    | 34,63                  | 2,99  |
|          | 2 trottoirs          | 0,2        | 13,12    | 1,13     | 1                | 13,12            | 1,13                 | 1,6                    | 21                     | 1,81  |

# SECTION : 5 POUTRES PRINCIPALES 1-5

| charges   | Coef. de répartition | M (m.kdaN) | T (kdaN) | S     | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de pondération | M <sub>maj-pond</sub> | T <sub>maj-pond</sub> |       |
|-----------|----------------------|------------|----------|-------|------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP        | 0,2                  | 286,86     | 0        | 1     | 286,86           | 0                | 1,32                 | 378,66                | 0                     |       |
| CCP       | 0,2                  | 54,81      | 0        | 1     | 54,81            | 0                | 1,32                 | 72,35                 | 0                     |       |
| A         | 1V                   | 0,5        | 161,76   | 7,555 | 1                | 161,76           | 7,555                | 1,6                   | 258,82                | 12,1  |
|           | 2V                   | 0,4        | 258,82   | 12,1  | 1                | 258,82           | 12,1                 | 1,6                   | 414,11                | 19,35 |
|           | 3V                   | 0,3        | 291,17   | 13,6  | 1                | 291,17           | 13,6                 | 1,6                   | 465,87                | 21,76 |
|           | 4V                   | 0,2        | 258,82   | 12,1  | 1                | 258,82           | 12,1                 | 1,6                   | 414,11                | 19,35 |
| BC        | 1V                   | 0,5305     | 176,65   | 10,07 | 1,114            | 196,8            | 11,22                | 1,6                   | 314,9                 | 17,95 |
|           | 2V                   | 0,4611     | 281,5    | 16,05 | 1,114            | 313,6            | 17,88                | 1,6                   | 501,75                | 28,61 |
|           | 3V                   | 0,3916     | 309,7    | 17,66 | 1,114            | 345              | 19,67                | 1,6                   | 552                   | 31,5  |
|           | 4V                   | 0,3222     | 286,11   | 16,31 | 1,114            | 318,73           | 18,17                | 1,6                   | 510                   | 29,07 |
| Bt        | 1 tandem             | 0,5166     | 114,3    | 7,88  | 1,114            | 127,3            | 8,78                 | 1,6                   | 203,7                 | 14,04 |
|           | 2 tandem             | 0,4333     | 191,7    | 13,22 | 1,114            | 213,54           | 14,73                | 1,6                   | 341,7                 | 23,56 |
| D         | 0,4055               | 705,57     | 20,8     | 1     | 705,57           | 20,8             | 1,32                 | 931,35                | 27,46                 |       |
| MC120     | 0,4805               | 383,2      | 20,87    | 1,092 | 418,45           | 22,8             | 1,32                 | 552,36                | 30,08                 |       |
| frottoirs | 1 frottoir           | 0,66       | 22,55    | 1,558 | 1                | 22,55            | 1,558                | 1,6                   | 36,08                 | 2,49  |
|           | 2 frottoirs          | 0,2        | 13,67    | 0,944 | 1                | 13,67            | 0,944                | 1,6                   | 21,87                 | 1,51  |

SECTION : 0 POUTRES PRINCIPALES 2-4

| charges   | coeff. de repartition | M(mKdAN) | T(KdAN) | S     | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | coeff. de Ponderation | M <sub>maj pond</sub> | T <sub>maj pond</sub> |       |
|-----------|-----------------------|----------|---------|-------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP        | 0,2                   | 0        | 39,568  | 1     | 0                | 39,568           | 1,32                  | 0                     | 52,23                 |       |
| CCP       | 0,2                   | 0        | 7,56    | 1     | 0                | 7,56             | 1,32                  | 0                     | 9,98                  |       |
| A         | 1 V                   | 0,35     | 0       | 15,62 | 1                | 0                | 15,62                 | 1,6                   | 0                     | 25    |
|           | 2 V                   | 0,3      | 0       | 26,77 | 1                | 0                | 26,77                 | 1,6                   | 0                     | 42,84 |
|           | 3 V                   | 0,25     | 0       | 33,47 | 1                | 0                | 33,47                 | 1,6                   | 0                     | 53,55 |
|           | 4 V                   | 0,2      | 0       | 35,7  | 1                | 0                | 35,7                  | 1,6                   | 0                     | 57,12 |
| BC        | 1 V                   | 0,3653   | 0       | 19,9  | 1,114            | 0                | 22,17                 | 1,6                   | 0                     | 35,48 |
|           | 2 V                   | 0,3305   | 0       | 33,01 | 1,114            | 0                | 36,78                 | 1,6                   | 0                     | 58,84 |
|           | 3 V                   | 0,2958   | 0       | 38,28 | 1,114            | 0                | 42,64                 | 1,6                   | 0                     | 68,23 |
|           | 4 V                   | 0,2611   | 0       | 37,94 | 1,114            | 0                | 42,26                 | 1,6                   | 0                     | 67,62 |
| Bt        | 1 tandem              | 0,3583   | 0       | 11,2  | 1,114            | 0                | 12,47                 | 1,6                   | 0                     | 19,96 |
|           | 2 tandem              | 0,3166   | 0       | 19,8  | 1,114            | 0                | 22,05                 | 1,6                   | 0                     | 35,3  |
| D         | 0,3028                | 0        | 49,36   | 1     | 0                | 49,36            | 1,32                  | 0                     | 65,15                 |       |
| MC120     | 0,3403                | 0        | 33,5    | 1,092 | 0                | 36,6             | 1,32                  | 0                     | 48,3                  |       |
| trottoirs | 1 trottoir            | 0,43     | 0       | 2,02  | 1                | 0                | 2,02                  | 1,6                   | 0                     | 3,24  |
|           | 2 trottoir            | 0,2      | 0       | 1,88  | 1                | 0                | 1,88                  | 1,6                   | 0                     | 3,01  |

# SECTION : 1 POUTRES PRINCIPALES 2-4

| Charges    | Coef. de Répartition | M (mKdAN) | T (KdAN) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de Pondération | M <sub>maj. pond</sub> | T <sub>maj. pond</sub> |       |
|------------|----------------------|-----------|----------|----------|------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| CP         | 0,2                  | 103,272   | 31,65    | 1        | 103,272          | 31,65            | 1,32                 | 136,32                 | 41,78                  |       |
| CCP        | 0,2                  | 19,73     | 6,05     | 1        | 19,73            | 6,05             | 1,32                 | 26,05                  | 7,98                   |       |
| A          | 1 V                  | 0,35      | 40,76    | 12,68    | 1                | 40,76            | 12,68                | 1,6                    | 65,22                  | 20,3  |
|            | 2 V                  | 0,30      | 69,88    | 21,73    | 1                | 69,88            | 21,73                | 1,6                    | 111,81                 | 34,8  |
|            | 3 V                  | 0,25      | 87,35    | 27,16    | 1                | 87,35            | 27,16                | 1,6                    | 139,76                 | 43,5  |
|            | 4 V                  | 0,2       | 93,17    | 28,98    | 1                | 93,17            | 28,98                | 1,6                    | 149                    | 46,36 |
| BC         | 1 V                  | 0,3653    | 50,1     | 17,3     | 1,114            | 55,82            | 19,24                | 1,6                    | 89,3                   | 30,8  |
|            | 2 V                  | 0,3305    | 83,11    | 28,65    | 1,114            | 92,6             | 31,92                | 1,6                    | 148,13                 | 51,07 |
|            | 3 V                  | 0,2958    | 96,36    | 33,22    | 1,114            | 107,34           | 37                   | 1,6                    | 171,75                 | 53,2  |
|            | 4 V                  | 0,2611    | 95,5     | 32,92    | 1,114            | 106,4            | 36,7                 | 1,6                    | 170,22                 | 58,7  |
| Bt         | 1<br>traverse        | 0,3583    | 29,15    | 10,05    | 1,114            | 32,5             | 11,2                 | 1,6                    | 52                     | 17,91 |
|            | 2<br>traverse        | 0,3166    | 51,52    | 17,76    | 1,114            | 57,4             | 19,8                 | 1,6                    | 91,8                   | 31,66 |
| D          | 0,3028               | 189,67    | 42,1     | 1        | 189,67           | 42,1             | 1,32                 | 250,36                 | 55,57                  |       |
| MC120      | 0,3403               | 97,7      | 29,75    | 1,092    | 106,7            | 32,5             | 1,32                 | 140,83                 | 42,9                   |       |
| travertins | 1<br>travertin       | 0,43      | 5,28     | 1,82     | 1                | 5,28             | 1,82                 | 1,6                    | 8,45                   | 2,92  |
|            | 2<br>travertin       | 0,2       | 4,92     | 1,7      | 1                | 4,92             | 1,7                  | 1,6                    | 7,86                   | 2,71  |

## SECTION : 2 POUTRES PRINCIPALES 2-4

| charges   | Coeff. de Répartition | M (mkdan) | T (Kdan) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coeff. de Ponderation | M <sub>maj. pond</sub> | T <sub>maj. pond</sub> |       |
|-----------|-----------------------|-----------|----------|----------|------------------|------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| CP        | 0,2                   | 183,6     | 23,74    | 1        | 183,6            | 23,74            | 1,32                  | 242,34                 | 31,34                  |       |
| CCP       | 0,2                   | 35,08     | 4,54     | 1        | 35,08            | 4,54             | 1,32                  | 46,3                   | 7,26                   |       |
| A         | 1 V                   | 0,35      | 72,47    | 10,68    | 1                | 72,47            | 10,68                 | 1,6                    | 115,95                 | 17,08 |
|           | 2 V                   | 0,3       | 124,23   | 18,31    | 1                | 124,23           | 18,31                 | 1,6                    | 198,8                  | 29,3  |
|           | 3 V                   | 0,25      | 155,29   | 22,88    | 1                | 155,29           | 22,88                 | 1,6                    | 248,5                  | 36,62 |
|           | 4 V                   | 0,2       | 165,64   | 24,41    | 1                | 165,64           | 24,41                 | 1,6                    | 265                    | 39,06 |
| BC        | 1 V                   | 0,3655    | 85       | 14,65    | 1,114            | 94,7             | 16,32                 | 1,6                    | 151,5                  | 26,11 |
|           | 2 V                   | 0,3305    | 140,91   | 24,3     | 1,114            | 154,98           | 27,06                 | 1,6                    | 251,16                 | 43,3  |
|           | 3 V                   | 0,2958    | 163,4    | 28,16    | 1,114            | 182              | 31,4                  | 1,6                    | 291,21                 | 50,2  |
|           | 4 V                   | 0,2611    | 161,92   | 27,91    | 1,114            | 180,4            | 31,09                 | 1,6                    | 288,6                  | 49,75 |
| Bt        | 1 tandem              | 0,3583    | 51,65    | 8,9      | 1,114            | 57,54            | 9,92                  | 1,6                    | 92,06                  | 15,87 |
|           | 2 tandem              | 0,3166    | 91,3     | 15,74    | 1,114            | 101,7            | 17,53                 | 1,6                    | 162,7                  | 28,05 |
| D         | 0,3028                | 337,2     | 37,33    | 1        | 337,2            | 37,33            | 1,32                  | 445,1                  | 49,3                   |       |
| MC120     | 0,3403                | 173,7     | 26       | 1,092    | 189,7            | 28,4             | 1,32                  | 250,36                 | 37,5                   |       |
| trottoirs | 1 trottoir            | 0,43      | 9,4      | 1,62     | 1                | 9,4              | 1,62                  | 1,6                    | 15,04                  | 2,59  |
|           | 2 trottoirs           | 0,2       | 8,75     | 1,51     | 1                | 8,75             | 1,51                  | 1,6                    | 14                     | 2,41  |

## SECTION: 3 POUTRES PRINCIPALES 2-4

| charges   | coefficient de<br>Repartition | M (mkdan) | T (Kdan) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de<br>Ponderation | M <sub>maj. pond</sub> | T <sub>maj. pond</sub> |       |
|-----------|-------------------------------|-----------|----------|----------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| CP        | 0,2                           | 240,97    | 15,83    | 1        | 240,97           | 15,83            | 1,32                    | 318,07                 | 20,9                   |       |
| CCP       | 0,2                           | 46,04     | 3,02     | 1        | 46,04            | 3,02             | 1,32                    | 60,77                  | 4                      |       |
| A         | 1 V                           | 0,35      | 95,11    | 8,78     | 1                | 95,11            | 8,78                    | 1,6                    | 152,18                 | 14,04 |
|           | 2 V                           | 0,3       | 163,05   | 15,045   | 1                | 163,05           | 15,045                  | 1,6                    | 260,88                 | 24,07 |
|           | 3 V                           | 0,25      | 203,81   | 18,81    | 1                | 203,81           | 18,81                   | 1,6                    | 326,1                  | 30,09 |
|           | 4 V                           | 0,2       | 217,4    | 20,06    | 1                | 217,4            | 20,06                   | 1,6                    | 347,84                 | 32,1  |
| BC        | 1 V                           | 0,3655    | 109,34   | 12,02    | 1,114            | 121,81           | 13,4                    | 1,6                    | 194,9                  | 21,44 |
|           | 2 V                           | 0,3305    | 181,26   | 19,93    | 1,114            | 201,93           | 22,2                    | 1,6                    | 323,09                 | 35,52 |
|           | 3 V                           | 0,2958    | 234,82   | 23,1     | 1,114            | 261,6            | 25,74                   | 1,6                    | 418,54                 | 41,2  |
|           | 4 V                           | 0,2611    | 208,3    | 22,9     | 1,114            | 232,04           | 25,51                   | 1,6                    | 371,26                 | 40,81 |
| Bt        | 1 tandem                      | 0,3583    | 67,5     | 7,76     | 1,114            | 75,2             | 8,64                    | 1,6                    | 120,32                 | 13,83 |
|           | 2 tandems                     | 0,3166    | 119,3    | 13,71    | 1,114            | 132,9            | 15,27                   | 1,6                    | 212,63                 | 24,44 |
| D         | 0,3028                        | 442,57    | 30,07    | 1        | 442,57           | 30,07            | 1,32                    | 584,2                  | 39,7                   |       |
| MC120     | 0,3403                        | 227,96    | 22,26    | 1,092    | 248,94           | 24,3             | 1,32                    | 328,6                  | 32,09                  |       |
| trottoirs | 1 trottoir                    | 0,43      | 12,34    | 1,42     | 1                | 12,34            | 1,42                    | 1,6                    | 19,75                  | 2,27  |
|           | 2 trottoirs                   | 0,2       | 11,48    | 1,32     | 1                | 11,48            | 1,32                    | 1,6                    | 18,37                  | 2,11  |

## SECTION : 4 POUTRES PRINCIPALES 2-4

| charges   | Coef. de Répartition | M(KdaN.m) | T(KdaN) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de Pondération | M <sub>maj. pond</sub> | T <sub>maj. pond</sub> |       |
|-----------|----------------------|-----------|---------|----------|------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------|
| CP        | 0,2                  | 275,39    | 7,914   | 1        | 275,39           | 7,914            | 1,32                 | 363,52                 | 10,45                  |       |
| CCP       | 0,2                  | 52,62     | 1,512   | 1        | 52,62            | 1,512            | 1,32                 | 69,46                  | 2                      |       |
| A         | 1 V                  | 0,35      | 108,7   | 6,97     | 1                | 108,7            | 6,97                 | 1,6                    | 174                    | 11,16 |
|           | 2 V                  | 0,3       | 186,34  | 11,96    | 1                | 186,34           | 11,96                | 1,6                    | 298,15                 | 19,13 |
|           | 3 V                  | 0,25      | 232,93  | 14,95    | 1                | 232,93           | 14,95                | 1,6                    | 372,67                 | 23,92 |
|           | 4 V                  | 0,2       | 248,46  | 15,94    | 1                | 248,46           | 15,94                | 1,6                    | 397,54                 | 25,51 |
| BC        | 1 V                  | 0,3655    | 123,16  | 9,38     | 1,114            | 137,2            | 10,46                | 1,6                    | 219,52                 | 16,73 |
|           | 2 V                  | 0,3305    | 204,17  | 15,56    | 1,114            | 227,44           | 17,33                | 1,6                    | 363,91                 | 27,73 |
|           | 3 V                  | 0,2958    | 236,72  | 18,04    | 1,114            | 263,71           | 20,1                 | 1,6                    | 421,93                 | 32,16 |
|           | 4 V                  | 0,2611    | 234,61  | 17,88    | 1,114            | 261,36           | 19,92                | 1,6                    | 418,17                 | 31,87 |
| Bt        | 1 tandem             | 0,3583    | 76,7    | 6,61     | 1,114            | 85,45            | 7,36                 | 1,6                    | 136,72                 | 11,78 |
|           | 2 tandems            | 0,3166    | 135,55  | 11,68    | 1,114            | 151              | 13,02                | 1,6                    | 241,6                  | 20,83 |
| D         | 0,3028               | 505,79    | 22,8    | 1        | 505,79           | 22,8             | 1,32                 | 667,64                 | 30,1                   |       |
| MC        | 0,3403               | 260,53    | 18,52   | 1,092    | 284,5            | 20,23            | 1,32                 | 375,54                 | 26,7                   |       |
| trottoirs | 1 trottoir           | 0,43      | 14,1    | 1,22     | 1                | 14,1             | 1,22                 | 1,6                    | 22,56                  | 1,95  |
|           | 2 trottoirs          | 0,2       | 13,12   | 1,13     | 1                | 13,12            | 1,13                 | 1,6                    | 20,98                  | 1,81  |

## SECTION : 5 POUTRES PRINCIPALES 2-4

| charges  |               | coeff. de<br>Repartition | M(m.kdan) | T(kdan) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coef. de<br>Ponderation | M <sub>maj. pond</sub> | T <sub>maj. pond</sub> |
|----------|---------------|--------------------------|-----------|---------|----------|------------------|------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| CP       |               | 0,2                      | 286,86    | 0       | 1        | 286,86           | 0                | 1,32                    | 378,66                 | 0                      |
| CCP      |               | 0,2                      | 54,81     | 0       | 1        | 54,81            | 0                | 1,32                    | 72,35                  | 0                      |
| A        | 1 V           | 0,35                     | 113,23    | 5,29    | 1        | 113,23           | 5,29             | 1,6                     | 181,17                 | 8,46                   |
|          | 2 V           | 0,3                      | 194,11    | 9,07    | 1        | 194,11           | 9,07             | 1,6                     | 310,6                  | 14,51                  |
|          | 3 V           | 0,25                     | 242,64    | 11,33   | 1        | 242,64           | 11,33            | 1,6                     | 388,23                 | 18,14                  |
|          | 4 V           | 0,2                      | 258,82    | 12,09   | 1        | 258,82           | 12,09            | 1,6                     | 414,11                 | 19,35                  |
| BC       | 1 V           | 0,3655                   | 121,71    | 6,94    | 1,114    | 135,6            | 7,73             | 1,6                     | 216,94                 | 12,36                  |
|          | 2 V           | 0,3305                   | 201,77    | 11,5    | 1,114    | 224,77           | 12,82            | 1,6                     | 359,63                 | 20,5                   |
|          | 3 V           | 0,2958                   | 233,94    | 13,34   | 1,114    | 260,61           | 14,86            | 1,6                     | 416,97                 | 23,77                  |
|          | 4 V           | 0,2611                   | 231,86    | 13,22   | 1,114    | 258,29           | 14,73            | 1,6                     | 413,26                 | 23,56                  |
| Bt       | 1<br>randam   | 0,3583                   | 79,25     | 5,46    | 1,114    | 88,29            | 6,09             | 1,6                     | 141,26                 | 9,74                   |
|          | 2<br>randam   | 0,3166                   | 140       | 9,66    | 1,114    | 156              | 10,76            | 1,6                     | 249,65                 | 17,22                  |
| D        |               | 0,3028                   | 526,87    | 15,53   | 1        | 526,87           | 15,53            | 1,32                    | 695,47                 | 20,5                   |
| MC       |               | 0,3403                   | 271,39    | 14,78   | 1,032    | 296,36           | 16,14            | 1,32                    | 391,2                  | 21,3                   |
| trottoir | 1<br>trottoir | 0,43                     | 14,69     | 1,02    | 1        | 14,69            | 1,02             | 1,6                     | 23,51                  | 1,62                   |
|          | 2<br>trottoir | 0,2                      | 13,67     | 0,944   | 1        | 13,67            | 0,944            | 1,6                     | 24,87                  | 1,51                   |



SECTION : 0 POUTRE PRINCIPALE 3

| charges  | Coef. de<br>Repartition | M(m.kdaN) | T(KdaN) | $\delta$ | Mmaj  | Tmaj   | Coef. de<br>Ponderation | Mmaj.pond | Tmaj.pond |       |
|----------|-------------------------|-----------|---------|----------|-------|--------|-------------------------|-----------|-----------|-------|
| CP       | 0,2                     | 0         | 39,568  | 1        | 0     | 39,568 | 1,32                    | 0         | 52,23     |       |
| CCP      | 0,2                     | 0         | 7,56    | 1        | 0     | 7,56   | 1,32                    | 0         | 9,98      |       |
| A        | 1V                      | 0,2       | 0       | 8,924    | 1     | 0      | 8,924                   | 1,6       | 0         | 14,28 |
|          | 2V                      | 0,2       | 0       | 17,85    | 1     | 0      | 17,85                   | 1,6       | 0         | 28,56 |
|          | 3V                      | 0,2       | 0       | 26,77    | 1     | 0      | 26,77                   | 1,6       | 0         | 42,84 |
|          | 4V                      | 0,2       | 0       | 35,7     | 1     | 0      | 35,7                    | 1,6       | 0         | 57,12 |
| BC       | 1V                      | 0,2       | 0       | 10,9     | 1,114 | 0      | 12,14                   | 1,6       | 0         | 19,42 |
|          | 2V                      | 0,2       | 0       | 19,98    | 1,114 | 0      | 22,25                   | 1,6       | 0         | 35,61 |
|          | 3V                      | 0,2       | 0       | 25,88    | 1,114 | 0      | 28,83                   | 1,6       | 0         | 46,13 |
|          | 4V                      | 0,2       | 0       | 29,06    | 1,114 | 0      | 32,37                   | 1,6       | 0         | 51,79 |
| Bt       | 1<br>traverse           | 0,2       | 0       | 6,25     | 1,114 | 0      | 6,96                    | 1,6       | 0         | 11,14 |
|          | 2<br>traverse           | 0,2       | 0       | 12,5     | 1,114 | 0      | 13,93                   | 1,6       | 0         | 22,28 |
| D        | 0,2                     | 0         | 32,61   | 1        | 0     | 32,61  | 1,32                    | 0         | 43,04     |       |
| MC120    | 0,2                     | 0         | 19,686  | 1,092    | 0     | 21,5   | 1,32                    | 0         | 28,38     |       |
| traverse | 1<br>traverse           | 0,2       | 0       | 0,942    | 1     | 0      | 0,942                   | 1,6       | 0         | 1,507 |
|          | 2<br>traverse           | 0,2       | 0       | 1,884    | 1     | 0      | 1,884                   | 1,6       | 0         | 3,014 |

# SECTION : 1 POUTRE PRINCIPALE 3

| charges   | coeff. de<br>Repartition | M(m.KdaN) | T(KdaN) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | coeff. de<br>Pondération | M <sub>maj.pond</sub> | T <sub>maj.pond</sub> |       |
|-----------|--------------------------|-----------|---------|----------|------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP        | 0,2                      | 103,27    | 31,65   | 1        | 103,27           | 31,65            | 1,32                     | 136,32                | 41,78                 |       |
| CCP       | 0,2                      | 19,73     | 6,05    | 1        | 19,73            | 6,05             | 1,32                     | 26,05                 | 7,98                  |       |
| A         | 1 V                      | 0,2       | 23,29   | 7,24     | 1                | 23,29            | 7,24                     | 1,6                   | 37,27                 | 11,59 |
|           | 2 V                      | 0,2       | 46,58   | 14,49    | 1                | 46,58            | 14,49                    | 1,6                   | 74,54                 | 23,18 |
|           | 3 V                      | 0,2       | 69,88   | 21,73    | 1                | 69,88            | 21,73                    | 1,6                   | 111,81                | 34,77 |
|           | 4 V                      | 0,2       | 93,17   | 28,98    | 1                | 93,17            | 28,98                    | 1,6                   | 149,08                | 46,36 |
| BC        | 1 V                      | 0,2       | 27,43   | 9,46     | 1,114            | 30,56            | 10,54                    | 1,6                   | 48,89                 | 16,86 |
|           | 2 V                      | 0,2       | 50,29   | 17,34    | 1,114            | 56,02            | 19,32                    | 1,6                   | 89,64                 | 30,91 |
|           | 3 V                      | 0,2       | 65,15   | 22,46    | 1,114            | 72,6             | 25,02                    | 1,6                   | 116,12                | 40    |
|           | 4 V                      | 0,2       | 73,15   | 25,22    | 1,114            | 81,5             | 28,09                    | 1,6                   | 130,4                 | 44,95 |
| Bt        | 1 tandem                 | 0,2       | 16,27   | 5,61     | 1,114            | 18,13            | 6,25                     | 1,6                   | 29                    | 10    |
|           | 2 tandem                 | 0,2       | 32,54   | 11,22    | 1,114            | 36,26            | 12,5                     | 1,6                   | 58                    | 20    |
| D         | 0,2                      | 125,28    | 27,81   | 1        | 125,28           | 27,81            | 1,32                     | 165,37                | 36,71                 |       |
| MC        | 0,2                      | 57,42     | 17,49   | 1,092    | 62,7             | 19,09            | 1,32                     | 82,77                 | 25,2                  |       |
| trottoirs | 1 trottoir               | 0,2       | 2,458   | 0,848    | 1                | 2,458            | 0,848                    | 1,6                   | 3,93                  | 1,36  |
|           | 2 trottoir               | 0,2       | 4,92    | 1,696    | 1                | 4,92             | 1,696                    | 1,6                   | 7,86                  | 2,71  |

# SECTION : 2 POUTRE PRINCIPALE 3

| Charges  |               | coeff de<br>Repartition | M(mkdan) | T(kdan) | $\delta$ | Mmaj.  | Tmaj. | Coefficient de<br>Ponderation | Mmaj pond | Tmaj pond |
|----------|---------------|-------------------------|----------|---------|----------|--------|-------|-------------------------------|-----------|-----------|
| CP       |               | 0,2                     | 183,6    | 23,74   | 1        | 183,6  | 23,74 | 1,32                          | 242,34    | 31,34     |
| CCP      |               | 0,2                     | 35,08    | 4,536   | 1        | 35,08  | 4,536 | 1,32                          | 46,3      | 5,99      |
| A        | 1 V           | 0,2                     | 41,41    | 6,1     | 1        | 41,41  | 6,1   | 1,6                           | 66,26     | 9,76      |
|          | 2 V           | 0,2                     | 82,82    | 12,2    | 1        | 82,82  | 12,2  | 1,6                           | 132,51    | 19,53     |
|          | 3 V           | 0,2                     | 124,23   | 18,31   | 1        | 124,23 | 18,31 | 1,6                           | 198,77    | 29,3      |
|          | 4 V           | 0,2                     | 165,64   | 24,41   | 1        | 165,64 | 24,41 | 1,6                           | 265       | 39,06     |
| BC       | 1 V           | 0,2                     | 46,51    | 8,02    | 1,114    | 51,81  | 8,93  | 1,6                           | 82,9      | 14,29     |
|          | 2 V           | 0,2                     | 85,27    | 14,7    | 1,114    | 95     | 16,37 | 1,6                           | 152       | 26,2      |
|          | 3 V           | 0,2                     | 110,47   | 19,04   | 1,114    | 123,06 | 21,21 | 1,6                           | 196,9     | 33,94     |
|          | 4 V           | 0,2                     | 124,03   | 21,38   | 1,114    | 138,2  | 23,82 | 1,6                           | 221,07    | 38,11     |
| Bt       | 1<br>traverse | 0,2                     | 28,83    | 4,97    | 1,114    | 32,92  | 5,54  | 1,6                           | 51,4      | 8,86      |
|          | 2<br>traverse | 0,2                     | 57,66    | 9,94    | 1,114    | 64,24  | 11,07 | 1,6                           | 102,8     | 17,72     |
| D        |               | 0,2                     | 222,72   | 24,66   | 1        | 222,72 | 24,66 | 1,32                          | 294       | 32,55     |
| MC120    |               | 0,2                     | 102,08   | 15,3    | 1,092    | 111,47 | 16,7  | 1,32                          | 147,14    | 22,03     |
| traverse | 1<br>traverse | 0,2                     | 4,372    | 0,754   | 1        | 4,372  | 0,754 | 1,6                           | 7         | 1,21      |
|          | 2<br>traverse | 0,2                     | 8,746    | 1,508   | 1        | 8,746  | 1,508 | 1,6                           | 14        | 2,42      |

## SECTION: 3 POUTRE PRINCIPALE 3

| Charges  | Coeff. de<br>Repartition | M (m kdaN) | T (kdaN) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Coeff. de<br>Ponderation | M <sub>maj pond</sub> | T <sub>maj pond</sub> |       |
|----------|--------------------------|------------|----------|----------|------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP       | 0,2                      | 240,97     | 15,83    | 1        | 240,97           | 15,83            | 1,32                     | 318,07                | 20,9                  |       |
| CCP      | 0,2                      | 46,04      | 3,02     | 1        | 46,04            | 3,02             | 1,32                     | 60,77                 | 4                     |       |
| A        | 1 V                      | 0,2        | 54,35    | 5,016    | 1                | 54,35            | 5,016                    | 1,6                   | 86,96                 | 8,03  |
|          | 2 V                      | 0,2        | 108,7    | 10,03    | 1                | 108,7            | 10,03                    | 1,6                   | 173,92                | 16,05 |
|          | 3 V                      | 0,2        | 163,05   | 15,05    | 1                | 163,05           | 15,05                    | 1,6                   | 260,88                | 24,07 |
|          | 4 V                      | 0,2        | 217,4    | 20,06    | 1                | 217,4            | 20,06                    | 1,6                   | 347,84                | 32,1  |
| BC       | 1 V                      | 0,2        | 59,83    | 6,58     | 1,114            | 66,65            | 7,33                     | 1,6                   | 106,64                | 11,72 |
|          | 2 V                      | 0,2        | 109,69   | 12,06    | 1,114            | 122,2            | 13,43                    | 1,6                   | 195,5                 | 21,5  |
|          | 3 V                      | 0,2        | 142,1    | 15,62    | 1,114            | 158,3            | 17,4                     | 1,6                   | 253,3                 | 27,84 |
|          | 4 V                      | 0,2        | 159,55   | 17,54    | 1,114            | 177,74           | 19,54                    | 1,6                   | 284,4                 | 31,26 |
| Bt       | 1<br>traverse            | 0,2        | 37,68    | 4,33     | 1,114            | 41,97            | 4,82                     | 1,6                   | 67,2                  | 7,72  |
|          | 2<br>traverse            | 0,2        | 75,36    | 8,66     | 1,114            | 83,95            | 9,65                     | 1,6                   | 134,32                | 15,44 |
| D        | 0,2                      | 292,32     | 19,86    | 1        | 292,32           | 19,86            | 1,32                     | 385,86                | 26,21                 |       |
| MC120    | 0,2                      | 133,98     | 13,09    | 1,092    | 146,31           | 14,29            | 1,32                     | 193,12                | 18,86                 |       |
| traverse | 1<br>traverse            | 0,2        | 5,74     | 0,66     | 1                | 5,74             | 0,66                     | 1,6                   | 9,18                  | 1,056 |
|          | 2<br>traverse            | 0,2        | 11,48    | 1,32     | 1                | 11,48            | 1,32                     | 1,6                   | 18,37                 | 2,112 |

# SECTION : 4 POUTRE PRINCIPALE 3

| charges | coeff. de<br>Repartition | M(mKdan) | T(Kdan) | S     | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | coeff. de<br>Pondération | M <sub>maj pond</sub> | T <sub>maj pond</sub> |       |
|---------|--------------------------|----------|---------|-------|------------------|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| CP      | 0,2                      | 275,39   | 7,914   | 1     | 275,39           | 7,914            | 1,32                     | 365,51                | 10,45                 |       |
| CCP     | 0,2                      | 52,62    | 1,512   | 1     | 52,62            | 1,512            | 1,32                     | 69,46                 | 2                     |       |
| A       | 1 V                      | 0,2      | 62,114  | 3,986 | 1                | 62,114           | 3,986                    | 1,6                   | 99,4                  | 6,38  |
|         | 2 V                      | 0,2      | 124,23  | 7,972 | 1                | 124,23           | 7,972                    | 1,6                   | 198,77                | 12,75 |
|         | 3 V                      | 0,2      | 186,34  | 11,96 | 1                | 186,34           | 11,96                    | 1,6                   | 298,15                | 19,13 |
|         | 4 V                      | 0,2      | 248,46  | 15,94 | 1                | 248,46           | 15,94                    | 1,6                   | 397,54                | 25,51 |
| BC      | 1 V                      | 0,2      | 67,39   | 5,136 | 1,114            | 75,07            | 5,72                     | 1,6                   | 120,12                | 9,15  |
|         | 2 V                      | 0,2      | 123,55  | 9,42  | 1,114            | 137,64           | 10,5                     | 1,6                   | 220,22                | 16,8  |
|         | 3 V                      | 0,2      | 160     | 12,2  | 1,114            | 178,3            | 13,6                     | 1,6                   | 285,3                 | 21,74 |
|         | 4 V                      | 0,2      | 179,7   | 13,7  | 1,114            | 200,2            | 15,26                    | 1,6                   | 320,32                | 24,4  |
| Bt      | 1<br>travail             | 0,2      | 42,82   | 3,69  | 1,114            | 47,7             | 4,11                     | 1,6                   | 76,31                 | 6,58  |
|         | 2<br>travail             | 0,2      | 85,63   | 7,38  | 1,114            | 95,4             | 8,22                     | 1,6                   | 152,63                | 13,16 |
| D       | 0,2                      | 334,08   | 15,06   | 1     | 334,08           | 15,06            | 1,32                     | 441                   | 13,88                 |       |
| MC120   | 0,2                      | 153,12   | 10,89   | 1,092 | 167,21           | 11,89            | 1,32                     | 220,71                | 15,7                  |       |
| travail | 1<br>travail             | 0,2      | 6,558   | 0,566 | 1                | 6,558            | 0,566                    | 1,6                   | 10,5                  | 0,906 |
|         | 2<br>travail             | 0,2      | 13,116  | 1,132 | 1                | 13,116           | 1,132                    | 1,6                   | 21                    | 1,81  |

# SECTION : 5 POUTRE PRINCIPALE 3

| charges | coeff. de<br>Repartition | M(mkJan) | T(kJan) | $\delta$ | Mmaj   | Tmaj   | coeff. de<br>Ponderation | Mmaj pond | Tmaj pond |       |
|---------|--------------------------|----------|---------|----------|--------|--------|--------------------------|-----------|-----------|-------|
| CP      | 0,2                      | 286,86   | 0       | 1        | 286,86 | 0      | 1,32                     | 378,66    | 0         |       |
| CCP     | 0,2                      | 54,81    | 0       | 1        | 54,81  | 0      | 1,32                     | 72,35     | 0         |       |
| A       | 1 V                      | 0,2      | 64,7    | 3,022    | 1      | 64,7   | 3,022                    | 1,6       | 103,53    | 4,83  |
|         | 2 V                      | 0,2      | 129,41  | 6,046    | 1      | 129,41 | 6,046                    | 1,6       | 207,06    | 9,67  |
|         | 3 V                      | 0,2      | 194,11  | 9,07     | 1      | 194,11 | 9,07                     | 1,6       | 310,6     | 14,51 |
|         | 4 V                      | 0,2      | 258,82  | 12,09    | 1      | 258,82 | 12,09                    | 1,6       | 414,11    | 19,35 |
| BC      | 1 V                      | 0,2      | 66,6    | 3,796    | 1,114  | 74,2   | 4,23                     | 1,6       | 118,71    | 6,77  |
|         | 2 V                      | 0,2      | 122,1   | 6,96     | 1,114  | 136    | 7,75                     | 1,6       | 217,63    | 12,41 |
|         | 3 V                      | 0,2      | 158,17  | 9,02     | 1,114  | 176,2  | 10,05                    | 1,6       | 281,93    | 16,07 |
|         | 4 V                      | 0,2      | 177,6   | 10,12    | 1,114  | 197,85 | 11,28                    | 1,6       | 316,55    | 18,05 |
| Bt      | 1<br>randem              | 0,2      | 44,24   | 3,05     | 1,114  | 49,28  | 3,4                      | 1,6       | 78,85     | 5,44  |
|         | 2<br>randem              | 0,2      | 88,48   | 6,1      | 1,114  | 98,57  | 6,8                      | 1,6       | 157,71    | 10,9  |
| D       | 0,2                      | 348      | 10,26   | 1        | 348    | 10,26  | 1,32                     | 459,36    | 13,55     |       |
| MC120   | 0,2                      | 159,5    | 8,69    | 1,092    | 174,17 | 9,48   | 1,32                     | 230       | 12,52     |       |
| trabois | 1<br>trabois             | 0,2      | 6,834   | 0,472    | 1      | 6,834  | 0,472                    | 1,6       | 10,93     | 0,755 |
|         | 2<br>trabois             | 0,2      | 13,67   | 0,944    | 1      | 13,67  | 0,944                    | 1,6       | 21,87     | 1,51  |

$$M_{\text{coeff}} = 9 \cdot \frac{l^2}{8} = 1,225 \times \frac{29^2}{8} = 128,78 \text{ mKdaN}$$

On considèrera les poutres principales de nive 1 et 5

$$M_1 = 378,66 + 72,35 + 128,78 = 579,79 \text{ mKdaN}$$

$$M_2 = 378,66 + 931,35 + 36,08 = 1346,09 \text{ mKdaN}$$

$$\Omega_1 = 1,125 \cdot \frac{579,79 \cdot 10^5}{200 \cdot 2400} = 135,89 \text{ cm}^2$$

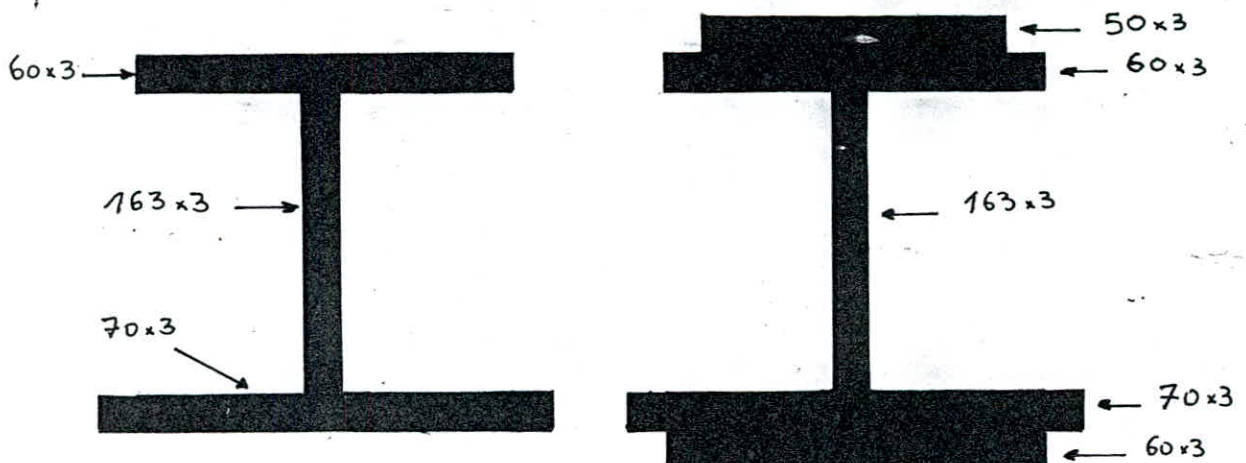
$$\Omega_2 = \frac{5}{6} \cdot \frac{1346,09 \cdot 10^5}{200 \cdot 2400} = 233,7 \text{ cm}^2$$

Tableau de la semelle superieure

| Section                                    | 0   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|--|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| $M_1$ (mKdaN)                              | 0   | 291,15 | 417,42 | 507,62 | 561,74 | 579,79 |
| $\Omega_1$ (cm <sup>2</sup> )<br>theorique | 0   | 68,24  | 97,83  | 118,97 | 131,66 | 135,89 |
| $\Omega_1$ (cm <sup>2</sup> )<br>reelle    | 180 | 180    | 180    | 330    | 330    | 330    |

Tableau de la semelle inferieure

| Section                                    | 0   | 1     | 2      | 3       | 4       | 5       |
|--|-----|-------|--------|---------|---------|---------|
| $M_2$ (mKdaN)                              | 0   | 484,6 | 861,48 | 1130,72 | 1292,23 | 1346,09 |
| $\Omega_2$ (cm <sup>2</sup> )<br>theorique | 0   | 84,13 | 149,56 | 196,3   | 224,34  | 233,7   |
| $\Omega_2$ (cm <sup>2</sup> )<br>reelle    | 210 | 210   | 210    | 390     | 390     | 390     |



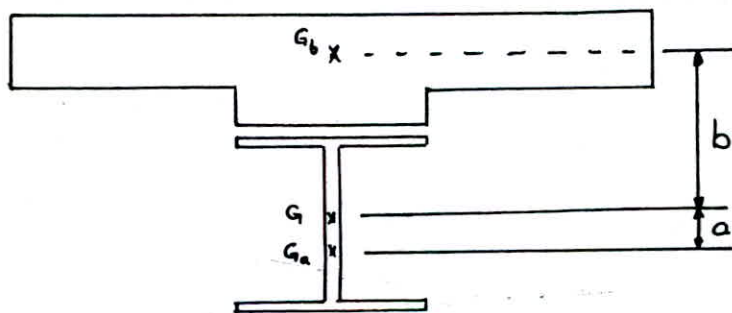
Le retrait est défini comme étant un raccourcissement non élastique du béton. Ce phénomène s'accroît pendant les premières années de service ensuite il s'affaiblit. Il dépend en premier lieu des conditions atmosphériques et de l'importance des armatures. D'autres facteurs influent sur le retrait. Ce sont :

- La sollicitation
- Quantité et qualité du ciment utilisé
- Quantité d'eau de gâchage
- Procédé de compactage.

La dalle en béton armé est solidaire des poutres métalliques par l'intermédiaire de connecteurs qui empêchent tout mouvement ou glissement de la dalle.

Bonc le retrait ne peut s'effectuer librement par conséquent, il se crée des contraintes dans la poutre mixte

L'ouvrage étant une poutre sur deux appuis, il se développe donc des effets isostatiques seulement.



B: Section rendue homogène du béton avec  $n=15$

A: Section d'acier

W: moment statique du béton par rapport au centre de gravité de la section mixte.

$\beta$  est un coefficient défini par : 
$$\beta = \frac{B}{A+B}$$

Le retrait se décompose en une traction uniforme dans le béton

$$\sigma_{rb} = E_b \epsilon_r \quad \text{avec} \quad \epsilon_r: \text{coefficient de retrait}$$

(en pays tempéré, on pourra prendre  $\epsilon_r E_b = 2,5 \text{ N/mm}^2$ )



Cette traction est équilibrée par :

- Une compression centrée dans la section totale

$$F = n \beta \sigma_{1b} \quad \text{Cette force } F \text{ crée :}$$

- Une compression dans l'acier  $\sigma_{2a} = -n \beta \sigma_{1b}$
- Une compression dans le béton  $\sigma_{2b} = -\beta \sigma_{1b}$

Notre section sera soumise à une contrainte :

$$\sigma_b = \sigma_{1b} + \sigma_{2b} = \sigma_{1b} - \beta \sigma_{1b} = (1 - \beta) \sigma_{1b}$$

- Une flexion due à l'excentrement de la force de compression :

$$M = n W \sigma_{1b}$$

Pour le calcul des contraintes dues au retrait, on envisagera un tableau où :

$\sigma_b$  : contrainte dans le béton

$\sigma_s$  : contrainte dans la semelle supérieure de la poutre en acier

$\sigma_i$  : contrainte dans la semelle inférieure de la poutre en acier

$n$  : coefficient d'équivalence prenant les valeurs :  $\infty$  ; 18 ; 15 ; 6

$F$  : effort normal

$$\beta = \frac{B}{A+B}$$

$W$  : moment statique du béton.

|            | SECTION MIXTE          |   | DALLE                           |
|------------|------------------------|---|---------------------------------|
|            | F                      | M   | traction uniforme dans le béton |
| $\sigma_b$ | $-\beta \sigma_{1b}$   | $-W \sigma_{1b} \cdot \frac{V_b}{I_{15}}$ | $\sigma_{1b} = E_b \epsilon_r$  |
| $\sigma_s$ | $-n \beta \sigma_{1b}$ | $-n W \sigma_{1b} \frac{V_s}{I_{15}}$     | —                               |
| $\sigma_i$ | $-n \beta \sigma_{1b}$ | $+n W \sigma_{1b} \frac{V_i}{I_{15}}$     | —                               |

D'après les définitions précédentes, on aura :

- $\sigma_b = \sigma_{1b} - \beta \sigma_{1b} - W \sigma_{1b} \frac{V_b}{I_{15}} = \sigma_{1b} \left( 1 - \beta - W \frac{V_b}{I_{15}} \right)$
- $\sigma_s = -n \beta \sigma_{1b} - n W \sigma_{1b} \frac{V_s}{I_{15}} = \sigma_{1b} \left( -n \beta - n W \frac{V_s}{I_{15}} \right)$
- $\sigma_i = -n \beta \sigma_{1b} + n W \sigma_{1b} \frac{V_i}{I_{15}} = \sigma_{1b} \left( -n \beta + n W \frac{V_i}{I_{15}} \right)$

$$\text{avec } \sigma_{1b} = E_b \epsilon_x = \frac{21 \cdot 10^5}{15} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 56 \text{ bar}$$

84

Effet de la variation de température:

Les contraintes dues à la différence de température sont supposées égales au tiers des contraintes dues au retrait.

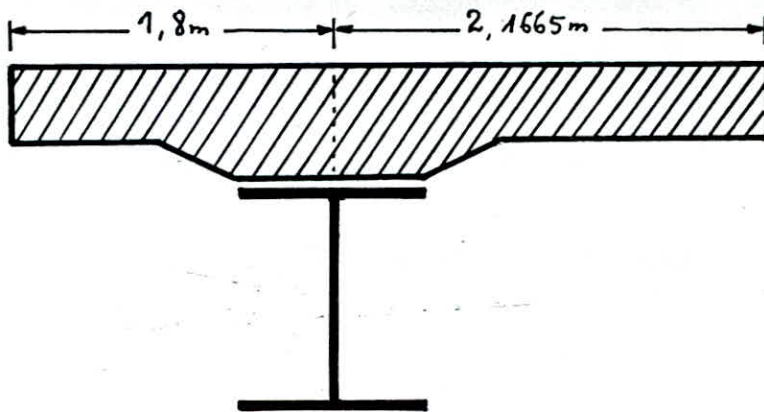
Note: Les coefficients de pondération pour le retrait et la température sont respectivement 1,32 et 1,6

Vérification à la résistance de la section prédimensionnée:

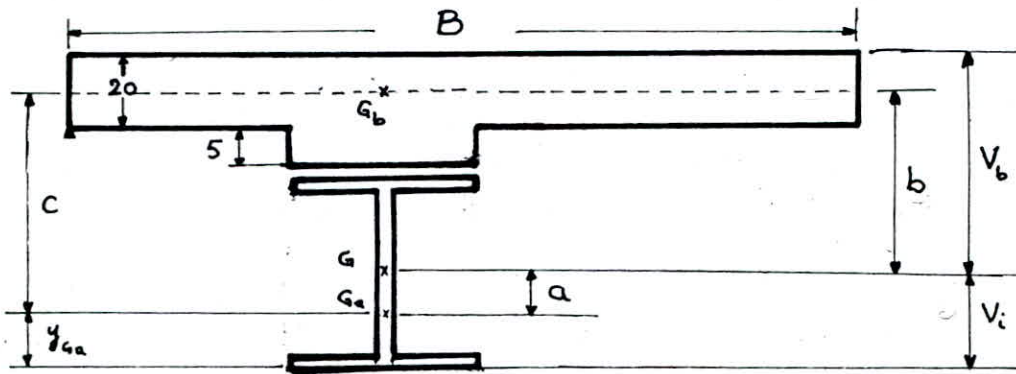
Détermination de la largeur participante (celle du hourdis) revenant à la poutre de rive:

Cette largeur est limitée à la plus restrictive des conditions suivantes:

- 1/  $\frac{B}{2} < \frac{L}{10}$  (  $L$ : portée de la poutre principale)
- 2/  $\frac{B}{2} < \frac{l}{2}$  (  $l$ : distance entre axe des poutres principales)
- 3/  $\frac{B}{2} < \frac{x}{4}$  (  $x$ : distance entre points de moment nuls)



$$B = 1,8 + 2,1665 = 3,9665 \text{ m}$$

Calcul de  $y_{Ga}$ :

$$y_{Ga} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = \frac{(70 \times 3) \cdot 1,5 + (163 \times 3) \cdot \frac{166}{2} + 60 \times 3 \cdot 167,5}{70 \times 3 + 163 \times 3 + 60 \times 3}$$

$$y_{Ga} = \frac{71052}{879} = 80,83 \text{ cm}$$

Calcul de  $y_{Gb}$ :

$$y_{Gb} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = \frac{(396,65 \times 20) \times 10 + 5 \times 55 \times 22,5}{396,65 \times 20 + 5 \times 55}$$

$$y_{Gb} = \frac{85517,5}{8208} = 10,418 \text{ cm (de la partie supérieure de la dalle)}$$

$$\rightarrow y_{Gb} = 194 - 10,418 = 183,582 \text{ cm (par rapport à la semelle inf)}$$

$$\text{donc: } c = y_{Gb} - y_{Ga} = 183,582 - 80,83 = 102,75 \text{ cm}$$

Calcul du moment d'inertie de la section de béton par rapport à  $G_b$ :

$$I_b = \frac{B y_1^3}{12} + \frac{B y_2^3}{12} + A_{1b} d_1^2 + A_{2b} d_2^2$$

$$I_{1b} = \frac{396,65 \times 20^3}{12} + \frac{55 \times 5^3}{12} + (396,65 \times 20) \times 0,418^2 + (55 \times 5) \times 12,082^2$$

$$I_b = 306535,4 \text{ cm}^4$$

Calcul du moment d'inertie de la section d'acier par rapport à  $G_a$ :

$$I_a = \sum \frac{b_i y_i^3}{12} + \sum A_i d_i^2$$

$$I_a = \frac{60 \times 3^3}{12} + \frac{70 \times 3^3}{12} + \frac{3 \times 163^3}{12} + 70 \times 3 \times 79,33^2 + 3 \times 163 \times 3,67^2 + 60 \times 3 \times 86,67^2$$

$$I_a = 3763252 \text{ cm}^4$$

Calcul de la section mixte homogénéisée:

$$\text{on a : } \sum A_i = A_a + \frac{A_b}{n}$$

$$n = \infty : \sum A_i = 879 + \frac{8208}{\infty} = 879 \text{ cm}^2$$

$$n = 18 : \sum A_i = 879 + \frac{8208}{18} = 1335 \text{ cm}^2$$

$$n = 15 : \sum A_i = 879 + \frac{8208}{15} = 1426,2 \text{ cm}^2$$

$$n = 6 : \sum A_i = 879 + \frac{8208}{6} = 2247 \text{ cm}^2$$

Détermination des caractéristiques de la section mixte:

$$a_i = \frac{A_b \cdot c}{n_i \sum A_i} ; b_i = \frac{A_a \cdot c}{\sum A_i} = c - a ; V_{b_i} = b_i + y_{g_b} \text{ avec } y_{g_b} = 10,418 \text{ cm}$$

$$V_i = b - V_{b_i} \text{ avec } b = 134 \text{ cm} ; V_s = V_{b_i} - 25$$

$$A_b = 8208 \text{ cm}^2 ; A_a = 879 \text{ cm}^2 ; c = 102,75 \text{ cm}$$

| $n_i$    | $a_i$ (cm) | $b_i$ (cm) | $V_{b_i}$ (cm) | $V_i$ (cm) | $V_s$ (cm) |
|----------|------------|------------|----------------|------------|------------|
| $\infty$ | 0          | 102,75     | 113,17         | 80,83      | 88,17      |
| 18       | 35,1       | 67,65      | 78,07          | 115,93     | 53,07      |
| 15       | 39,42      | 63,33      | 73,75          | 120,25     | 48,75      |
| 6        | 62,55      | 40,2       | 50,62          | 143,38     | 25,62      |

Calcul des inerties de la section mixte:

$$I_{\text{mixte}} = I_A + \frac{I_B}{n} + c^2 \frac{A_b A_a}{n \sum A_i}$$

| $n$                                      | $\infty$ | 18      | 15      | 6       |
|--|----------|---------|---------|---------|
| $I_{\text{mixte}} \text{ (cm}^4\text{)}$ | 3763252  | 6950113 | 7630346 | 9464173 |

Calcul du moment statique du béton pour  $n = 15$ 

$$W_{b,15} = b_{15} \cdot \frac{A_b}{15} = 63,33 \cdot \frac{8208}{15}$$

$$W_{b,15} = 34654 \text{ cm}^3$$

Tableau des caractéristiques de la section:

| $n$                                  | $\infty$ | 18      | 15        | 6         |
|--------------------------------------|----------|---------|-----------|-----------|
| $I$ (cm <sup>4</sup> )               | 3763252  | 6950113 | 7930346   | 9464173   |
| $V_b$ (cm)                           | 113,17   | 78,07   | 73,75     | 50,62     |
| $V_s$ (cm)                           | 88,17    | 53,07   | 48,75     | 25,62     |
| $V_i$ (cm)                           | 80,83    | 115,93  | 120,25    | 143,38    |
| $\frac{I}{V_b}$ (cm <sup>3</sup> )   | 33253    | 89024   | 103462,32 | 186965,1  |
| $n \frac{I}{V_b}$ (cm <sup>3</sup> ) | /        | 1602434 | 1551935   | 1121790,5 |
| $\frac{I}{V_s}$ (cm <sup>3</sup> )   | 42682    | 130961  | 156520    | 369406    |
| $\frac{I}{V_i}$ (cm <sup>3</sup> )   | 46557,61 | 59940,6 | 63454     | 66007,6   |
| $A$ (cm <sup>2</sup> )               | /        | /       | 879       | /         |
| $B$ (cm <sup>2</sup> )               | /        | /       | 8208      | /         |
| $W$ (cm <sup>3</sup> )               | /        | /       | 34654     | /         |

Vérification de la résistance pour la section ①:

Calcul des contraintes:

- Effet du retrait et de la température:

$$n = 15 ; \quad \beta = \frac{B_{15}}{A + B_{15}} = \frac{\frac{8208}{15}}{879 + \frac{8208}{15}} = 0,384$$

$$\sigma_{16} = 56 \text{ bar}$$

$$\sigma_b = \sigma_{16} \left( 1 - \beta - n \frac{W}{I_{15}} \right) = 56 \left( 1 - 0,384 - 15 \cdot \frac{34654}{103462,32} \right) = 15,74 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = \sigma_{16} \left( -n\beta - n \frac{W}{I_{15}} \right) = 56 \left( -15 \cdot 0,384 - 15 \cdot \frac{34654}{156520} \right) = -508,54 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \sigma_{16} \left( -n\beta + n \frac{W}{I_{15}} \right) = 56 \left( -15 \cdot 0,384 + 15 \cdot \frac{34654}{63454} \right) = +136,2 \text{ bar}$$

finallement, le retrait developpe les contraintes suivantes:

$$\sigma_b = 1,32 \times 15,74 = 20,78 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = 1,32 \times (-508,54) = -671,27 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = 1,32 \times 136,2 = 179,78 \text{ bar}$$

Pour l'effet de la temperature, on a les contraintes suivantes:

$$\sigma_b = 1,6 \times \frac{15,74}{3} = 8,4 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = 1,6 \times \frac{-508,54}{3} = -271,22 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = 1,6 \times \frac{136,2}{3} = 72,64 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux charges permanentes (CP):

$$n = \infty \quad \sigma_b = 0 \quad M = 136,22 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{136,22 \cdot 10^5}{42682} = -319,15 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{136,22 \cdot 10^5}{46557,61} = 292,58 \text{ bar}$$

Contraintes dues au complement de charges permanentes (CCP):

$$n = 18 \quad M = 26,05 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{26,05 \cdot 10^5}{1602434} = -1,63 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{26,05 \cdot 10^5}{130961} = -19,9 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{26,05 \cdot 10^5}{59940,6} = 43,46 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux surcharges maximale + surcharge trottoir:

$$n = 6 \quad M = 335,3 + 12,98 = 348,28 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{348,28 \cdot 10^5}{1121790,5} = -31,05 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{348,28 \cdot 10^5}{369406} = -94,28 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{348,28 \cdot 10^5}{66007,6} = 527,64 \text{ bar}$$

| charges        | n        | M (mkdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 136,22    | 0                | -319,15          | 292,58           |
| CCP            | 18       | 26,05     | -1,63            | -19,9            | 43,46            |
| Retrait        | 15       | /         | 20,78            | -671,27          | 179,78           |
| temperature    | 15       | /         | 8,4              | -271,22          | 72,64            |
| Surcharge      | 6        | 348,28    | -31,05           | -94,28           | 527,64           |
| total          | /        | /         | -3,5             | -1375,82         | 1116,1           |
| $\sigma_{adm}$ | /        | /         | -180             | -2400            | 2400             |

Conclusion : Le PRS passe pour la section ①

Verification à la resistance pour la section ② :

Pour la section ②, les caracteristiques sont les memes que pour la section ①

Par contre les efforts changent.

Les contraintes dues aux effets du retrait et la temperature restent elle aussi inchangées

Contraintes dues aux charges permanentes : (CP) :

$$n = \infty \quad M = 242,34 \text{ mkdaN} \quad \sigma_b = 0$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{242,34 \cdot 10^5}{42682} = -567,78 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{242,34 \cdot 10^5}{46557,61} = 520,52 \text{ bar}$$

Contraintes dues au complement de charges permanentes : (CCP) :

$$n = 18 \quad M = 46,3 \text{ mkdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = \frac{46,3 \cdot 10^5}{1602434} = -2,89 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = \frac{46,3 \cdot 10^5}{130961} = -35,35 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{46,3 \cdot 10^5}{59940,6} = 77,24 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux surcharges maximale + surcharge de trottoir:

$$n = 6 \quad M = 596,06 + 23,08 = 619,14 \text{ mkdaN}$$

$$\sigma_b = - \frac{M}{nI} V_b = - \frac{619,14 \cdot 10^5}{112790,5} = - 55,19 \text{ bar}$$

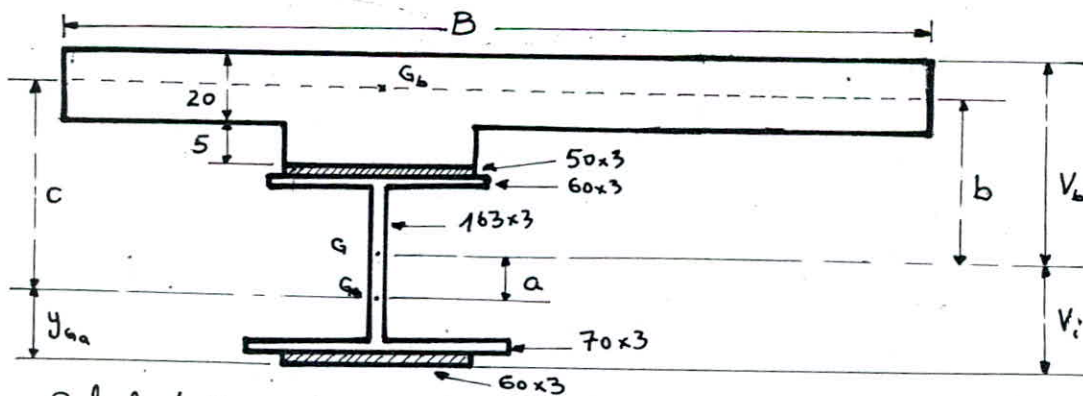
$$\sigma_s = - \frac{M}{I} V_s = - \frac{619,14 \cdot 10^5}{369406} = - 167,6 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{619,14 \cdot 10^5}{66007,6} = 937,98 \text{ bar}$$

| charges        | n        | M(mkdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 242,34   | 0                | -567,78          | 520,52           |
| CCP            | 18       | 46,3     | -2,89            | -35,35           | 77,24            |
| Retrait        | 15       |          | 20,78            | -671,27          | 179,78           |
| temperature    | 15       |          | 8,4              | -271,22          | 72,64            |
| Surcharge      | 6        | 619,14   | -55,19           | -167,6           | 937,98           |
| total          |          |          | -28,9            | -1713,22         | 1788,16          |
| $\sigma_{adm}$ |          |          | -180             | -2400            | 2400             |

Conclusion: Le PRS passe pour la section ②

Verification à la resistance de la section ③:



Calcul de  $y_{Ga}$ :

$$y_{Ga} = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = \frac{(60 \times 3 \times 1,5) + (70 \times 3 \times 4,5) + (163 \times 3 \times 87,5) + (60 \times 3 \times 170,5) + (50 \times 3 \times 173,5)}{(60 \times 3) + (70 \times 3) + (163 \times 3) + (60 \times 3) + (50 \times 3)}$$

$$y_{Ga} = \frac{100717,5}{1209} = 83,3 \text{ cm}$$



Calcul de  $y_{Gb}$ :

$$y_{Gb} = 10,418 \text{ cm (de la partie supérieure de la dalle)}$$

→ par rapport à la semelle additionnelle inférieure de la poutre, on a:

$$y_{Gb} = 200 - 10,418 = 189,58 \text{ cm}$$

$$c = y_{Gb} - y_{Ga} = 189,58 - 83,3 = 106,28 \text{ cm}$$

Calcul du moment d'inertie de la section du béton par rapport à  $G_b$ :

$$I_b = \frac{B y_1^3}{12} + \frac{B' y_2^3}{12} + A_{1b} d_1^2 + A_{2b} d_2^2$$

$$I_b = 306535,4 \text{ cm}^4$$

Calcul du moment d'inertie de la section d'acier par rapport à  $G_a$ :

$$I_a = \sum \frac{b_i y_i^3}{12} + \sum A_i d_i^2$$

$$I_a = \frac{60 \times 3^3}{12} + \frac{70 \times 3^3}{12} + \frac{3 \times 163^3}{12} + \frac{60 \times 3^3}{12} + \frac{50 \times 3^3}{12} + [60 \times 3 \times (83,3 - 1,5)^2] + [70 \times 3 \times (83,3 - 4,5)^2] + [163 \times 3 \times (83,3 - (\frac{163}{2} + 4))^2] + [60 \times 3 \times (83,3 - (169 + 1,5))^2] + [50 \times 3 \times (173,5 - 83,3)^2]$$

$$I_a = 6189355,51 \text{ cm}^4$$

Calcul de la section mixte homogénéisée

$$\sum A_i = A_a + \frac{A_b}{n}$$

$$n = \infty : \sum A_i = 1209 + \frac{8208}{\infty} = 1209 \text{ cm}^2$$

$$n = 18 : \sum A_i = 1209 + \frac{8208}{18} = 1665 \text{ cm}^2$$

$$n = 15 : \sum A_i = 1209 + \frac{8208}{15} = 1756,2 \text{ cm}^2$$

$$n = 6 : \sum A_i = 1209 + \frac{8208}{6} = 2577 \text{ cm}^2$$

Détermination des caractéristiques de la section mixte:

$$a_i = \frac{A_b \cdot c}{n_i \sum A_i} ; b_i = \frac{A_a \cdot c}{\sum A_i} = c - a_i$$

$$V_{b_i} = b_i - y_{Gb} ; V_i = b - V_{b_i} ; V_{s_i} = V_{b_i} - 25$$

$$b = 200 \text{ cm} ; y_{Gb} = 10,418 \text{ cm} ; c = 106,28 \text{ cm}$$

| $n$      | $a_i$ (cm) | $b_i$ (cm) | $V_{b_i}$ (cm) | $V_i$ (cm) | $V_{s_i}$ (cm) |
|----------|------------|------------|----------------|------------|----------------|
| $\infty$ | 0          | 106,28     | 95,86          | 93,72      | 70,86          |
| 18       | 29,11      | 77,17      | 66,75          | 133,24     | 41,75          |
| 15       | 33,11      | 73,16      | 62,75          | 137,25     | 37,75          |
| 6        | 56,42      | 49,86      | 39,44          | 160,56     | 14,44          |

Inertie de la section mixte

$$I_{mixte} = I_A + \frac{I_b}{n} + e^2 \frac{A_b A_a}{n \sum A_i}$$

| $n$                            | $\infty$   | 18         | 15       | 6        |
|--------------------------------|------------|------------|----------|----------|
| $I_{mixte}$ (cm <sup>4</sup> ) | 6189355,51 | 9946457,55 | 10464810 | 13489828 |

Calcul du moment statique du béton pour  $n=15$  :

$$W_{b,15} = b_{15} \cdot \frac{A_b}{15} = 73,16 \cdot \frac{8208}{15} = 40035,94 \text{ cm}^3$$

| $n$                                 | $\infty$   | 18         | 15       | 6        |
|-------------------------------------|------------|------------|----------|----------|
| $I$ (cm <sup>4</sup> )              | 6189355,51 | 9946457,55 | 10464810 | 13489828 |
| $V_b$ (cm)                          | 95,86      | 66,75      | 62,75    | 39,44    |
| $V_i$ (cm)                          | 93,72      | 133,24     | 137,25   | 160,56   |
| $V_s$ (cm)                          | 70,86      | 41,75      | 37,75    | 14,44    |
| $\frac{I}{V_b}$ (cm <sup>3</sup> )  | 64566,6    | 149010,6   | 166770   | 342034   |
| $\frac{nI}{V_b}$ (cm <sup>3</sup> ) | /          | 2682191    | 2501548  | 2052205  |
| $\frac{I}{V_s}$ (cm <sup>3</sup> )  | 87346,25   | 238238,5   | 277213,5 | 934198,6 |
| $\frac{I}{V_i}$ (cm <sup>3</sup> )  | 66041      | 74650,7    | 76246,34 | 84017,36 |
| $A$ (cm <sup>2</sup> )              | /          | /          | 1209     | /        |
| $B$ (cm <sup>2</sup> )              | /          | /          | 8208     | /        |
| $W$ (cm <sup>3</sup> )              | /          | /          | 40035,94 | /        |

Calcul des contraintes:Effet du retrait:

$$n = 15 \quad \beta = \frac{\frac{8208}{15}}{\frac{8208}{15} + 1209} = 0,311$$

$$\sigma_b = \sigma_{1b} \left( 1 - \beta - n W \frac{V_b}{I_{15}} \right) = 56 \left( 1 - 0,311 - 40035,93 \cdot \frac{1}{166770} \right) = 25,14 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = \sigma_{1b} \left( -n\beta - n W \frac{V_s}{I_{15}} \right) = 56 \left( -15 \cdot 0,311 - 15 \cdot \frac{40035,93}{277213,5} \right) = -382,55 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \sigma_{1b} \left( -n\beta + n W \frac{V_i}{I_{15}} \right) = 56 \left( -15 \cdot 0,311 + 15 \cdot \frac{40035,93}{76246,34} \right) = 179,8 \text{ bar}$$

On a donc pour le retrait les contraintes suivantes:

$$\sigma_b = 1,32 \times 25,14 = 33,18 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = 1,32 \times (-382,55) = -504,97 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = 1,32 \times 179,8 = 237,34 \text{ bar}$$

Effet de la température:

$$\sigma_b = \frac{1}{3} \times 1,6 \times 25,14 = 13,41 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = \frac{1}{3} \times 1,6 \times (-382,55) = -204,03 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{1}{3} \times 1,6 \times 179,8 = 95,89 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux charges permanentes (CP):

$$n = \infty \quad M = 318,07 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = 0$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{318,07 \cdot 10^5}{87346,25} = -364,15 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = +\frac{M}{I} V_i = \frac{318,07 \cdot 10^5}{66041} = 461,62 \text{ bar}$$

Contraintes dues au complément de charges permanentes (CCP):

$$n = 18 \quad M = 60,77 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{60,77 \cdot 10^5}{2682191} = -2,26 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{60,77 \cdot 10^5}{238238,5} = -25,51 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{60,77 \cdot 10^5}{74650,7} = 81,41 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux surcharge maximale + surcharge de trottoir:

$$n = 6 \quad M = 782,34 + 30,31 = 812,65 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = - \frac{M}{nI} V_b = - \frac{812,65 \cdot 10^5}{2052205} = - 39,6 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = - \frac{M}{I} V_s = - \frac{812,65 \cdot 10^5}{934198,6} = - 87 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{812,65 \cdot 10^5}{84017,36} = 967,24 \text{ bar}$$

| charges        | n        | M(mKdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 318,07   | 0                | -364,15          | 461,62           |
| CCP            | 18       | 60,77    | -2,26            | -25,51           | 81,41            |
| Retrait        | 15       |          | 33,18            | -504,97          | 237,34           |
| Temperature    | 15       |          | 13,41            | -204,03          | 95,89            |
| Surcharge      | 6        | 812,65   | -39,6            | -87              | 967,24           |
| Total          |          |          | 4,73             | -1185,66         | 1843,5           |
| $\sigma_{adm}$ |          |          | 180              | 2400             | 2400             |

Conclusion: Le PRS passe pour la section ③

Verification à la resistance de la section ④:

Pour la section ④, les caracteristiques sont les memes que pour la section ③

Par contre les efforts changent.

Les contraintes dues aux effets de retrait et de la temperature restent elle aussi inchangées

Contraintes dues aux charges permanentes (CP):

$$n = \infty \quad M = 363,5 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = 0$$

$$\sigma_s = - \frac{M}{I} V_s = - \frac{363,5 \cdot 10^5}{87346,25} = - 416,16 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{363,5 \cdot 10^5}{66041} = 550,42 \text{ bar}$$

Contraintes dues au complement de charges permanentes (CCP):

$$n = 18 \quad M = 69,46 \text{ mkdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{69,46 \cdot 10^5}{2682191} = -2,59 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{69,46 \cdot 10^5}{238238,5} = -29,16 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{69,46 \cdot 10^5}{74650,7} = 93,05 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux surcharges maximale + surcharge de trottoir:

$$n = 6 \quad M = 894,1 + 34,63 = 928,73 \text{ mkdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{928,73 \cdot 10^5}{2052205} = -45,25 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{928,73 \cdot 10^5}{934198,6} = -99,41 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{928,73 \cdot 10^5}{84017,36} = 1105,4 \text{ bar}$$

| Charges        | n        | M (mkdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 363,5     | 0                | -416,16          | 550,42           |
| CCP            | 18       | 69,36     | -2,59            | -29,16           | 93,05            |
| Retrait        | 15       |           | 33,18            | -504,97          | 237,34           |
| Temperature    | 15       |           | 13,41            | -204,03          | 95,89            |
| Surcharges     | 6        | 928,73    | -45,25           | -99,41           | 1105,4           |
| TOTAL          |          |           | -1,25            | -1253,73         | 2082,1           |
| $\sigma_{adm}$ |          |           | -180             | -2400            | 2400             |

Conclusion: Le PRS passe pour la section ④

Vérification à la résistance pour la section ⑤:

Pour la section ⑤, les caractéristiques sont les mêmes que pour la section ③

Les contraintes dues au retrait et à la température restent inchangées.

Seuls les efforts changent.

Contraintes dues aux charges permanentes: (CP)

$$n = \infty \quad M = 378,66 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = 0$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{378,66 \cdot 10^5}{87346,25} = -433,52 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = +\frac{378,66 \cdot 10^5}{66041} = 573,37 \text{ bar}$$

Contraintes dues au complement de charges permanentes (CCP):

$$n = 18 \quad M = 72,35 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{72,35 \cdot 10^5}{2632191} = -2,7 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{72,35 \cdot 10^5}{238238,5} = -30,37 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{72,35 \cdot 10^5}{74650,7} = 96,92 \text{ bar}$$

Contraintes dues aux surcharge maximale + surcharge de retrait:

$$n = 6 \quad M = 931,35 + 36,08 = 967,43 \text{ mKdaN}$$

$$\sigma_b = -\frac{M}{nI} V_b = -\frac{967,43 \cdot 10^5}{2052205} = -47,14 \text{ bar}$$

$$\sigma_s = -\frac{M}{I} V_s = -\frac{967,43 \cdot 10^5}{934198,6} = -103,56 \text{ bar}$$

$$\sigma_i = \frac{M}{I} V_i = \frac{967,43 \cdot 10^5}{84017,36} = 1151,46 \text{ bar}$$

| Charges        | n        | M (mKdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 378,66    | 0                | -433,52          | 573,37           |
| CCP            | 18       | 72,35     | -2,7             | -30,37           | 96,92            |
| Retrait        | 15       | ?         | 33,18            | -504,97          | 237,34           |
| Temperature    | 15       |           | 13,41            | -204,03          | 95,89            |
| Surcharge      | 6        | 967,43    | -47,14           | -103,56          | 1151,46          |
| TOTAL          |          |           | -3,25            | -1276,45         | 2154,98          |
| $\sigma_{adm}$ |          |           | -180             | -2400            | 2400             |

Conclusion : Le PRS passe pour la section ⑤

Vérification des contraintes de cisaillement dans la poutre:

On considérera le cas le plus défavorable dans la poutre de rive n° ①  
 et on calculera pour chaque section (0, 1, 2, 3, 4, 5) de cette poutre l'effort tranchant  
 résultant (CP + CCP + surcharge max (Bc 3voies chargées) + surcharge flottante)

On aura donc :

| Section  | 0      | 1      | 2      | 3    | 4     | 5     |
|----------|--------|--------|--------|------|-------|-------|
| T (kdaN) | 157,51 | 132,59 | 109,03 | 82,9 | 58,04 | 33,99 |

Notre profilé a une section d'âme

$$A_a = 3 \times 163 = 489 \text{ cm}^2$$

Il s'agit de vérifier dans chaque section :  $\tau_i = \frac{T_i}{A} < \bar{\tau} = \frac{\sigma_{en}}{1,54}$

| Section            | 0      | 1      | 2      | 3      | 4      | 5     |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| $\tau_i$ (bar)     | 322,11 | 271,14 | 222,96 | 169,53 | 118,69 | 69,51 |
| $\bar{\tau}$ (bar) | 1558   | 1558   | 1558   | 1558   | 1558   | 1558  |

Donc le cisaillement est vérifié.

### Voilement des âmes de poutres:

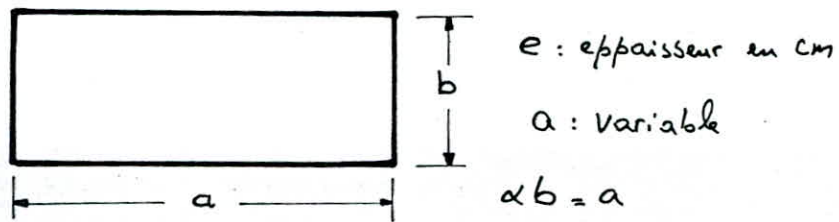
L'âme de la poutre est une plaque de dimensions  $a \times b$  ( $a = \alpha b$ ) et d'épaisseur  $e$ . Elle est délimitée par les semelles et les raidisseurs verticaux.

La flexion pure introduit dans la tôle des contraintes de compression dans la partie supérieure et de traction dans la partie inférieure.

L'étude de la stabilité par la méthode de l'énergie conduit à définir une contrainte  $\sigma^*$  dite critique de voilement.

Théoriquement si  $\sigma > \sigma^*$ , l'équilibre de la tôle devient instable.

Dans le cas du cisaillement pur, le panneau de dimensions  $a \times b$  résiste jusqu'à ce que les contraintes des membrures obliques atteignent la limite élastique  $\bar{\sigma}_s$ .



### Méthode des raidisseurs rigides:

Dans la vérification de la stabilité des panneaux élémentaires non raidis,

on doit vérifier : 
$$\left( S_\sigma \cdot \frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^2 + \left( \frac{\xi}{\xi^*} \right)^2 \leq 1,8$$

$\sigma^*$  et  $\xi^*$  étant les contraintes critiques du panneau élémentaire

Nota: La valeur (1,8) est fixée compte tenu du fait que  $\sigma$  et  $\xi$  ne sont pas des contraintes admissibles mais résultent de combinaison d'actions.

$$\sigma^* = \sigma_c \cdot K_\sigma = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{e}{b} \right)^2 \cdot K_\sigma \quad E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ bar}$$

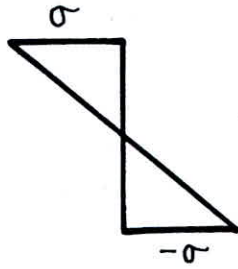
$$\xi^* = \sigma_c \cdot K_\xi = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{e}{b} \right)^2 \cdot K_\xi \quad \nu = 0,3$$

$$S_\sigma = \begin{cases} 1,8 & \text{si } \psi = 1 \\ 1,4 + 0,4\psi & \text{si } -1 \leq \psi \leq +1 \\ 1 & \text{si } \psi < -1 \end{cases} \quad \text{avec : } \psi = \frac{\sigma_{\text{traction}}}{\sigma_{\text{compression}}}$$



Valeurs de  $K_\sigma$  et  $K_\tau$  pour un panneau non raidi et articulé sur les bords.

$\psi \leq -1$



$\alpha \geq \frac{a}{b} = \frac{5,8}{1,63} = 3,558 > 0,667$

donc  $K_\sigma = 23,9$

$\alpha > 0,667$

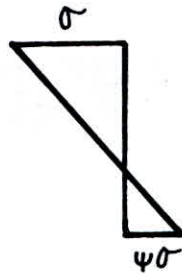
$0 \leq \psi \leq 1$



$\alpha \geq 1 \quad K_\sigma = \frac{8,4}{\psi + 1,1}$

$\alpha \leq 1 \quad K_\sigma = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{2,1}{\psi + 1,1}$

$-1 \leq \psi \leq 0$

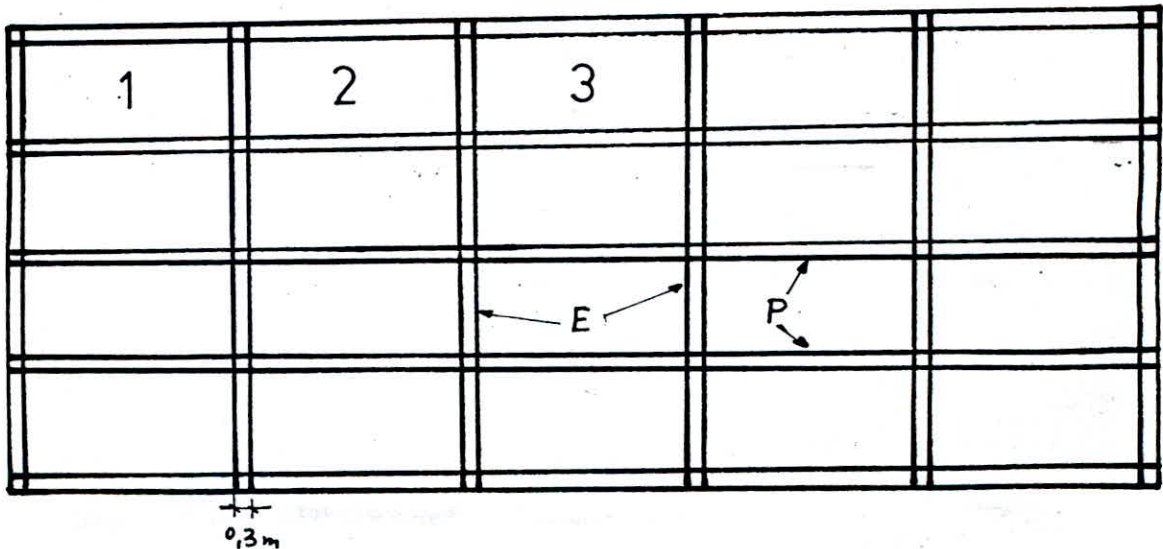


$K_\sigma = (1 + \psi) K_\sigma(\psi=0) - \psi K_\sigma(\psi=-1) + 10\psi(1 + \psi)$

Cisaillement  $\tau$  :

$$\begin{cases} \alpha \geq 1 & K_\tau = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2} \\ \alpha \leq 1 & K_\tau = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2} \end{cases}$$

Notre étude se porte sur 3 panneaux dont la représentation est schématisée ci après :



Etude du panneau ①:Calcul des efforts sous les différents types de charges et surcharges:a/ Charges permanentes (CP):

$$q = 13644 \text{ daN/ml}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} \quad \text{où } x = 0,3 + \frac{5,8}{2} = 3,2 \text{ m}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx$$

$$M = 563,22 \text{ mkdaN} \quad T = 154,18 \text{ KdaN}$$

b/ Complément de charges permanentes (CCP):

$$q = 2607 \text{ daN/ml} \quad x = 3,2 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} \quad T = q \frac{l}{2} - qx$$

$$M = 107,62 \text{ mkdaN} \quad T = 29,46 \text{ KdaN}$$

c/ Surcharge D:

Le calcul des efforts dus à la surcharge D à 3,2 m seront déterminés par interpolation

$$x = 2,9 \text{ m} \quad M = 626,4 \text{ mkdaN} \quad T = 139,03 \text{ KdaN}$$

$$x = 3,2 \text{ m} \quad M = 676,8 \text{ mkdaN} \quad T = 137,4 \text{ KdaN}$$

$$x = 5,8 \text{ m} \quad M = 1113,6 \text{ mkdaN} \quad T = 123,3 \text{ KdaN}$$

d/ Surcharge de trottoir:

$$q = 150 \times 2,1665 = 325 \text{ daN/ml} \quad x = 3,2 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} \quad T = q \frac{l}{2} - qx$$

$$M = 13,42 \text{ mkdaN} \quad T = 3,67 \text{ KdaN}$$

Etude du panneau ②:a/ Charges permanentes (CP):

$$q = 13644 \text{ daN/ml} \quad x = 0,3 + 5,8 + \frac{5,8}{2} = 9 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} = 1227,96 \text{ mkdaN}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx = 75,04 \text{ KdaN}$$

b/ Complément de charges permanentes (CCP):

$$q = 2607 \text{ daN/ml} \quad x = 9 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} = 234,63 \text{ mKdaN}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx = 14,34 \text{ KdaN}$$

c/ Surcharge D:

$$x = 8,7 \text{ m} \quad M = 1461,6 \text{ mKdaN} \quad T = 99,3 \text{ KdaN}$$

$$x = 9 \text{ m} \quad M = 1483,2 \text{ mKdaN} \quad T = 96,82 \text{ KdaN}$$

$$x = 11,6 \text{ m} \quad M = 1670,4 \text{ mKdaN} \quad T = 75,3 \text{ KdaN}$$

d/ Surcharge de trottoir:

$$q = 150 \times 2,1665 = 325 \text{ daN/ml} \quad x = 9 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} = 29,25 \text{ mKdaN}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx = 1,79 \text{ KdaN}$$

Etude du panneau n° ③:a/ Charges permanentes (CP):

$$q = 13644 \text{ daN/ml} \quad x = 0,3 + 5,8 + 5,8 + \frac{5,8}{2} = 14,8 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} = 1433,71 \text{ mKdaN}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx = -4,09 \text{ KdaN}$$

b/ Complément de charges permanentes (CCP):

$$q = 2607 \text{ daN/ml} \quad x = 14,8 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} = 273,94 \text{ mKdaN}$$

$$T = q \frac{l}{2} - qx = -0,78 \text{ KdaN}$$

c/ Surcharge D:

$$x = 14,5 \text{ m} \quad M = 1740 \text{ mKdaN} \quad T = 51,3 \text{ KdaN}$$

$$x = 14,8 \text{ m} \quad M = 1732,8 \text{ mKdaN} \quad T = 53,78 \text{ KdaN}$$

$$x = 17,4 \text{ m} \quad M = 1670,4 \text{ mKdaN} \quad T = 75,3 \text{ KdaN}$$

d/ Surcharges de trottoir:

$$q = 150 \times 2,1665 = 325 \text{ daN/ml} \quad \alpha = 14,8 \text{ m}$$

$$M = q \frac{l}{2} x - q \frac{x^2}{2} = 34,15 \text{ mKdaN}$$

$$T = q \frac{l}{2} - q x = -0,0975 \text{ KdaN}$$

| Panneau | charges effort | CP      | CCP    | D      | trottoir |
|---------|----------------|---------|--------|--------|----------|
| 1       | M mKdaN        | 563,22  | 107,62 | 676,8  | 13,42    |
|         | T KdaN         | 154,18  | 29,46  | 137,4  | 3,67     |
| 2       | M mKdaN        | 1227,96 | 234,63 | 1483,2 | 29,25    |
|         | T KdaN         | 75,04   | 14,34  | 96,82  | 1,79     |
| 3       | M mKdaN        | 1433,71 | 273,94 | 1732,8 | 34,15    |
|         | T KdaN         | -4,09   | -0,78  | 53,78  | -0,0975  |

## Tableau des efforts majorés et pondérés

## Panneau 1

| charge   | $\rho$ | M(mKdaN) | T(KdaN) | $\delta$ | Mmaj    | Tmaj  | Pondération | Mmaj pond | Tmaj pond |
|----------|--------|----------|---------|----------|---------|-------|-------------|-----------|-----------|
| CP       | 0,2    | 112,644  | 30,84   | 1        | 112,644 | 30,84 | 1,32        | 148,7     | 40,7      |
| CCP      | 0,2    | 21,52    | 5,89    | 1        | 21,52   | 5,89  | 1,32        | 28,41     | 7,78      |
| D        | 0,4055 | 274,44   | 55,72   | 1        | 274,44  | 55,72 | 1,32        | 362,26    | 73,54     |
| trottoir | 0,66   | 8,86     | 2,42    | 1        | 8,86    | 2,42  | 1,6         | 14,17     | 3,87      |

## Panneau n°: 2

| charge   | $\rho$ | M(mKdaN) | T(KdaN) | $\delta$ | Mmaj   | Tmaj  | Pondération | Mmaj pond | Tmaj pond |
|----------|--------|----------|---------|----------|--------|-------|-------------|-----------|-----------|
| CP       | 0,2    | 245,6    | 15      | 1        | 245,6  | 15    | 1,32        | 324,2     | 19,8      |
| CCP      | 0,2    | 46,93    | 2,87    | 1        | 46,93  | 2,87  | 1,32        | 61,94     | 3,78      |
| D        | 0,4055 | 601,44   | 39,26   | 1        | 601,44 | 39,26 | 1,32        | 793,8     | 51,82     |
| trottoir | 0,66   | 19,3     | 1,18    | 1        | 19,3   | 1,18  | 1,6         | 30,89     | 1,89      |

Panneau 3

| charge  | $\rho$ | M (mkdaN) | T (KdaN) | $\delta$ | M <sub>maj</sub> | T <sub>maj</sub> | Pondération | M <sub>maj pond</sub> | T <sub>maj pond</sub> |
|---------|--------|-----------|----------|----------|------------------|------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| CP      | 0,2    | 286,74    | -0,82    | 1        | 286,74           | -0,82            | 1,32        | 378,5                 | -1,08                 |
| CCP     | 0,2    | 54,79     | -0,16    | 1        | 54,79            | -0,16            | 1,32        | 72,32                 | -0,2                  |
| D       | 0,4051 | 702,65    | 21,81    | 1        | 702,65           | 21,81            | 1,32        | 927,5                 | 28,79                 |
| travail | 0,66   | 22,54     | -0,064   | 1        | 22,54            | -0,064           | 1,6         | 36,06                 | -0,103                |

Verification des contraintes:Panneau 1

| charges        | n        | M (mkdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 148,7     | 0                | -348,39          | 319,39           |
| CCP            | 18       | 28,41     | -1,77            | -21,69           | 47,4             |
| Retrait        | 15       |           | 20,78            | -671,27          | 179,78           |
| température    | 15       |           | 8,4              | -271,22          | 72,64            |
| Surcharge      | 6        | 376,43    | -33,56           | -101,9           | 570,3            |
| Total          |          |           | -6,15            | -1414,47         | 1189,51          |
| $\sigma_{adm}$ |          |           | -180             | -2400            | 2400             |

Panneau 2

| charges        | n        | M (mkdaN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 324,2     | 0                | -371,17          | 490,91           |
| CCP            | 18       | 61,94     | -2,31            | -26              | 82,97            |
| Retrait        | 15       |           | 33,18            | -504,97          | 237,34           |
| température    | 15       |           | 13,41            | -204,03          | 95,89            |
| Surcharge      | 6        | 824,69    | -40,18           | -88,28           | 981,57           |
| total          |          |           | 4,1              | -1194,45         | 1888,68          |
| $\sigma_{adm}$ |          |           | 180              | -2400            | 2400             |

Panneau 3 :

| charges        | n        | M (mKdAN) | $\sigma_b$ (bar) | $\sigma_s$ (bar) | $\sigma_i$ (bar) |
|----------------|----------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| CP             | $\infty$ | 378,5     | 0                | -433,33          | 573,13           |
| CCP            | 18       | 72,32     | -2,7             | -30,36           | 96,9             |
| Retrait        | 15       |           | 33,18            | -504,97          | 237,34           |
| temperature    | 15       |           | 13,41            | -204,03          | 95,89            |
| Surcharges     | 6        | 963,56    | -46,95           | -103,14          | 1146,81          |
| Total          |          |           | -3,06            | -1275,83         | 2150,07          |
| $\sigma_{adm}$ |          |           | -180             | -2400            | 2400             |

Calcul de  $K_\sigma$  :

$$K_\sigma(\psi=0) = \frac{8,4}{\psi+1,1} = \frac{8,4}{1,1} = 7,636$$

$\alpha > 1$

$$K_\sigma(\psi=-1) = 23,9 \quad \alpha > 0,667$$

$$K_\sigma = (1+\psi) K_\sigma(\psi=0) - \psi K_\sigma(\psi=-1) + 10\psi(1+\psi)$$

$$\text{Panneau ① : } K_{\sigma_1} = 19,921$$

$$\text{Panneau ② : } K_{\sigma_2} = 42,361$$

$$\text{Panneau ③ : } K_{\sigma_3} = 46,38$$

Calcul de  $K_E$  :

$$\alpha = 3,558 > 1 \Rightarrow K_E = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2} = 46,38$$

Vérification au Voilement:

| Panneau   | 1                            | 2                           | 3                           |
|---|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| a (m)   | 5,8                          | 5,8                         | 5,8                         |
| b (m)   | 1,63                         | 1,63                        | 1,63                        |
| e (cm)  | 3                            | 3                           | 3                           |
| $\alpha = a/b \ (a > b)$  | 3,558                        | 3,558                       | 3,558                       |
| $K_B$   | 5,6559                       | 5,6559                      | 5,6559                      |
| $\sigma_c = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{e}{b}\right)^2$ | 642,93                       | 642,93                      | 642,93                      |
| $E^* = \sigma_c \cdot K_B$  | 3636,35                      | 3636,35                     | 3636,35                     |
| $\sigma$  | 257,44                       | 158,06                      | 56,05                       |
| $(\sigma/E^*)^2$  | $5,012 \cdot 10^{-3}$        | $1,889 \cdot 10^{-3}$       | $0,237 \cdot 10^{-3}$       |
| $\sigma_i$  | 1189,51                      | 1888,68                     | 2150,07                     |
| $\sigma_s$  | -1414,47                     | -1194,45                    | -1275,83                    |
| $\psi = \sigma_i / \sigma_s$  | -0,841                       | -1,581                      | -1,685                      |
| $S_\sigma$  | 1,0636                       | 1                           | 1                           |
| $K_\sigma$  | 19,92                        | 42,36                       | 46,38                       |
| $\sigma^* = \sigma_c K_\sigma$  | 12807,16                     | 27234,5                     | 29819,1                     |
| $\sigma = \max( \sigma_s, \sigma_i )$                                     | 1414,47                      | 1888,68                     | 2150,07                     |
| $(S_\sigma \cdot \frac{\sigma}{\sigma^*})^2$                              | $13,8 \cdot 10^{-3}$         | $4,81 \cdot 10^{-3}$        | $5,2 \cdot 10^{-3}$         |
| $(S_\sigma \cdot \frac{\sigma}{\sigma^*})^2 + (\frac{\sigma}{E^*})^2$     | $18,812 \cdot 10^{-3} < 1,8$ | $6,698 \cdot 10^{-3} < 1,8$ | $5,437 \cdot 10^{-3} < 1,8$ |
| Voilement   | Pas de voilement             | Pas de Voilement            | Pas de Voilement            |

## DEFORMATION

Les déformations élastiques sous les surcharges doivent être inférieures à certaines limites pour des raisons de rigidité de l'ouvrage (risque d'oscillation, confort des usagers, sécurité, etc...)

Ainsi, leur calcul doit être exact et précis pour des raisons esthétiques afin de prévoir des contreflexes bien précis lors de la fabrication des poutres maitresses.

Du fait que les poutres maitresses prévues sont renforcées par des semelles additionnelles de longueur limitée, l'inertie de ces poutres est donc variable.

C'est pourquoi on calcule les déformations à l'aide de l'intégrale de MOHR d'autant plus qu'en charpente métallique, la section droite est homogène, les résultats de la RDM sont significatifs.

### 1/ Charges permanentes:

$$L = l_0 + 2l$$

$$l = \alpha L = 0,3 \times 29 = 8,7 \text{ m}$$

$$l_0 = \beta L = 0,4 \times 29 = 11,6 \text{ m}$$

$$\frac{L}{2} = \left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right)L = \lambda L = 0,5L$$

$$R_A = R_B = q \frac{L}{2}$$

$$M(x) = q \frac{L}{2} x - q \frac{x^2}{2} = \frac{q}{2} x (L - x)$$

On applique une charge unitaire

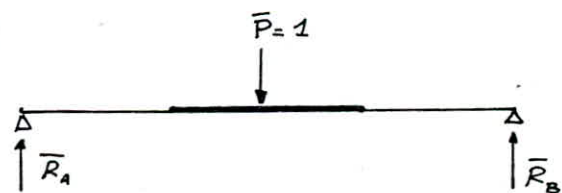
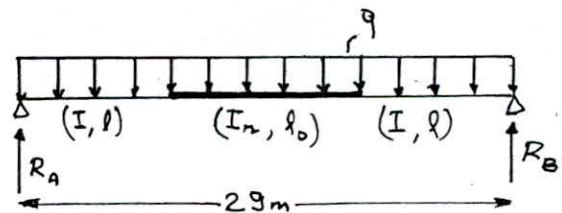
au milieu de la travée

$$\bar{R}_A = \bar{R}_B = \frac{1}{2} \rightarrow \bar{M}(x) = \frac{1}{2} x \quad (\text{pour } x < \frac{L}{2})$$

Le chargement et les appuis sont symétriques donc:

$$\frac{\delta}{2} = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{M \bar{M}}{EI_i} dx = \int_0^l \frac{1}{EI} \cdot \frac{q}{2} x (L - x) \cdot \frac{1}{2} x dx + \int_l^{l+\frac{l_0}{2}} \frac{1}{EI_n} \cdot \frac{q}{2} x (L - x) \cdot \frac{1}{2} x dx$$

$$\frac{\delta}{2} = \frac{q}{4EI} \int_0^{\lambda L} (Lx^2 - x^3) dx + \frac{q}{4EI_n} \int_{\alpha L}^{\lambda L} (Lx^2 - x^3) dx$$





$$\text{Soit } \delta = \lambda^3(4-3\lambda) \frac{qL^4}{24EI_n} + \alpha^3(4-3\alpha) \frac{qL^4}{24EI_n} (I_n - I)$$

Avec  $\alpha = 0,3$  ;  $\lambda = 0,5$  , on a alors :

$$\delta = \frac{59L^4}{384EI_n} + \frac{0,93}{80} \frac{qL^4}{EI_n I} (I_n - I)$$

Remarque: Si  $I_n = I$  (poutre a inertie constante) :

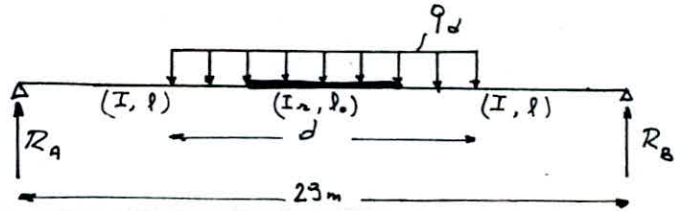
$$\text{On retrouve la formule habituelle } \delta = \frac{59L^4}{384EI}$$

## 2/ Surcharge mobiles (cas du convoi D, du char MC120):

Le convoi exceptionnel D provoque le moment max donc la flèche max.

$$q_D = \frac{S_D \cdot c_r}{d} = \frac{240 \cdot 0,4055}{18,6} = 5,23 \text{ kdaN/ml}$$

$$R_A = R_B = q_D \cdot \frac{d}{2}$$

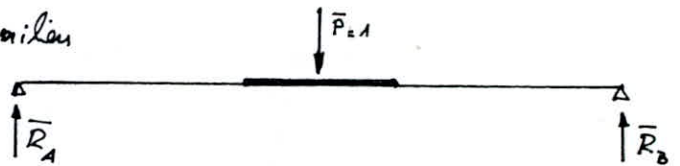


$$\forall x > \frac{L}{2} - \frac{d}{2}$$

$$M(x) = q_D \frac{d}{2} x - q_D \cdot \frac{1}{2} \left( x - \left( \frac{L-d}{2} \right) \right)^2$$

$$M(x) = q_D \frac{d}{2} x - \frac{q_D}{2} \left( x^2 - x(L-d) + \left( \frac{L-d}{2} \right)^2 \right)$$

Soit la charge unitaire placée au milieu



$$\bar{R}_A = \frac{1}{2} \rightarrow M(x) = \frac{1}{2} x \quad (\forall x < \frac{L}{2})$$

En vertu de la symétrie, on a :

$$\frac{\delta'}{2} = \frac{q_D}{4EI} \int_0^{\frac{L}{2}} \left[ dx - x^2 + x(L-d) - \left( \frac{L-d}{2} \right)^2 \right] x dx + \frac{q_D}{4EI_n} \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2} + \frac{d}{2}} \left[ x \cdot d - x^2 + x(L-d) - \left( \frac{L-d}{2} \right)^2 \right] x dx$$

$$\frac{2E\delta}{q_D} = \frac{1}{I} \int_0^{\frac{L}{2}} \left[ Lx^2 - x^3 - \left( \frac{L-d}{2} \right)^2 x \right] dx + \frac{1}{I_n} \int_{\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2} + \frac{d}{2}} \left[ Lx^2 - x^3 - \left( \frac{L-d}{2} \right)^2 x \right] dx$$

Soit :

$$\delta = \frac{q_D}{48EI_n} \left[ (-6\lambda^4 + 8\lambda^3 - 3\lambda^2)L^4 + 6\lambda^2L^3d - 3\lambda^2L^2d^2 \right] + \\ + \frac{q_D(I_n - I)}{48EI_n} \left[ (-6\lambda^4 + 8\lambda^3 - 3\lambda^2)L^4 + 6\lambda^2L^3d - 3\lambda^2L^2d^2 \right]$$

pour :  $\alpha = 0,3$  ;  $\lambda = 0,5$  , on a :

$$\delta = \frac{q_D}{384EI_n} \left( 1 + \frac{I_n - I}{I} \right) ( 12L^3d - L^4 - 6d^2L^2 )$$

### 3/ Applications numériques :

#### a/ Charge permanente CP :

$$M_{\max} = 286,26 \text{ mKdaN} \rightarrow q = 2,73 \text{ KdaN/ml}$$

$$I = 3763252 \text{ cm}^4 ; I_n = 6189355,55 \text{ cm}^4$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2 ; L = 2900 \text{ cm}$$

$$\delta_{cp} = 3,0476 \text{ cm}$$

#### b/ Complément de charges permanentes CCP :

$$M_{\max} = 54,81 \text{ mKdaN} \rightarrow q = 521 \text{ daN/ml}$$

$$I = 6950113 \text{ cm}^4 ; I_n = 9946457,55 \text{ cm}^4$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2 ; L = 2900 \text{ cm}$$

$$\delta_{ccp} = 0,3181 \text{ cm}$$

#### c/ Surcharge de trottoir :

$$M_{\max} = 18,45 \text{ mKdaN} \rightarrow q = 175,5 \text{ daN/ml}$$

$$I = 9464173 \text{ cm}^4 ; I_n = 13489828 \text{ cm}^4$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2 ; L = 2900 \text{ cm}$$

$$\delta_{\text{trottoir}} = 0,022 \text{ cm}$$

#### d/ Surcharge exceptionnelle D :

$$q_D = 5,23 \text{ KdaN/ml} ; E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ daN/ml} ; L = 2900 \text{ cm} ; d = 1860 \text{ cm}$$

$$I = 9464173 \text{ cm}^4 ; I_n = 13489828 \text{ cm}^4$$

$$\delta_D = 2,049 \text{ cm}$$

e/ Effet du retrait:

$$M_{\text{retrait}} = n W \sigma_{t,b} = n W E_b E_n$$

$$M_{\text{retrait}} = 15.56.40033,94 = 33628509,6 \text{ daN.cm}$$

$$\delta_{\text{retrait}} = \frac{M L^2}{16 E I_r} = \frac{33628509,6 \cdot 2900^2}{16 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 10464810} = 0,804 \text{ cm}$$

Donc la flèche total sera :

$$\delta_{\text{total}} = \delta_{cp} + \delta_{ccp} + \delta_{trattoir} + \delta_D + \delta_{\text{retrait}}$$

soit :  $\delta_{\text{total}} = 6,2407 \text{ cm}$

Lors de l'usinage de la poutre, on doit prévoir une contre flèche de 63 mm.

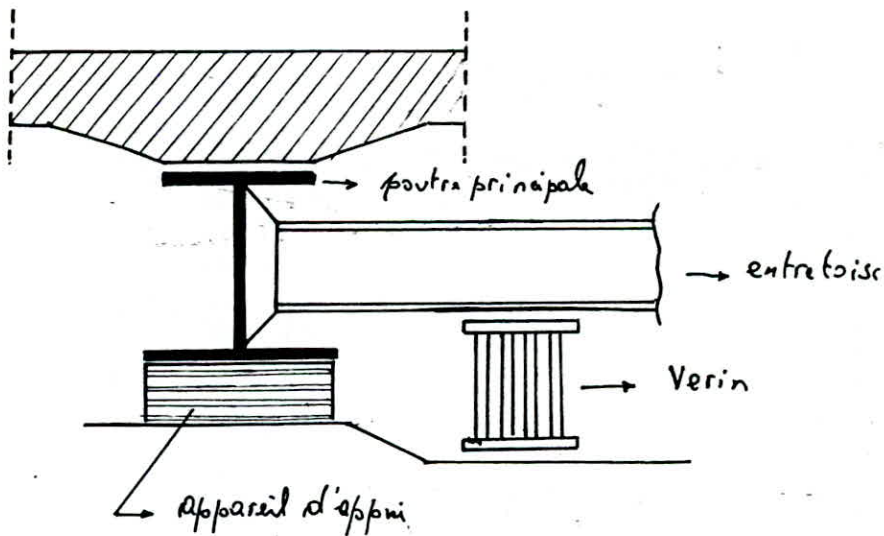
## ENTRETOISES

Les entretoises sont des éléments horizontaux, normaux à l'axe longitudinal du pont. Elles solidarisent les poutres maîtresses entre elles. Leur rôle principal est d'assurer l'indeformabilité de la section transversale de l'ouvrage.

D'autre part, elles transmettent au tablier, certains efforts dus au vent (négligeables dans notre cas), et permettent de fixer certains points les semelles supérieures et inférieures des poutres maîtresses, ce qui permet au stade de montage ou de service de limiter les dangers de déversements des membrures comprimées.

Les entretoises peuvent être formées de poutre à âme pleine ou de poutre à âme en treillis (poutres triangulées)

Entretoises sur appui : pile ou culée, elles solidarisent les poutres principales et permettent par verinage entre ces dernières un soulèvement de l'ouvrage en vue d'un chargement éventuel d'appareil d'appui situé.

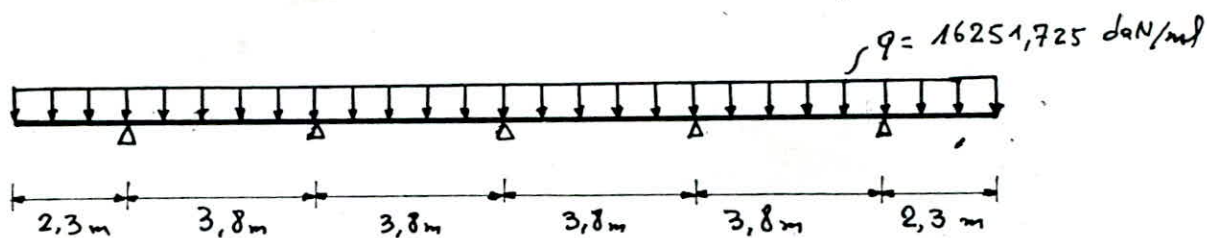


### Calcul des entretoises:

La dalle repose sur les poutres principales et les entretoises d'about. Ces entretoises sont soumises à l'action du poids propre du tablier et aux efforts tranchants résultants du verinage lors de la pose du tablier. Dans ce cas le pont est au stade de montage.

### schéma statique:

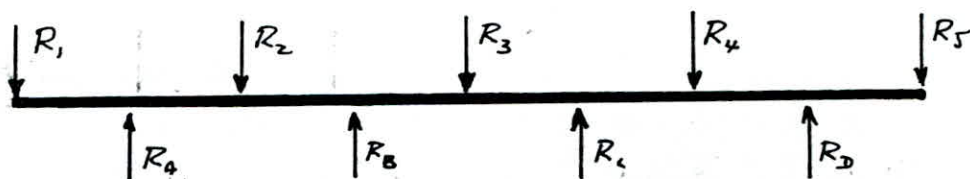
L'entretoise d'about se calcule en biais (longueur réelle)



La charge  $P$  concentrée qui sera équivalente à un système de réaction  $R_i$  est:

$$P = 16251,725 \times 29 = 471,3 \text{ KdaN}$$

Lors du verinage de la dalle, les poutres principales transmettent à l'entretoise une réaction  $R$ .



Les réactions  $R_A, R_B, R_C, R_D$  représentant les réactions des verins

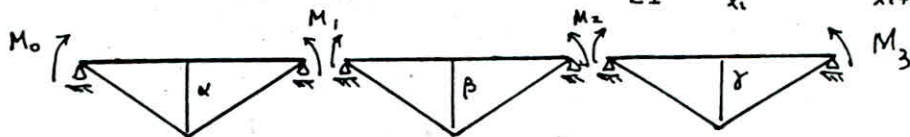
(Les verins choisis ont une capacité portante de 100 KdaN)

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = \frac{P}{2} \cdot g \cdot 1,32 = \frac{471,3}{2} \cdot 0,2 \cdot 1,32 = 62,21 \text{ KdaN}$$

Remarque:  $R_i = 62,21 \text{ KdaN} < \text{capacité portante du verin} = 100 \text{ KdaN}$

### Calcul des efforts (M et T) : méthode des 3 moments:

$$M_{i-1} l_i + 2M_i (l_i + l_{i+1}) + M_{i+1} l_{i+1} = -\frac{6}{EI} \left( \frac{R_i a_i}{l_i} + \frac{R_{i+1} b_{i+1}}{l_{i+1}} \right)$$



$$\alpha = R_2 \frac{l_1}{4} ; \quad \beta = R_3 \frac{l_2}{4} ; \quad \delta = R_4 \frac{l_3}{4}$$

$$M_0 = M_3 = -R_1 \cdot 2,3 = -62,21 \times 2,3 = -143,083 \text{ mKdaN}$$

$$i=1 : M_0 l + 4 M_1 l + M_2 l = -\frac{6}{EI} \left( \frac{R_2 l^2}{8} \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{l} + \frac{R_3 l^2}{8} \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{l} \right)$$

$$R_2 = R_3 \rightarrow M_0 l + 4 M_1 l + M_2 l = -\frac{12 l^2 R}{16 EI}$$

$$i=2 : M_1 l + 4 M_2 l + M_3 l = -\frac{12 l^2 R}{16 EI}$$

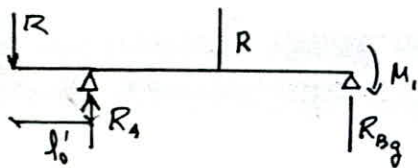
On a donc le système d'équation suivant où  $M_1$  et  $M_2$  sont inconnus :

$$\begin{cases} M_0 + 4 M_1 + M_2 = -\frac{3}{4} R l \\ M_1 + 4 M_2 + M_3 = -\frac{3}{4} R l \end{cases}$$

$$R = 62,21 \text{ kdaN} ; \quad l = 3,8 \text{ m} ; \quad M_0 = M_3 = -143,083 \text{ mKdaN}$$

$$\rightarrow M_1 = M_2 = 6,842 \text{ mKdaN}$$

Calcul des réactions :



$$\sum M/B = 0 \Rightarrow R_4 l - R(l+l) - R \frac{l}{2} + M_1 = 0$$

$$R_4 = \frac{1}{l} \left[ R(l+l) + R \frac{l}{2} - M_1 \right]$$

$$R_4 = \frac{1}{3,8} \left[ 62,21(2,3+3,8) + 62,21 \cdot \frac{3,8}{2} - 6,842 \right]$$

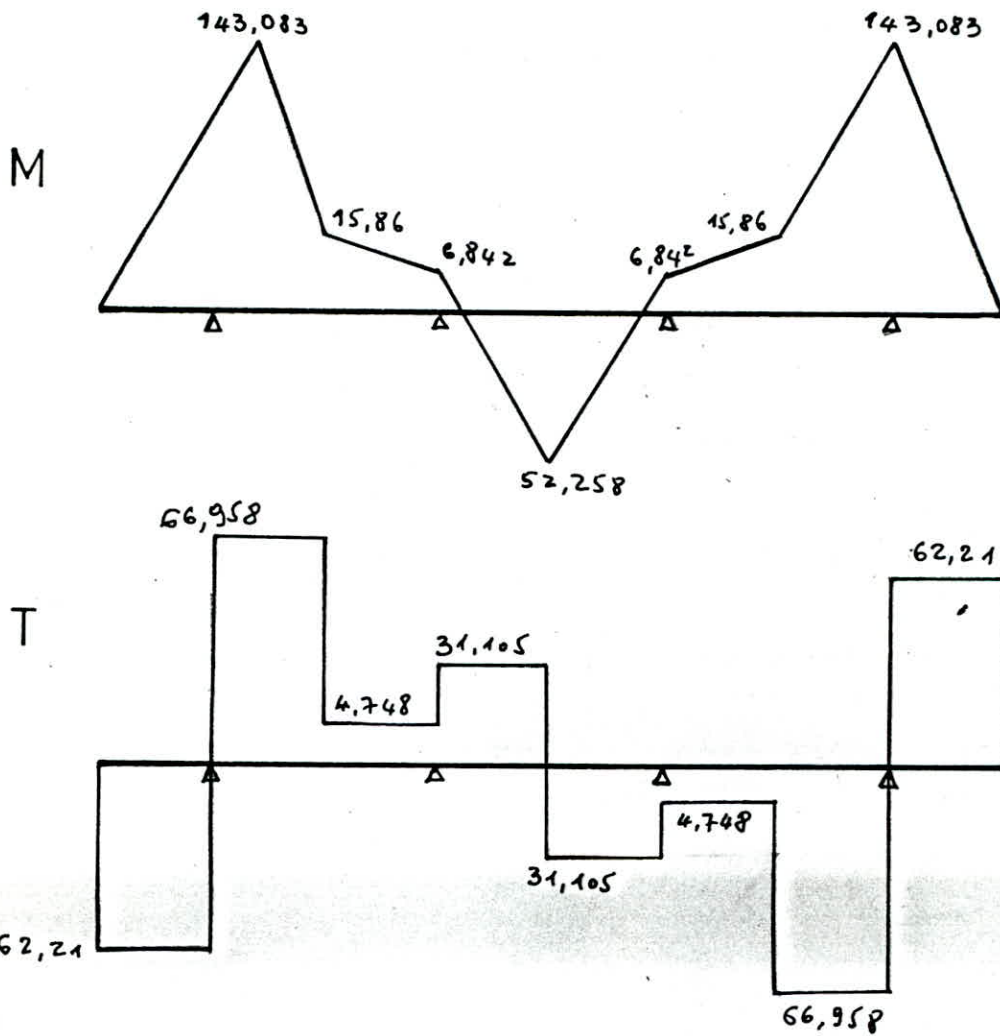
$$R_4 = 129,168 \text{ kdaN}$$

On trouve de même :  $R_B = 26,357 \text{ kdaN}$

$$R_C = R_B$$

$$R_D = R_A$$

Contrôle :  $\sum R_i = 5R = R_A + R_B + R_C + R_D \quad \text{OK.}$



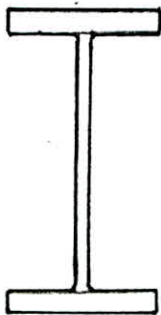
$$M_{\max} = 143,083 \text{ mKdaN}$$

$$T_{\max} = 66,958 \text{ KdaN}$$

Predimensionnement:

$$\sigma = \frac{M}{W_{\text{nec}}} \leq \sigma_{\text{en}} \Rightarrow W_{\text{nec}} > \frac{M}{\sigma_{\text{en}}} = \frac{143,083 \cdot 10^5}{2400} = 5961,79 \text{ cm}^3$$

On adopte un profilé laminaire du type: HEB 650  $\rightarrow W_x = 6480 \text{ cm}^3$



Caractéristique d'un HEB 650:

$$h = 65 \text{ cm} ; b = 30 \text{ cm}$$

$$e_a = 1,6 \text{ cm} ; e_s = 3,1 \text{ cm}$$

$$I_x = 210620 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 6480 \text{ cm}^3$$

Verification à la résistance:

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{143,083 \cdot 10^5}{6480} = 2208 \text{ bar} < 2400 \text{ bar}$$

Verification au cisaillement:

$$A_{\text{âme}} = (h - 2e_s) e_a = (65 - 2 \times 3,1)(1,6) = 94,08 \text{ cm}^2$$

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{A_{\text{âme}}} = \frac{66,958 \cdot 10^3}{94,08} = 711,7 \text{ bar} < \frac{\tau_{\text{lim}}}{1,54} = 1558,44 \text{ bar}$$

Voilement de semelle:  $\frac{b_0}{e_s} \leq 15$  (art 5.214.311 RCM66)

$$\frac{b_0}{e_s} \leq 15 ; \quad b_0 = \frac{b - e_a}{2} = \frac{30 - 1,6}{2} = 14,2 \text{ cm.}$$

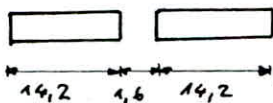
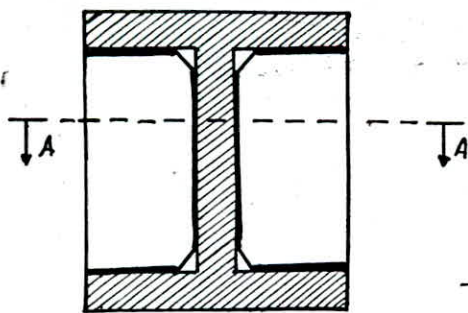
$$\frac{b_0}{e_s} = \frac{14,2}{3,2} = 4,56 < 15 \Rightarrow \text{pas de voilement.}$$

En fait, le profil étant laminé, on a tenu compte de ce phénomène lors du laminage.

De même pour l'âme, on n'a pas à craindre le voilement vu que le profil en question est laminé mais conformément aux règles CM66, on doit prévoir des raidisseurs au niveau des appuis (voir inf)

Par contre la vérification au voilement des raidisseurs est nécessaire

Voilement du raidisseur:



Coupe A-A

Le vérif le plus chargé se trouve au droit de la réaction  $R_D$ :

$$M = M_3 = 128,84 \text{ m kdaN} \rightarrow \sigma = 19,88 \text{ daN/mm}^2$$

$$T = R_s = 62,24 \text{ kdaN}$$

$$T_{\text{âme}} = e_a h_a \sqrt{0,015 \left( \frac{1000 e_a}{h_a} \right)^4 - \left( \frac{\sigma}{7} \right)^2}$$

$$T_{\text{âme}} = 852737 \text{ daN}$$

$$T_{\text{app}} = 62240 \text{ daN}$$

$T_{\text{app}} < T_{\text{âme}}$  donc il n'y a pas lieu de mettre un

raidisseur d'âme. Par contre il est obligatoire de placer un raidisseur au droit des appuis et au droit des charges concentrées fixes.



Rigidité:

Calcul de la flèche :

$$f = \frac{59l^4}{384EI} \quad : \text{cas de poutre indépendante.}$$

$$f = \frac{9 \frac{l^2}{8} \cdot l^2}{9,6EI} = \frac{M_{\max} l^2}{9,6EI} \quad : \text{cas de poutre quelconque}$$

$$M_{\max} = 143,083 \text{ m kdaN}$$

$$l = 380 \text{ cm}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ daN/cm}^2$$

$$I = 210620 \text{ cm}^4 \quad (\text{HEB650})$$

$$f = \frac{143,083 \cdot 10^5 \cdot \overline{380}^2}{9,6 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 210620} = 4,86 \text{ mm}$$

$$\bar{f} = \frac{l}{200} = \frac{3800}{200} = 19 \text{ mm}$$

$f < \bar{f}$  donc la flèche est vérifiée.

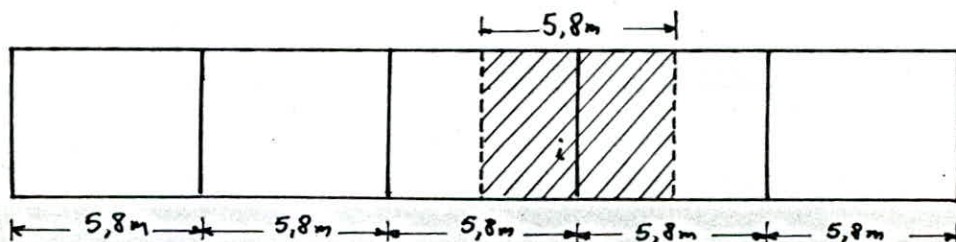
## Entretoises intermediaires

Le rôle des entretoises est double. Elles doivent d'une part garantir l'indéformabilité du contour de la section et d'autre part assurer la liaison entre les différents éléments de l'ouvrage.

La dalle ne repose pas sur les entretoises intermédiaires qui doivent résister aux efforts de répartition qui résultent en leur noeuds.

Pour avoir les effets les plus défavorables, les charges et surcharges doivent être placées longitudinalement dans les positions les plus défavorables à l'aide du tracé des lignes d'influence des réactions (le tablier étant articulé sur les entretoises).

Soit  $n$  le nombre de poutres principales, on a donc  $(n-1)$  entretoises intermédiaires.



Soit  $R$  la réaction qui revient à l'entretoise  $i$ .

a/ CP + CCP:

$$CP + CCP = 16251,725 \text{ daN/ml}$$

$$q = \frac{16251,725}{18,733} = 867,54 \text{ daN/m}^2$$

$$R_{\max} = q \cdot l = 867,54 \cdot 5,8 = 5031,73 \text{ daN/ml}$$

b/ Surcharge A:

$$A = 854,74 \text{ daN/m}^2$$

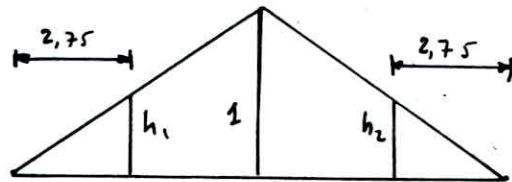
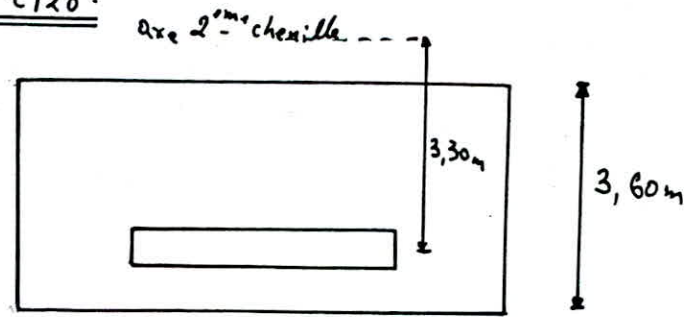
$$R_{\max} = A \cdot l = 854,74 \cdot 5,8 = 4957,5 \text{ daN/ml}$$

c/ trottoir:

$$q = 150 \text{ daN/m}^2$$

$$R_{\max} = q \cdot l = 150 \cdot 5,8 = 870 \text{ daN/ml}$$

d/ Surcharge M<sub>c120</sub>:

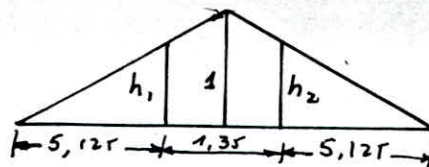
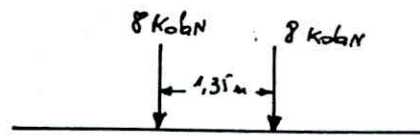


$$q = \frac{55}{6,1} = 9,0164 \text{ KdaN/m}^2$$

$$h_1 = h_2 = \frac{2,75 \cdot 1}{5,8} = 0,474$$

$$R_{\max} = \left[ 2 \times \left( \frac{1 + 0,474}{2} \right) \times 3,05 \right] \times 9,0164 = 40,54 \text{ KdaN}$$

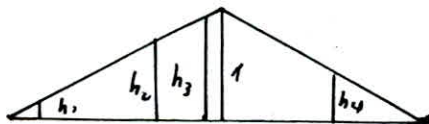
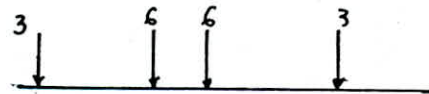
e/ Surcharge B<sub>c</sub>:



$$h_1 = h_2 = \frac{5,125 \cdot 1}{5,8} = 0,8836$$

$$R_{\max} = 2 \times 8 \times 0,8836 = 14,138 \text{ KdaN}$$

f/ Surcharge B<sub>c</sub>:

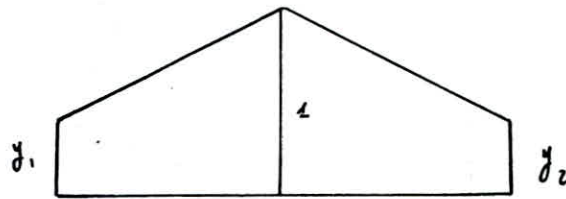
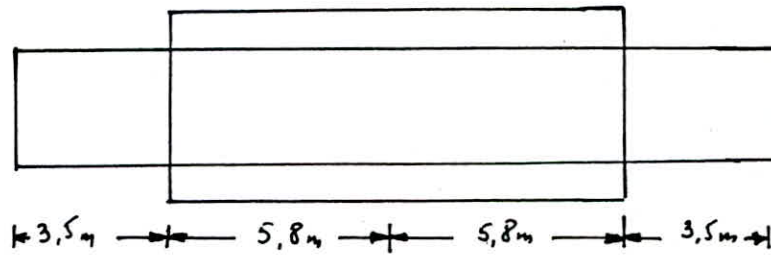


$$h_1 = \frac{0,55 \cdot 1}{5,8} = 0,095 \quad ; \quad h_2 = \frac{5,05 \cdot 1}{5,8} = 0,87$$

$$h_1 = h_4 = 0,095 \quad ; \quad h_2 = h_3 = 0,87$$

$$R_{\max} = 2 \times 6 \times 0,095 + 2 \times 3 \times 0,87 = 6,36 \text{ KdaN}$$

9/ Système D :



$$q = \frac{240 \cdot 10^3}{18,6} = 12,903 \text{ kdaN/ml}$$

$$\frac{y_1}{3,5} = \frac{1}{5,8 + 3,5} \rightarrow y_1 = 0,376 = y_2$$

$$R_{\max} = 2 \left[ \frac{0,376 + 1}{2} \times 5,8 \right] \times 12,903 = 102,97 \text{ kdaN}$$

Calcul des efforts :

Soit  $R_i$  : la réaction sous différents cas de charges et surcharges.

$A_i$  : l'aire de la ligne d'influence enveloppe de chaque section lorsque la charge se déplace

$M_i = R_i A_i$  (mkdaN/ml) : Moment résultant

$T_i =$  effort tranchant résultant =  $R_i A_i$ .

# LIGNES D'INFLUENCE

## Rappel de la méthode:

Dans les ponts à poutres multiples sous chaussée, l'entretroise est un agent de répartition des charges entre les différentes poutres

## Hypothèses:

- Entretroises infiniment rigides
- Les  $n$  poutres ont un moment d'inertie égal
- Les  $n$  poutres sont également espacées de  $\lambda$
- Longueur du pont  $>$  2 fois sa largeur chargeable.



$$R_i = \frac{P}{n} \Delta_i$$



$$\Delta_i = 1 + 6 \frac{(n+1) - 2i}{n^2 - 1} \left( \frac{e}{\lambda} \right)$$

Ce qui permet de rechercher les réactions de chacune des poutres pour une position variable de  $P$  et de tracer les lignes d'influence des réactions, des efforts tranchants et des moments fléchissants

Pour notre cas, les hypothèses ci-dessus sont satisfaites. Il faut noter que la 4<sup>ème</sup> hypothèse est comme suit:

$$\text{Longueur du pont (= longueur de la travée)} = 29 \text{ m}$$

$$2 \text{ fois largeur du pont} = 2 \text{ fois la largeur chargeable} = 2 \times 14,4 = 28,8 \text{ m.}$$

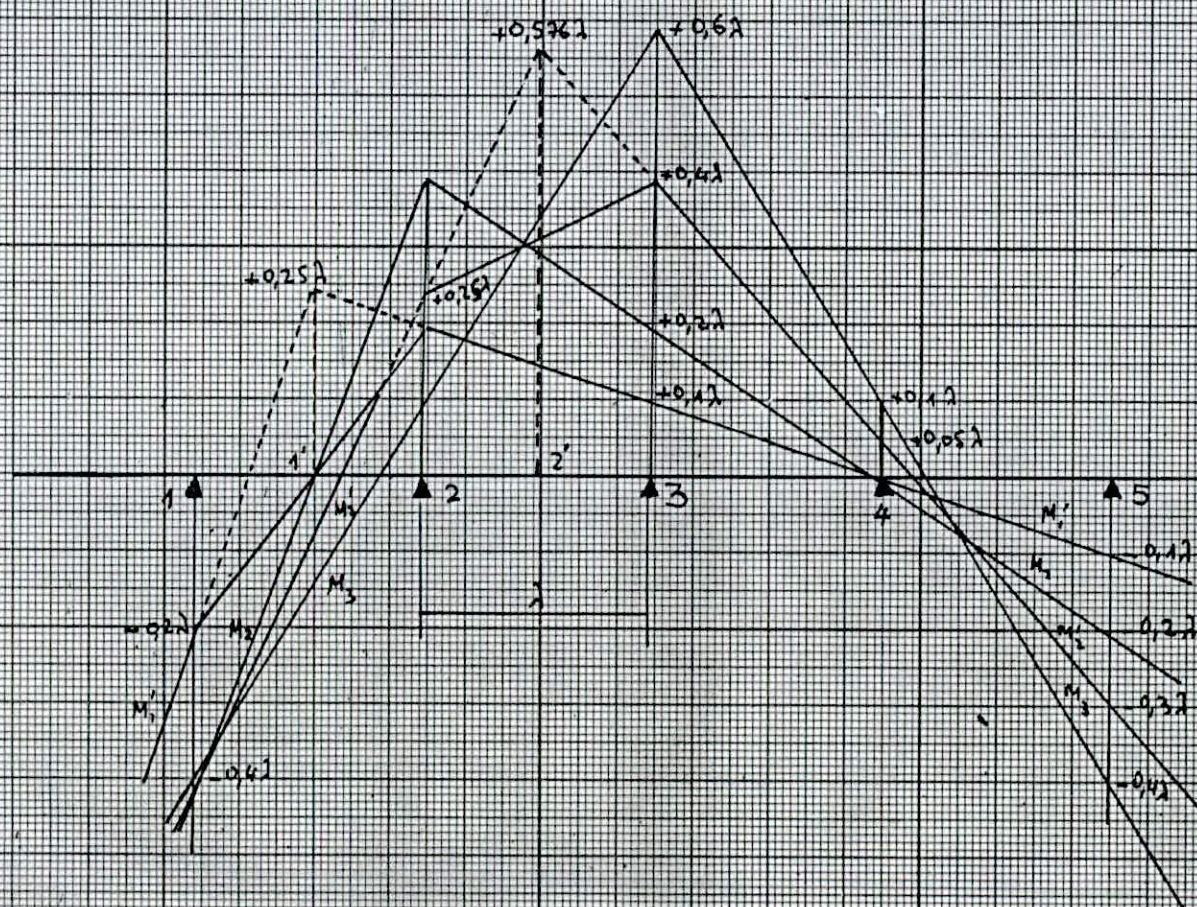
# Lignes d'influence des moments

La dalle se repose pas sur des entretoises

$\lambda$ : écartement des poutres

Nota: Symétrie par rapport aux moments en 4', 4; 5', 5

5  
10  
15  
20

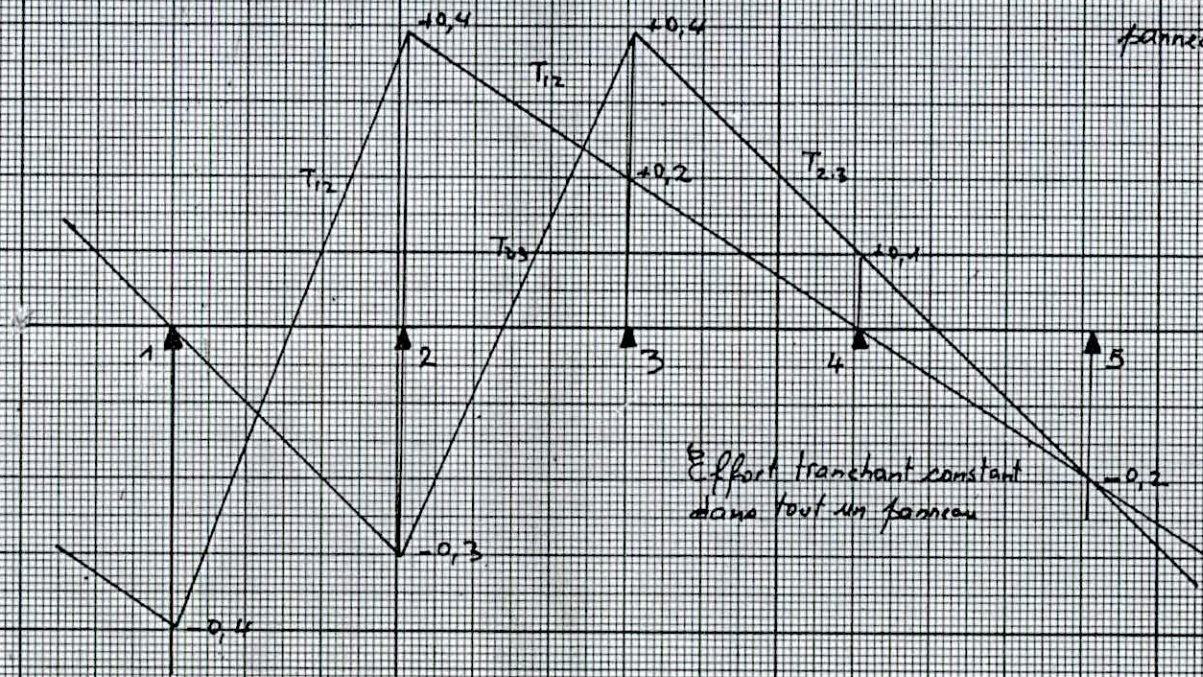


# Lignes d'influence des efforts tranchants

indépendantes de  $\Delta$  écartement des poutres

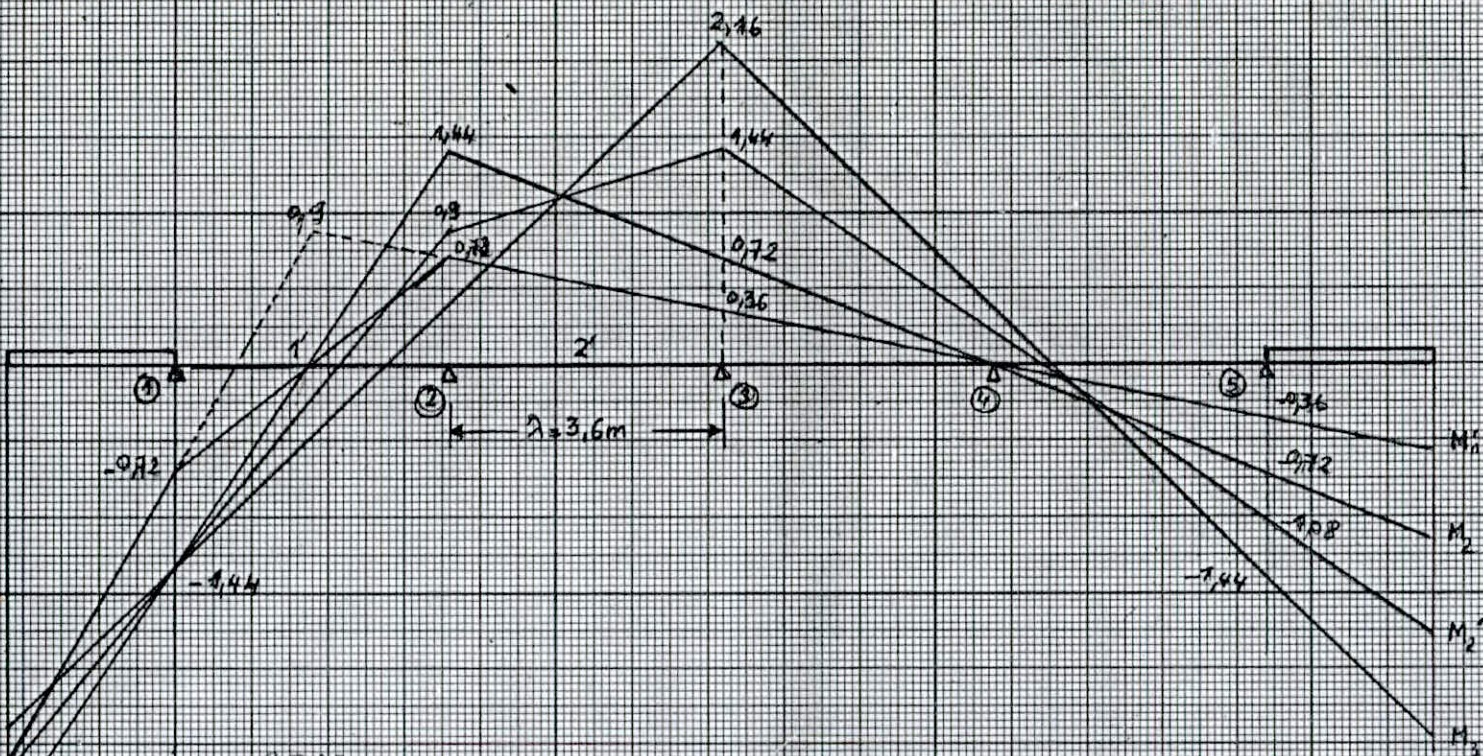
La dalle ne repose pas sur les entretoises

Note: Symétrie pour les efforts tranchants dans les panneaux { 3-4, 4-5



Effort tranchant constant dans tout un panneau

CP+CCP



$$M_1 = \left[ \frac{2.726 + 0.72}{2} \cdot 2.1665 \right] + \left[ -\frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 1.8 \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 1.8 \right] + \left[ \frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 7.2 \right] - \left[ \frac{1}{2} \cdot 0.566 \cdot 5.7665 \right] = -2.772$$

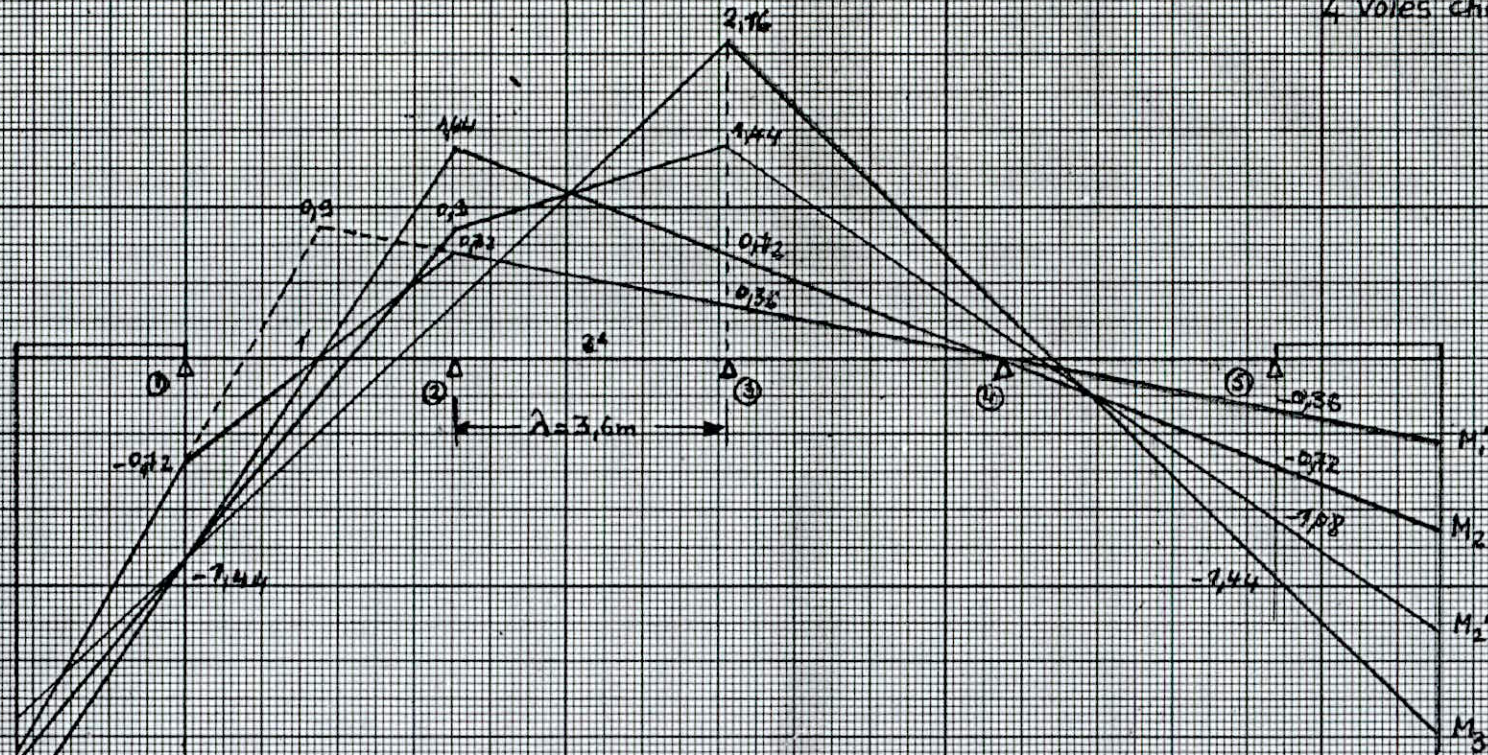
$$M_2 = -\frac{1}{2} \cdot 3.03 \cdot 3.9665 + \frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 1.8 + \frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 7.2 - \frac{1}{2} \cdot 1.183 \cdot 5.7665 = -2.94$$

$$M_2' = -\frac{1}{2} \cdot 2.726 \cdot 4.3165 + \frac{1}{2} \cdot 0.9 \cdot 1.05 + \frac{0.9 + 1.44}{2} \cdot 3.6 + 1.44 \cdot 4.15 - \frac{1}{2} \cdot 5.2165 \cdot 1.85 = -2.856$$

$$M_3 = 2 \left[ -\frac{1}{2} \cdot 2.52 \cdot 5.2665 \right] + 2 \left[ \frac{1}{2} \cdot 2.16 \cdot 4.1 \right] = -4.415$$



SURCHARGE 1A  
4 voles chargées



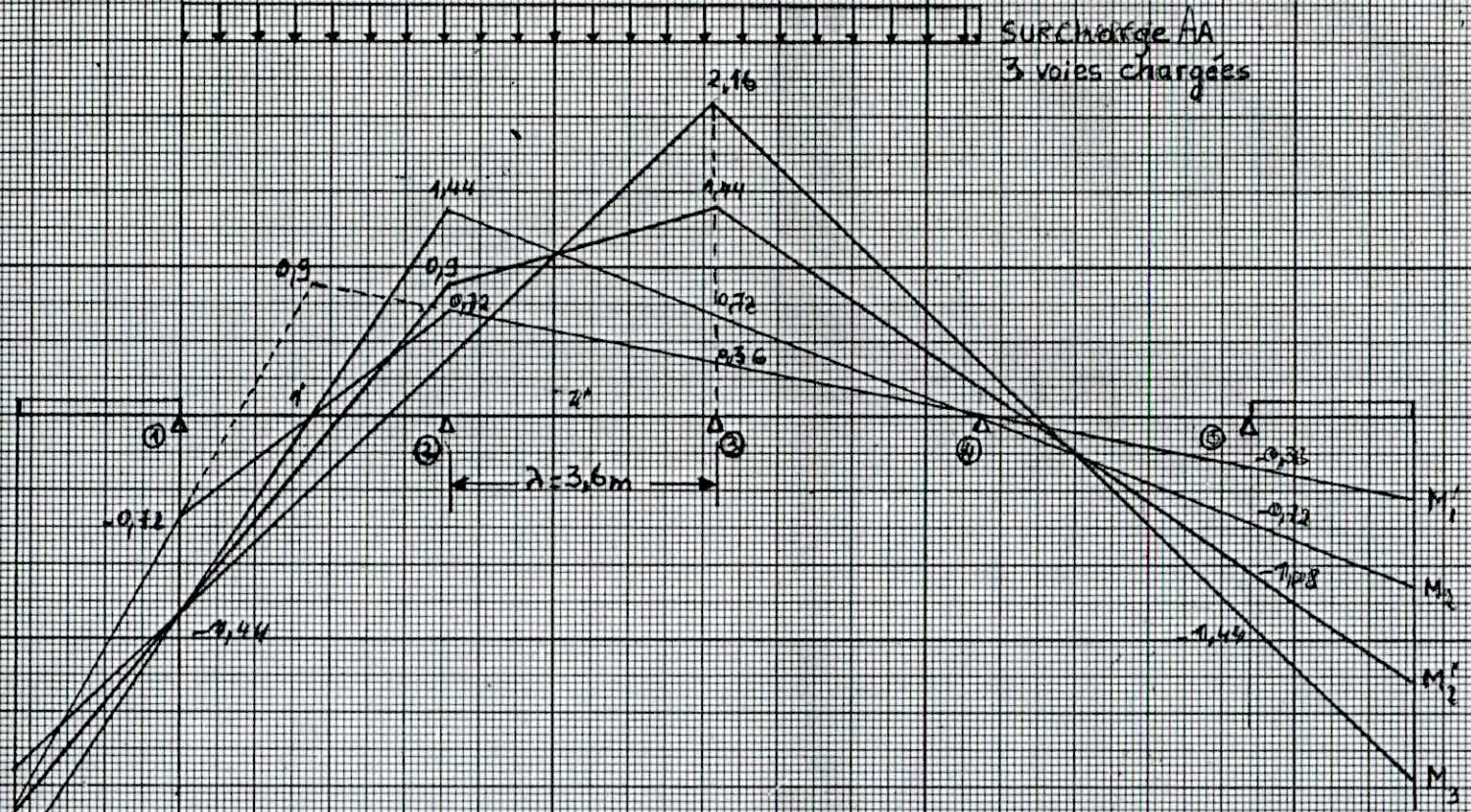
$$M_1 = \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 7,2 + \left( \frac{1}{2} \cdot 0,36 \cdot 3,6 \right) = 1,944$$

$$M_2 = -\frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 7,2 - \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 3,6 = -0,7776$$

$$M_2' = \frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 2,15 + \frac{1}{2} \cdot 1,45 \cdot 0,9 + \frac{0,9 + 1,44}{2} \cdot 3,6 + 1,84 \cdot \frac{1}{2} \cdot 4,1 - \frac{1}{2} \cdot 3,6 \cdot 1,08 = 4,5945$$

$$M_3 = 2 \left( -\frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 2,9 \right) + 2 \left( \frac{1}{2} \cdot 2,16 \cdot 4,3 \right) = 5,112$$

126



SURCHARGE AA  
3 voies chargées

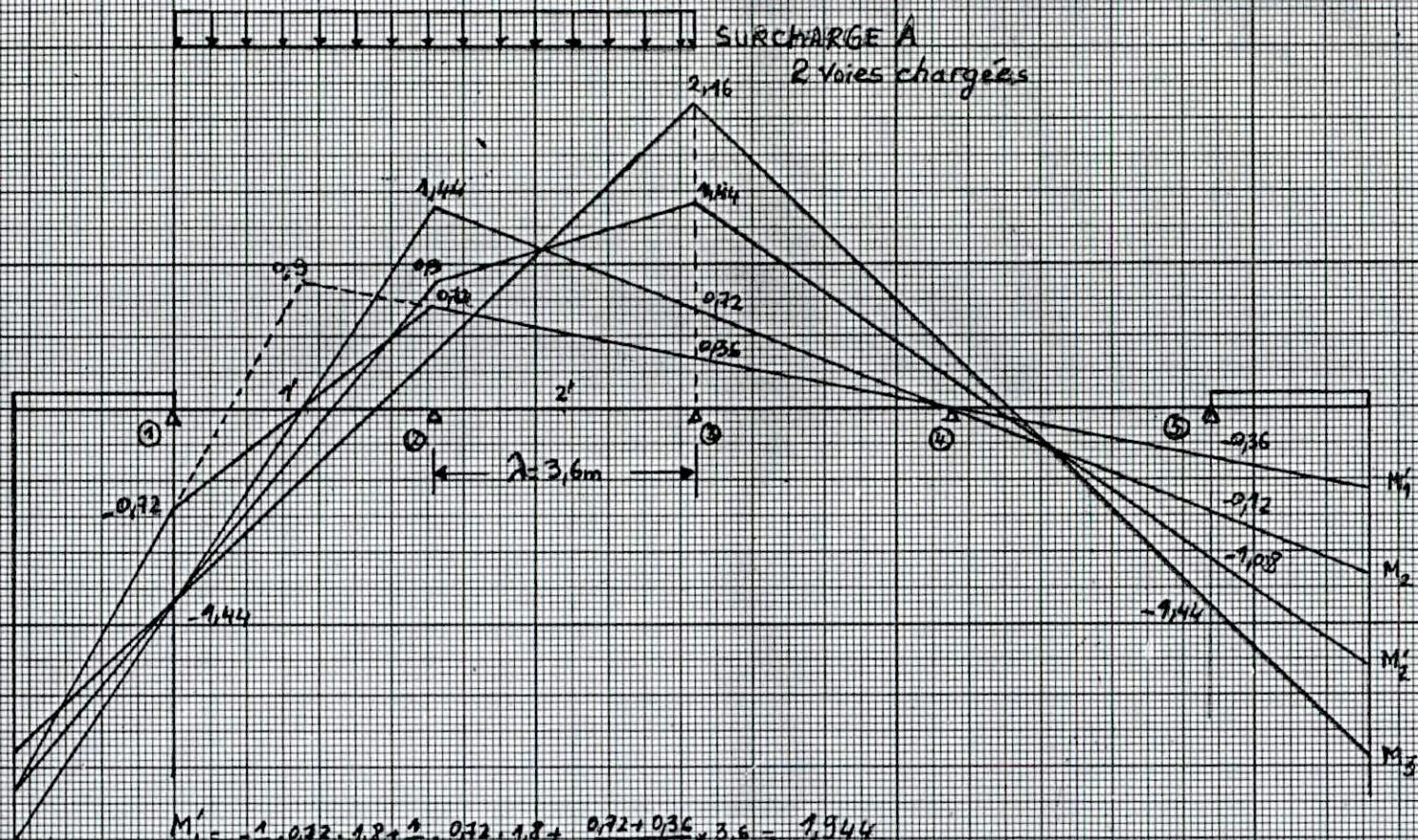
$\lambda = 3,6m$

$$M_1' = -\frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 7,2 = 2,592$$

$$M_2 = -\frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 7,2 = 5,184$$

$$M_2' = -\frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 2,2 + \frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 0,9 + \frac{0,9 + 1,44}{2} \cdot 3,6 + \frac{1,44 + 0,72}{2} \cdot 3,6 = 6,278$$

$$M_3 = -\frac{1}{2} \cdot 1,44 \cdot 3 + 4,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,16 + \frac{2,16 + 0,36}{2} \cdot 3,6 = 6,972$$

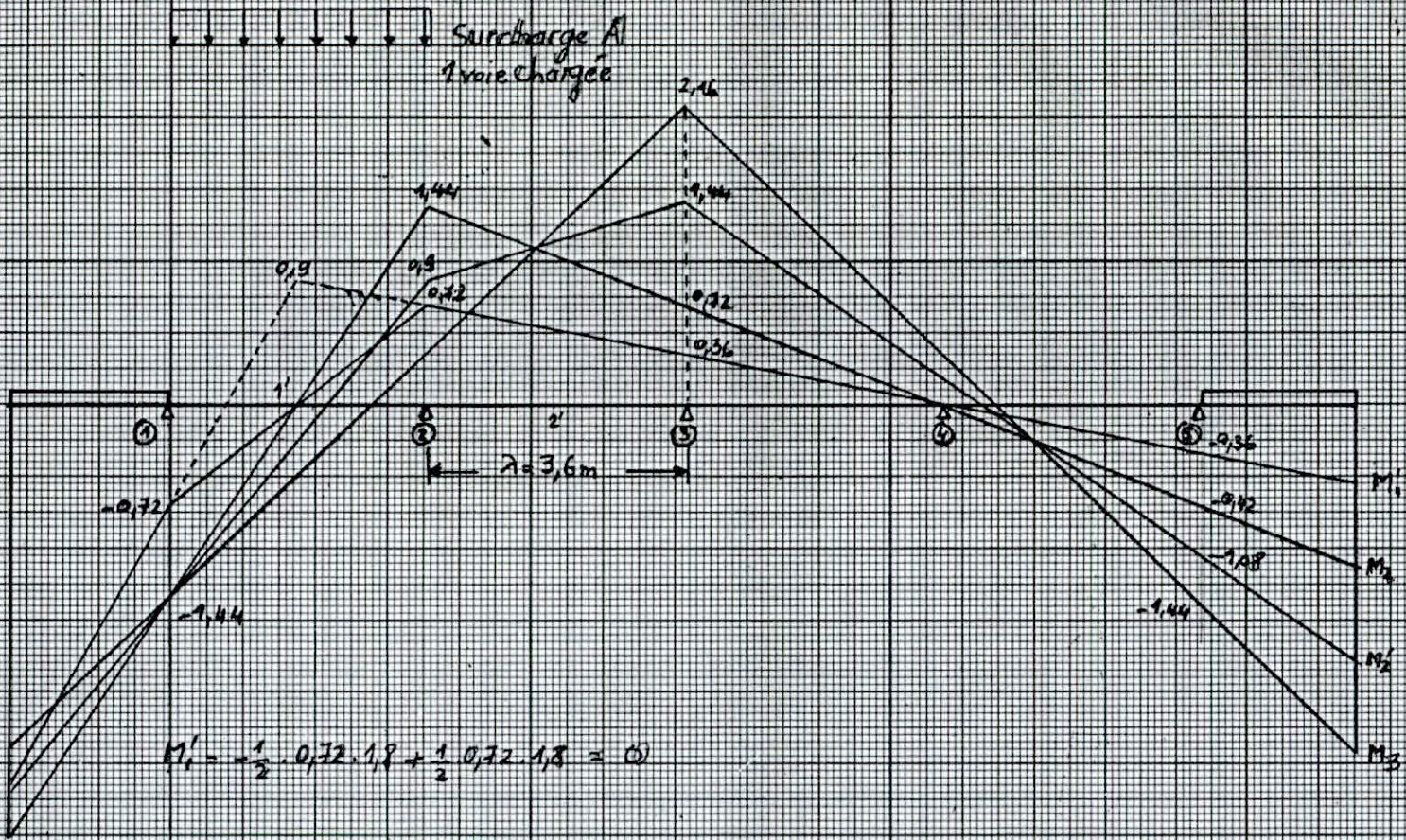


$$M_1' = -\frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 1.8 + \frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 1.8 + \frac{0.72 + 0.36}{2} \cdot 3.6 = 1.944$$

$$M_2 = -\frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 1.8 + \frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 1.8 + \frac{1.44 + 0.72}{2} \cdot 3.6 = 3.888$$

$$M_2' = -\frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 2.2 + \frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 0.9 + \frac{0.72 + 1.44}{2} \cdot 3.6 = 3.276$$

$$M_3 = -\frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 2.8 + \frac{1}{2} \cdot 1.44 \cdot 2.16 = 2.736$$



$$M_1' = -\frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,72 \cdot 1,8 = 0$$

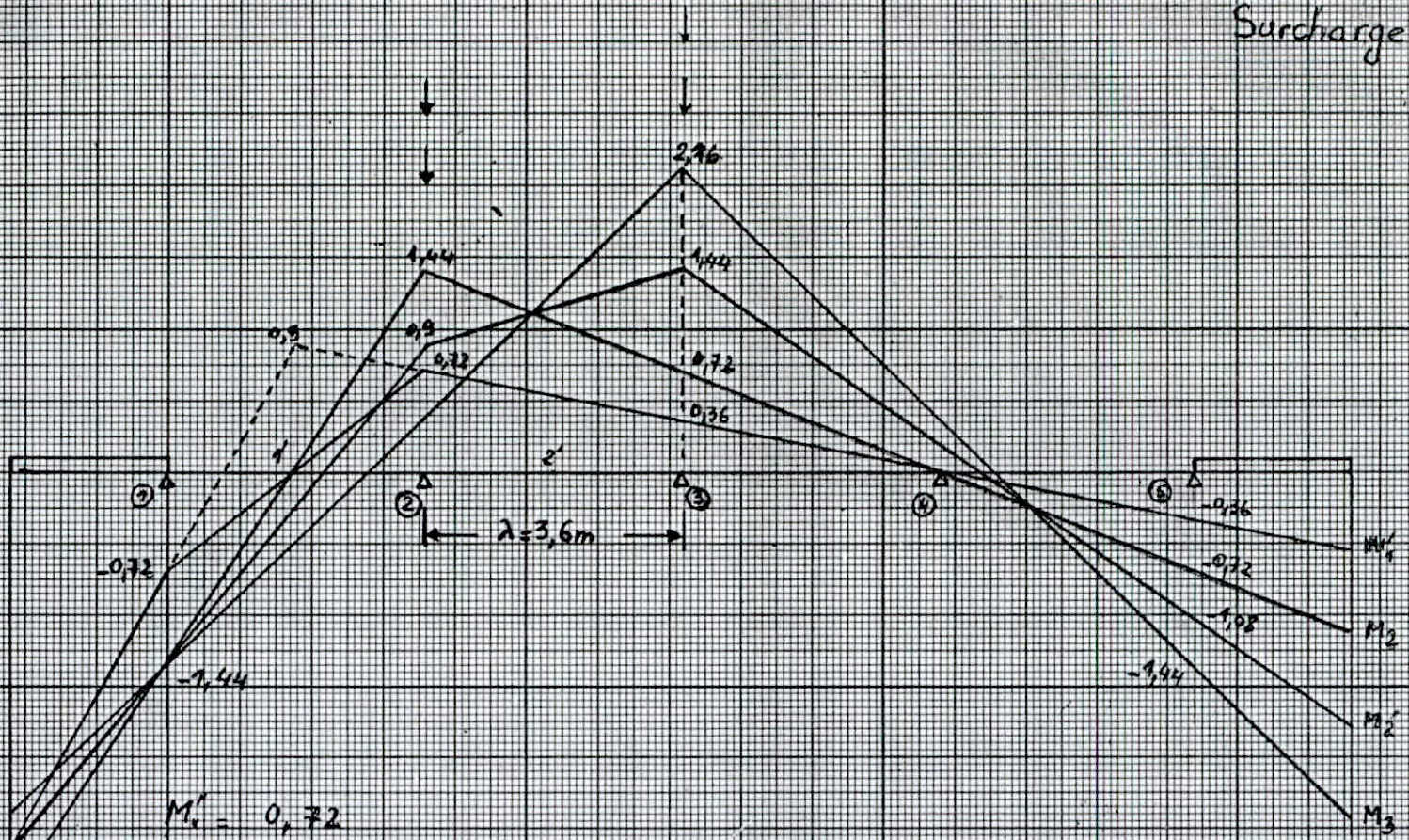
$$M_2 = -\frac{1}{2} \times 1,44 \times 1,8 + \frac{1}{2} \times 1,44 \times 1,8 = 0$$

$$M_2' = -\frac{1}{2} \cdot 1,44 \times 3,2 + \frac{1}{2} \cdot 1,44 \times 0,9 = -0,954$$

$$M_3' = -\frac{1}{2} \times 1,44 \times 2,8 + \frac{1}{2} \times 0,8 \times 0,36 = -1,872$$

127

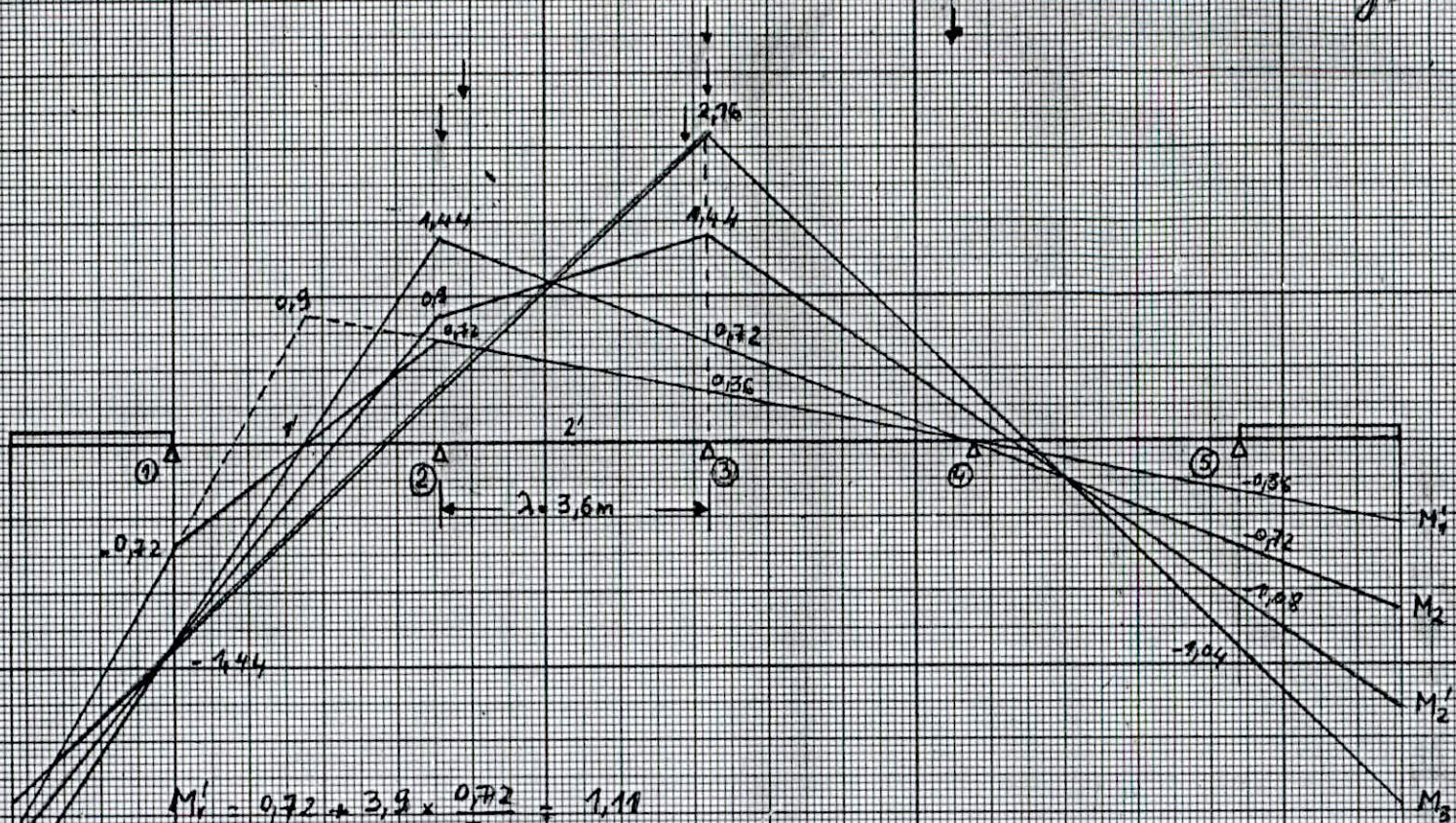
Surcharge D



- $M_1' = 0,72$
- $M_2 = 1,44$
- $M_2' = 1,44$
- $M_3 = 2,16$

128

Surcharge  $M_{c120}$



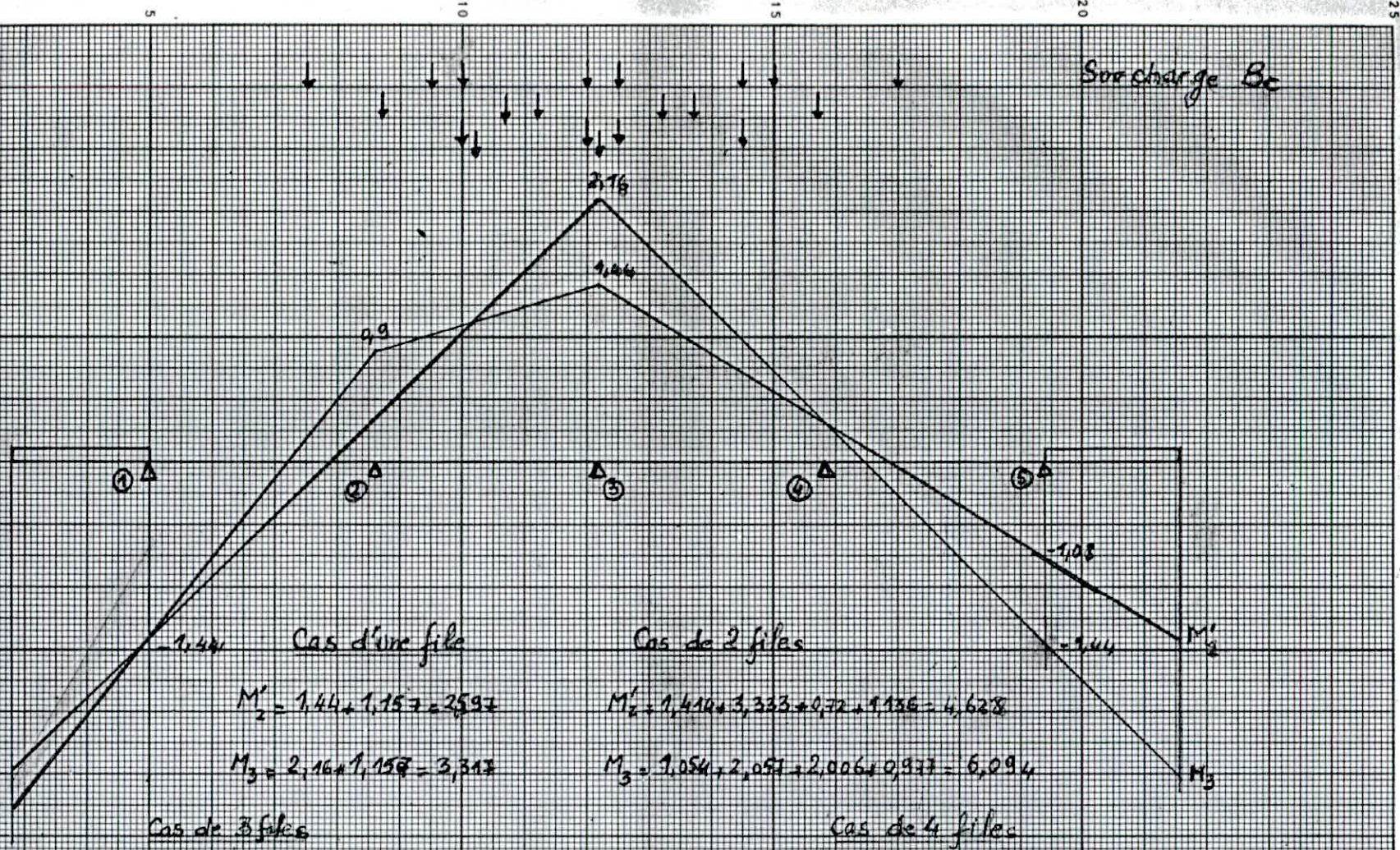
$$M_1' = 0,72 + 3,9 \times \frac{0,72}{7,2} = 1,19$$

$$M_2 = 1,44 + 3,9 \times \frac{1,44}{7,2} = 2,22$$

$$M_2' = 1,44 + 0,926 = 2,366$$

$$M_3 = 2,16 + 0,514 = 2,674$$

Surcharge Bc



Cas d'une file  
 $M'_2 = 1,44 + 1,157 = 2,597$   
 $M_3 = 2,16 + 1,157 = 3,317$   
 Cas de 3 files

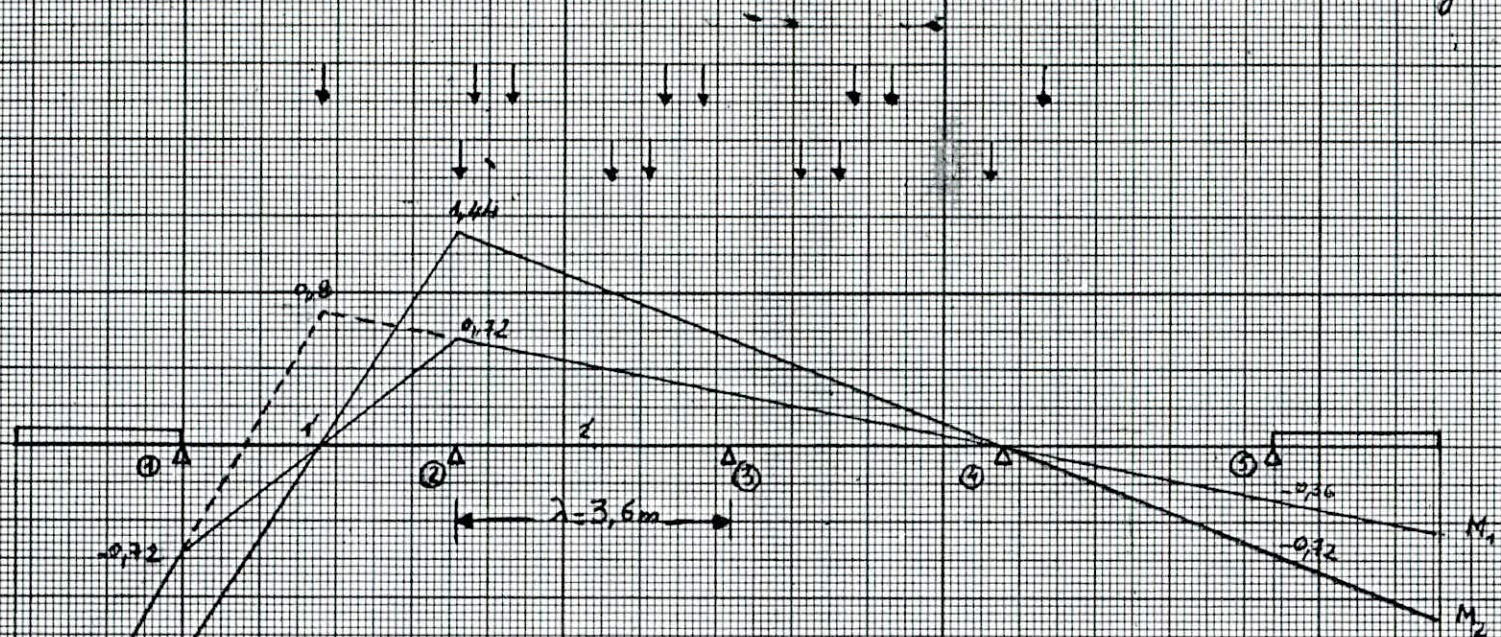
Cas de 2 files  
 $M'_2 = 1,410 + 3,333 + 0,72 + 1,136 = 6,609$   
 $M_3 = 1,054 + 2,051 + 2,006 + 0,937 = 6,094$   
 Cas de 4 files

$M'_2 = 0,926 + 1,234 + 1,311 + 1,131 + 1,388 + 0,36 = 6,35$   
 $M_3 = 0,411 + 1,474 + 1,671 + 1,604 + 1,414 + 0,411 = 6,992$

$M'_2 = 0,78 + 0,54 + 1,131 + 1,074 + 1,353 + 0,72 + 0,59 = 6,205$   
 $M_3 = 0,02 + 0,397 + 1,054 + 2,187 + 2,006 + 1,003 + 0,746 + 0,283 = 7,706$

Surcharge  $B_c$

130



Cas d'une file

$$M'_1 = 0,32 + 5,2 \times \frac{0,72}{7,2} = 1,24$$

$$M_2 = 1,44 + 5,2 \times \frac{1,44}{7,2} = 2,48$$

Cas de 2 files

$$M'_1 = 0,32 + 5,2 \times \frac{0,72}{7,2} + 4,3 \times \frac{0,72}{7,2} + 2,7 \times \frac{0,72}{7,2} = 1,98$$

$$M_2 = 1,44 + 5,2 \times \frac{1,44}{7,2} + 4,3 \times \frac{1,44}{7,2} + 2,7 \times \frac{1,44}{7,2} = 3,96$$

Cas de 3 files

$$M'_1 = 0,32 + 5,2 \times \frac{0,72}{7,2} + 4,3 \times \frac{0,72}{7,2} + 2,7 \times \frac{0,72}{7,2} + 2,2 \times \frac{0,72}{7,2} + 0,2 \times \frac{0,72}{7,2} = 2,22$$

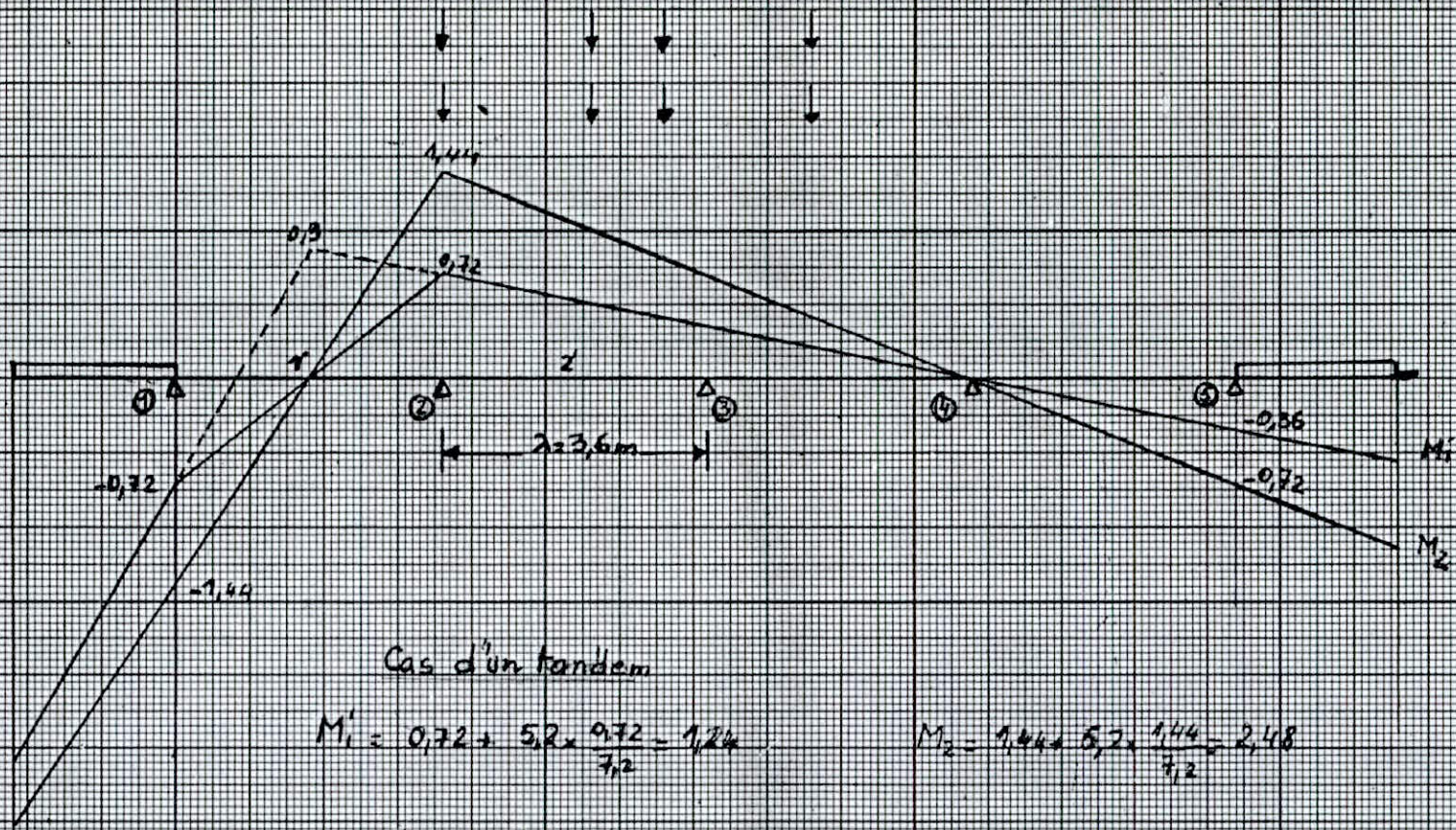
$$M_2 = 1,44 + 5,2 \times \frac{1,44}{7,2} + 2,7 \times \frac{1,44}{7,2} + 2,2 \times \frac{1,44}{7,2} + 0,2 \times \frac{1,44}{7,2} = 4,44$$

Cas de 4 files

$$M'_1 = \frac{0,72}{7,2} [7 + 6,5 + 4,5 + 4 + 3,5 + 1,5] + 0,5 \times \frac{0,36}{3,6} = 2,65$$

$$M_2 = \frac{1,44}{7,2} [7 + 6,5 + 4,5 + 4 + 3,5 + 1,5] + 0,5 \times \frac{0,72}{3,6} = 5,3$$





Cas d'un tandem

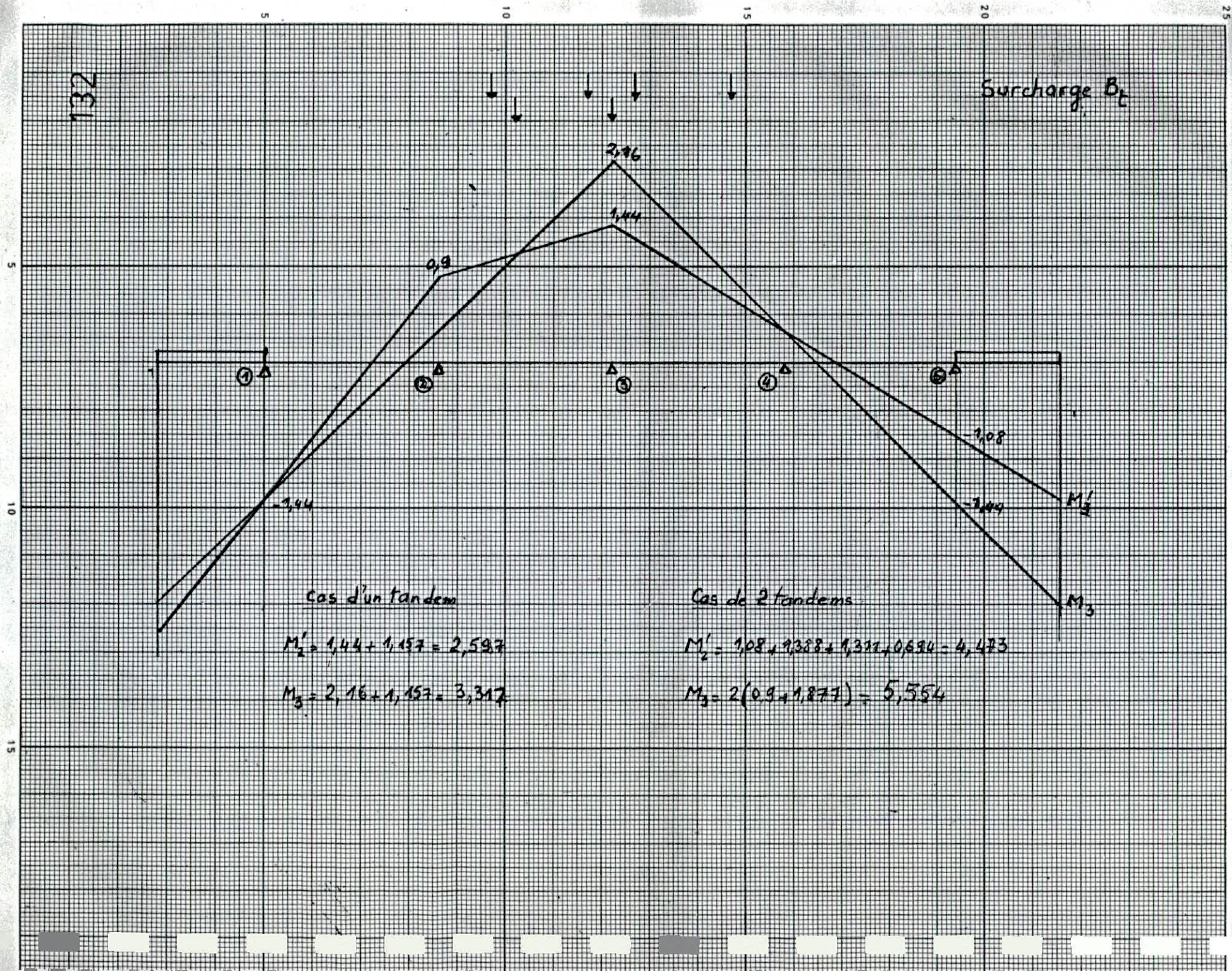
$$M_1' = 0,72 + 5,2 \times \frac{0,72}{7,2} = 1,24$$

$$M_2 = 1,44 + 5,2 \times \frac{1,44}{7,2} = 2,48$$

Cas de 2 tandems

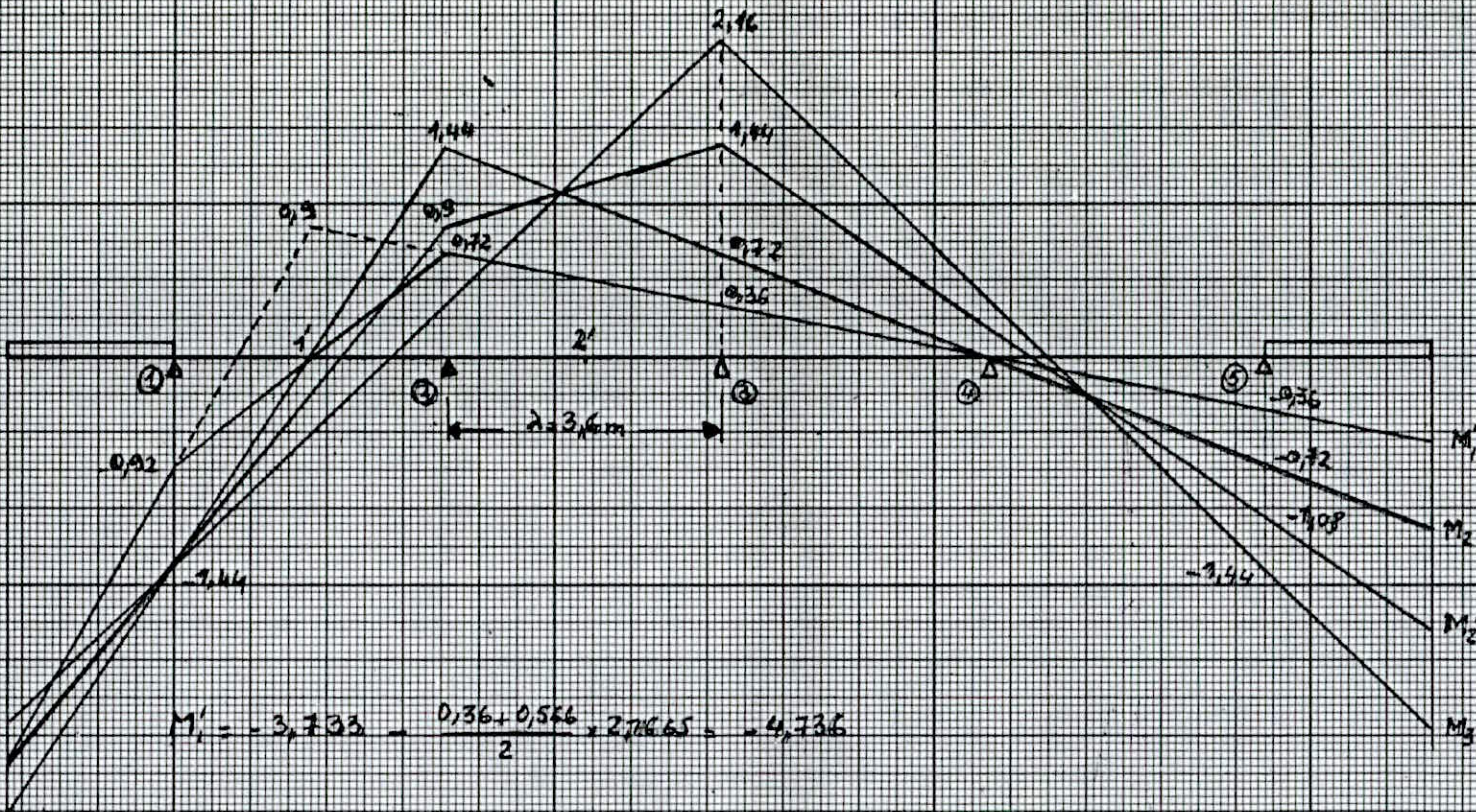
$$M_1' = 0,72 + 5,2 \times \frac{0,72}{7,2} + 4,2 \times \frac{0,72}{7,2} + 2,2 \times \frac{0,72}{7,2} = 1,88$$

$$M_2 = 1,44 + 5,2 \times \frac{1,44}{7,2} + 4,2 \times \frac{1,44}{7,2} + 2,2 \times \frac{1,44}{7,2} = 3,76$$



133

2 trottoirs chargés



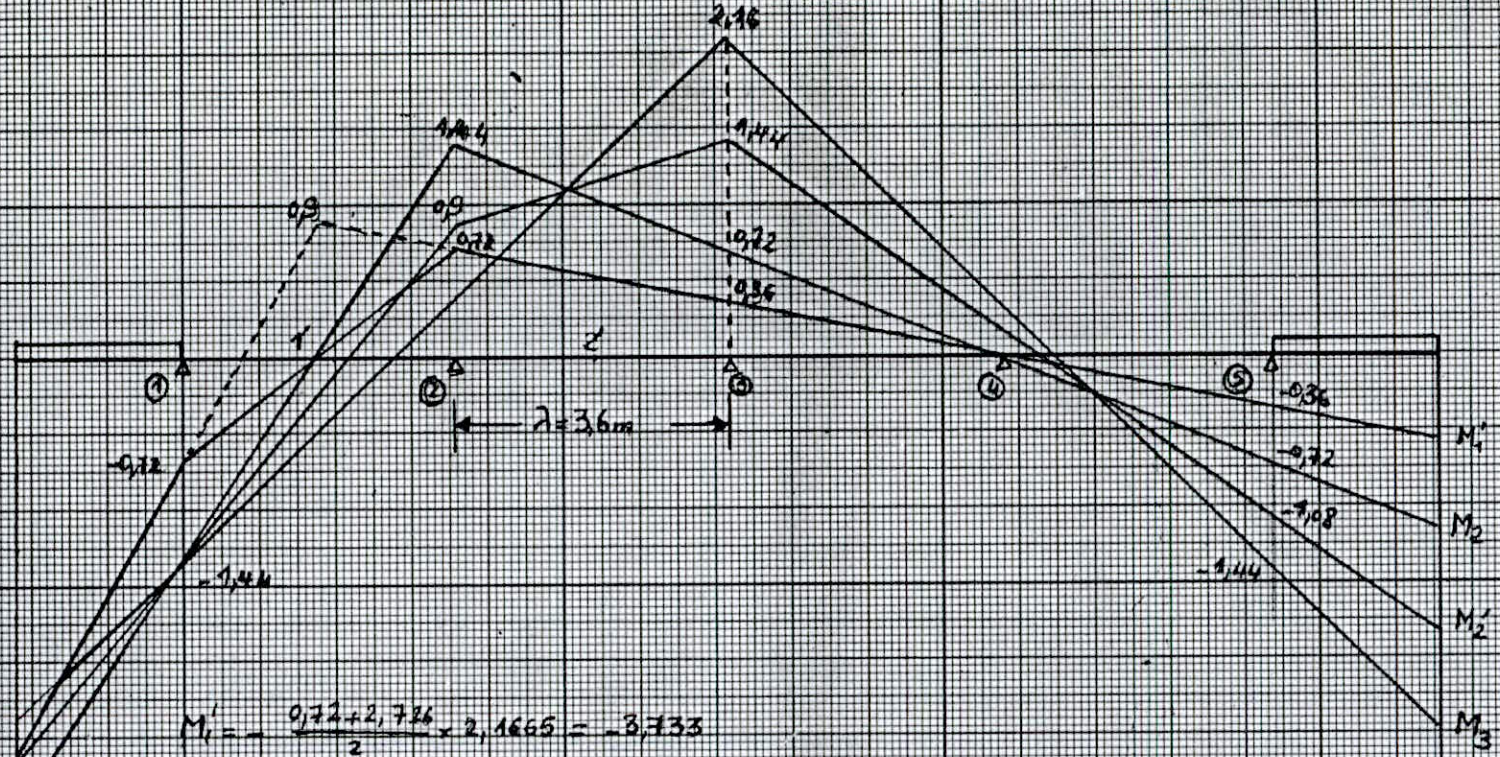
$$M_1' = -3,733 - \frac{0,36 + 0,546}{2} \times 2,7665 = -4,736$$

$$M_2 = -4,066 - \frac{0,72 + 1,183}{2} \times 2,7665 = -6,127$$

$$M_2' = -3,733 - \frac{1,08 + 1,185}{2} \times 2,1665 = -6,907$$

$$M_3 = -3,426 - \frac{1,44 + 2,12}{2} \times 2,1665 = -7,715$$

1 trottoir chargé



$$M_1 = -\frac{0.72 + 2.726}{2} \times 2.1665 = -3.733$$

$$M_2 = -\frac{0.72 + 3.034}{2} \times 2.1665 = -4.066$$

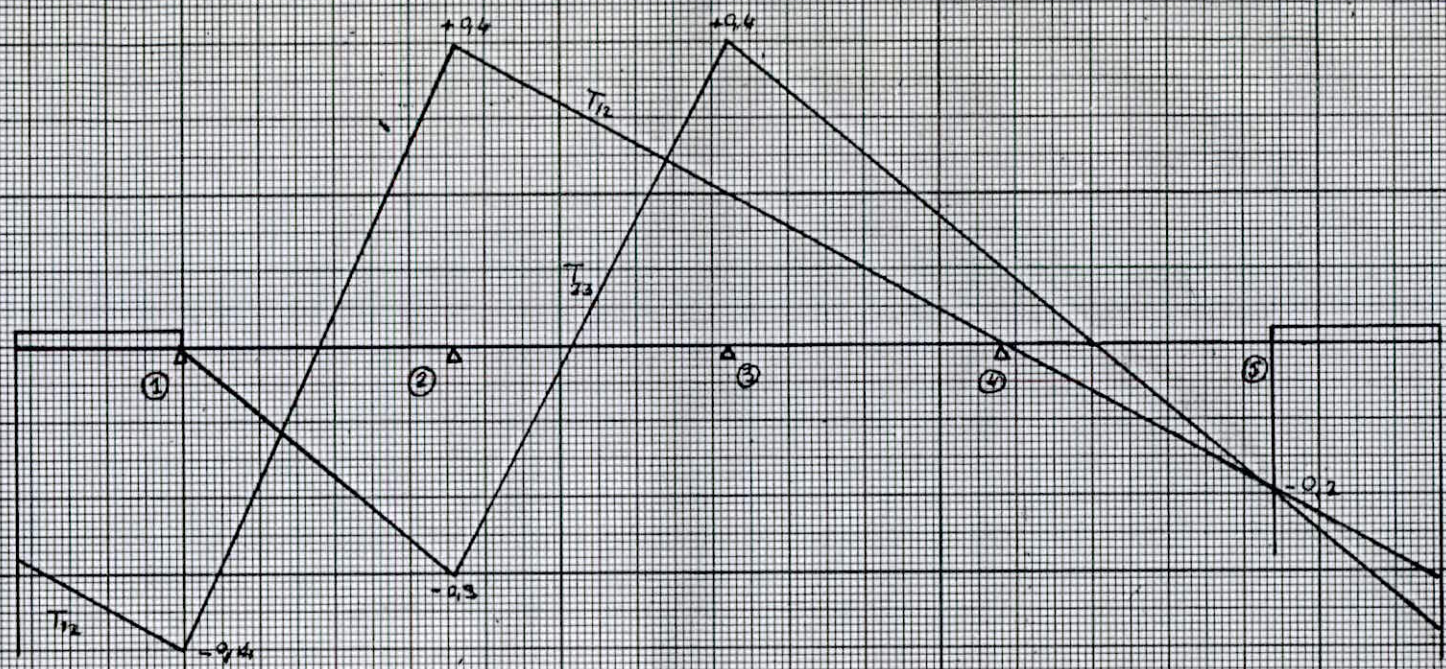
$$M_2' = \frac{1.44}{2} \times 2.1665 = 1.573$$

$$M_2 = -\frac{1.44 + 2.720}{2} \times 2.1665 = -4.573$$

$$M_3 = -\frac{0.72 + 2.403}{2} \times 2.1665 = -3.426$$

135

CP+CCP



$$T_{12} = \frac{0,28 + 0,4 \cdot 2,1665}{2} - 0,4 \cdot 1,8 \cdot \frac{1}{2} + 0,4 \cdot 1,8 \cdot \frac{1}{2} + 0,4 \cdot 7,2 \cdot \frac{1}{2} - 0,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3,6 - \frac{0,2 + 0,31}{2} \cdot 2,1665 = -0,209$$

$$T_{23} = -\frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 3,6 - \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1,6 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 2 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 4,8 - \frac{1}{2} \cdot 4,5665 \cdot 0,38 = -0,2876$$

5

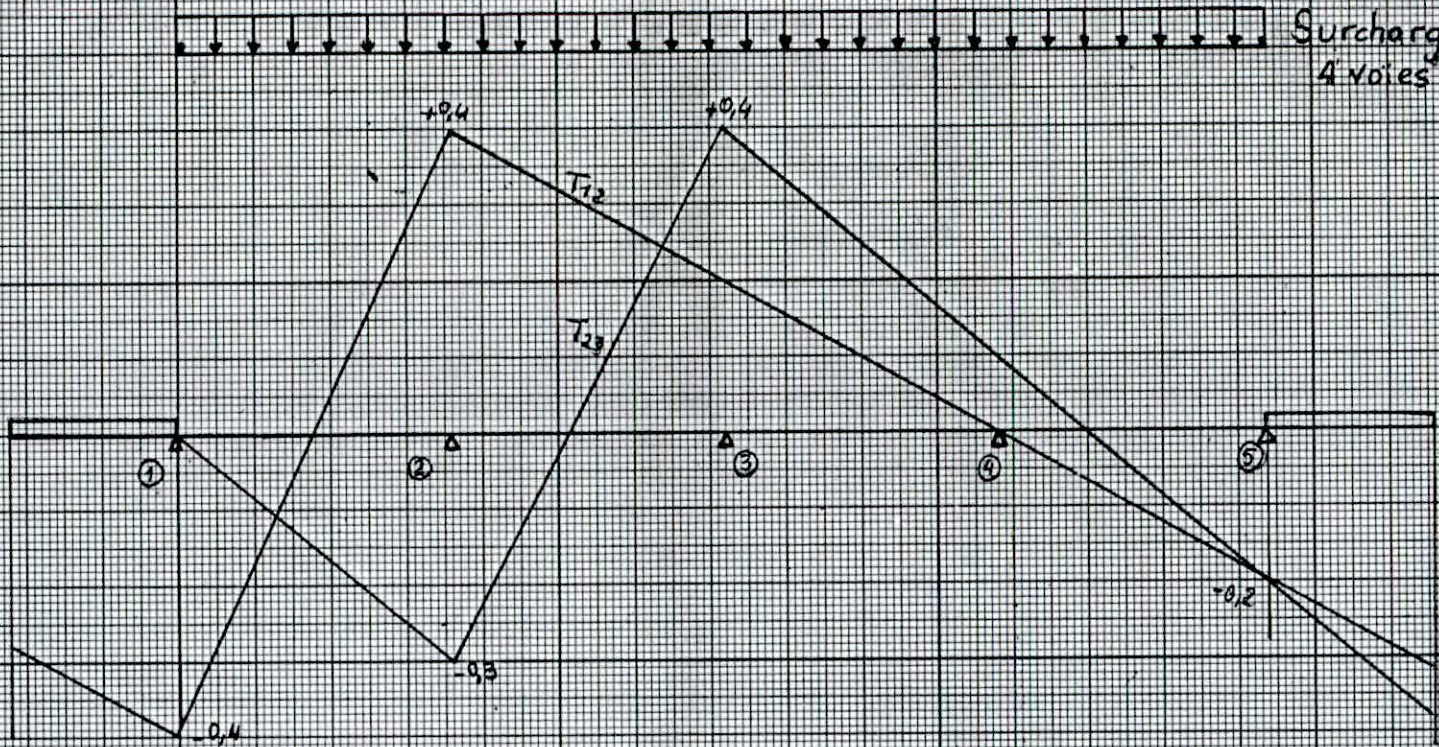
10

15

20

136

Surcharge A  
4 voies chargées

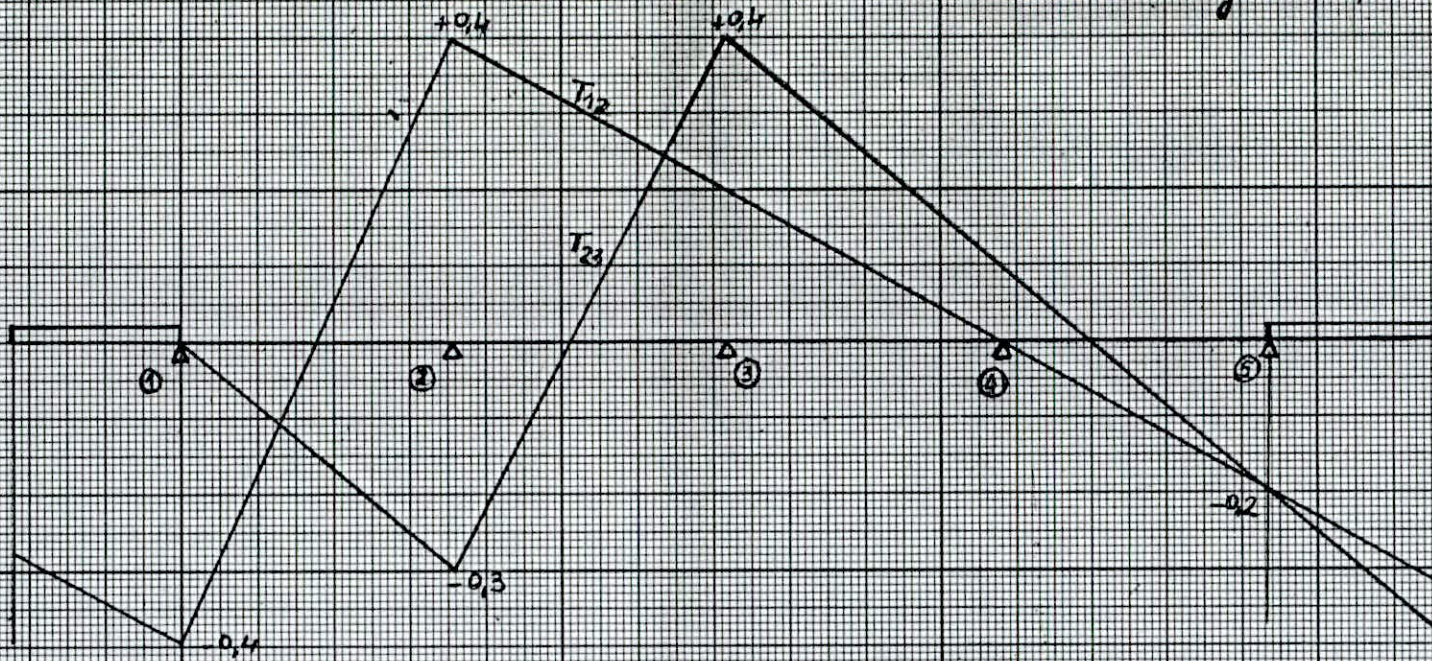


$$T_{12} = -\frac{1}{2} \cdot 0,4 \times 1,8 + 0,4 \times \frac{1}{2} \times 1,8 + 0,4 \times \frac{1}{2} \times 7,2 - 0,2 \times \frac{1}{2} \times 3,6 = 1,08$$

$$T_{23} = -\frac{1}{2} \cdot 0,3 \times 3,6 - \frac{1}{2} \cdot 0,3 \times 1,65 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \times 1,95 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \times 4,8 - \frac{1}{2} \cdot 0,2 \times 2,4 = 0,3225$$



Surcharge A  
3 voies chargées



$$T_{12} = -\frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,8 + 0,4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3,6 = 1,44$$

$$T_{23} = -\frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 3,6 + \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1,65 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,95 + \frac{0,4 + 0,1}{2} \cdot 3,6 = 0,5025$$

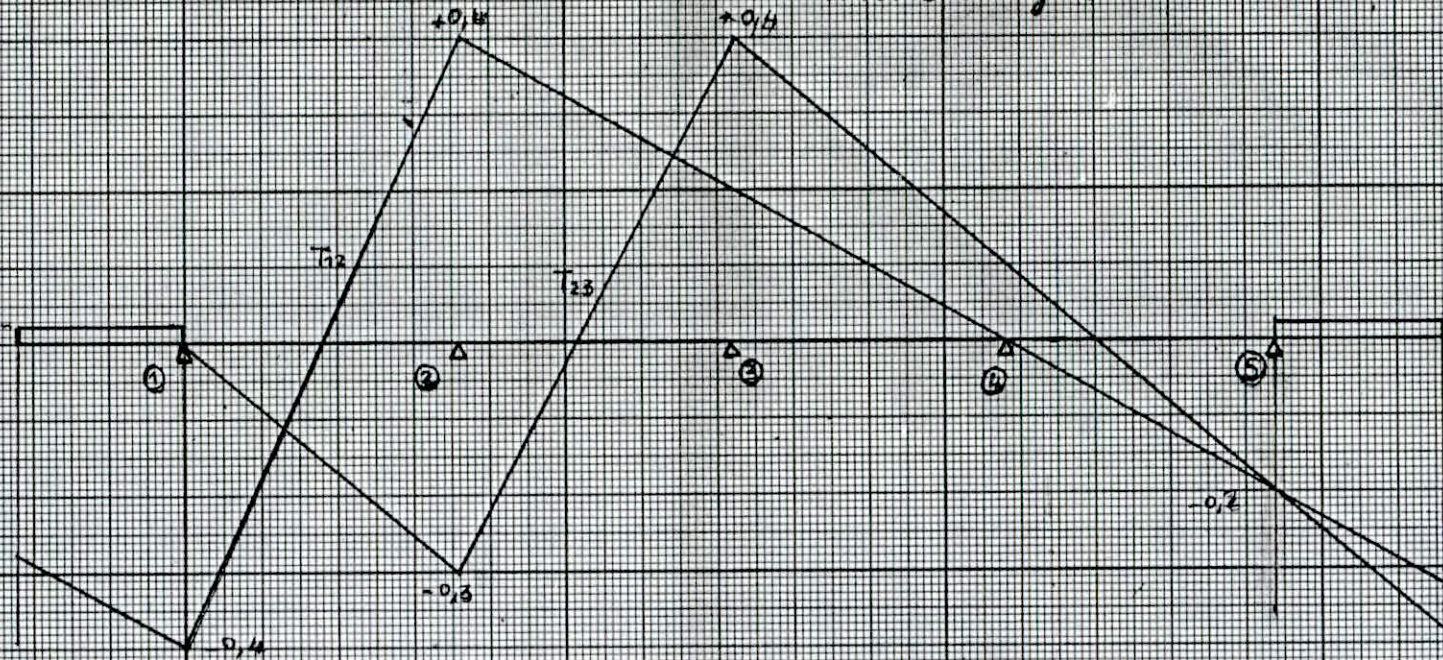
Surcharge A  
2 voies chargées

5

10

15

20



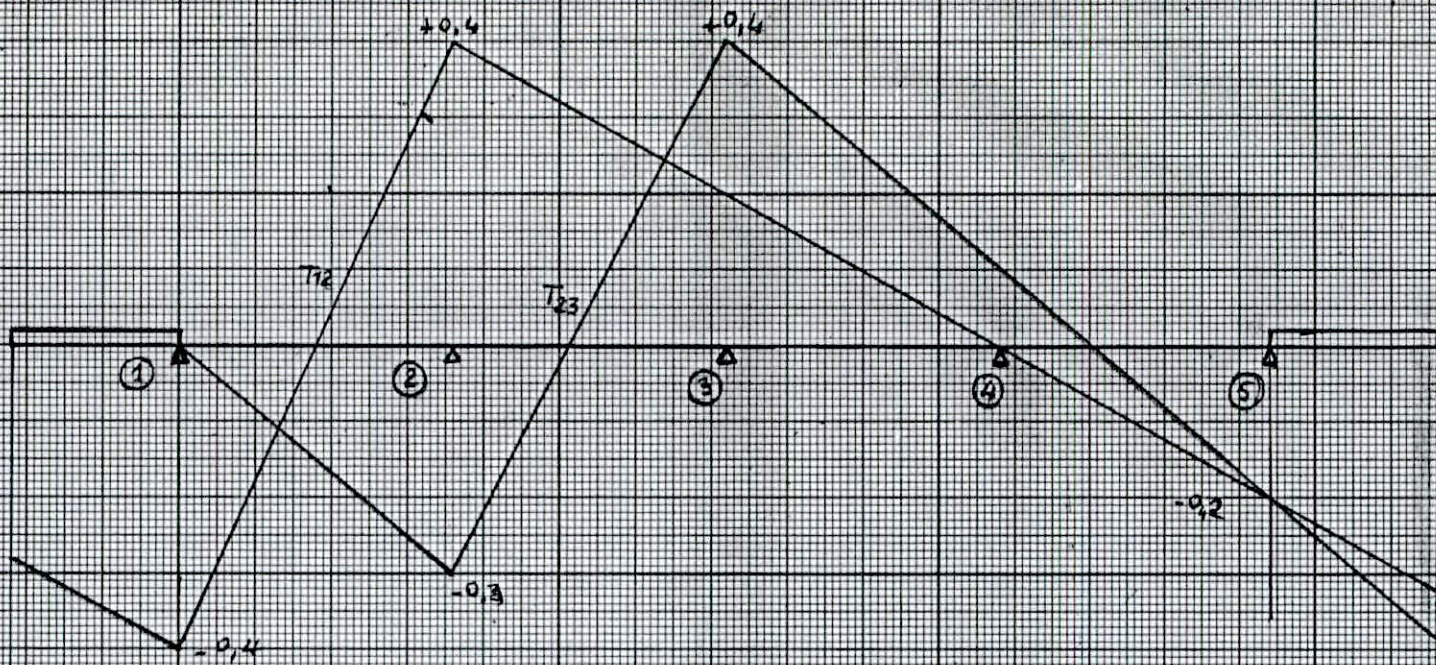
$$T_{12} = -\frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,8 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,8 + \frac{0,4 + 0,2}{2} \cdot 3,6 = 1,08$$

$$T_{23} = -\frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 3,6 - \frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 1,65 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,95 = 0,3975$$





Surcharge A trois chargées

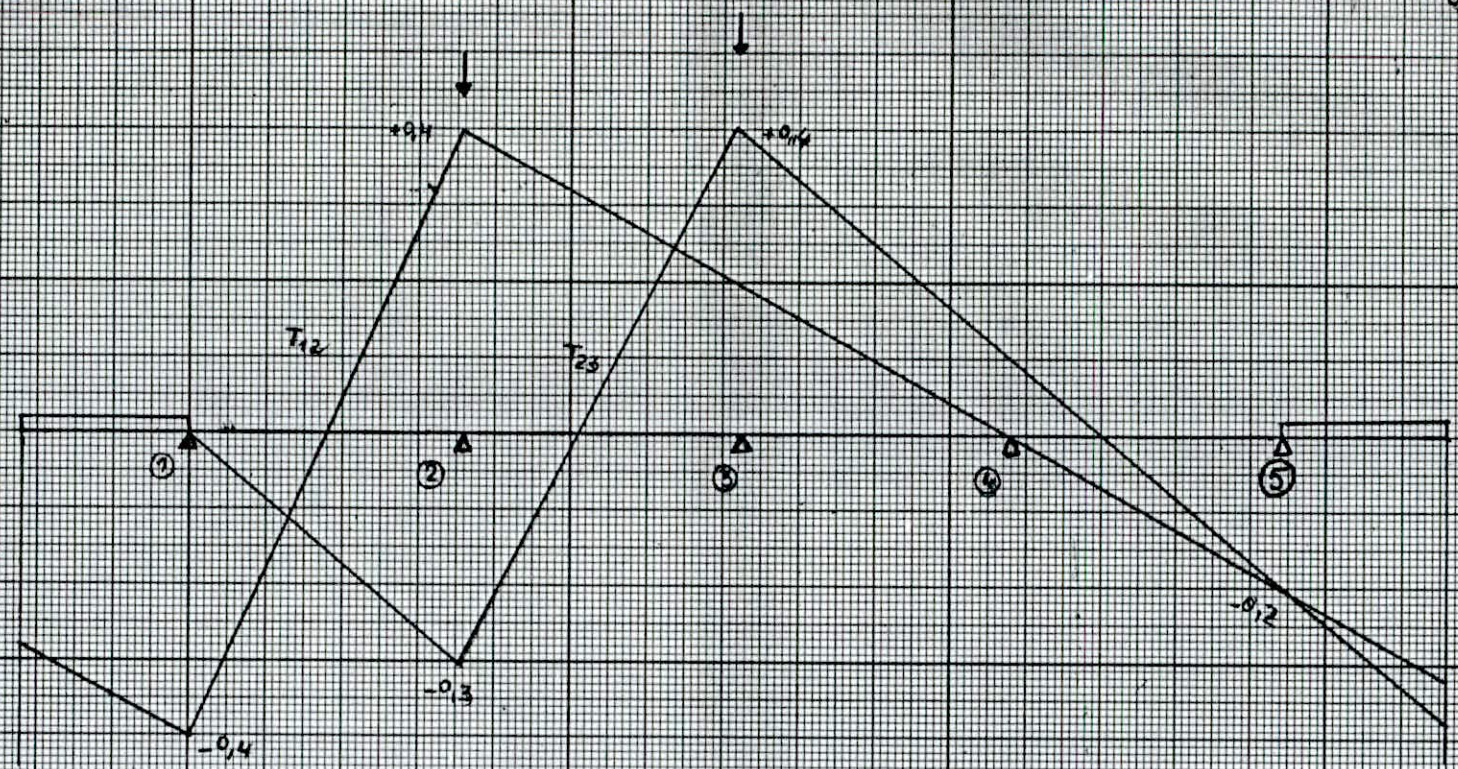


$$T_{12} = -\frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,6 + \frac{1}{2} \cdot 0,4 \cdot 1,6 = 0$$

$$T_{23} = -\frac{1}{2} \cdot 0,3 \cdot 3,6 = -0,54$$

Surcharge D

071



$$T_{12} = +0,4$$

$$T_{23} = +0,4$$

5

10

15

20

5

10

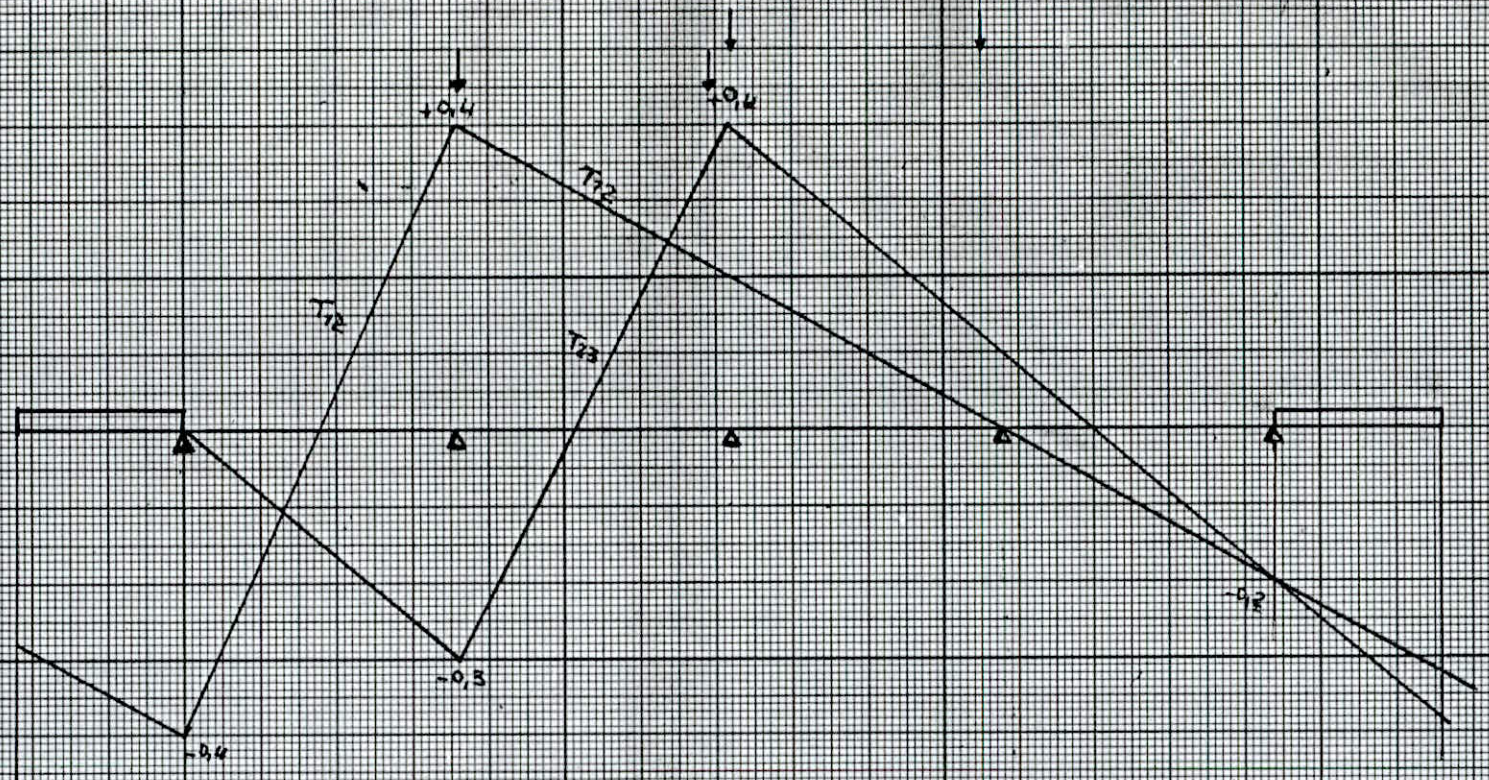
15

20

25

Surcharge M<sub>120</sub>

14.1

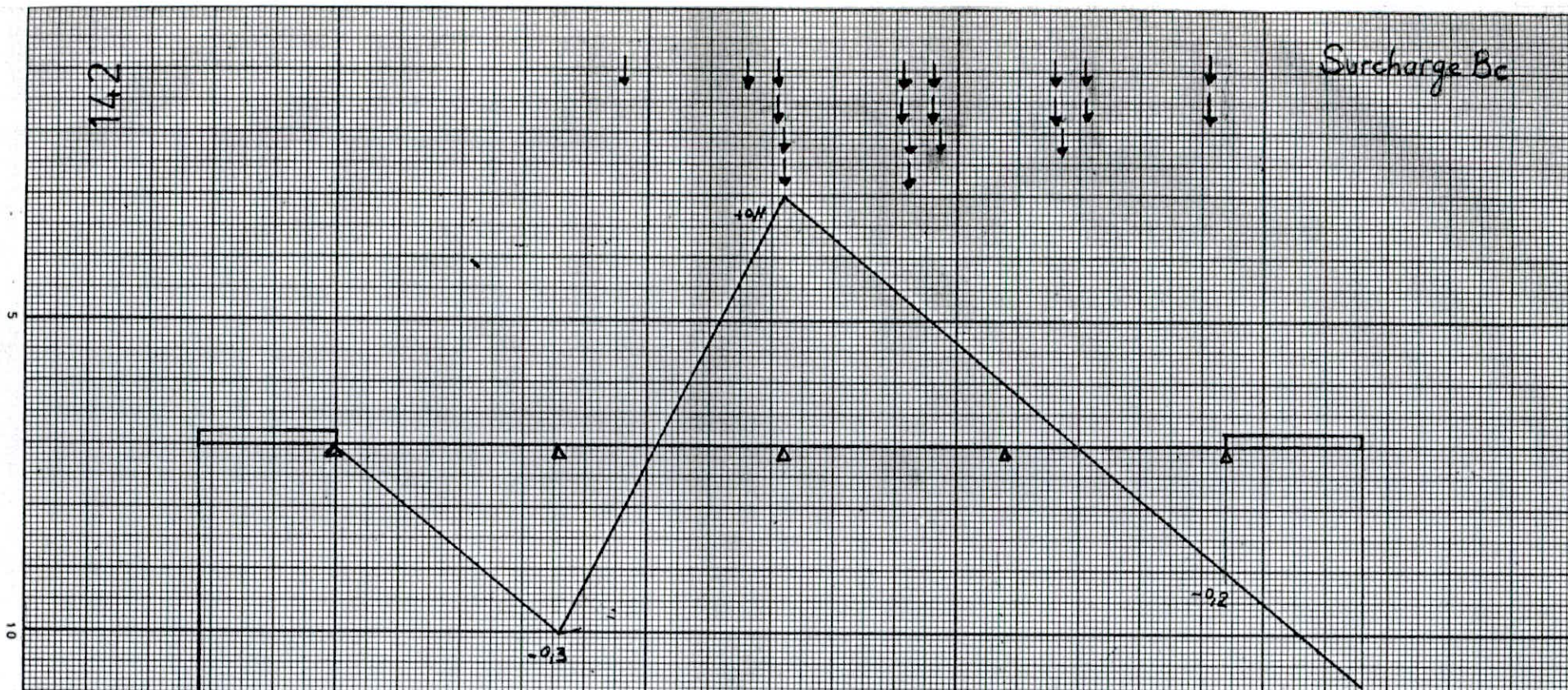


$$T_{12} = +0.4 + 0.25 = 0.65$$

$$T_{23} = 0.4 + 0.15 = 0.55$$

142

Surcharge Bc



Cas d'une file

$$T_{23} = 0,4 + 0,23 = 0,63$$

Cas de 2 files

$$T_{23} = 0,4 + 0,23 + 0,19 + 0,02 = 0,84$$

Cas de 3 files

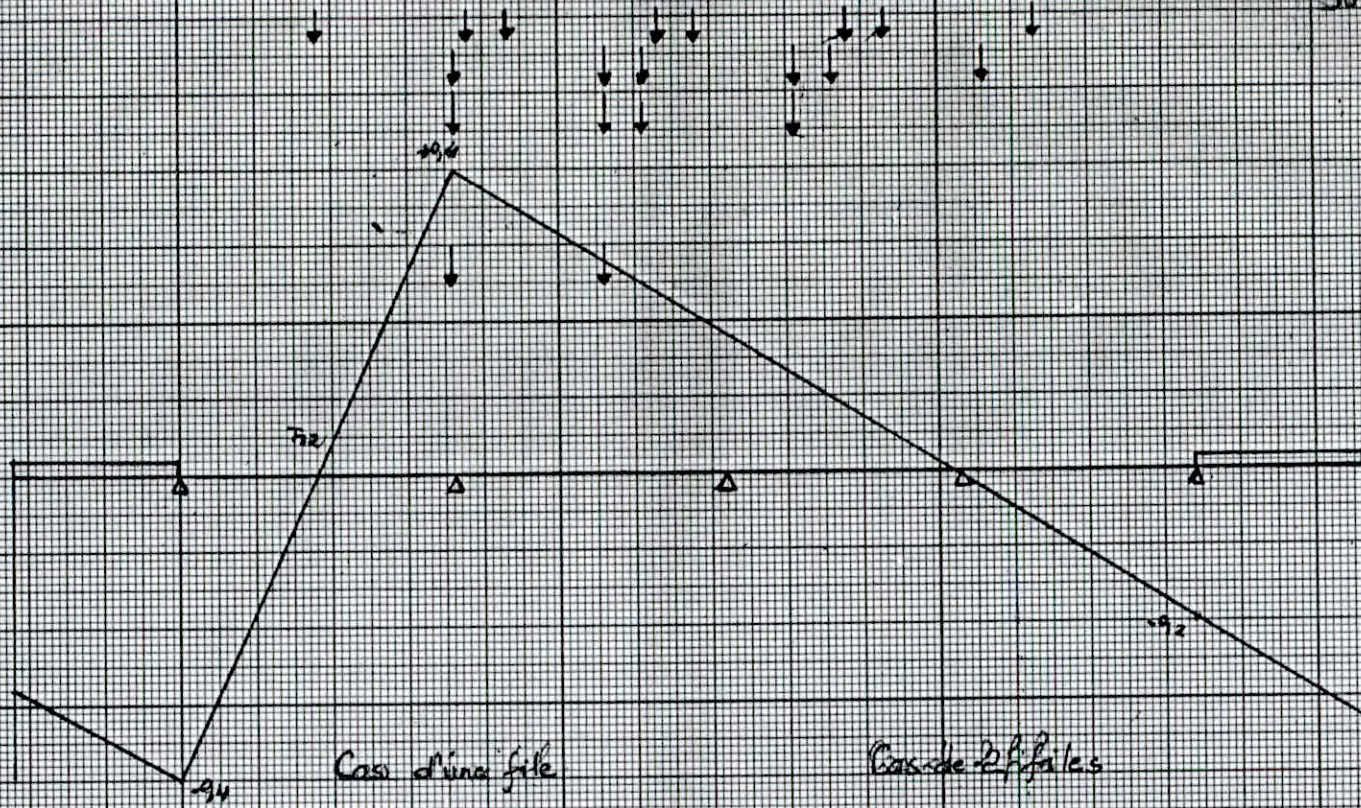
$$T_{23} = 0,38 + 0,24 + 0,2 + 0,03 + 0,4 - 0,175 = 0,665$$

Cas de 4 files

$$T_{23} = -0,1 + 0,28 + 0,38 + 0,24 + 0,2 + 0,03 - 0,01 - 0,175 = 0,845$$

14.3

Surcharge BB<sub>c</sub>



Cas d'une file

$$T_{12} = 0,4 + 0,28 = 0,68$$

Cas de 3 files

$$T_{12} = 0,4 + 0,28 + 0,245 + 0,125 + 0,095 - 0,025 = 1,12$$

Cas de 4 files

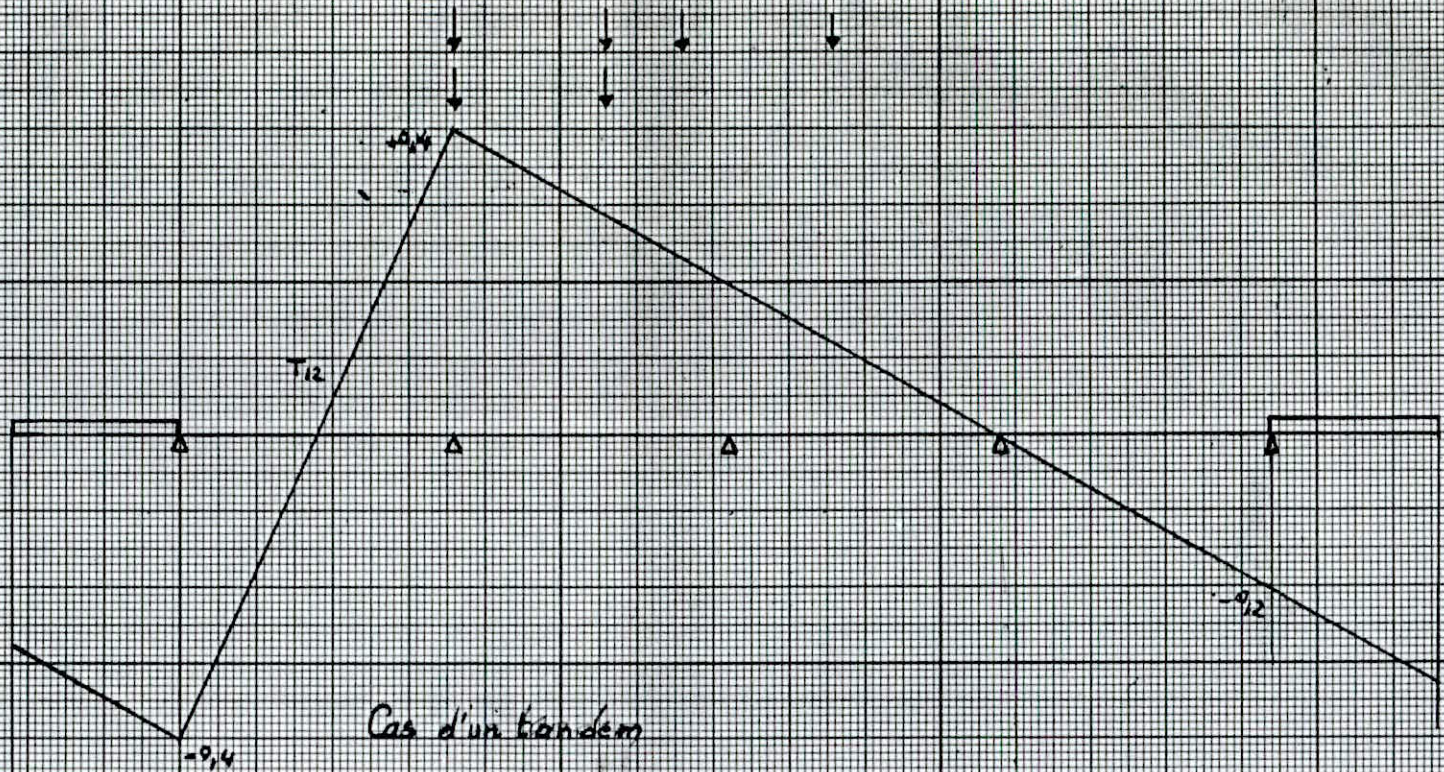
$$T_{12} = 0 + 0,385 + 0,355 + 0,235 + 0,205 + 0,085 + 0,055 - 0,065 = 1,255$$

Cas de 2 files

$$T_{12} = 0,4 + 0,28 + 0,245 + 0,125 = 1,05$$

Surcharge  $B_6$

77,



Cas d'un tandem

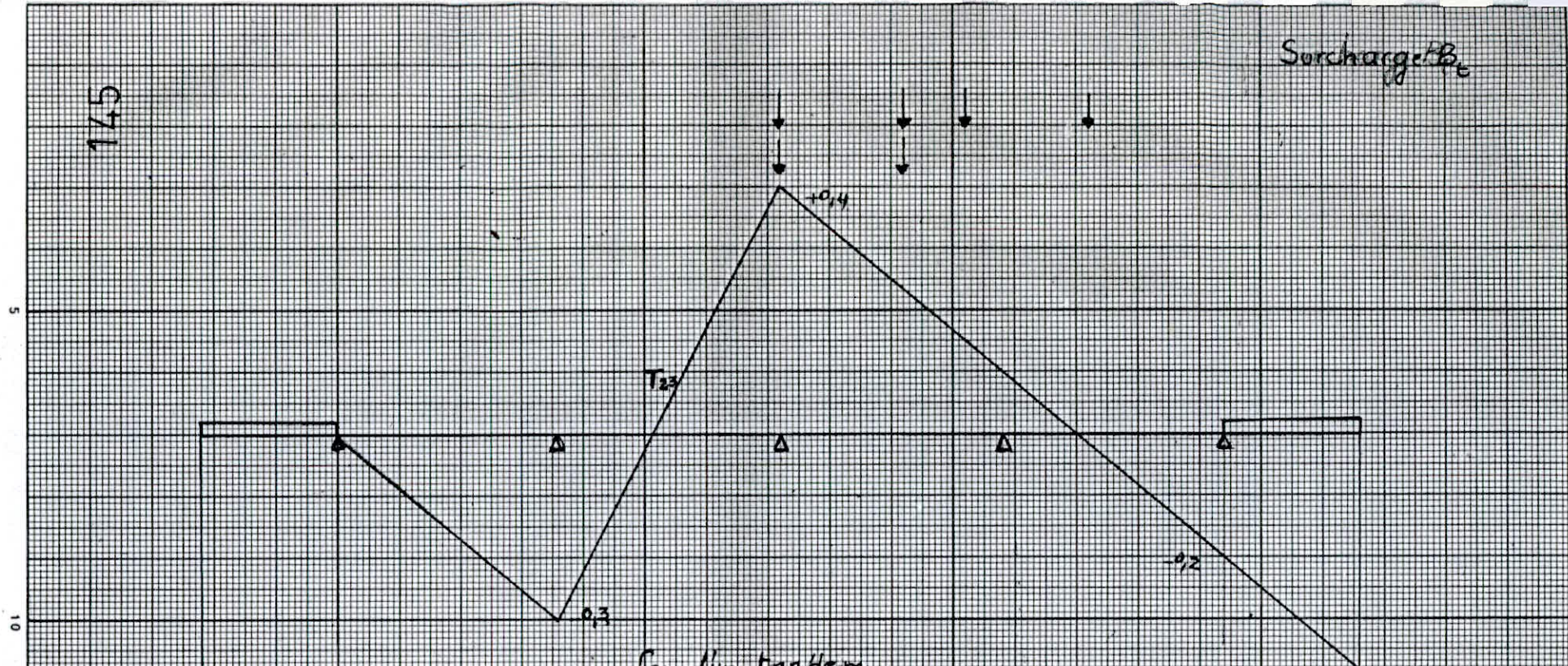
$$T_{12} = 0,4 + 0,28 = 0,68$$

Cas de 2 tandems

$$T_{12} = 0,4 + 0,28 + 0,23 + 0,12 = 1,03$$

175

Surcharge  $B_e$



Cas d'un trainem

$$T_{23} = 0,4 + 0,23 = 0,63$$

Cas de 2 trainem

$$T_{23} = 0,4 + 0,23 + 0,15 + 0,02 = 0,76$$

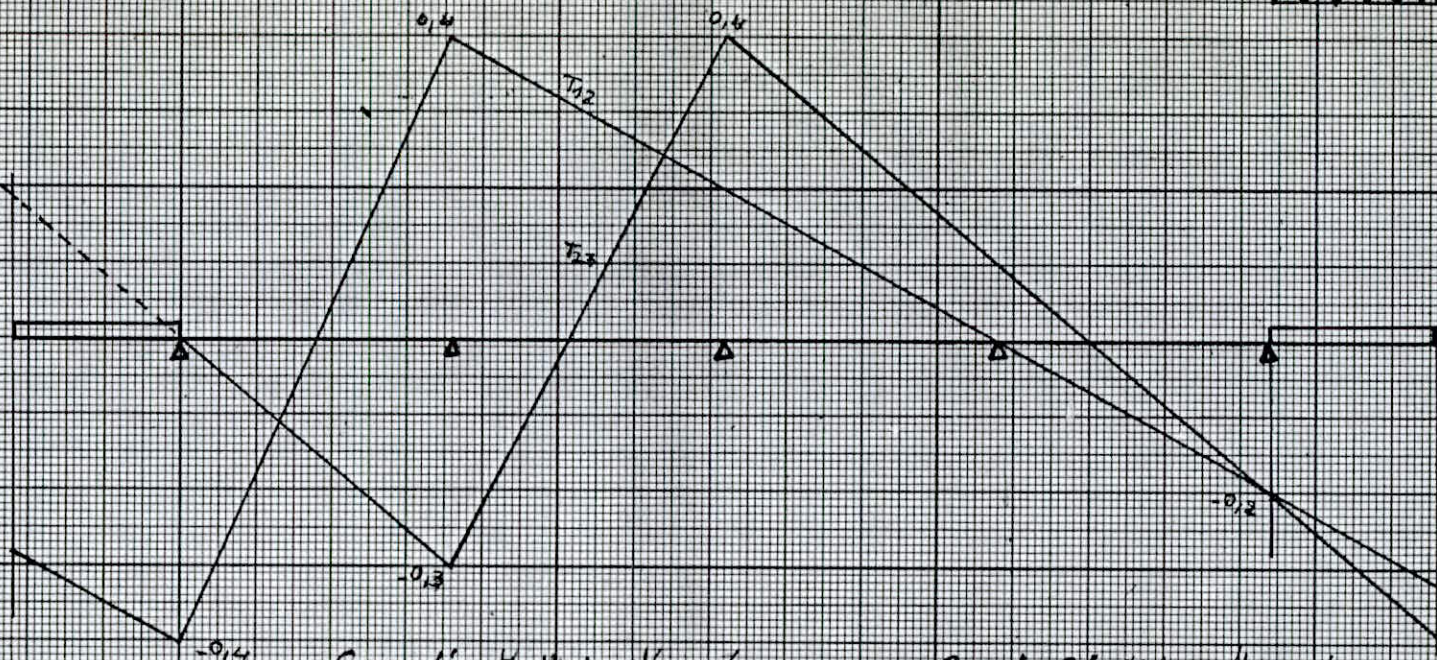
10

15

2

146

Surcharges de trottoir



Cas d'un trottoir chargé

$$T_{12} = -\frac{0,28+0,4}{2} \times 2,1665 = -0,7366$$

$$T_{23} = \frac{1}{2} \times 2,1665 \times 0,175 = 0,1896$$

Cas de 2 trottoirs chargés

$$T_{12} = -\frac{0,28+0,4}{2} \times 2,1665 - \frac{0,2+0,32}{2} \times 2,1665 = -1,3$$

$$T_{23} = \frac{1}{2} \times 2,1665 \times 0,175 - \frac{0,2+0,39}{2} \times 2,1665 = -0,4495$$



## Moments fléchissants

| charges    | $R_i$ kdaN/m | $A_1'$ | $A_2$  | $A_2'$  | $A_3$  | $M_1'$ | $M_2$  | $M_2'$ | $M_3$  |        |
|------------|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CP+CCP     | 5,032        | -2,772 | -2,94  | -2,856  | -4,415 | -13,95 | -14,79 | -14,37 | -22,21 |        |
| A          | 1v           | 4,96   | 0      | 0       | -0,954 | -1,872 | 0      | 0      | -4     | -7,86  |
|            | 2v           | 4,96   | 1,944  | 3,888   | 3,276  | 2,736  | 8,16   | 16,31  | 13,75  | 11,48  |
|            | 3v           | 4,96   | 2,592  | 5,184   | 6,228  | 6,912  | 10,88  | 21,75  | 26,13  | 29     |
|            | 4v           | 4,96   | 1,944  | -0,7776 | 4,5945 | 5,112  | 8,16   | -3,26  | 19,28  | 21,45  |
| BC         | 1v           | 6,36   | 1,24   | 2,48    | 2,597  | 3,317  | 7,89   | 15,77  | 16,52  | 21,1   |
|            | 2v           | 6,36   | 1,98   | 3,96    | 4,628  | 6,094  | 12,59  | 25,18  | 29,43  | 38,76  |
|            | 3v           | 6,36   | 2,22   | 4,44    | 6,35   | 6,992  | 14,12  | 28,24  | 40,38  | 44,47  |
|            | 4v           | 6,36   | 2,65   | 5,3     | 5,934  | 7,36   | 16,85  | 33,71  | 37,74  | 46,81  |
| Bt         | 1<br>travail | 14,138 | 1,24   | 2,48    | 2,597  | 3,317  | 17,53  | 35,06  | 36,72  | 46,9   |
|            | 2<br>travail | 14,138 | 1,88   | 3,76    | 4,473  | 5,554  | 26,58  | 53,16  | 63,24  | 78,52  |
| * D        | 102,97       | 0,72   | 1,44   | 1,44    | 2,16   | 74,14  | 148,28 | 148,28 | 222,4  |        |
| $M_{c120}$ | 40,54        | 1,11   | 2,22   | 2,366   | 2,674  | 45     | 90     | 95,92  | 108,4  |        |
| travail    | 1<br>travail | 0,87   | -3,733 | -4,066  | -4,713 | -3,426 | -3,248 | -3,537 | -4,1   | -2,98  |
|            | 2<br>travail | 0,87   | -4,736 | -6,127  | -6,907 | -7,715 | -4,12  | -5,33  | -6     | -6,712 |

## Effort tranchant

| charge et surcharges |             | $R_i$ (kGn/ml) | $A_{12}$ | $A_{23}$ | $T_{12}$ (kGn) | $T_{23}$ (kGn) |
|----------------------|-------------|----------------|----------|----------|----------------|----------------|
| CP+CCP               |             | 5,032          | -0,209   | -0,2876  | -1,05          | -1,45          |
| Surcharge A          | 1 voie      | 4,96           | 0        | -0,54    | 0              | 2,68           |
|                      | 2 voies     | 4,96           | 1,08     | -0,3975  | 5,3568         | 1,9716         |
|                      | 3 voies     | 4,96           | 1,44     | 0,5025   | 7,1424         | 2,4924         |
|                      | 4 voies     | 4,96           | 1,08     | 0,3225   | 5,3568         | 1,6            |
| Surcharge Bc         | 1 voie      | 6,36           | 0,68     | 0,63     | 4,325          | 4              |
|                      | 2 voies     | 6,36           | 1,05     | 0,84     | 6,678          | 5,342          |
|                      | 3 voies     | 6,36           | 1,12     | 0,665    | 7,123          | 4,23           |
|                      | 4 voies     | 6,36           | 1,255    | 0,845    | 7,982          | 5,374          |
| Surcharge Bt         | 1 tandem    | 14,138         | 0,68     | 0,63     | 9,614          | 8,91           |
|                      | 2 tandems   | 14,138         | 1,03     | 0,76     | 14,56          | 10,745         |
| Surcharge D          |             | 102,97         | 0,4      | 0,4      | 41,19          | 41,19          |
| Surcharge Mc120      |             | 40,54          | 0,615    | 0,525    | 24,03          | 21,28          |
| Surcharge trottoir   | 1 trottoir  | 0,87           | -0,7366  | 0,1896   | -0,641         | 0,165          |
|                      | 2 trottoirs | 0,87           | -1,3     | -0,4495  | -1,131         | -0,391         |

| charges                     |             | $M_1'$ | $M_2$  | $M_2'$ | $M_3$  | $T_{12}$ | $T_{23}$ | $S$   | Coeff. de Pondération | $M_1'$ | $M_2$  | $M_2'$ | $M_3$  | $T_{12}$ | $T_{23}$ |
|-----------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|-------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| CP + CCP                    |             | -13,95 | -14,79 | -14,37 | -22,21 | -1,05    | -1,45    | 1     | 1,32                  | -18,41 | -19,52 | -18,97 | -29,32 | -1,386   | -1,914   |
| A                           | 1 voie      | 0      | 0      | -4     | -7,86  | 0        | 2,68     | 1     | 1,6                   | 0      | 0      | -6,4   | -12,58 | 0        | 4,288    |
|                             | 2 voies     | 8,16   | 16,31  | 13,75  | 11,48  | 5,3568   | 1,9716   | 1     | 1,6                   | 13,06  | 26,1   | 22     | 18,37  | 8,57     | 3,15     |
|                             | 3 voies     | 10,88  | 21,75  | 26,13  | 29     | 7,1424   | 2,4924   | 1     | 1,6                   | 17,41  | 34,8   | 41,81  | 46,4   | 11,43    | 3,99     |
|                             | 4 voies     | 8,16   | -3,26  | 19,28  | 21,45  | 5,3568   | 1,6      | 1     | 1,6                   | 13,06  | -5,216 | 30,85  | 34,32  | 8,57     | 2,56     |
| B <sub>2</sub>              | 1 voie      | 7,89   | 15,77  | 16,52  | 21,1   | 4,325    | 4        | 1,114 | 1,6                   | 14,06  | 28,11  | 29,44  | 37,61  | 7,71     | 7,13     |
|                             | 2 voies     | 12,59  | 25,18  | 29,43  | 38,74  | 6,678    | 5,342    | 1,114 | 1,6                   | 22,40  | 44,88  | 52,46  | 69,05  | 11,9     | 9,52     |
|                             | 3 voies     | 14,12  | 28,24  | 40,38  | 44,47  | 7,123    | 4,23     | 1,114 | 1,6                   | 25,17  | 50,34  | 71,97  | 79,26  | 12,7     | 7,54     |
|                             | 4 voies     | 16,85  | 33,71  | 37,74  | 46,81  | 7,982    | 5,374    | 1,114 | 1,6                   | 30     | 60,1   | 67,27  | 83,43  | 14,23    | 9,58     |
| B <sub>6</sub>              | 1 tandem    | 17,53  | 35,06  | 36,72  | 46,9   | 9,614    | 8,91     | 1,114 | 1,6                   | 31,24  | 62,5   | 65,45  | 83,6   | 17,13    | 15,88    |
|                             | 2 tandem    | 26,58  | 53,16  | 63,24  | 78,52  | 14,56    | 10,745   | 1,114 | 1,6                   | 47,38  | 94,75  | 112,72 | 139,95 | 25,95    | 19,15    |
| surcharge D                 |             | 74,14  | 148,28 | 148,28 | 222,4  | 41,19    | 41,19    | 1     | 1,32                  | 97,86  | 195,73 | 195,73 | 293,57 | 54,37    | 54,37    |
| surcharge M <sub>c120</sub> |             | 45     | 90     | 95,92  | 108,4  | 24,93    | 21,28    | 1,092 | 1,32                  | 64,86  | 129,73 | 138,26 | 156,25 | 35,93    | 30,67    |
| trottoir                    | 1 trottoir  | -3,248 | -3,537 | -4,1   | -2,98  | -0,641   | 0,165    | 1     | 1,6                   | -5,197 | -5,66  | -6,56  | -4,77  | -1,03    | 0,264    |
|                             | 2 trottoirs | -4,12  | -5,33  | -6     | -6,712 | -1,131   | -0,391   | 1     | 1,6                   | -6,59  | -8,53  | -9,6   | -10,74 | -1,81    | -0,626   |



1 ex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL



PROJET DE FIN D'ETUDES  
Tome 2

SUJET

PONT MIXTE

Proposé par :

SAPTA

Etudié par :

N.E. NEBBACHE  
H. CHENITI

Dirigé par :

M. KORDJANI



PROMOTION : JAN 85

Combinaison des efforts:

$$CP + CCP + \text{surcharge} > 0$$

$$CP + CCP + \text{surcharge} < 0$$



| effort charge | $M'_1$ | $M_2$  | $M'_2$ | $M_3$  | $T_{12}$ | $T_{23}$ |
|---------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
| CP+CCP        | -18,41 | -19,52 | -18,97 | -29,32 | -1,386   | -1,914   |
| Surcharge     | > 0    | 97,86  | 195,73 | 195,73 | 293,57   | 54,37    |
|               | < 0    | 0      | -5,216 | -6,4   | -12,58   | 0        |
| trottoir      | > 0    | 0      | 0      | 0      | 0        | 0,264    |
|               | < 0    | -6,59  | -8,53  | -9,6   | -10,74   | -1,81    |
| Resultat      | > 0    | 79,45  | 176,21 | 176,76 | 264,25   | 52,984   |
|               | < 0    | -25    | -33,27 | -34,97 | -52,64   | -3,196   |

$$M_{\max} = 264,25 \text{ mKdaN}$$

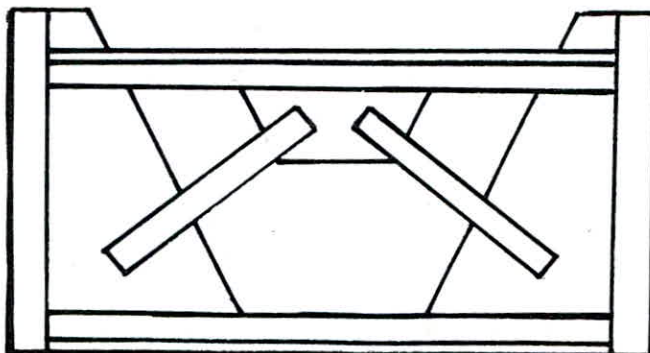
$$T_{\max} = 52,984 \text{ KdaN}$$

Predimensionnement:

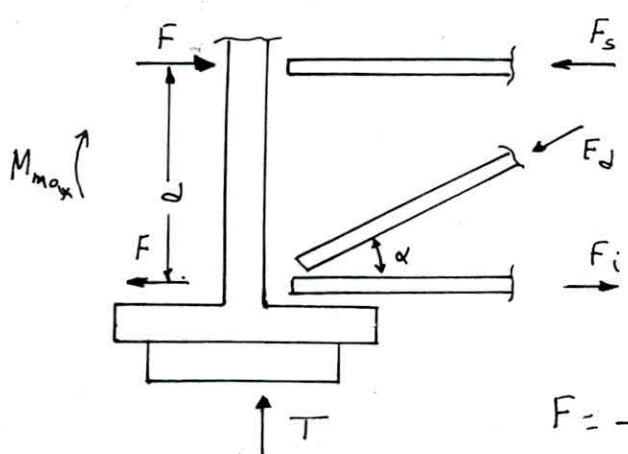
$$\sigma = \frac{M_{\max}}{W_{\text{nel}}} \leq \sigma_{\text{en}} \Rightarrow W_{\text{nel}} \geq \frac{M_{\max}}{\sigma_{\text{en}}}$$

$$W_{\text{nel}} \geq \frac{264,25 \cdot 10^5}{2400} = 11010,42 \text{ cm}^3$$

Comme on n'a pas de profilé laminé ayant  $W_{\text{nel}} > 11010,42 \text{ cm}^3$ , on optera donc pour une poutre triangulée. On aura donc la figure suivante:



Calcul des efforts:



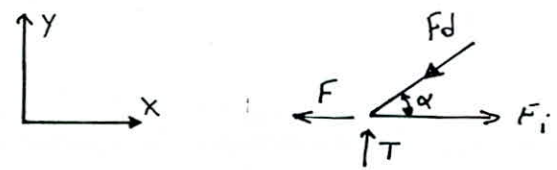
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{d}{\frac{l_x}{2}} = \frac{2 \times 120}{360} = 0,66 \\ \alpha &= 33,69^\circ \\ \cos \alpha &= 0,832 \\ \sin \alpha &= 0,5547 \end{aligned}$$

$$F = \frac{M_{\max}}{d} = \frac{264,25}{1,2} = 220,21 \text{ kdaN}$$

soit  $d = 120 \text{ cm}$

Determination des efforts dans les barres:

efforts sollicitants :  $F = 220,21 \text{ kdaN}$  ;  $T = 52,984 \text{ kdaN}$



$$\begin{aligned} \sum X = 0 : & \quad F_i - F - F_d \cos \alpha = 0 \\ \sum Y = 0 : & \quad T - F_d \sin \alpha = 0 \\ F_s = F &= 220,21 \text{ kdaN} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow \begin{cases} F_d = \frac{T}{\sin \alpha} = 95,52 \text{ kdaN} \\ F_i = F + F_d \cos \alpha = 299,67 \text{ kdaN} \end{cases}$$

Vérification au flambement:

La membrane supérieure est sollicitée en compression.

On prend :  $\Gamma \Gamma \quad 180 \times 180 \times 18$

$$A = 2 \times 61,91 = 123,82 \text{ cm}^2$$

$$i_x = 5,49 \text{ cm}$$

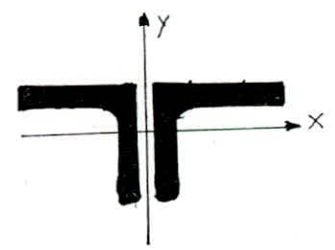
$$i_y = 7,55 \text{ cm}$$

$$\lambda_x = \frac{l_x}{i_x} = \frac{180}{5,49} = 32,79$$

$$\lambda_y = \frac{l_y}{i_y} = \frac{360}{7,55} = 47,68$$

$$\lambda_y = 47,68 > \lambda_x \longrightarrow k_y = 1,103$$

$$\text{On doit vérifier } k_y \sigma \leq \sigma_{\text{adm}} : 1,103 \frac{F_s}{A} = 1,103 \cdot \frac{220,21 \cdot 10^3}{123,82} = 1960,8 \text{ bar} < \sigma_{\text{adm}} \quad \text{OK.}$$



La membrure inférieure est sollicitée en traction donc pas de risque de flambement

Condition de résistance:

$$\frac{F_i}{A} \leq \sigma_{\text{ten}} \Rightarrow A \geq \frac{F_i}{\sigma_{\text{ten}}} = \frac{293,67 \cdot 10^3}{2400} = 124,87 \text{ cm}^2$$

On prend:  $\Gamma \Gamma 180 \times 180 \times 20$  :  $A = 2 \times 68,35 = 136,7 \text{ cm}^2$

Diagonale:

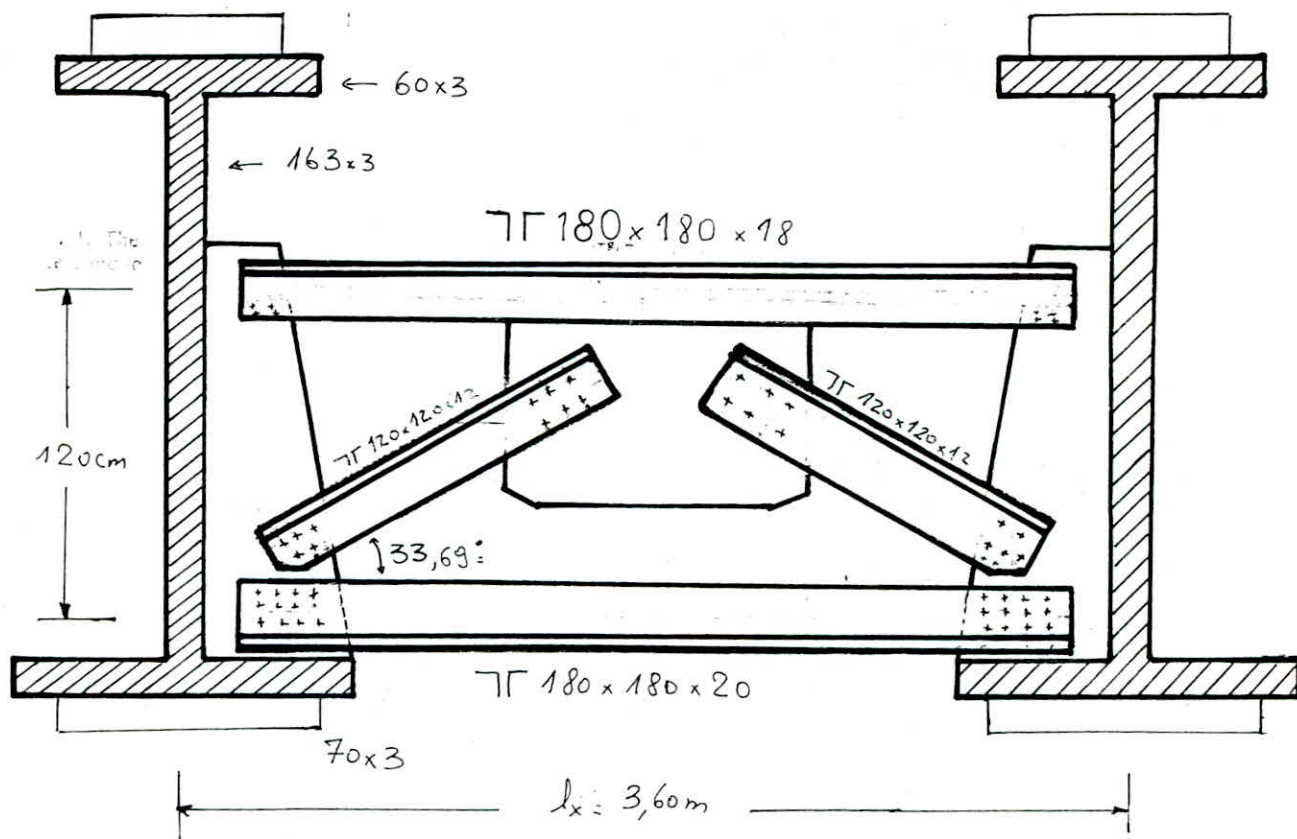
Elle est sollicitée en compression  $F_d = 95,52 \text{ kdaN}$

On prend  $\Gamma \Gamma 120 \times 120 \times 12 \rightarrow \begin{cases} i_x = i_y = 3,65 \text{ cm} \\ A = 2 \times 27,54 = 55,08 \text{ cm}^2 \end{cases}$

$$\lambda_y = \lambda_x = \frac{216,4}{3,65} = 59,3 \rightarrow K = 1,188$$

$$K \frac{F_d}{A} = 1,188 \times \frac{95,52 \cdot 10^3}{55,08} = 2060,3 \text{ bar} < \sigma_{\text{ten}}$$

donc pas de risque de flambement





## CONNECTEURS

L'adhérence du béton sur les poutres métalliques ne peut être considérée comme un moyen de liaison car elle est non seulement trop faible, mais encore peu durable (fatigue). C'est pourquoi il est nécessaire de prévoir des organes de liaison qui doivent empêcher le glissement des deux matériaux à leur contact ainsi que le soulèvement relatif.

Actuellement, l'emploi de connecteurs de type goujons tend à se généraliser grâce à la commodité et la rapidité de la pose, faite automatiquement avec un pistolet électrique. De plus, ces connecteurs ont l'avantage de présenter la même résistance dans toutes les directions et en raison de leur flexibilité, ils permettent une bonne répartition de l'effort tranchant.

Les connecteurs peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Les butées : Organes rigides qui empêchent plus ou moins le glissement relatif
- Les ancrages : Organes souples qui permettent un certain glissement relatif
- Les butées munies d'ancrages : Combinaison des deux systèmes précédents.
- Les goujons : Organes assez souples avec ou sans tête ronde (la tête permet un meilleur ancrage du goujon dans la dalle).

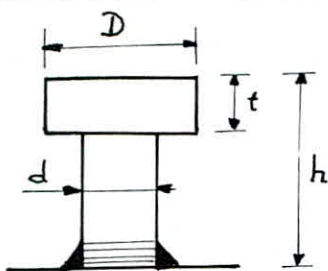
Ces connecteurs (goujons) doivent résister à un effort de glissement valant

$$\text{en phase élastique : } G = T \cdot \frac{H}{I}$$

où :  $H$  : moment statique de la dalle de béton par rapport au centre de gravité de la section mixte

$I$  : moment d'inertie de la section complète

$T$  : effort tranchant



Resistance d'un connecteur (art 3-422 CTICM)

$$Q = 42 d \sqrt{d \sigma'_{25}}$$

Cette formule n'est valable que si :

$$1 \text{ cm} \leq d \leq 3,2 \text{ cm} \quad ; \quad h \geq 4d$$

$$0,6d \leq t \leq d \quad ; \quad 1,2d \leq D \leq 1,4d$$

Le goujon est soudé sur la semelle supérieure de la poutre métallique.  
Ces connecteurs offrent la même résistance dans les deux sens.

Les résistances de plusieurs connecteurs situés dans une même section droite de la poutre mixte s'additionnent quelque soit leur écartement

$$d = 3 \text{ cm} \quad ; \quad h = 13 \text{ cm} \quad ; \quad t = 2 \text{ cm} \quad ; \quad D = 4 \text{ cm}$$

Resistance d'un goujon :

$$Q = 42 \times 3 \sqrt{3 \times 300} = 3780 \text{ kg.}$$

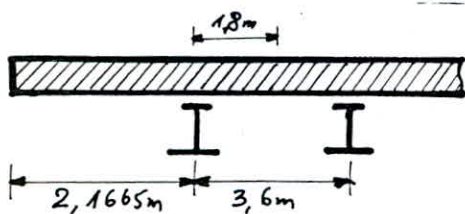
Les goujons doivent être vérifiés à l'action du glissement et du retrait.

Efforts de retrait :

- Retrait total :

Les efforts de retrait seront repris sur une longueur de  $l' = \frac{l}{6} = \frac{29}{6} = 4,83 \text{ m}$   
à partir de chaque appui.

Le béton est supposé tendu à :  $\sigma_b = E_{bR} \times \epsilon_R = 56 \text{ bar}$



$$B = (1,8 + 2,1665) \times 0,2 = 0,7933 \text{ m}^2$$

$$B = 7933 \text{ cm}^2$$

L'effort du retrait total est :  $F_r = B \sigma_b = 7933 \times 56 = 444,248 \text{ KdaN}$

Cet effort engendre un glissement unitaire :  $G_i = \frac{F_r}{l'} = \frac{444,248}{4,83} = 92 \text{ KdaN/ml}$

- Retrait partiel:

$$\sigma = E_b \epsilon_r = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 140000 = 21 \text{ bar}$$

$$\text{L'effort du retrait partiel: } F_2 = B \sigma_b = 21 \cdot 7933 = 166,593 \text{ KdaN.}$$

$$\text{Ce qui engendre un glissement unitaire: } G_2 = \frac{F_2}{l'} = \frac{166,593}{4,83} = 34,491 \text{ KdaN/m}$$

On doit multiplier le nombre de goussets dans la zone où le retrait est important à savoir la zone d'about  $l' = 4,83 \text{ m}$  où la vérification se fait avec les combinaisons des valeurs du glissement suivantes:

a/ CCP + surcharges + retrait partiel ( $\epsilon_r = 1,5 \cdot 10^{-4}$ )

b/ CCP + retrait total ( $\epsilon_r = 4 \cdot 10^{-4}$ )

c/ CCP + surcharge + retrait total

En dehors de ces zones, la combinaison à prendre en compte est:

CCP + surcharge

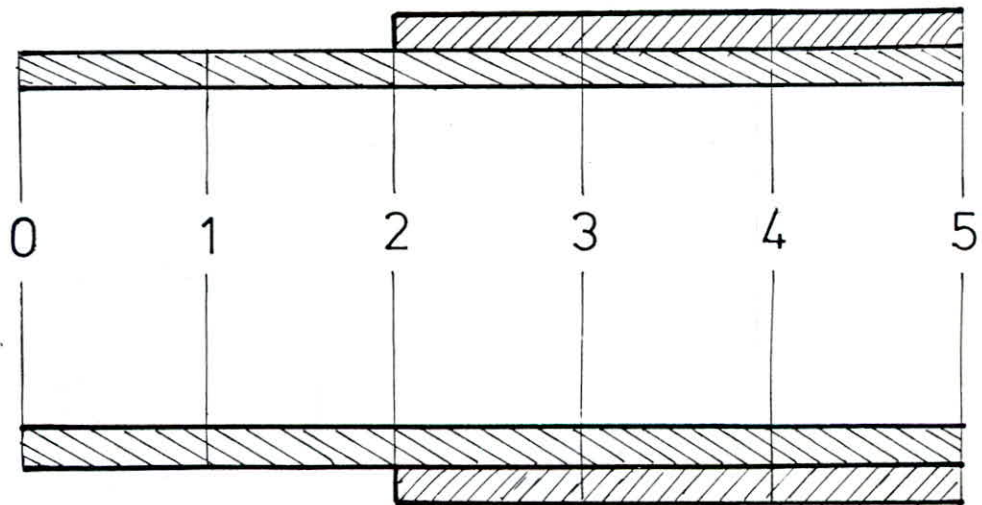
Efforts dus au glissement:

$$G = \sum \left( \frac{T m_a}{I \cdot b} \right) \quad \text{avec } b = 1,00 \text{ m}$$

$m_a$ : moment statique de la section de béton par rapport au centre de gravité de la section mixte.

$I$ : moment d'inertie de la section mixte.

$T$ : effort tranchant pondéré.



Remarque: Dans la justification des connecteurs, on considère la combinaison:

CCP + surcharge trottoir + retrait et on ne considère pas CP car deux cas peuvent se présenter.

1/ Montage des poutres principales avec des étais (joint droit): Dans ce cas, on doit tenir compte de CP qui développe des contraintes de cisaillement au niveau des connecteurs

2/ Montage des poutres principales sans étais (notre cas): Dans ce cas, il n'y a pas lieu de tenir compte de CP car l'action de CP sera absorbée par une flexion de la dalle. C'est la réponse de la dalle.

|                             |       | 0-1     | 1-2     | 2-3      | 3-4      | 4-5      |
|-----------------------------|-------|---------|---------|----------|----------|----------|
| CCP<br>$n=18$               | T     | 9980    | 7980    | 7260     | 4000     | 2000     |
|                             | I     | 6650113 | 6650113 | 9946457  | 9946457  | 9946457  |
|                             | $m_s$ | 30848,5 | 30848,5 | 35189,5  | 35189,5  | 35189,5  |
|                             | G     | 4629,5  | 3702    | 2568,5   | 1415     | 707,6    |
| Surcharge max<br>$n=6$      | T     | 90330   | 78350   | 66450    | 54520    | 42600    |
|                             | I     | 9464173 | 9464173 | 13489828 | 13489828 | 13489828 |
|                             | $m_s$ | 54993,6 | 54993,6 | 68208,5  | 68208,5  | 68208,5  |
|                             | G     | 52488   | 45527   | 33599    | 27567    | 21540    |
| Surcharge trottoir<br>$n=6$ | T     | 4970    | 4480    | 3980     | 3480     | 2990     |
|                             | I     | 9464173 | 9464173 | 13489828 | 13489828 | 13489828 |
|                             | $m_s$ | 54993,6 | 54993,6 | 68208,5  | 68208,5  | 68208,5  |
|                             | G     | 2888    | 2603,2  | 2012,4   | 1759,6   | 1511,8   |

$$m_s = \frac{A_b}{n} b_n$$

Combinaison des efforts:

| G      | CCP    | Surcharge max | Surcharge trottoir | Retrait total | Retrait partiel | CCP + Surcharge |
|--------|--------|---------------|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| G(0-1) | 4629,5 | 52488         | 2888               | 92000         | 34491           | 60005,5         |
| G(1-2) | 3702   | 45527         | 2603,2             | 92000         | 34491           | 51832,2         |
| G(2-3) | 2568,5 | 33599         | 2012,4             | 92000         | 34491           | 38179,9         |
| G(3-4) | 1415   | 27567         | 1759,6             | 92000         | 34491           | 30741,6         |
| G(4-5) | 707,6  | 21540         | 1511,8             | 92000         | 34491           | 23759,4         |

Espacement et nombre de goujons:

| Tronçon | effort par goujon dan/ml | effort total > 0 dan/ml | nombre de goujons | espacement des goujons (cm) |
|---------|--------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 0 - 1   | 3780                     | 60005,5                 | 46                | 6                           |
| 1 - 2   | 3780                     | 51832,2                 | 40                | 7                           |
| 2 - 3   | 3780                     | 38179,9                 | 30                | 9                           |
| 3 - 4   | 3780                     | 30741,6                 | 24                | 12                          |
| 4 - 5   | 3780                     | 23759,4                 | 18                | 16                          |

Remarque: Dans les zones d'about, où le retrait est important sur  $l' = 4,83m$ , on a:

le nombre de goujon est  $n_g = \frac{\text{effort de au retrait total} \times l'}{\text{effort repris par un goujon}}$

|           |           |           |            |            |   |
|-----------|-----------|-----------|------------|------------|---|
| $n = 46$  | $n = 40$  | $n = 30$  | $n = 24$   | $n = 18$   |   |
| $e = 6cm$ | $e = 7cm$ | $e = 9cm$ | $e = 12cm$ | $e = 16cm$ |   |
| 0         | 1         | 2         | 3          | 4          | 5 |

$$n = \frac{\text{effort total} \times \text{longueur du tronçon}}{\text{effort par goujon}}$$

Remarque:

Des brusques changements de section de la poutre métallique créent des efforts rasants concentrés. Ces efforts sont donnés par la différence des efforts normaux de la dalle de béton agissant à gauche et à droite de la section considérée. L'effort normal dans la dalle en béton est la résultante de contraintes  $\sigma_b$  (cas de la flexion)

$$N_b = \int_{\text{dalle}} \sigma_b dF = \int \frac{M}{I_m} y dF = \frac{M}{I_m} S_m \quad \text{avec} \quad S_m = \frac{F_b}{n} a_b$$

L'effort rasant concentré agissant à chaque changement brusque de section vaut:

$$R = M \left[ \left( \frac{S_m}{I_m} \right)_{\text{gauche}} - \left( \frac{S_m}{I_m} \right)_{\text{droite}} \right]$$

Cet effort n'est généralement pas déterminant pour le dimensionnement des connecteurs. En effet, en travée, les sections des poutres maîtresses augmentent en direction du milieu de la travée. Du côté de la section métallique la plus forte, la résultante  $N_b$  est plus faible. Par conséquent, l'effort rasant concentré dû au changement de section agit en sens inverse des efforts rasants répartis dus à la flexion de la poutre mixte.

Vérification à la fatigue:

On peut avoir une rupture des goujons par fatigue dans le domaine élastique qui fait suite à un chargement et à un déchargement répétés.

Pour ce fait, il faut vérifier que le nombre de goujons prévus en tout point est suffisant pour supporter les efforts rasants de fatigue.

$$\Delta G = \frac{(T_{\max} - T_{\min}) m_s}{I}$$

$T_{\max}, T_{\min}$ : efforts tranchants extrêmes provoqués par les surcharges de trafic localisées  $m = 6$

Dans ce cas, l'effort admissible par goujon en tenant compte des efforts de fatigue est:  $G' = 0,56 d^2$  (réglement suisse I COM §)

$G' \neq f'(\sigma_{2,3})$  car les expériences ont montré qu'à partir d'un béton de résistance

$\sigma'_{28} > 300 \text{ bar}$ , la rupture de la liaison a lieu par faiblesse du goujon.

$$G' = 0,56 \times 3^2 = 5,04 \text{ kdaN}$$

Remarque: Ce même règlement donne un effort par goujon  $Q = 50d^2 \sqrt{\sigma'_{28}} > Q$

$Q$ : effort par goujon donné par CTICM

donc elle donne  $n_b$  plus petit  $\Rightarrow$  on est en sécurité.

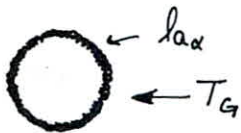
| Tronçon               | 0 - 1   | 1 - 2   | 2 - 3    | 3 - 4    | 4 - 5    |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|----------|
| $T_{\max}$ daN        | 90330   | 78350   | 66450    | 54520    | 42600    |
| $T_{\min}$ daN        | 28770   | 25830   | 22880    | 19930    | 17000    |
| $m_p$ cm <sup>2</sup> | 54993,6 | 54993,6 | 68208,5  | 68208,5  | 68208,5  |
| $I$ cm <sup>4</sup>   | 9464173 | 9464173 | 13489828 | 13489828 | 13489828 |
| $\Delta G$ daN/ml     | 35771   | 30518   | 22030    | 17489,8  | 12944    |
| $n_{\min}$            | 21      | 18      | 13       | 10       | 8        |

avec  $n_{\min} = \frac{\Delta G \times 2,9}{G'}$

Le nombre de goujons pris pour chaque section est supérieur à  $n_{\min}$  donc la vérification à la fatigue est satisfaite.

### Soudure des goujons:

La soudure des goujons est circulaire et doit résister à l'effort tranchant (voir assemblage chap →) de glissement qui est horizontal



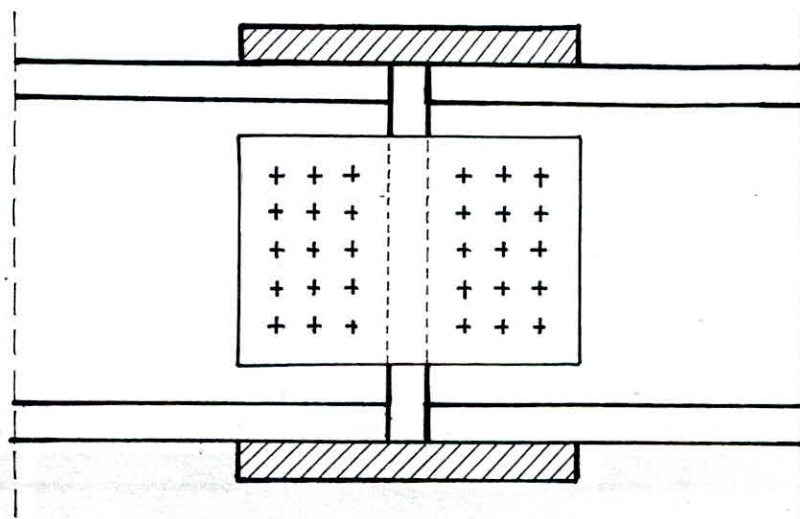
(voir assemblage CH)

# ASSEMBLAGES

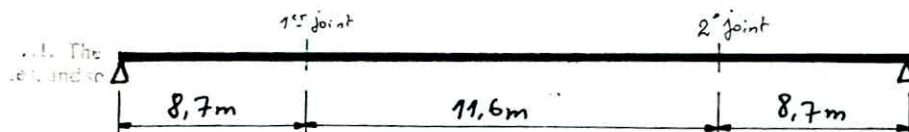
La portée des poutres principales étant de 29m, leur transport est difficile de leur lieu de fabrication au chantier. Pour remédier à ce problème, on réalise des assemblages de poutres.

## Assemblage poutre-poutre

C'est un joint de continuité réalisé par l'intermédiaire d'éclisse d'âme et de semelle.



Notre poutre présente 2 joints symétriques par rapport au milieu de la travée



On utilisera des boulons HR  $\Phi 24$  car l'épaisseur de la tôle est  $e = 30\text{mm} > 14\text{mm}$

$$A_r = 353\text{ mm}^2 \quad (\text{annexe 14.12 RCM66})$$

On prendra un coefficient de frottement  $\varphi = 0,30$  en supposant que les parties à assembler sont simplement brossées

## Principe de calcul:

Précontrainte des boulons: C'est la force axiale dans le boulon résultant du serrage:  $N_0 = A_r \sigma_{ten} \cdot 0,8$

L'effort de frottement (glissement) dépend de l'état de surface et de  $N_0$

$$T_g = 1,1 \varphi N_0 = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 353 \cdot 88 = 8200,9\text{ daN} = 8,2\text{ KdaN}$$



### Joint boulonné de la semelle supérieure:

La semelle supérieure étant comprimée, la contrainte normale de compression sera calculée en section brute sous l'action de  $F_A + F_B$

L'assemblage est situé à 8,7m de l'appui, ce qui correspond à la section ③ de la poutre principale donc on a:  $\sigma_s = 1185,66 \text{ bar}$

Section de la semelle supérieure:

$$A = 60 \times 3 + 50 \times 3 = 330 \text{ cm}^2$$

L'effort de compression agissant au niveau de la section est:

$$F = A \sigma_s = 330 \times 1185,66 = 391267,8 \text{ daN}$$

Comme on a 2 plans de frottement,  $f_r = 2 T_g = 16400 \text{ daN}$  (commentaire 4,133 RCM66)

D'où le nombre de boulons nécessaires:

$$n_b = \frac{391267,8}{16400} = 23,86$$

$$n_b = 24 \quad \phi 24 \text{ HR 10/9}$$

### Disposition constructive de l'assemblage:

$$d = \phi + 1 = 24 + 1 = 25 \text{ mm}$$

- Distance entre axe des boulons:

Dans le cas des ponts, on a:  $3d < S < 5d$

$$75 \text{ mm} < S < 125 \text{ mm}$$

- Pince transversale:

$$1,5d < \delta_t < 2,5d$$

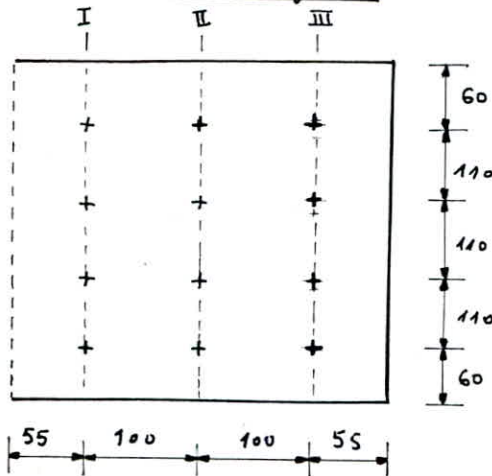
$$37,5 \text{ mm} < \delta_t < 62,5 \text{ mm}$$

- Pince longitudinale:

$$2d < \delta_l < 2,5d$$

$$50 \text{ mm} < \delta_l < 62,5 \text{ mm}$$

### Verification des couvre joints:



Les sections des pièces sont vérifiées :

- en section brute pour les effets de compression
- en section nette pour les efforts de traction ou de cisaillement (ou en section brute en adoptant un effort réduit  $F_a + 0,6 F_b$ )

$F_a$  : est la partie de l'effort transmis par les boulons en amont de la section

$F_b$  : est la partie de l'effort transmis au droit de la section considérée

Le couvre joint supérieur de la semelle <sup>sup</sup> reprend la moitié de l'effort total

Le couvre joint inférieur de la semelle supérieure reprend aussi la moitié de l'effort total

De même pour la semelle inférieure

Bonc on aura par demi-couvre joint un effort égal au quart de l'effort total

$$\text{Soit : } F = \frac{F_t}{4} = \frac{391267,8}{4} = 97816,95 \text{ daN}$$

### Justification d'un demi-couvre joint

| Section | $F_A$ (daN)                  | $F_B$ (daN)                  | $F_A + F_B$ (daN) | $A_{\text{brute}}$ (cm <sup>2</sup> ) | $\sigma$ (bar) |
|---------|------------------------------|------------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------|
| I       | 0                            | $\frac{4}{12} \frac{F_t}{4}$ | 32605,65          | 135                                   | 241,52         |
| II      | $\frac{4}{12} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{4}{12} \frac{F_t}{4}$ | 65211,3           | 135                                   | 483,05         |
| III     | $\frac{8}{12} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{4}{12} \frac{F_t}{4}$ | 97816,95          | 135                                   | 724,57         |

On a choisi un couvre joint de 3 cm d'épaisseur

$$A = 3 \times 45 = 135 \text{ cm}^2$$

Calcul de justification de la semelle supérieure assemblée:

L'effort total repris par cette semelle est  $F = 391267,8 \text{ daN}$

On dressera un tableau résumant les valeurs des contraintes en chaque section avec  $S = 60 \times 3 + 50 \times 3 = 330 \text{ cm}^2$ : section de la semelle supérieure

| Section | $F_A$ (daN)      | $F_B$ (daN)      | $F_A + F_B$ (daN) | S (cm <sup>2</sup> ) | $\sigma$ (bar) |
|---------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|----------------|
| I       | $\frac{8}{12} F$ | $\frac{4}{12} F$ | 391267,8          | 330                  | 1185,66        |
| II      | $\frac{4}{12} F$ | $\frac{4}{12} F$ | 260845,2          | 330                  | 790,44         |
| III     | 0                | $\frac{4}{12} F$ | 130422,6          | 330                  | 395,22         |

Points boulonnés de la semelle inférieure:

La semelle inférieure étant tendue, le calcul de justification pour les joints se fera par:

$F_A + F_B$  en section brute

$F_A + 0,6 F_B$  en section nette

Contrainte dans la semelle inférieure:  $\sigma_i = 1843,5 \text{ bar}$

Section de la semelle inférieure:  $S = 70 \times 3 + 60 \times 3 = 390 \text{ cm}^2$

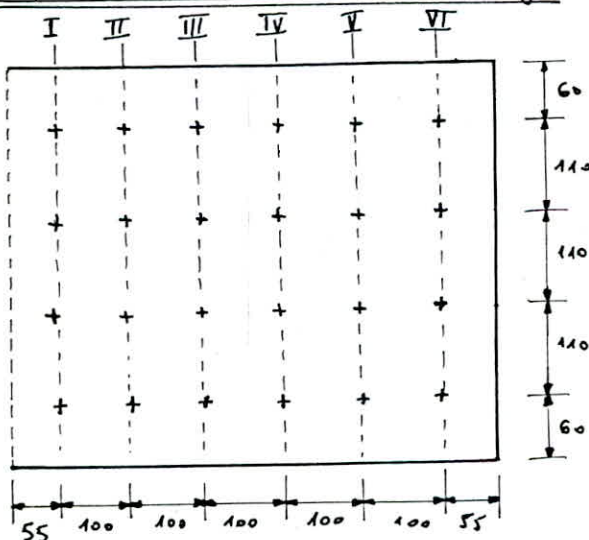
effort de traction agissant par la semelle inférieure:  $F = 1843,5 \times 390 = 718965 \text{ daN}$

Le nombre de boulons nécessaire sera donc:

$$n_b = \frac{718965}{16400} = 43,24$$

On adoptera donc 48 boulons  $\phi 24 \text{ HR 10/9}$

Disposition constructive de l'assemblage:



le joint a une épaisseur de 3 cm  
 section nette = section brute - section trous

$$\frac{F_t}{4} = \frac{718965}{4} = 179741,25 \text{ daN}$$

| Section                        | I                            | II                           | III                          | IV                            | V                             | VI                            |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $F_A$ (daN)                    | 0                            | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{8}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{12}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{16}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{20}{24} \frac{F_t}{4}$ |
| $F_B$ (daN)                    | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$ | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$  | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$  | $\frac{4}{24} \frac{F_t}{4}$  |
| $F_A + F_B$ (daN)              | 29956,875                    | 59913,75                     | 89870,625                    | 119827,5                      | 149784,375                    | 179741,25                     |
| $A_{brute}$ (cm <sup>2</sup> ) | 135                          | 135                          | 135                          | 135                           | 135                           | 135                           |
| $\sigma_{brute}$ (bar)         | 221,9                        | 443,8                        | 665,71                       | 887,61                        | 1109,51                       | 1331,42                       |
| $F_A + 0,6F_B$ (daN)           | 17974,125                    | 47931                        | 77887,875                    | 107844,75                     | 137801,625                    | 167758,5                      |
| $A_{nette}$ (cm <sup>2</sup> ) | 112,5                        | 112,5                        | 112,5                        | 112,5                         | 112,5                         | 112,5                         |
| $\sigma_{nette}$ (bar)         | 159,77                       | 426,05                       | 692,34                       | 958,62                        | 1224,9                        | 1491,18                       |

$$A_{brute} = 3 \times (11,0 \times 3 + 2 \times 6,0) = 135 \text{ cm}^2$$

$$A_{nette} = 3 \times (11,0 \times 3 + 2 \times 6,0) - 3 \times 2,5 \times 3 = 135 - 3 \times 7,5 = 112,5 \text{ cm}^2$$

Calcul de justification de la semelle inférieure assemblée:

L'effort total repris par cette semelle est :  $F = 718965 \text{ daN}$

| Section                        | I                 | II                | III               | IV               | V                | VI               |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| $F_A$ (daN)                    | $\frac{20}{24} F$ | $\frac{16}{24} F$ | $\frac{12}{24} F$ | $\frac{8}{24} F$ | $\frac{4}{24} F$ | 0                |
| $F_B$ (daN)                    | $\frac{4}{24} F$  | $\frac{4}{24} F$  | $\frac{4}{24} F$  | $\frac{4}{24} F$ | $\frac{4}{24} F$ | $\frac{4}{24} F$ |
| $F_A + F_B$ (daN)              | 718965            | 599137,5          | 479310            | 359482,5         | 239655           | 110827,5         |
| $A_{brute}$ (cm <sup>2</sup> ) | 390               | 390               | 390               | 390              | 390              | 390              |
| $\sigma_{brute}$ (bar)         | 1843,5            | 1536,25           | 1229              | 921,75           | 614,5            | 307,25           |
| $F_A + 0,6F_B$ (daN)           | 671034            | 551206,5          | 431379            | 311551,5         | 191724           | 71896,5          |
| $A_{nette}$ (cm <sup>2</sup> ) | 345               | 345               | 345               | 345              | 345              | 345              |
| $\sigma_{nette}$ (bar)         | 1945,02           | 1597,7            | 1250,37           | 903,05           | 553,72           | 208,39           |

$$A_{brute} = 70 \times 3 + 60 \times 3 = 390 \text{ cm}^2$$

$$A_{nette} = A_{brute} - 3 \times 2,5(3+3) = 345 \text{ cm}^2$$

Joints boulonnés au niveau de l'âme cisailée:

L'effort tranchant qui sollicite l'âme cisailée est :

$$T = 82,9 \text{ kdaN} \quad (\text{cf PP } \textcircled{1} \text{ et } \textcircled{5} \text{ section } \textcircled{3}) \quad T = T_{cp} + T_{cep} + T_{tr0H_{max}} + T_{sar_{max}}$$

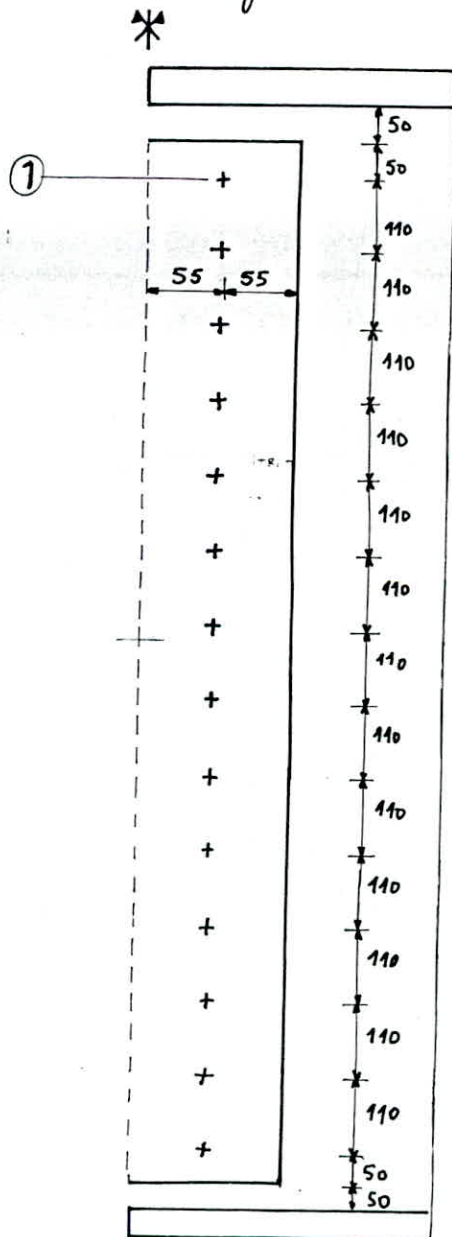
L'effort repris par un boulon est

$$f_r = 16400 \text{ daN}$$

d'où le nombre de boulons :  $n_b = \frac{T}{f_r} = \frac{82900}{16400} = 5,36$

$$n_b = 6 \text{ boulons } \phi 24 \text{ HR } 10/9$$

Comme la distance entre axe des boulons  $75 < S < 125$  n'est pas vérifiée vu que l'on a une hauteur d'âme de 1630 mm, on est amené à augmenter le nombre de boulons par demi-couvre-joint à 14. On aura ainsi la disposition suivante:



... The  
... and ...

Verification au cisaillement:

$$A_{nette} = 163 \times 3 - 14 \times 2,5 \times 3 = 384 \text{ cm}^2$$

$$\bar{\sigma} = \frac{T}{A_{nette}} = \frac{82900}{384} = 215,88 \text{ bar} < \bar{\sigma} = 1558,44 \text{ bar}$$

Verification du couvre joint:

On adopte un couvre joint d'épaisseur 30 mm (pour l'âme)

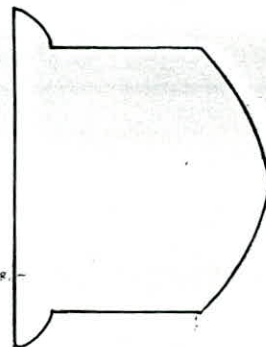
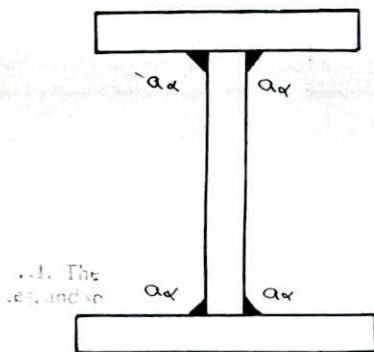
$$\text{Effort repris par un joint: } F_1 = \frac{T}{2} = 41,45 \text{ kdaN}$$

On vérifiera la section ① avec un effort  $F = \frac{0,6 F_1}{6} = \frac{F_1}{10} = 4145 \text{ daN}$

La section nette du couvre joint sera:

$$A_{nette} = 11 \times 3 - 2,5 \times 3 = 25,5 \text{ cm}^2$$

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A_{nette}} = \frac{4145}{25,5} = 162,55 \text{ bar} < \bar{\sigma} = 1558,44 \text{ bar}$$

Verifications des soudures du PRS:

$$\bar{\sigma} = \frac{T}{A_a}$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{T}{2 a x h_a}$$

$$\frac{\bar{\sigma}_{T1}}{0,75} \leq \bar{\sigma}_{en} \quad \frac{T}{0,75 \cdot 2 a x h_a} \leq \bar{\sigma}_{en} \quad (\text{règle 4,312-61 RCM 66})$$

$$T = T_{cp} + T_{ccp} + T_{surcharge \max} + T_{traction} = 31,34 + 7,26 + 66,45 + 3,98 = 109,03 \text{ kdaN}$$

$$\text{épaisseur des pièces: } e = 30 \text{ mm} \quad 23_{\text{mm}} < e < 32 \text{ mm} \quad \text{donc } a = 8 \text{ mm}$$

$$\alpha = 0,8 \left(1 + \frac{1}{a}\right) = 0,8 \left(1 + \frac{1}{0,8}\right) = 0,9$$

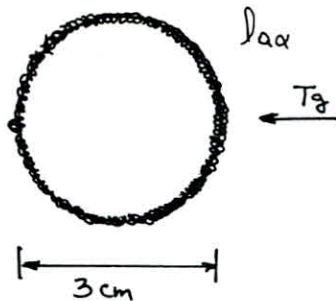
$$a x = 7,2 \quad \text{donc}$$

$$\frac{\bar{\sigma}}{0,75} = \frac{T}{0,75 \cdot 2 \cdot 8 \cdot h_a} = 619,35 \text{ bar} < \bar{\sigma}_{en}$$

### Assemblage goujon poutre principale:

Les goujons sont fixés à l'aide d'un pistolet électrique. La soudure à la base étant circulaire, est sollicitée à un effort de cisaillement  $T_g = Q$ : effort revenant à chaque goujon  $T_g = Q = 3780 \text{ daN}$

Le diamètre des goujons est  $d = 3 \text{ cm}$  ;  $e = 30 \text{ mm} \rightarrow a = 8 \text{ mm} \rightarrow a_\alpha = 7,2 \text{ mm}$



$$\frac{T_g}{0,75 l_{a\alpha}} \leq \sigma_{\text{en}}$$

$$\Rightarrow a_\alpha \geq \frac{T_g}{0,75 \cdot \sigma_{\text{en}}} = 0,2228 \text{ mm} < 7,2 \text{ mm}$$

### Assemblage entretoise d'about poutre principale:

L'entretoise d'about est placée en biais. On opte pour l'assemblage type poutre portée encastrée sur l'âme de la poutre porteuse. Cet assemblage est réalisé au moyen d'une chaise (plaque d'appui + raidisseur), il se trouve au droit des poutres principales. On considérera la poutre principale n° 3 où les efforts sont les plus prépondérants en section 0 soit :  $M_{\text{max}} = 52,258 \text{ mdaN}$  ;  $T_{\text{max}} = 31,105 \text{ daN}$

### Calcul de la chaise:

Les cordons de soudure qui reprennent ces efforts sont 2 cordons horizontaux au niveau de la plaque et 2 cordons verticaux au niveau du raidisseur

L'effort tranchant va se retrouver excentré de  $(\frac{2}{3}c + e)$  par rapport aux soudures verticales

$$h_a \text{ pp} = 163 \text{ cm} \quad h_a \text{ entretoise} = 58,8 \text{ cm}$$

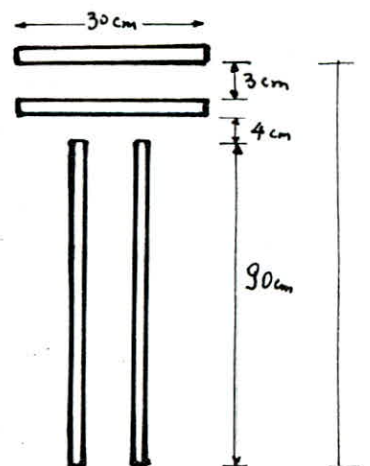
$$e_s = 3,1 \text{ cm} \quad e_{\text{plaque}} = 3 \text{ cm}$$

hauteur du raidisseur de la chaise:

$$h_r = 163 - (58,8 + 3,1 + 3) \approx 98 \text{ cm}$$

Si on retranche les angles vifs  $\Rightarrow h_r \approx 90 \text{ cm}$

Largeur de la plaque d'appui = Largeur de l'entretoise = 30 cm



Analyse des contraintes:

Les efforts sollicitant sont:  $M_T = T \left( \frac{2}{3} c + e \right)$  car T est excentrée

$$F = \frac{M}{h_e}$$

on a alors les contraintes suivantes:

$$c_{\text{comp}} = \frac{M_T}{I_x} v \quad \text{sur la fibre } v$$

$$c_{\text{traction}} = \frac{M_T}{I_x} v' \quad \text{sur la fibre } v'$$

$$c_F = \frac{F}{2l_1 a_1 \alpha_1} \quad \text{sur la fibre } v'$$

$$c_T = \frac{F}{2l_2 a_2 \alpha_2} \quad \text{sur la fibre } v$$

Vérifications:

sur la fibre  $v'$ :  $c_F + c_{\text{traction}} \leq 0,75 \sigma_{\text{en}}$

( $c_F$  et  $c_{\text{traction}}$  ont la même direction)

sur la fibre  $v$ :  $\sqrt{c_c^2 + c_T^2} \leq 0,75 \sigma_{\text{en}}$

( $c_c$  et  $c_T$  n'ont pas la même direction)

Calcul des caractéristiques des soudures:Position du centre de gravité:

$$y_{G_s} = \frac{l_1 a_1 \alpha_1 (97 + 94) + 2 l_2 a_2 \alpha_2 \cdot 45}{2 (l_1 a_1 \alpha_1 + 2 l_2 a_2 \alpha_2)}$$

comme on a des tôles de 30 mm à assembler, on a alors

$$a = 8 \text{ mm} \rightarrow \alpha = 0,9 \rightarrow a\alpha = 7,2 \text{ mm}$$

On prend  $a_1 \alpha_1 = a_2 \alpha_2 = a\alpha = 7,2 \text{ mm}$

$$\text{donc } l_1 = 30 - 2a = 30 - 2 \times 0,8 = 28,4 \text{ cm}$$

$$l_2 = 90 - 2a = 90 - 2 \times 0,8 = 88,4 \text{ cm}$$

$$\text{donc } y_{G_s} = \frac{963388,8}{29548,8} = 32,6 \text{ cm} \rightarrow \begin{cases} v = 32,6 \text{ cm} \\ v' = 97 - 32,6 = 64,4 \text{ cm} \end{cases}$$



$$I_{cs} = l_1 a_1 \alpha_1 v'^2 + l_1 a_1 \alpha_1 (v' - e_1)^2 + 2 l_2 a_2 \alpha_2 \left( \frac{90}{2} - \frac{v}{2} \right)^2$$

$$I_{cs} = \alpha \alpha \left[ l_1 v'^2 + l_1 (v' - e_1)^2 + 2 l_2 \left( \frac{90}{2} - \frac{v}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_{cs} = 0,72 \left[ 28,4 \cdot 64,4^2 + 28,4 (64,4 - 3)^2 + 2 \cdot 88,4 \cdot \left( \frac{90}{2} - \frac{32,6}{2} \right)^2 \right]$$

$$I_{cs} = 266745,8016 \text{ cm}^4$$

$$M_T = T \left( \frac{2}{3} c + e \right)$$

On se place en sécurité en prenant l'effort tranchant en section 0 des poutres 2 et 4 et le moment fléchissant de la poutre 3

$$\text{Soit } M = 52,258 \text{ mKdaN} ; T = 66,958 \text{ kdaN}$$

$$M_T = 66,958 \left( \frac{2}{3} \cdot 0,28 + 0,03 \right) = 14,51 \text{ mKdaN}$$

$$F = \frac{M}{h} = \frac{52,258}{0,65} = 80,39 \text{ KdaN}$$

$$T = 66,958 \text{ KdaN}$$

$$C_{\text{comp}} = \frac{M_T}{I_{cs}} v = \frac{1451000}{266745,8016} \cdot 32,6 = 177,33 \text{ bar}$$

$$C_F = \frac{F}{2 l_1 \alpha \alpha} = \frac{80390}{2 \cdot 28,4 \cdot 0,72} = 1965,72 \text{ bar}$$

$$C_{\text{traction}} = \frac{M_T}{I_{cs}} v' = \frac{1451000}{266745,8016} \cdot 64,4 = 350,31 \text{ bar}$$

$$C_T = \frac{T}{2 l_2 \alpha \alpha} = \frac{66958}{2 \cdot 88,4 \cdot 0,72} = 526 \text{ bar}$$

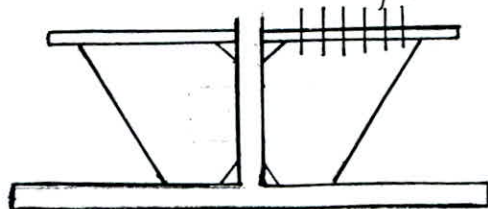
On a alors :

$$C_F + C_{\text{traction}} = 1965,72 + 350,31 = 2316,03 \text{ bar}$$

$$\sqrt{C_T^2 + C_{\text{comp}}^2} = \left( 526^2 + 177,33^2 \right)^{\frac{1}{2}} = 555,09 \text{ bar}$$

Comme la condition  $C_F + C_{\text{traction}} \leq 0,75 \sigma_{\text{eq}}$  n'est pas vérifiée,

on prend un autre modèle de fixation à savoir le dispositif suivant :



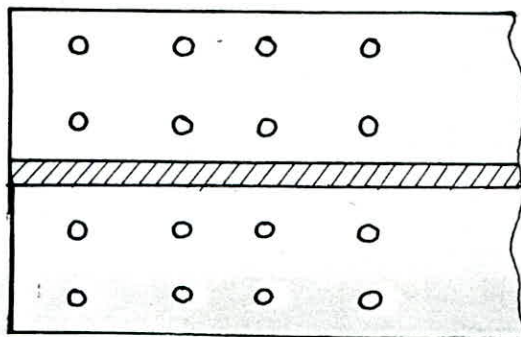
$$n_b = \frac{1,54 F}{A_r \sigma_{tr}} ; A_r = 353 \text{ mm}^2$$

$$n_b = \frac{1,54 \cdot 80,39 \cdot 10^3}{353 \cdot 24} = 14,61 \rightarrow n_b = 15 \text{ boulons } \phi 24 \text{ HR } 10/9$$

On disposera 8x2 boulons de part et d'autre de l'âme de la poutre portée  
donc on a :

$$C_F = \frac{F'}{A'_{nette}} \quad \text{avec } F' = \frac{F}{2} ; A'_{nette} = A'_{brute} - 8 \cdot 2,5 \times 3,1 \times \frac{1}{4}$$

$$A'_{brute} = 15 \times 3,1 = 46,5 \text{ cm} ; A'_{nette} = 31 \text{ cm}$$



Vue de dessus de HEB650

$$C_F = \frac{80,39 \cdot 10^3}{2 \times 31} = 1296,61 \text{ bar}$$

On a donc :

... The  
... and so

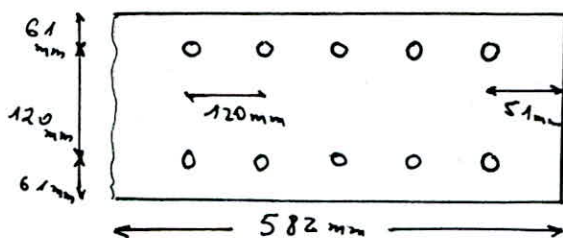
$$C_F + C_{traction} = 1296,61 + 350,31 = 1646,92 \text{ bar} < 0,75 \sigma_{em} = 1800 \text{ bar}$$

Assemblage semelle supérieur de la poutre portée à la poutre porteuse :

Le moment donne un couple de force :  $F = \frac{M}{h}$  qui est repris par les boulons au niveau de l'éclisse supérieure.

L'effort par boulon est :  $T = 8200,9 \text{ daN}$  , on a alors le nombre de boulons

$$n_b = \frac{F}{T_a} = \frac{80,46}{8,2} = 9,8 \quad \text{soit } n_b = 10 \text{ boulons HR } 10/9$$



$$75 \text{ mm} < \delta < 125 \text{ mm}$$

$$50 \text{ mm} < \delta_g < 62,5 \text{ mm}$$

$$37,5 \text{ mm} < \delta_t < 62,5 \text{ mm}$$

## Assemblage entretoise triangulée - poutre principale:

L'assemblage est assuré par boulons HR dont les caractéristiques sont:

1/  $\phi = 24 \text{ mm}$  car la largeur d'aile des cornières  $> 120 \text{ mm}$

(annexe 14.101 RCM66) avec l'obligation de vérifier la pression diamétrale

2/  $\phi 24 \rightarrow A_r = 353 \text{ cm}^2$  (annexe 14.12 RCM66)

3/  $\varphi = 0,3$  : frottement par simple brossage.

4/  $\sigma_{en} = 88 \text{ kg/mm}^2$

d'où la précontrainte dans les boulons:  $N_0 = 0,8 A_r \sigma_{en}$  (art 4.131 RCM66)

Les barres de la triangulation sont soumises à un cisaillement simple

la valeur admissible que reprend chaque boulon:  $T_a = 1,1 \varphi N_0$  (art 4.133 RCM66)

$$T_a = 1,1 \cdot 0,3 \cdot 0,8 \cdot 353 \cdot 88 = 8200,9 \text{ daN}$$

### Détermination du nombre de boulons:

\* barres de la membrure supérieure:  $\text{I} 180 \times 180 \times 18$  soumises à un effort extérieur  $F_s = 220,2 \text{ kdaN}$  qui se partage entre les 2 cornières soit  $F = \frac{F_s}{2} = 110,1 \text{ kdaN}$  par cornière.

nombre de boulons dans chaque cornière:  $n_b = \frac{F}{T_a} = \frac{110,1}{8,2} = 13,3$

soit 14 boulons HR 10/9. On prend 2 files de 7 boulons

### Disposition constructive:

Distance de trusquinage:

$$e + r = 18 + 18 = 36 \text{ mm}$$

$$75 \text{ mm} < \delta < 125 \text{ mm}$$

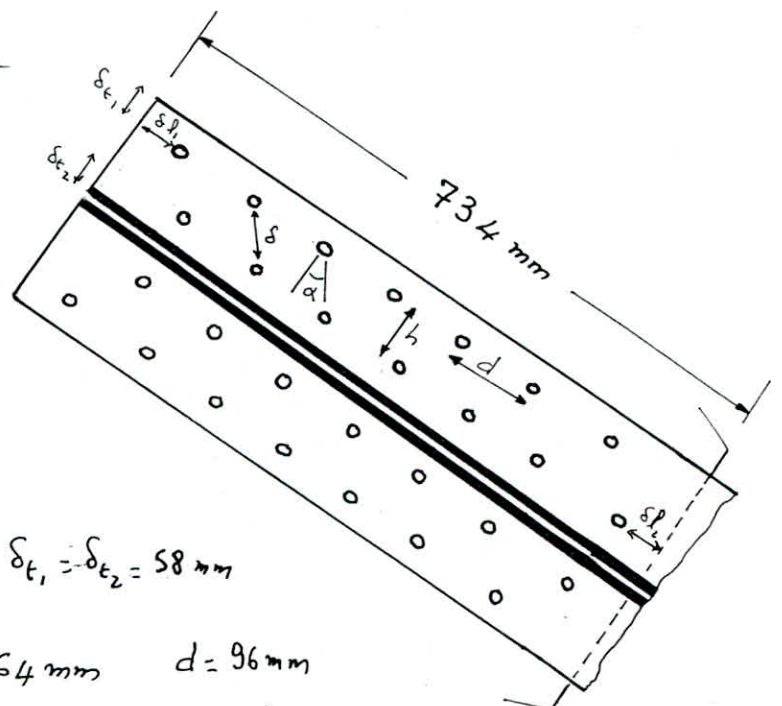
$$50 \text{ mm} < \delta_l < 62,5 \text{ mm}$$

$$37,5 \text{ mm} < \delta_t < 62,5 \text{ mm}$$

On adopte:  $\delta = 80 \text{ mm}$

$$\delta_{l1} = \delta_{l2} = 55 \text{ mm} \quad \delta_{t1} = \delta_{t2} = 58 \text{ mm}$$

$$\alpha = 36,87^\circ \quad h = 64 \text{ mm} \quad d = 96 \text{ mm}$$



\* barres de la membrure inférieure:

7F 180 x 180 x 20 soumises à un effort  $F_i = 299,67 \text{ kdaN}$  qui se partage entre les 2 cornières donc on a:  $F = \frac{F_i}{2} = 149,83 \text{ kdaN}$

nombre de boulons dont chaque cornière:  $n_b = \frac{F}{T_a} = \frac{149,83}{8,2} = 18,27$

soit  $n = 20 \text{ } \phi 24 \text{ HR } 10/9$

Disposition constructive:

Distance de trusquinage:  $e + r = 20 + 18 = 38 \text{ mm}$

On adoptera la même disposition que pour la membrure supérieure sans la longueur du goutet l change.

$\delta = 80 \text{ mm}$  ;  $\delta_l = 55 \text{ mm}$  ;  $\delta_t = 40 \text{ mm}$

$l = 1022 \text{ mm}$

\* barres de la diagonale:

7F 120 x 120 x 12 soumises à un effort  $F_d = 95,52 \text{ kdaN}$  qui se partage entre les 2 cornières donc on a:  $F = \frac{F_d}{2} = 47,76 \text{ kdaN}$

Quisqu'il s'agit d'une cornière telle que la largeur d'aile est égale à 120 mm,

On a suite à l'annexe 14.101 de RCM 66:  $\phi 22 \rightarrow A_r = 303 \text{ mm}^2$

$T_a = 0,88 \times 0,3 \times 303 \times 88 = 7039,296 \text{ daN}$

d'où le nombre de boulons:  $n_b = \frac{F}{T_a} = 6,76$  soit 7  $\phi 22 \text{ HR } 10/9$

Disposition constructive

$66 \text{ mm} < \delta < 110 \text{ mm}$

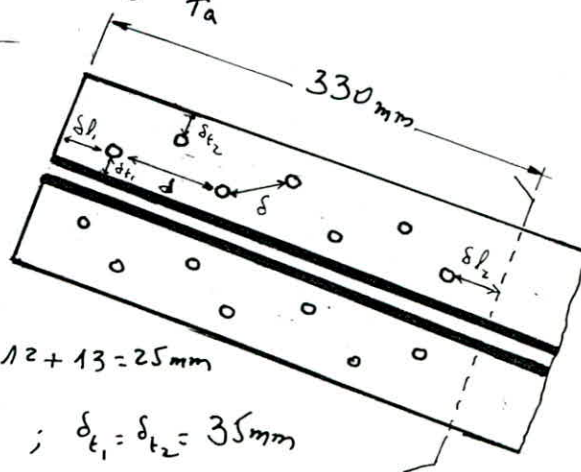
$44 \text{ mm} < \delta_l < 55 \text{ mm}$

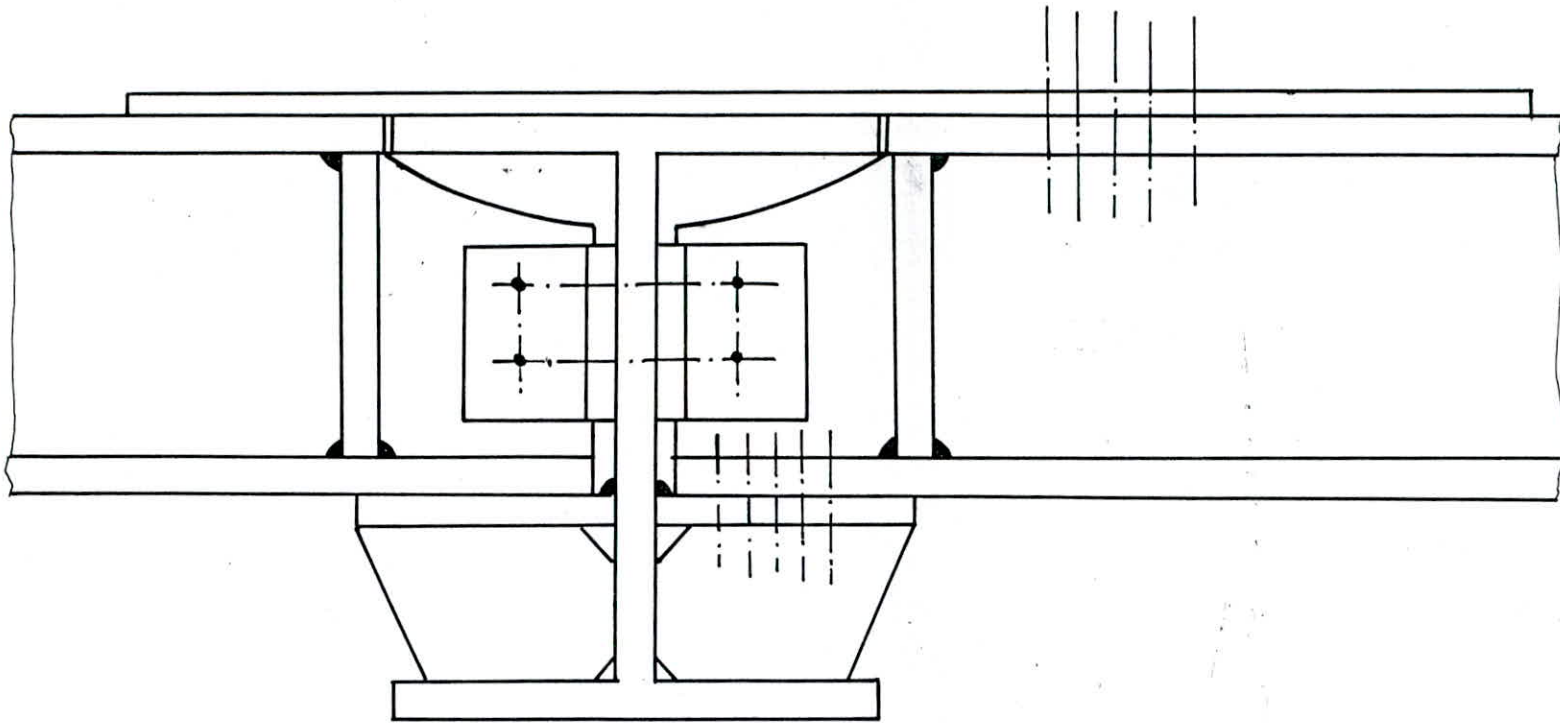
$33 \text{ mm} < \delta_t < 55 \text{ mm}$

Distance de trusquinage:  $e + r = 12 + 13 = 25 \text{ mm}$

on adopte:  $\delta_{l1} = \delta_{l2} = 45 \text{ mm}$  ;  $\delta_{t1} = \delta_{t2} = 35 \text{ mm}$

$l = 125 \text{ mm}$  ;  $\delta = 80 \text{ mm}$





POUTRE PORTEE ENCASTREE SUR  
L'ÂME DE LA POUTRE PORTEUSE

## APPAREILS D'APPUI

Les appareils d'appui ont pour but d'assurer la liaison entre une structure et son support tout en permettant d'absorber les déplacements, les efforts horizontaux et les rotations.

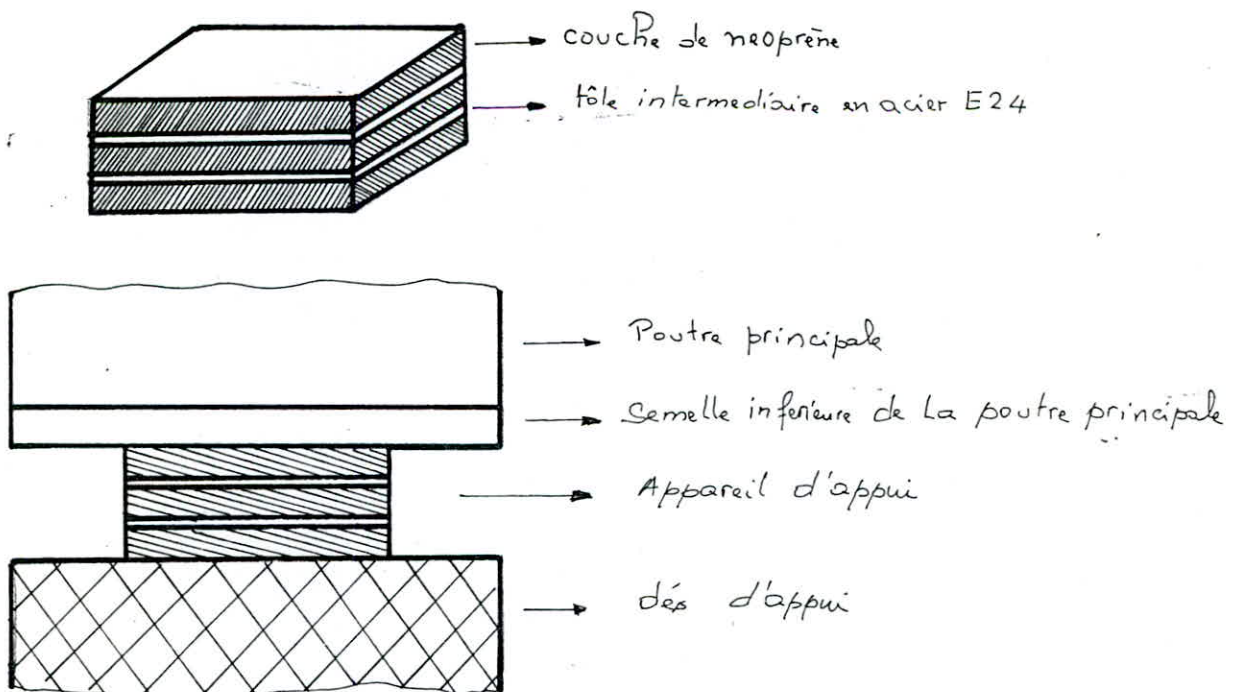
### Description:

Les appareils d'appui choisis sont constitués de plusieurs couches d'élastomère avec interposition de tôles de fretage en acier. L'adhésion est obtenue sous presse lors de la vulcanisation.

Il existe deux qualités courantes d'élastomère :

- Pont route :  $G = 0,8 \text{ MPa}$
- Pont rail :  $G = 1,1 \text{ MPa}$

Leur constitution monobloc avec faces extérieures en élastomère évite tout risque de cheminement sous faible charges et constitue une protection efficace contre la corrosion.



Méthode de calcul :

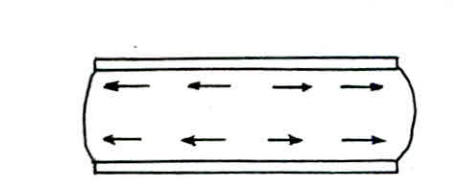
Le calcul des appuis est établi conformément aux directives du chap III :  
Méthode de calcul, dimensionnement des appareils d'appui. Bulletin technique  
n° 4 diffusé par la division des ouvrages d'art du SETRA.

Notation :

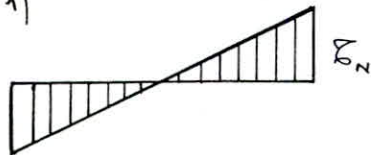
- $n$  : nombre de feuillets élémentaires d'élastomère  
 $a, b$  : dimensions en plan de l'appui ( $a \leq b$ )  
 $t$  : épaisseur nominale d'un feuillet élémentaire de l'élastomère  
 $T$  : épaisseur nominale totale de l'élastomère.  
 $t_s$  : épaisseur d'une frette élémentaire.  
 $N$  : effort normal appliqué à l'appareil d'appui.  
 $H$  : effort horizontal appliqué à l'appareil d'appui.  
 $U$  : déformation horizontale, lente, de l'appareil d'appui.  
 $\alpha_T$  : angle de rotation de l'appareil d'appui.  
 $\alpha_e$  : angle de rotation d'un feuillet élémentaire  
 $G$  : module d'élasticité transversal  
 $T_m$  : contrainte moyenne de compression  
 $\sigma_N$  : contrainte de cisaillement due à l'effort normal  
 $\sigma_H$  : contrainte de cisaillement due à un effort horizontal  
 $\sigma_\alpha$  : contrainte de cisaillement due à une rotation d'une face  
 d'un feuillet par rapport à l'autre

Principe de dimensionnement:

Le principe de dimensionnement est basé sur la limitation des contraintes de cisaillement qui sont imposées par les réactions et les déformations résultantes et qui sollicitent l'élastomère au niveau du plan de frottement en se basant bien sur l'incompressibilité de l'élastomère.

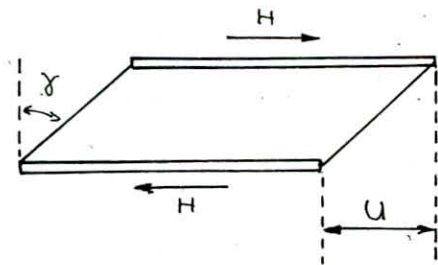


(fig 1)



$$\sigma_N = \frac{1,5 \sigma_m}{\beta}$$

$$\beta = \frac{a \cdot b}{2t(a+b)} ; \quad \sigma_m = \frac{N}{ab}$$

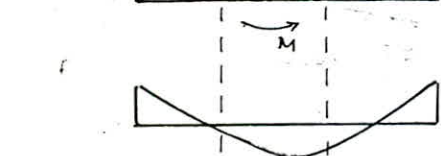
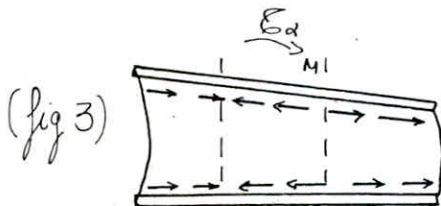


$$\sigma_{H1} = G \cdot \frac{U}{T}$$

Deformation lente + rapide

$$\sigma_H = G \cdot \frac{U \cdot l}{T} + \frac{H_d}{2ab}$$

(fig 2)



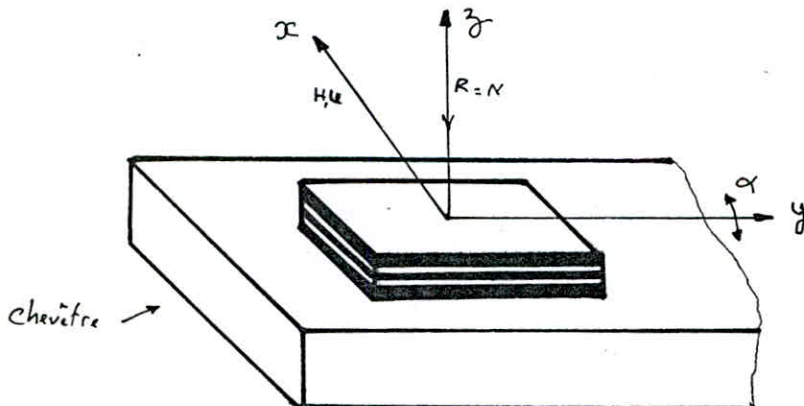
(fig 3)

$$\sigma_\alpha = \frac{G}{2} \cdot \frac{a^2}{t^2} \cdot \frac{\alpha T + \alpha_0}{m}$$

$\alpha_0$ : rotation supplémentaire pour tenir compte des imperfections de pose

$$\alpha_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ rad (Béton coulé sur place - métal)}$$

$$\alpha_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ rad (Béton préfabriqué)}$$





Principe:

Les performances des appareils d'appui sont limitées par les contraintes de cisaillement qui apparaissent entre l'élastomère et les tôles de frottement:

- Sous charge verticale  $N$  :  $\epsilon_N$
- Sous déplacement ou force horizontale :  $\epsilon_H$
- Sous rotation :  $\epsilon_\alpha$

limite admissible  $\epsilon_N + \epsilon_H + \epsilon_\alpha \leq 5G \leq 40 \text{ bars}$

a/ Sollicitation sous charge verticale  $R = N$  (fig 1)

$$\text{on admet } \epsilon_N = \frac{1,5 \sigma_m}{\beta} ; \quad \beta = \frac{a \cdot b}{2t(a+b)} ; \quad \sigma_m = \frac{N}{a \cdot b}$$

limite admissible  $\epsilon_N \leq 3G$  soit  $\sigma_m \leq 16\beta$

On limite généralement  $\sigma_m \leq 150 \text{ bar}$  pour des sujétions de frottement de béton.

b/ Sollicitations dues à un déplacement horizontal ou un effort horizontal (fig 2)

- Pour un déplacement lent  $U_l$  (sous température, retrait ou fluage) ou un effort statique  $H_s$

$$\epsilon_{H_s} = G \frac{U_l}{T} = \frac{H_s}{ab}$$

limite admissible  $\epsilon_{H_s} \leq 0,5G \rightarrow \frac{U_l}{T} \leq 0,5$

- Pour un déplacement de courte durée  $U_d$  ou sous un effort dynamique

(freinage, séisme)  $H_d$

$$\epsilon_{H_d} = 2G \cdot \frac{U_d}{T} = \frac{H_d}{ab} \quad \text{soit} \quad U_d = H_d \cdot \frac{T}{2G \cdot ab}$$

On admet en effet pour un effort instantané un module de cisaillement double du module sous effort statique soit  $16 \text{ bar}$

$$\epsilon_H = \epsilon_{H_s} + \epsilon_{H_d} = G \cdot \frac{U_l}{T} + \frac{H_d}{ab}$$

limite admissible :  $\text{tg } \gamma \leq 0,7$

$$\text{soit} \quad \frac{U_l}{T} + \frac{H_d}{2G \cdot ab} \leq 0,7$$

c/ Sollicitation sous rotation:

$$\text{On admet } \sigma_{\alpha} = \frac{G}{2} \left(\frac{a}{t}\right)^2 \operatorname{tg} \alpha$$

$\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$  car  $\alpha$  petit

$$\text{limite admissible } \sigma_{\alpha} < 1,5 G$$

$$\text{crit à vérifier : } \alpha_t \leq \frac{3}{\beta} \left(\frac{t}{a}\right)^2 \frac{\sigma_m}{G}$$

$$\text{avec } \alpha_t = \frac{\rho_t}{m}$$

Calcul des réactions d'appui:

a/ Sous CP:

$$q = 13,644 \text{ kdaN/ml} \rightarrow R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = \frac{13,644 \times 29}{2} = 197,8 \text{ kdaN}$$

b/ Sous CCP:

$$q = 2,607 \text{ kdaN/ml} \rightarrow R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = \frac{2,607 \times 29}{2} = 37,8 \text{ kdaN}$$

c/ Sous surcharge A:

$$A = 854,74 \text{ daN/m}^2 ; l_v = 3,6 \text{ m} ; l = 29 \text{ m}$$

- 1 voie chargée:

$$q = 854,74 \times 3,6 = 3,077 \text{ kdaN/ml} \rightarrow R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = 44,6 \text{ kdaN}$$

- 2 voies chargées:

$$q = 854,74 \times 7,2 = 6,154 \text{ kdaN/ml} \rightarrow R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = 89,2 \text{ kdaN}$$

- 3 voies chargées:

$$q = 854,74 \times 10,8 = 9,23 \text{ kdaN/ml} \rightarrow R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = 133,8 \text{ kdaN}$$

- 4 voies chargées:

$$q = 854,74 \times 14,4 = 12,308 \text{ kdaN/ml} \rightarrow R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = 178,47 \text{ kdaN}$$

d/ Sous surcharges des trottoirs: (surcharge générale)

- 1 trottoir chargé:

$$q = 0,15 \times 2,1665 = 0,325 \text{ kdaN/ml}$$

$$R_{\max} = q \cdot \frac{l}{2} = 0,325 \cdot \frac{29}{2} = 4,7125 \text{ kdaN}$$

- 2 trottoirs chargés:

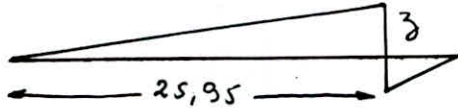
$$R_{\max} = 2 \times 4,7125 = 9,425 \text{ kdaN}$$

g/ Sous Mc120:

Pour avoir la réaction maximale, il faut placer la charge sur appui.



$$z = \frac{25,95}{29} \rightarrow R_{max} = 98,431 \text{ KdaN}$$

f/ Sous Be:

- 1 tandem:  $R_{max} = \sum P_i z_i = 16(1 + 0,953) = 31,248 \text{ KdaN}$

- 2 tandems:  $R_{max} = 2 \times 31,248 = 62,496 \text{ KdaN}$

g/ Sous Bc:

- 1 voie chargée:  $R_{max} = \sum P_i z_i = 45,408 \text{ KdaN}$

$$R_{max \text{ pondérée}} = b_c \cdot R_{max} = 1,2 \times 45,408 = 54,48 \text{ KdaN}$$

- 2 voies chargées:

$$R_{max \text{ pondérée}} = b_c \cdot R_{max} = 1,1 \times \sum P_i z_i = 1,1 \times 90,816 = 99,89 \text{ KdaN}$$

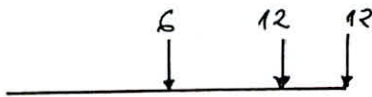
- 3 voies chargées:

$$R_{max \text{ pondérée}} = b_c \cdot R_{max} = 0,95 \cdot \sum P_i z_i = 0,95 \times 136,224 = 129,41 \text{ KdaN}$$

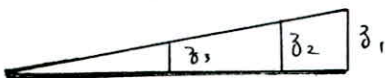
- 4 voies chargées:

$$R_{max \text{ pondérée}} = b_c \cdot R_{max} = 0,8 \cdot \sum P_i z_i = 0,8 \times 181,632 = 145,3 \text{ KdaN}$$

Reaction minimale sous Bc:



$$z_1 = 1 ; z_2 = 0,948 ; z_3 = 0,793$$



$$R_{min} = 6 \times 0,793 + 12(1 + 0,948) = 28,134 \text{ KdaN}$$

$$R_{min \text{ pondérée}} = 1,2 \times 28,134 = 33,77 \text{ KdaN}$$

h/ Sous le système D:

$$R_{max} = 163,03 \text{ KdaN}$$

Calcul des efforts horizontaux:Efforts dus au freinage:\* Surcharge A:

$$F_A = 16633 \text{ daN} \quad (\text{pour 5 poutres sur 2 appuis chacune donc 10 appuis})$$

$$\text{effort qui revient à chaque appui: } F = \frac{F_A}{10} = 1663,3 \text{ daN}$$

\* Surcharge Bc:

$$F_{Bc} = 30 \text{ KdaN} \quad \text{soit } F = \frac{F_{Bc}}{10} = 3 \text{ KdaN} \quad \text{par appui.}$$

Dilatation:

L'allongement est pris égal au  $3/10 \text{ mm/ml}$

$$\text{soit par appui: } \frac{29}{2} \times \frac{3}{10} = 4,35 \text{ mm/ml}$$

Effort dû au séisme:

La force sismique peut cisailer les appareils d'appui. La composante horizontale est prise égale à  $H = \frac{1}{10} (CP + CCP)$

$$\text{soit: } H = 4,7125 \text{ KdaN}$$

Rotations:

$$\varphi = \frac{\sum P_i a_i (l - a_i) (2l - a_i)}{6EI l}$$

a/ Sous Bc min:

$$a_1 = 27,5 \text{ m}; \quad a_2 = 23 \text{ m}$$

$$\varphi = \frac{12 \cdot 10^3 \cdot 27,5 [(29 - 27,5)(2 \times 29 - 23)] + 6 \cdot 10^3 \cdot 23 [(29 - 23)(2 \times 29 - 23)] \cdot 10^4}{6 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 9464173 \times 29}$$

$$\varphi = 0,127 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$$

b/ Sous CP:

$$q = 13,644 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{q l^3}{24EI} = \frac{13644 \cdot 2900^3}{24 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 3763252} = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$$

c/ Sous CCP:

$$q = 2,607 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{ql^3}{24EI} = \frac{2607 \times 2900^3 \cdot 10^{-2}}{24 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 6950113} = 1,815 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

d/ Sous surcharge A:d1/ 1 voie chargée:

$$q = 3,077 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{ql^3}{24EI} = \frac{3077 \cdot 10^{-2} \cdot 2900^3}{24 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 9464173} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

d2/ 2 voies chargées:

$$q = 6,154 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{ql^3}{24EI} = 3,14 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

d3/ 3 voies chargées:

$$q = 9,23 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{ql^3}{24EI} = 4,72 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

d4/ 4 voies chargées:

$$q = 12,308 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{ql^3}{24EI} = 6,29 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

e/ Sous les surcharges de trottoir:e1/ 1 trottoir chargé:

$$q = 0,325 \text{ KdaN/ml}$$

$$\varphi = \frac{ql^3}{24EI} = 0,166 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

e2/ 2 trottoirs chargés:

$$\varphi = 2 \times 0,166 \cdot 10^{-3} = 0,332 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

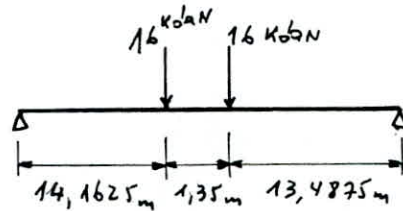
f/ Sous MC120:

$$\varphi = \frac{Pl^2}{16EI} = \frac{110 \cdot 10^3 \cdot 2900^2}{16 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 9464173} = 2,91 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

g/ Sous  $B_c$ :

$$a_1 = 14,1625 \text{ m}$$

$$a_2 = 15,5125 \text{ m}$$



g1/ Cas d'un tandem:

$$\varphi = \frac{\sum P_i a_i (l - a_i)(2l - a_i)}{6EI l}$$

$$\varphi = 0,837 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

g2/ Cas de 2 tandems:

$$\varphi = 2 \times 0,837 \cdot 10^{-3} = 1,675 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

h/ Sous la surcharge D:

$$\varphi = \frac{Pl^2}{16EI} = \frac{240 \cdot 10^3 \cdot 2900^2}{16 \times 2,1 \cdot 10^4 \times 9464173} = 6,34 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

i/ Sous  $B_c$ :

$$a_1 = 6,775 \text{ m}$$

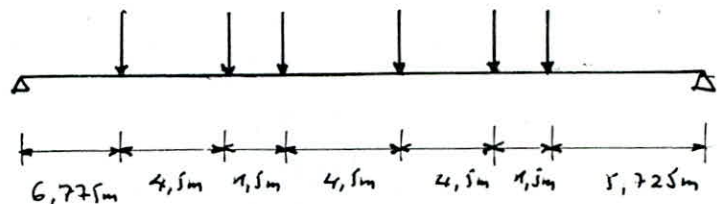
$$a_2 = 11,275 \text{ m}$$

$$a_3 = 12,775 \text{ m}$$

$$a_4 = 17,275 \text{ m}$$

$$a_5 = 21,775 \text{ m}$$

$$a_6 = 23,275 \text{ m}$$



i1/ Cas d'un convoi:

$$\varphi = \frac{1}{6EI l} \left[ \sum P_i a_i (l - a_i)(2l - a_i) \right] = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

i2/ Cas de 2 convois:

$$\varphi = 2,71 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

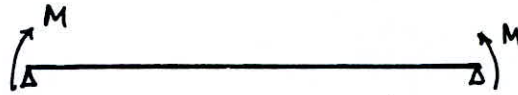
i3/ Cas de 3 convois:

$$\varphi = 4,06 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

i4/ Cas de 4 convois:

$$\varphi = 5,419 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

j) Rotation due au retrait:



$$\varphi_A = \frac{1}{3} \frac{M_n l}{EI}$$

$$\varphi_B = \frac{M_n l}{6EI}$$

$$M_n = W \varphi_b = 34654 \times 56 = 1940624 \text{ daNcm}$$

$$\varphi = \varphi_A + \varphi_B$$

$$\varphi = \frac{M_n l}{EI} \left( \frac{1}{3} + \frac{1}{6} \right) = \frac{M_n l}{2EI} = \frac{1940624 \times 2900}{2 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 7630346} = 0,18 \cdot 10^3 \text{ rad}$$

Tableau récapitulatif.

| Charges            |            | coeff. de<br>répartition | R (Kdov) | $\varphi (10^3 \text{nd})$ | $\delta$ | coeff de<br>Pondération | R (Kdov)<br>Pmaj pond | $\varphi (10^3 \text{nd})$<br>Pmaj pond |
|--------------------|------------|--------------------------|----------|----------------------------|----------|-------------------------|-----------------------|---|
| CP                 |            | 0,2                      | 39,56    | 3,5                        | 1        | 1                       | 39,56                 | 3,5                                     |
| CCP                |            | 0,2                      | 7,56     | 0,36                       | 1        | 1                       | 7,56                  | 0,36                                    |
| A                  | 1 voie     | 0,5                      | 22,3     | 0,785                      | 1        | 1,2                     | 26,76                 | 0,94                                    |
|                    | 2 voies    | 0,4                      | 35,68    | 1,25                       | 1        | 1,2                     | 42,81                 | 1,5                                     |
|                    | 3 voies    | 0,3                      | 40,14    | 1,41                       | 1        | 1,2                     | 48,17                 | 1,69                                    |
|                    | 4 voies    | 0,2                      | 35,69    | 1,26                       | 1        | 1,2                     | 42,83                 | 1,51                                    |
| B <sub>c</sub>     | 1 voie     | 0,5305                   | 28,9     | 0,716                      | 1,114    | 1,2                     | 38,63                 | 0,96                                    |
|                    | 2 voies    | 0,4611                   | 46,06    | 1,25                       | 1,114    | 1,2                     | 46,06                 | 1,67                                    |
|                    | 3 voies    | 0,3916                   | 50,67    | 1,53                       | 1,114    | 1,2                     | 67,73                 | 2,12                                    |
|                    | 4 voies    | 0,3222                   | 46,8     | 1,74                       | 1,114    | 1,2                     | 62,56                 | 2,32                                    |
| B <sub>c</sub> min |            | 0,5305                   | 14,92    | 0,067                      | 1,114    | 1,2                     | 19,94                 | 0,089                                   |
| B <sub>e</sub>     | 1 tandem   | 0,5166                   | 16,14    | 0,43                       | 1,114    | 1,2                     | 21,57                 | 0,57                                    |
|                    | 2 tandems  | 0,4333                   | 27,08    | 0,72                       | 1,114    | 1,2                     | 36,20                 | 0,96                                    |
| Surcharge D        |            | 0,4055                   | 66,11    | 2,57                       | 1        | 1,2                     | 79,33                 | 3,08                                    |
| Surcharge Merza    |            | 0,4805                   | 47,29    | 1,39                       | 1,092    | 1,2                     | 61,96                 | 1,82                                    |
| fretrait           | 1 fretrait | 0,66                     | 3,11     | 0,11                       | 1        | 1,2                     | 3,73                  | 0,13                                    |
|                    | 2 fretrait | 0,2                      | 1,88     | 0,07                       | 1        | 1,2                     | 2,25                  | 0,08                                    |
| Re trait           |            | 0,2                      |          | 0,036                      | 1        | 1                       |                       | 0,036                                   |



### Dimensionnement de l'appareil d'appui:

On fixe des dimensions normalisées suivant les exigences de la compression et ensuite, on procède aux vérifications nécessaires.

$$\sigma_m = \frac{N}{ab} \quad ; \quad N = R_{cp} + R_{ccp} + R_{Surch.max} + R_{trottoir}$$

$$N = 39,56 + 7,56 + 79,33 + 3,73 = 130,24 \text{ kdaN}$$

$$\sigma_m \leq 150 \text{ bar} \Rightarrow ab = \frac{N}{\sigma_m} \geq \frac{N}{150} = \frac{130,24 \cdot 10^3}{150} = 868,26 \text{ cm}^2$$

$$a = 30 \text{ cm} \quad ; \quad b = 50 \text{ cm} \quad ; \quad t = 1,2 \text{ cm} \quad ; \quad n = 5 \quad ; \quad T = nt = 6 \text{ cm}$$

$$t_A \geq \frac{a}{\beta} \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (\sigma_e = 2400 \text{ bar})$$

$$\beta = \frac{ab}{2t(a+b)} = \frac{30 \times 50}{2 \times 1,2(30+50)} = 7,8125$$

$$\sigma_m = \frac{N}{ab} = \frac{130,24 \cdot 10^3}{30 \times 50} = 86,82 \text{ bar}$$

$$\text{donc } t_A \geq \frac{30}{7,8125} \cdot \frac{86,82}{2400} = 0,14 \text{ cm} \quad \text{soit } t_A = 0,2 \text{ cm}$$

### Condition de non flambement:

$$T \leq \frac{a}{5} \quad \text{et vérifier } T \geq \frac{a}{10} \quad (T = 6 \text{ cm})$$

$$T \leq \frac{30}{5} = 6 \text{ cm} \quad (\text{à la limite})$$

$$T \geq \frac{30}{10} = 3 \text{ cm} \quad \text{O.K.}$$

### Calcul des contraintes:

$$\sigma_N = \frac{1,5 \sigma_m}{\beta}$$

$$\text{avec : } \sigma_m = \frac{N}{a \cdot b}$$

$$\beta = \frac{a \cdot b}{2t(a+b)}$$

| Charge                | N (daN) | $\sigma_m$ (bar) | $\sigma_N$ (bar) |
|-----------------------|---------|------------------|------------------|
| CP                    | 39560   | 26,37            | 5,06             |
| CCP                   | 7560    | 5,04             | 0,96             |
| A 3voies              | 48170   | 32,11            | 6,16             |
| B <sub>c</sub> 3voies | 67730   | 45,15            | 8,67             |
| Me120                 | 61960   | 41,30            | 7,93             |
| D                     | 79330   | 52,88            | 10,15            |
| Surcharge de trottoir | 3730    | 2,48             | 0,47             |
| B <sub>cmin</sub>     | 19940   | 13,29            | 2,55             |

Contrainte due à CP+CCP+ surcharge max + surcharge de trottoir

$$\sigma_m = 26,37 + 5,04 + 52,88 + 2,48 = 86,77 \text{ bar}$$

$$\sigma_N = 5,06 + 0,96 + 10,15 + 0,47 = 16,64 \text{ bar}$$

Contrainte de distorsion due au freinage.

a/ Freinage A:

$$F_A = 1663,3 \text{ daN}$$

$$\text{tg } \gamma = \frac{F_A}{2G a b} = \frac{1663,3}{2 \cdot 8 \cdot 30 \cdot 50} = 0,07$$

$$\sigma_{HA} = 2G \text{tg } \gamma = 2 \times 8 \times 0,07 = 1,12 \text{ bar}$$

$$u_A = T \text{tg } \gamma = 6 \times 0,07 = 0,42 \text{ cm}$$

b/ Freinage B<sub>c</sub>:

$$F_{Bc} = 3000 \text{ daN}$$

$$\text{tg } \gamma = \frac{F_{Bc}}{2G a b} = \frac{3000}{2 \cdot 8 \cdot 30 \cdot 50} = 0,125$$

$$\sigma_{HBc} = 2G \text{tg } \gamma = 2 \times 8 \times 0,125 = 2 \text{ bar}$$

$$u_{Bc} = T \text{tg } \gamma = 6 \times 0,125 = 0,75 \text{ cm}$$

c/ Seisme:

$$F_{SI} = 4712,5 \text{ daN} \quad \text{tg } \gamma = \frac{4712,5}{2 \times 8 \times 30 \times 50} = 0,196$$

$$\epsilon_{H_{SI}} = 2 G \text{tg } \gamma = 2 \times 8 \times 0,196 = 3,136 \text{ bar}$$

$$U_{SI} = T \text{tg } \gamma = 6 \times 0,196 = 1,176 \text{ cm}$$

Distorsion de rotation:Soient:  $\varphi$ : Angle de rotation de la poutre principale $V$ : distance de la fibre la plus sollicitée à l'axe neutre de la section mixte $U$ : distorsion  $U = V \times \varphi$  $G$ : module d'élasticité transversal ( $G = 8 \text{ bar}$ )

$$T = 6 \text{ cm}; \quad \text{tg } \gamma = \frac{U}{T}; \quad \epsilon_H = G \text{tg } \gamma; \quad H = a b \epsilon_H$$

| n        | charge      | V (cm) | $\varphi_{\text{rad}}$ | U (cm) | tg $\gamma$ | $\epsilon_H$ (bar) | H (daN) |
|----------|-------------|--------|------------------------|--------|-------------|--------------------|---------|
| $\infty$ | CP          | 80,83  | 3,5                    | 0,283  | 0,047       | 0,376              | 564     |
| 18       | CCP         | 115,93 | 0,36                   | 0,042  | 0,007       | 0,056              | 84      |
| 15       | Retrait     | 120,25 | 0,036                  | 0,004  | 0,0007      | 0,0056             | 8,4     |
| 15       | dilatation  | 120,25 |                        | 0,435  | 0,072       | 0,576              | 864     |
| 6        | A 3voies    | 143,38 | 1,69                   | 0,242  | 0,0403      | 0,322              | 483     |
| 6        | Bc 3voies   | 143,38 | 2,12                   | 0,304  | 0,0506      | 0,405              | 607,5   |
| 6        | Bt 2travées | 143,38 | 0,96                   | 0,137  | 0,023       | 0,184              | 276     |
| 6        | Mc120       | 143,38 | 1,82                   | 0,261  | 0,0435      | 0,348              | 522     |
| 6        | D           | 143,38 | 3,08                   | 0,441  | 0,073       | 0,584              | 876     |
| 6        | troufir     | 143,38 | 0,13                   | 0,018  | 0,003       | 0,024              | 36      |
| 6        | Bc min      | 143,38 | 0,083                  | 0,013  | 0,002       | 0,016              | 24      |

$$\epsilon_{H_{\text{max}}} = \epsilon_{H_{CP}} + \epsilon_{H_{CCP}} + \epsilon_{H_{\text{retrait}}} + \epsilon_{H_{\text{dil}}} + \epsilon_{H_{\text{sur.max}}} + \epsilon_{H_{\text{troufir}}}$$

$$\epsilon_{H_{\text{max}}} = 1,622 \text{ bar}$$

Combinaison des rotations:

- Rotation pour tenir compte des défauts de montage :  $\varphi_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$

$$1/ \varphi_{cp} + \varphi_{ccp} + \varphi_0 + \varphi_D + \varphi_{\text{trattoir}} = \varphi_{1T} = 10,07 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

$$2/ \varphi_{cp} + \varphi_{ccp} + \varphi_0 + \varphi_{B_{cmax}} + \varphi_{\text{trattoir}} = \varphi_{2T} = 9,31 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

$$3/ \varphi_{cp} + \varphi_{ccp} + \varphi_0 + \varphi_{B_{cmin}} = \varphi_{3T} = 6,949 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

Contraintes sous l'effet des rotations  $\varphi_{iT}$  (d'après SETRA)

$$\sigma_{\varphi_1} = \frac{G}{2} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \frac{\varphi_{1T}}{n} = \frac{8}{2} \cdot \left(\frac{30}{1,2}\right)^2 \cdot \frac{10,07 \cdot 10^{-3}}{5} = 5,035 \text{ bar}$$

$$\sigma_{\varphi_2} = \frac{G}{2} \left(\frac{a}{t}\right)^2 \frac{\varphi_{2T}}{n} = 4,655 \text{ bar}$$

$$\sigma_{\varphi_3} = \frac{G}{2} \left(\frac{a}{t}\right)^2 \frac{\varphi_{3T}}{n} = 3,4745 \text{ bar}$$

Limitation des contraintes de cisaillement:

$$- \sigma = \sigma_N + \sigma_H + \sigma_{\varphi} \leq 5G$$

$$\sigma = 16,64 + 1,622 + 5,035 = 23,3 < 5 \times 8 = 40 \text{ bars OK}$$

$$- \sigma_{H_1} \leq 0,5G \quad (\text{Déformation lente})$$

$$\sigma_{H_1} = \sigma_H (cp + ccp + retrait + dilatation) = 0,376 + 0,056 + 0,0056 + 0,576 = 1,0136 \text{ bar}$$

$$\sigma_{H_1} = 1,0136 \text{ bar} < 0,5 \times 8 = 4 \text{ bar OK}$$

$$- \sigma_H \leq 0,7G$$

$$\sigma_H = \sigma_{H_1} + \frac{1}{2} \sigma_{H_2} \quad (\text{Déformation lente + rapide})$$

$$\text{avec } \sigma_{H_2} = \frac{H_2}{ab} \quad (H_2: \text{effort dû au freinage})$$

$$\sigma_H = 1,0136 + \frac{1}{2} \cdot \frac{3000}{30 \cdot 50} = 2,0136 < 0,7 \times 8 = 5,6 \text{ bar OK}$$

- Vérification tenant compte du séisme:

$$\sigma_H \leq 0,7G$$

$$\sigma_H = \sigma_{H_1} + \sigma_{H_4} \quad \text{avec } \sigma_{H_4} = \frac{1}{2} \frac{H_4}{ab}$$

$$\text{avec } H_4 = F_{Bc} + F_{SI} \quad (\text{freinage } Bc + \text{séisme})$$

$$\sigma_{H4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3000 + 4712,5}{30 \times 50} = 2,57 \text{ bar}$$

$$\sigma_H = 1,0136 + 2,57 = 3,5836 \text{ bar} < 0,7 \times 8 = 5,6 \text{ bar} \quad \text{OK}$$

Condition de non cheminement et de non glissement:

a/  $\sigma_{\min} \geq 20 \text{ bar}$  (non glissement entre plaques)

b/  $H \leq f N_{\min}$  (non cheminement de l'apais : documents CIPEC)

$$\sigma_{\min} = \frac{N_{\min}}{a \cdot b}$$

$$N_{\min} = N_{cp} + N_{ccp} + N_{bcmin} = 39,56 + 7,56 + 19,94 = 67,06 \text{ KdaN}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{67,06 \cdot 10^3}{30 \times 50} = 44,7 \text{ bar} \geq 20 \text{ bar}$$

donc la condition de non glissement entre plaques est vérifiée.

$$f = 0,12 + \frac{0,2}{\sigma_{\min}} = 0,12 + \frac{0,2}{44,7} = 0,12447$$

$$fN = 0,12447 \times 67,06 \cdot 10^3 = 8347,2 \text{ daN}$$

$$H_4 = 3000 + 4712,5 = 7712,5 \text{ daN} < fN$$

donc la condition de non glissement est vérifiée.

Condition de non-soulèvement:

$$\alpha_t \leq \frac{3}{\beta} \left(\frac{t}{a}\right)^2 \frac{\sigma_m}{G} \quad \text{avec} \quad \alpha_t = \frac{\varphi_T}{n}$$

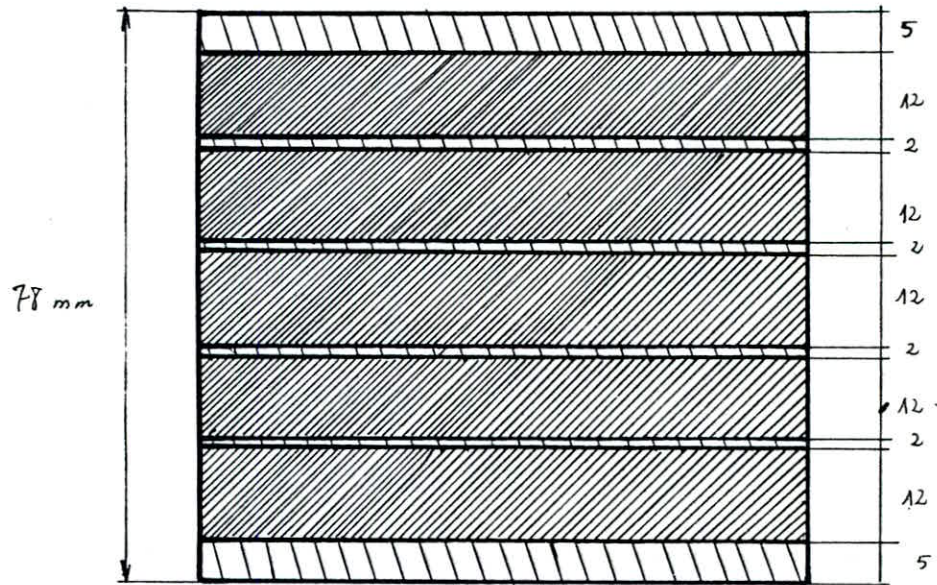
$$\beta = \frac{a \times b}{2t(a+b)} = 7,8125$$

$$\alpha_{t_1} = \frac{\varphi_{1T}}{n} = \frac{10,07 \cdot 10^{-3}}{5} = 2,014 \cdot 10^{-3} \text{ rd} \leq \frac{3}{7,8125} \cdot \left(\frac{1,2}{30}\right)^2 \cdot \frac{86,77}{8} = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$$

$$\alpha_{t_2} = \frac{\varphi_{2T}}{n} = \frac{9,31 \cdot 10^{-3}}{5} = 1,862 \cdot 10^{-3} \text{ rd} \leq \frac{3}{7,8125} \cdot \left(\frac{1,2}{30}\right)^2 \cdot \frac{79,04}{8} = 6,07 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$$

$$\alpha_{t_3} = \frac{\varphi_{3T}}{n} = \frac{6,95 \cdot 10^{-3}}{5} = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ rd} \leq \frac{3}{7,8125} \cdot \left(\frac{1,2}{30}\right)^2 \cdot \frac{44,7}{8} = 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$$

Donc la condition de non-soulèvement est satisfaite.



$$a = 30 \text{ cm}$$

$$b = 50 \text{ cm}$$

## ETUDE DE LA FONDATION

La fondation prévue est une fondation sur pieux forés tubés.

Ces pieux sont mis en oeuvre à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc..., sous protection d'un tubage dont la base est toujours située au dessous du fond de forage. Le tubage peut être enfoncé jusqu'à la profondeur finale par vibration, ou forcé avec levoirement au fur et à mesure de l'avancement du forage. Le forage est rempli partiellement ou totalement d'un béton de grande ouvrabilité, puis le tubage est extrait sans que le pied du tubage puisse se trouver à moins de 1m sous le niveau du béton, sauf au niveau de la côte d'arête.

Détermination de la force portante admissible d'un pieu:

1/ Force portante déduite de la résistance du sol

11/ Pieu résistant par la pointe:

$$Q_p = \pi R^2 (\gamma D N_q + 0,6 \gamma R N_\gamma) + 2\pi R h f_s$$

R: rayon du pieu  $R = 0,6 \text{ m}$

$$\gamma = 1,8 \text{ g/cm}^3 \quad ; \quad \varphi = 15^\circ \rightarrow N_q = 3,94 ; N_\gamma = 2,33$$

D = 30 m (profondeur du pieu)

$$h = 3\phi = 3 \times 2R = 3,6 \text{ m}$$

$$f_s = \left(D - \frac{h}{2}\right) \text{tg } \varphi = 7,556$$

$$Q_p = 1181,26 \text{ kdaN}$$

12/ Pieu flottant:

$$Q_f = 2\pi RL (\gamma Z + q) K \text{tg } \varphi + c \cdot 2\pi RL$$

$c = 0,7 \text{ bar} ; q = 0 ; Z = 30 \text{ m} ; L = 3,6 \text{ m}$

$$Q_f = 706,3 \text{ kdaN}$$

En définitif, on a:  $Q_n = \frac{Q_p}{3} + \frac{Q_f}{2} = 746,9 \text{ kdaN}$

2/ Détermination de la force portante déduite de l'essai du penetromètre statique:

Après que la solution de fondations sur pieux s'est avérée la seule valable, des essais de pénétration statique ont été effectués. Les résultats de cet essai sont ci-après:

|               |      |      |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N° de l'essai | 1    | 2    | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| $Q_N$ (kdaN)  | 321  | 151  | 182 | 177 | 178 | 185 | 188 | 172 | 269 | 280 |
| H (m)         | 32,5 | 30,5 | 35  | 35  | 35  | 35  | 35  | 35  | 32  | 31  |

|               |     |      |     |     |     |     |     |     |      |     |
|---------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| N° de l'essai | 11  | 12   | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19   | 20  |
| $Q_N$ (kdaN)  | 228 | 283  | 345 | 190 | 179 | 214 | 242 | 223 | 303  | 280 |
| H (m)         | 30  | 28,5 | 32  | 35  | 35  | 35  | 31  | 30  | 27,5 | 41  |

$$Q_N = \frac{Q_p}{3} + \frac{Q_f}{2}$$

$Q_p$ : terme de pointe

$Q_f$ : terme de frottement latéral

$$Q_p = A q_L$$

A: aire de la section droite du pieu

$q_L$ : résistance de pointe à la rupture

$$q_L = \alpha_p \cdot q_c$$

avec  $q_c$ : résistance unitaire de pointe au penetromètre statique dans la couche d'ancrage

$\alpha_p$ : Coefficient reliant la résistance de pointe du pieu à la résistance au penetromètre statique

$\alpha_p = 0,5$  pour l'argile ;  $\alpha_p = 0,35$  pour une grave

|                  |      |
|------------------|------|
| PS n° 1          | 1984 |
| L = 32,5 m       |      |
| $Q_N = 321$ kdaN |      |
| $Q_p = 155$ kdaN |      |
| $Q_f = 166$ kdaN |      |



|       | H (m) | $q_c$ (t/m <sup>2</sup> ) | $\alpha_s$ | $\alpha_p$ | $\alpha_f$ | $f_u$ (t/m <sup>2</sup> ) |
|-------|-------|---------------------------|------------|------------|------------|---------------------------|
| $h_1$ | 6     | 150                       | 60         | 0,5        | 0,85       | 2,13                      |
| $h_2$ | 7     | 130                       | 60         | 0,5        | 0,85       | 1,84                      |
| $h_3$ | 5     | 50                        | 60         | 0,5        | 0,85       | 0,71                      |
| $h_4$ | 3     | 150                       | 60         | 0,5        | 0,85       | 2,13                      |
| $h_5$ | 2     | 250                       | 60         | 0,5        | 0,85       | 3,54                      |
| $h_6$ | 9,5   | 550                       | 60         | 0,5        | 0,85       | 5,0                       |

$$Q_F = p \cdot \sum_{i=1}^n f_{u_i} \times h_i$$

$f_{u_i}$  : frottement unitaire mobilisable dans la couche  $i$

$h_i$  : épaisseur de la couche  $i$

$p$  : périmètre du pieu

$$f_u = \alpha_f \cdot \frac{q_c}{\alpha_s}$$

avec :  $\alpha_f$  : coefficient fonction du pieu  $\alpha_f = 0,85$

$\alpha_s$  : coefficient fonction de la nature du sol  $\alpha_s = 60$  pour l'argile

$q_c$  : résistance de pointe au pénétromètre statique dans la couche  $i$

En définitif on a :  $Q_N = 300 \text{ kdaN}$  à 30 m de profondeur

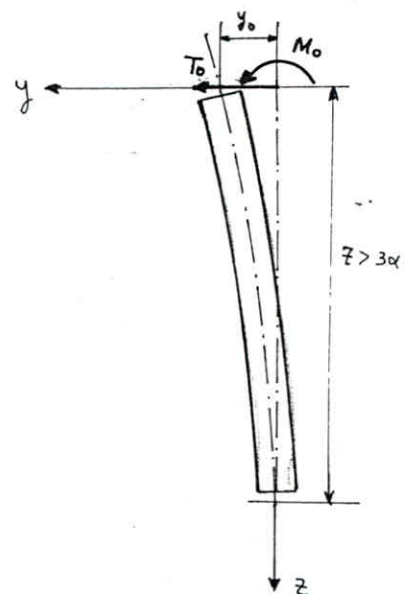
### 3/ Reprise des efforts horizontaux par les fondations sur pieux:

Le comportement d'un élément flexible dans le sol peut s'exprimer par l'équation différentielle du 4<sup>e</sup> ordre :  $EI \frac{d^4 y}{dz^4} + Cby = 0$

$b$  : diamètre du pieu

$I$  : inertie de la section

$E$  : module d'élasticité du matériau



La résolution de cette équation met en évidence un coefficient constant appelé longueur élastique et est défini par :  $\alpha = \left(\frac{4EI}{c_6}\right)^{\frac{1}{4}}$

Pratiquement on constate que la partie du pieu située à  $z > 3\alpha$ , n'est pas sollicitée si la flexion due à l'effort horizontal en tête et aux moments de flexion le déplacement est pratiquement nul

$$M(z) = T_0 \alpha \left( e^{-\frac{z}{\alpha}} \sin \frac{z}{\alpha} \right) : \text{moment à la cote } z \text{ dû à l'effort } T_0$$

$$M(z) = M_0 e^{-\frac{z}{\alpha}} \left( \sin \frac{z}{\alpha} + \cos \frac{z}{\alpha} \right) : \text{moment à la cote } z \text{ dû au moment } M_0$$

Sous l'action de  $M_0$  et  $T_0$ , on aura :

$$M(z) = T_0 \alpha e^{-\frac{z}{\alpha}} \sin \frac{z}{\alpha} + M_0 e^{-\frac{z}{\alpha}} \left( \sin \frac{z}{\alpha} + \cos \frac{z}{\alpha} \right)$$

$$M(z) = T_0 \alpha e^{-\frac{z}{\alpha}} \left[ \sin \frac{z}{\alpha} + \frac{M_0}{T_0 \alpha} \left( \sin \frac{z}{\alpha} + \cos \frac{z}{\alpha} \right) \right]$$

$$T(z) = \frac{dM(z)}{dz} = T_0 e^{-\frac{z}{\alpha}} \left[ \cos \frac{z}{\alpha} - \left( 1 + 2 \frac{M_0}{T_0 \alpha} \right) \sin \frac{z}{\alpha} \right]$$

$$T(z) = 0 \text{ pour } M(z) = M_{\max}$$

$$\cos \frac{z}{\alpha} = \left( 1 + \frac{2M_0}{T_0 \alpha} \right) \sin \frac{z}{\alpha}$$

$$\Rightarrow \operatorname{tg} \frac{z}{\alpha} = \frac{1}{1 + \frac{2M_0}{T_0 \alpha}}$$

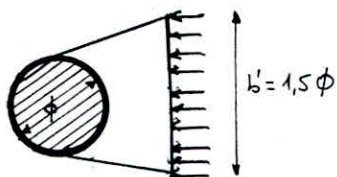
$$\text{d'où la cote } z : \quad z = \alpha \operatorname{arctg} \frac{1}{1 + \frac{2M_0}{T_0 \alpha}}$$

Application numérique :

$$I = \frac{\pi \phi^4}{64} = \frac{\pi \cdot 1,2^4}{64} = 0,1018 \text{ m}^4 ; c = 750$$

$$E = 2 \cdot 10^6 \text{ KdaN/m}^2 : \text{module d'élasticité du béton}$$

$$b' : \text{largeur apparente du pieu} \quad b' = 1,5 \times 1,2 = 1,8 \text{ m}$$



$$\text{donc } \alpha = 4,96 \text{ m}$$

$$T_0 = 50,396 \text{ kdaN}$$

$$M_0 = 206,62 \text{ mKdaN}$$

$$\frac{M_0}{\alpha T_0} = \frac{206,62}{4,96 \times 50,396} = 0,826$$

$$e^{-\frac{z}{\alpha}} \left( \sin \frac{z}{\alpha} + \frac{M_0}{\alpha T_0} \left( \sin \frac{z}{\alpha} + \cos \frac{z}{\alpha} \right) \right) = 0,98 \quad \left( \text{valeur tirée de la courbe } C_1 = f(\beta) \right. \\ \left. \text{fondations profondes page 116} \right)$$

Pour le calcul des déplacements, on a :

$$y(z)_{T_0} = \frac{2 T_0}{\alpha c b'} e^{-\frac{z}{\alpha}} \cos \frac{z}{\alpha} \quad \text{sous l'effet de } T_0$$

$$y(z)_{M_0} = \frac{2 M_0}{\alpha^2 c b'} e^{-\frac{z}{\alpha}} \left( \cos \frac{z}{\alpha} - \sin \frac{z}{\alpha} \right) \quad \text{sous l'effet de } M_0$$

Sous l'action de  $M_0$  et  $T_0$ , le déplacement en tête du pieu pour  $z=0$

$$y_0(T_0, M_0) = \frac{2}{\alpha c b'} \left( T_0 + \frac{M_0}{\alpha} \right) = 2,75 \text{ cm}$$

# ETUDE DE LA PILE

## Presentation:

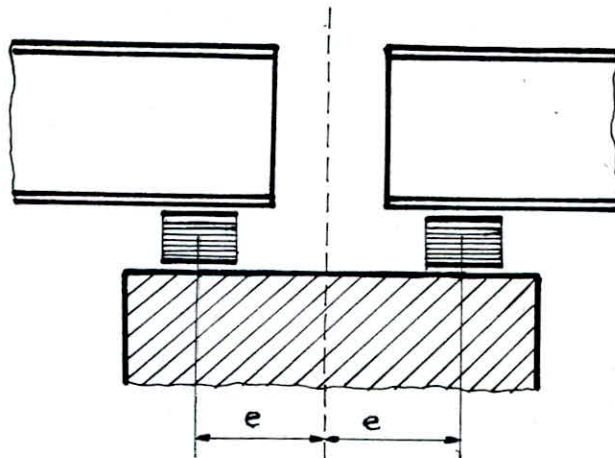
La pile est constituée de 2 fûts cylindriques, surmontés d'un chevêtre reposant sur une semelle. Elle est ancrée dans le sol au moyen d'une fondation profonde. Les poutres principales reposent sur les dés d'appuis qui sont fixés au chevêtre. Ce dernier sert au verinage du tablier au moment de sa mise en place et pendant les opérations de changement d'appareils d'appui. Il sert aussi à la répartition des efforts horizontaux dus aux actions accidentelles du séisme et aux efforts de freinage.

## Vérification de la stabilité de la pile:

| element           | Dimensions   | P (KobN) |
|-------------------|--|----------|
| Tablier           |  | 471,3    |
| dés d'appuis      | $(1,9 \times 0,8) (31,5 + 37,7 + 43,9 + 50,7 + 56,2) \cdot 10^2$ | 8,36     |
| Chevêtre          | $1,25 \times 19,6 \times 2,5$                                    | 153,125  |
| Fûts              | $2\pi \left( \frac{2^2}{4} - \frac{1,3^2}{4} \right) \times 7$   | 63,5     |
| Semelle           | $20,4 \times 6,4 \times 1,5 \cdot 2,5$                           | 489,6    |
| Buté parasismique | $(86,2 + 67,7) \cdot 10^2 \times 3,2 \times 0,4$                 | 4,925    |
| TOTAL             |  | 1190,81  |

### Efforts dus aux surcharges d'exploitation:

On envisage tous les cas possibles de chargement, et on calculera dans chaque cas, l'effort normal ( $N$ ) et le moment dans le sens longitudinal ( $M_l$ ) qui est dû à l'excentrement de l'appareil d'appui par rapport à l'axe du chevet. Cet excentrement est schématisé ci-dessous.



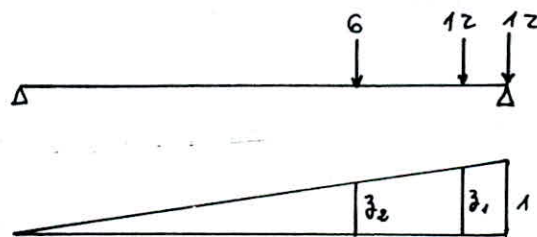
$$e = 33 \text{ cm}$$

$$N \cdot e = M_l$$

L'effort normal ( $N$ ) provoque aussi un moment transversal  $M_t = N \cdot d$  où  $d$  est la distance dans le sens transversal du pont entre l'axe du système porteur et le point d'application de la résultante de surcharge considéré.

Calcul des sollicitation dues à  $B_{c \min}$ ; freinage  $B_c$ ; freinage A:

a/  $B_{c \min}$ :



$$\frac{z_1}{27,5} = \frac{1}{29} \rightarrow z_1 = 0,948$$

$$\frac{z_2}{23} = \frac{1}{29} \rightarrow z_2 = 0,793$$

$$T = \sum P_i z_i = 28,134 \text{ kdaN} \quad \text{donc} \quad T_{b_{c \min}} = 1,2 \times 28,134 = 6_c \times T$$

$$T_{b_{c \min}} = 33,76 \text{ kdaN}$$

b/ Freinage B<sub>c</sub>:

On considère que chaque essieu développe une force de freinage, et pour un ensemble de camions, un seul développe la force de freinage.

Chaque essieu d'un camion du système B<sub>c</sub> peut développer un effort de freinage égal à son poids. Parmi les camions B<sub>c</sub> que l'on peut placer sur le pont, un seul est supposé freiner.

Bonc le freinage B<sub>c</sub> est :  $F_{nB_c} = 30 \text{ kdaN}$

Mais comme on a une pile donc appui intermédiaire, on prend  $F_{nB_c} = \frac{30}{2} = 15 \text{ kdaN}$

c/ Freinage A: cas d'une travée chargée:

$$F_A = \frac{A}{20 + 0,0035S} \quad : \text{force unitaire c'est à dire force de freinage développée par la surcharge A par m}^2 \text{ de tablier}$$

$$A = 854,74 \text{ daN/m}^2$$

$$S = l_A \cdot L = 14,4 \times 29 = 417,6 \text{ m}^2$$

$$F_A = \frac{854,74}{20 + 0,0035 \cdot 417,6} = 39,83 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{A_{1t}} = F_A \times S = 39,83 \times 417,6 = 16631 \text{ daN}$$

d/ Freinage A: cas de 2 travées chargées:

$$A = 542,71 \text{ daN/m}^2$$

$$S = 835,2 \text{ m}^2$$

$$F_A = \frac{542,71}{20 + 0,0035 \times 835,2} = 23,675 \text{ daN/m}^2$$

$$F_{A_{2t}} = F_A \times S = 23,675 \times 835,2 = 19773 \text{ daN}$$

## UNE TRAVEE CHARGEE

| Surcharges      |             | N (kdan) | H (kdan) | d (m) | Mt (mkdan) | e (m) | Ml (mkdan) |
|-----------------|-------------|----------|----------|-------|------------|-------|------------|
| Surcharge A     | 1 voie      | 44,62    | /        | 5,4   | 240,95     | 0,33  | 14,725     |
|                 | 2 voies     | 89,25    | /        | 3,6   | 321,3      | 0,33  | 29,45      |
|                 | 3 voies     | 133,87   | /        | 1,8   | 240,966    | 0,33  | 44,18      |
|                 | 4 voies     | 178,495  | /        | 0     | 0          | 0,33  | 58,90      |
| Freinage A      |             | /        | 8,3155   | /     | /          | 14,4  | 119,74     |
| Surcharge BC    | 1 voie      | 54,49    | /        | 5,95  | 324,215    | 0,33  | 17,98      |
|                 | 2 voies     | 99,89    | /        | 4,7   | 469,483    | 0,33  | 32,96      |
|                 | 3 voies     | 129,41   | /        | 3,45  | 446,46     | 0,33  | 42,7       |
|                 | 4 voies     | 145,3    | /        | 2,2   | 319,66     | 0,33  | 47,95      |
| Freinage BC     |             | /        | 15       | /     | /          | 14,4  | 216        |
| BC min          |             | 33,76    | /        | 5,95  | 200,88     | 0,33  | 11,14      |
| Surcharge Bt    | 1 tandem    | 31,25    | /        | 5,7   | 178,125    | 0,33  | 10,31      |
|                 | 2 tandems   | 62,51    | /        | 4,2   | 262,54     | 0,33  | 20,62      |
| Surcharge D     |             | 163,03   | /        | 3,7   | 603,211    | 0,33  | 53,8       |
| Surcharge Mc120 |             | 98,43    | /        | 5,05  | 497,07     | 0,33  | 32,48      |
| trottoir        | 1 trottoir  | 4,71     | /        | 8,28  | 39,014     | 0,33  | 1,55       |
|                 | 2 trottoirs | 9,42     | /        | 0     | 0          | 0,33  | 3,11       |

## DEUX TRAVEES CHARGEES

| Surcharge       |             | N (kdaN) | H (kdaN) | d (m) | Mt (mKdaN) | e (m) | Mt (mKdaN) |
|-----------------|-------------|----------|----------|-------|------------|-------|------------|
| Surcharge A     | 1 voie      | 56,66    | /        | 5,4   | 305,964    |       | 0          |
|                 | 2 voies     | 113,32   | /        | 3,6   | 407,952    |       | 0          |
|                 | 3 voies     | 169,98   | /        | 1,8   | 305,964    |       | 0          |
|                 | 4 voies     | 226,635  | /        | 0     | 0          |       | 0          |
| Freinage A      |             | /        | 9,8865   | /     | /          | 10,41 | 142,36     |
| Surcharge BC    | 1 voie      | 49,134   | /        | 5,95  | 292,35     | 0,33  | 16,21      |
|                 | 2 voies     | 98,268   | /        | 4,7   | 461,86     | 0,33  | 32,43      |
|                 | 3 voies     | 147,402  | /        | 3,45  | 508,54     | 0,33  | 48,64      |
|                 | 4 voies     | 196,536  | /        | 2,2   | 432,38     | 0,33  | 64,86      |
| Freinage BC     |             | /        | 15       | /     | /          | 10,41 | 216        |
| BC min          |             | 33,76    | /        | 5,95  | 200,88     |       | 0          |
| Bt              | 1 tandem    | 31,25    | /        | 5,7   | 178,12     |       | 0          |
|                 | 2 tandems   | 62,51    | /        | 4,2   | 262,54     |       | 0          |
| Surcharge D     |             | 163,03   | /        | 3,7   | 603,21     |       | 0          |
| Surcharge Merzo |             | 123,79   | /        | 5,05  | 625,14     |       | 0          |
| trottoir        | 1 trottoir  | 9,42     | /        | 8,28  | 78         |       | 0          |
|                 | 2 trottoirs | 18,84    | /        | 0     | 0          |       | 0          |



# Combinaison des efforts

On envisagera toutes les combinaisons possibles.

| COMBINAISONS  | N (kdaN) | M <sub>q</sub> (m kdaN) | M <sub>t</sub> (m kdaN) |
|---|----------|-------------------------|-------------------------|
| CP + A <sub>4v,2t</sub> + 2 trottoirs <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (A)                            | 1485,38  | 170,832                 | 0                       |
| CP + A <sub>4v,2t</sub> + 1 trottoirs <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (A)                            | 1474,08  | 170,832                 | 93,6                    |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>4v,2t</sub> + 2 trottoirs <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> ) | 1449,26  | 337,032                 | 518,86                  |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>3v,2t</sub> + 2 trottoirs <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> ) | 1390,3   | 317,568                 | 610,25                  |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>4v,2t</sub> + 1 trottoir <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> )  | 1437,96  | 337,032                 | 612,456                 |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>4v,2t</sub> + 1 trottoir <sub>1t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> )  | 1370,82  | 318,6                   | 430,41                  |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>3v,1t</sub> + 2 trottoirs <sub>1t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> ) | 1357,41  | 314,172                 | 535,752                 |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>4v,1t</sub> + 2 trottoirs <sub>1t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> ) | 1376,47  | 320,472                 | 383,59                  |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>3v,1t</sub> + 1 trottoir <sub>1t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> )  | 1351,75  | 312,3                   | 582,57                  |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>min</sub> + 1 trottoir <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> )    | 1242,626 | 259,2                   | 334,656                 |
| CP + B <sub>c</sub> <sub>min</sub> + 2 trottoir <sub>2t</sub> + F <sub>r</sub> (B <sub>c</sub> )    | 1253,93  | 259,2                   | 241,056                 |
| CP + D + 2 trottoir <sub>2t</sub>   | 1409     | 0                       | 723,852                 |
| CP + D + 1 trottoir <sub>2t</sub>   | 1397,75  | 0                       | 817,45                  |
| CP + D + 2 trottoir <sub>1t</sub>   | 1397,75  | 68,29                   | 723,852                 |
| CP + D + 1 trottoir <sub>1t</sub>   | 1392,1   | 66,42                   | 770,67                  |
| CP + M <sub>c120</sub> + 2 trottoir <sub>2t</sub>   | 1361,966 | 0                       | 750,168                 |
| CP + M <sub>c120</sub> + 1 trottoir <sub>2t</sub>   | 1350,662 | 0                       | 843,768                 |
| CP + M <sub>c120</sub> + 2 trottoir <sub>1t</sub>   | 1350,662 | 42,71                   | 596,484                 |
| CP + M <sub>c120</sub> + 1 trottoir <sub>1t</sub>   | 1345,01  | 40,836                  | 643,3                   |

On a donc les combinaisons la plus défavorables :

$$\textcircled{1} \quad CP + A_{4v,2t} + 2 \text{ trottoirs}_{2t} + Fr(A)$$

$$N = 1485,38 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 170,832 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 0$$

$$\textcircled{2} \quad CP + B_{4v,2t} + 2 \text{ trottoirs}_{2t} + Fr(B_c)$$

$$N = 1449,26 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 337,032 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 518,86 \text{ mKdaN}$$

$$\textcircled{3} \quad CP + M_{c120} + 1 \text{ trottoir}_{2t}$$

$$N = 1350,662 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 0$$

$$M_t = 843,768 \text{ mKdaN}$$

Les efforts qui en découlent de ces 3 combinaisons servent à calculer la réaction maximale sur le fieu ( $F_{max}$ )

Par contre, pour déterminer la réaction minimale sur le fieu ( $F_{min}$ ), on doit considérer la combinaison suivante :

$$\textcircled{4} \quad CP + B_{cmin} + 2 \text{ trottoirs}_{2t} + Fr(B_c)$$

$$N = 1253,93 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 259,2 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 241,056 \text{ mKdaN}$$

On déterminera aussi les moments  $M_{p1}$  et  $M_{p2}$  respectivement longitudinal et transversal

$$\text{avec } M_p^2 = M_{p1}^2 + M_{p2}^2 \quad ; \quad M_{p1} = M_p \cos \theta \quad ; \quad M_{p2} = M_p \sin \theta$$

On considérera les moments  $M_{p1}$  et  $M_{t1} = M_t + M_{p2}$  pour déterminer

les réactions  $F_{max}$  et  $F_{min}$  sur le fieu.

$$\theta = 78,956 \text{ grade} \quad : \quad \text{biais à l'appui 11}$$

| Combinaison                                       | $M_1$ (mKdaN) | $M_2$ (mKdaN) | $M_{D_2}$ (mKdaN) | $M_{D_1}$ (mKdaN) | $M_{T_1}$ (mKdaN) |
|---|---------------|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ① CP + $A_{4v, zt} + 2 trottoir_{zt} + F_r(A)$    | 170,832       | 0             | 161,58            | 55,45             | 161,58            |
| ② CP + $B_{c4v, zt} + 2 trottoir_{zt} + F_r(B_c)$ | 337,032       | 518,86        | 318,78            | 109,39            | 837,64            |
| ③ CP + $M_{c120} + 1 trottoir_{zt}$               | 0             | 843,768       | 0                 | 0                 | 843,768           |
| ④ CP + $B_{cmin} + 2 trottoir_{zt} + F_r(B_c)$    | 259,2         | 241,056       | 245,17            | 84,13             | 486,226           |

Determination de  $F_{max}$  et  $F_{min}$ :

$$F = \frac{N}{n} \pm \left[ \frac{M_y x_i}{I_y} \pm \frac{M_x y_i}{I_x} \right] \Omega \quad : \text{ flexion déviée.}$$

$n$  : nombre de pieux

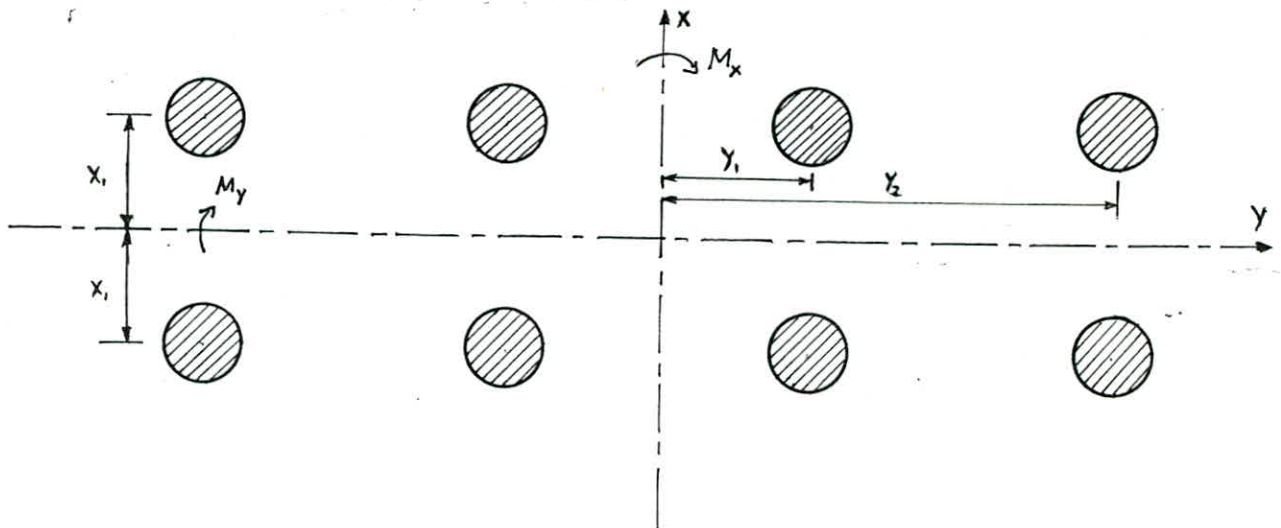
$I_x, I_y$  : moments d'inertie du groupe de pieux calculés respectivement à partir des axes  $Ox$  et  $Oy$

$M_x, M_y$  : moments fléchissants par rapport aux axes  $Ox, Oy$

$\Omega$  : section d'un pieu.

Hypothèses :

- la déformation pieu semelle est proportionnelle à la charge
- la semelle est infiniment rigide
- les pieux sont identiques et encastrés dans la semelle.



$$X_1 = 2,6 \text{ m} ; Y_1 = 2,5835 \text{ m} ; Y_2 = 7,7505 \text{ m}$$

$$I_x = I_{x_1} + I_{x_2} = 4 \Omega (Y_1^2 + Y_2^2)$$

$$\Omega = \pi \frac{\phi^2}{4} = 1,13 \text{ m}^2$$

$$I_x = 4 \times 1,13 (2,5835^2 + 7,7505^2) = 301,67 \text{ m}^4$$

$$I_y = 8 \Omega X_1^2 = 8 \times 1,13 \times 2,6^2 = 61,11 \text{ m}^4$$

Recherche de  $F_{\max}$  et  $F_{\min}$  revenant à un pieu.

① : CP + A<sub>4v,2t</sub> + 2 trottoirs<sub>2t</sub> + F<sub>r</sub>(A) :

$$N = 1485,38 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_t = 161,58 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_l = 55,45 \text{ mKdaN}$$

$$F_{\text{max}} = \frac{N}{n} + \left( \frac{M_y X_1}{I_y} + \frac{M_x Y_1}{I_x} \right) \Omega$$

$$F_{\text{max}} = \frac{1485,38}{8} + \left( \frac{55,45 \times 2,6}{61,11} + \frac{161,58 \times 7,7505}{301,67} \right) \times 1,13 = 193,03 \text{ KdaN}$$

② : CP + B<sub>c4v,2t</sub> + 2 trottoirs<sub>2t</sub> + F<sub>r</sub>(B<sub>c</sub>) :

$$N = 1449,26 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_t = 837,64 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_l = 109,39 \text{ mKdaN}$$

$$F_{\text{max}} = \frac{1449,26}{8} + \left( \frac{109,39 \times 2,6}{61,11} + \frac{837,64 \times 7,7505}{301,67} \right) \times 1,13 = 210,73 \text{ KdaN}$$

③ CP + M<sub>c120</sub> + 1 trottoir<sub>1t</sub> :

$$N = 1350,662 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_t = 843,768 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_l = 0$$

$$F_{\text{max}} = \frac{1350,662}{8} + \frac{843,768 \times 2,6}{61,11} \times 1,13 = 209,4 \text{ KdaN}$$

Donc :  $F_{\max} = \max (F_{\text{①}}, F_{\text{②}}, F_{\text{③}}) = 210,73 \text{ KdaN}$

$$\textcircled{4}: \underline{CP + B_{cmin} + 2 \text{ trottoirs}_{2t} + F_n(B_c):}$$

$$N = 1253,93 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_{t_x} = 486,226 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_{t_y} = 84,13 \text{ mKdaN}$$

$$F_{\textcircled{4}} = \frac{1253,93}{8} - \left( \frac{84,13 \times 2,6}{61,11} + \frac{486,226 \times 7,7505}{301,67} \right) \times 1,13 = 138,58 \text{ KdaN}$$

$$F_{\textcircled{3} \text{ min}} = \frac{1350,662}{8} - \left( \frac{843,768 \times 2,6}{61,11} \times 1,13 \right) = 128,26 \text{ KdaN}$$

$$\text{donc } F_{\text{min}} = \min(F_{\textcircled{4}}, F_{\textcircled{3} \text{ min}}) = 128,26 \text{ KdaN}$$

### Conclusions:

$$F_{\text{max}} = 210,73 \text{ KdaN} < F_p = 300 \text{ KdaN}$$

donc il n'y a pas risque de poinçonnement du pieu

$$F_{\text{min}} = 128,26 \text{ KdaN} > 0$$

donc il n'y a pas risque d'arrachement du pieu

Ainsi la stabilité de la pile est assurée pour les sollicitations du 1<sup>er</sup> genre

Vérification de la stabilité sous l'effet du séisme:a/ Composante horizontale:

Pour un élément quelconque de la construction, la composante horizontale, de direction quelconque est appliquée au CG de l'élément considéré et a pour valeur:  $H = s \cdot G_v$

Définition de  $s$ :

$$s = s_1 \times s_2 \times s_3 \quad : \text{Coefficient sismique}$$

$$s_1 = 0,07 \quad : \text{Coefficient de zone}$$

$$s_2 = 1 \quad : \text{Coefficient de terrain}$$

$$s_3 = 1,3 \text{ (sol meuble)} \quad : \text{Coefficient de profondeur de fondation.}$$

$$s = 0,07 \times 1 \times 1,3 = 0,091$$

$$H = 0,091 \times 1190,81 = 108,36 \text{ KdaN}$$

Repartition de la composante horizontale sur tous les éléments de la pile:1/ Éablier:

$$H = 0,091 \times 471,3 = 42,89 \text{ KdaN}$$

bras de levier par rapport à la base de fondation:  $x = 10,457 \text{ m}$

$$\text{on a donc } M = H \cdot x = 448,5 \text{ mKdaN}$$

2/ Chevêtre:

$$H = 0,091 \times 153,125 = 13,93 \text{ KdaN}$$

bras de levier:  $x = 7,625 \text{ m}$

$$\text{moment: } M = H \cdot x = 106,22 \text{ mKdaN}$$

3/ Fûts:

$$H = 0,091 \times 63,5 = 5,78 \text{ KdaN}$$

bras de levier:  $x = 5 \text{ m}$

$$M = H \cdot x = 28,9 \text{ mKdaN}$$

4/ Semelle sur pieux:

$$H = 0,091 \times 489,6 = 44,55 \text{ KdaN}$$

$$x = 0,75 \text{ m}$$

$$M = H \cdot x = 33,41 \text{ mKdaN}$$

Donc les moments à la base de la fondation sera :

$$M_t = 448,5 + 106,22 + 28,9 + 33,41 = 617,03 \text{ mKdaN}$$

6/ Composante Verticale:

Elle est définie par  $V = \pm 2 \Delta (G_v + 0,5 P_v)$

$P_v$  : composante verticale de la surcharge

Combinaison des efforts pour la recherche de  $F_{max}$

a/ CP + A<sub>uv,zt</sub> + 2 trottoirs,zt + F<sub>r</sub>(A) + SI :

$$V = \pm 2 \times 0,091 [1190,81 + 0,5(226,635 + 18,84)] = \pm 239,07 \text{ KdaN}$$

donc :

$$N_{sup} = 1190,81 + 226,635 + 18,84 + 239,07 = 1675,355 \text{ KdaN}$$

$$N_{inf} = 1190,81 + 226,635 + 18,84 - 239,07 = 1197,215 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 142,36 + 617,03 = 759,39 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 0$$

donc on aura à considérer les efforts suivants:

$$N = 1675,355 \text{ KdaN}$$

$$M_y = M_p = M_p \cos \theta = 759,39 \cos 78,858^\circ = 247,58 \text{ mKdaN}$$

$$M_x = M_t = M_t + M_p \sin \theta = 0 + 759,39 \sin 78,858^\circ = 717,9 \text{ mKdaN}$$

on a alors :

$$F_1 = \frac{N}{m} + S \left[ \frac{M_y \cdot x}{I_y} + \frac{M_x \cdot y}{I_x} \right] = \frac{1675,355}{8} + \left( \frac{247,58 \times 2,6}{61,11} + \frac{717,9 \times 7,7505}{301,67} \right) 1,13$$

$$\underline{F_1 = 242,16 \text{ KdaN}}$$

$$b/ CP + B_{c_{4v,2t}} + 2 \text{ trottoir}_{A,2t} + F_r(B_c) + SI$$

$$V = \pm 2 \times 0,091 [1190,81 + 0,5 (196,536 + 18,84)] = \pm 236,33 \text{ KdaN}$$

$$N_{sup} = 1190,81 + 196,536 + 18,84 + 236,33 = 1642,516 \text{ KdaN}$$

$$N_{inf} = 1190,81 + 196,536 + 18,84 - 236,33 = 1169,856 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 280,86 + 617,03 = 897,89 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 432,38 \text{ mKdaN}$$

On a alors :

$$N = 1642,516 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_{t_i} = M_t + M_p \sin \theta = 1281,21 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_{p_i} = M_p \cos \theta = 292,74 \text{ mKdaN}$$

$$F_2 = \frac{N}{n} + S \left[ \frac{M_y \cdot X}{I_y} + \frac{M_x \cdot Y}{I_x} \right] = \frac{1642,516}{8} + \left[ \frac{292,74 \times 2,6}{61,11} + \frac{1281,21 \times 7,7505}{301,67} \right] \cdot 1,13$$

$$\underline{F_2 = 256,58 \text{ KdaN}}$$

$$c/ CP + M_{c_{120}} + 1 \text{ trottoir}_{,2t} + SI :$$

$$V = \pm 2 \times 0,091 (1190,81 + 0,5 (123,79 + 9,42)) = \pm 228,85 \text{ KdaN}$$

$$N_{sup} = 1190,81 + 123,79 + 9,42 + 228,85 = 1552,87 \text{ KdaN}$$

$$N_{inf} = 1190,81 + 123,79 + 9,42 - 228,85 = 1095,17 \text{ KdaN}$$

$$M_p = 0 + 617,03 = 617,03 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 703,14 \text{ mKdaN}$$

on a :

$$N = 1552,87 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_{t_i} = 1286,45 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_{p_i} = 201,17 \text{ mKdaN}$$

$$\underline{F_3 = 241,13 \text{ KdaN}}$$



$$F_{\max} = \max(F_1, F_2, F_3) = F_2 = 256,58 \text{ kdaN}$$

Recherche de  $F_{\min}$

a) CP + B<sub>cmin</sub> + 2 trottoirs, zt + F<sub>r</sub>(B<sub>c</sub>) + SI:

$$V = \pm 2 \times 0,091(1190,81 + 0,5(33,76 + 18,84)) = 221,51 \text{ kdaN}$$

$$N_{\text{sup}} = 1190,81 + 33,76 + 18,84 + 221,51 = 1464,92 \text{ kdaN}$$

$$N_{\text{inf}} = 1190,81 + 33,76 + 18,84 - 221,51 = 1021,9 \text{ kdaN}$$

$$M_p = 216 + 617,03 = 833,03 \text{ mkdaN}$$

$$M_t = 200,88 \text{ mkdaN}$$

on a :

$$N = 1021,90 \text{ kdaN}$$

$$M_x = M_{t_i} = 988,4 \text{ mkdaN}$$

$$M_y = M_{t_j} = 271,6 \text{ mkdaN}$$

$$F_{\min} = \frac{1021,9}{8} - \left[ \frac{271,6 \times 2,6}{61,11} + \frac{988,4 \times 7,7505}{301,67} \right] \times 1,13$$

$$\underline{F_{\min} = 85,98 \text{ kdaN}}$$

Vérification:

$$F_{\max} = 256,58 \text{ kdaN} < 2F_p = 600 \text{ kdaN}$$

$$F_{\min} = 85,98 \text{ kdaN} > 0$$

Donc la stabilité de la pile est assurée sous les sollicitations du 2<sup>e</sup> genre.

# FERRAILLAGE DE LA PILE

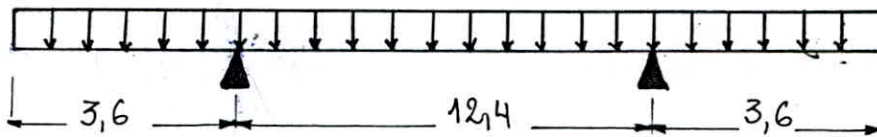
## I Chevêtre

Le chevêtre est considéré comme une poutre sur deux appuis. Il est calculé pour reprendre les efforts lors du verinage du tablier. Il sert aussi pour la répartition des efforts horizontaux entre les deux fûts mais le verinage reste le plus prépondérant du point de vue efforts.

A. Cas du verinage d'un seul tablier.

Efforts dus au poids propre du tablier :

$$q = 1,25 \times 2,5 \times 2,5 = 7,8125 \text{ t/ml.}$$



$$\sum M/B = 0 \quad R_A \cdot l - q(l+l_0) \cdot \left(\frac{l+l_0}{2}\right) + q \frac{l_0^2}{2} = 0$$

$$R_A = \frac{q}{2l} [(l+l_0)^2 - l_0^2] = \frac{q}{2l} [l^2 + 2ll_0] = \frac{q}{2} (l + 2l_0)$$

$$M(x) = -q \frac{x^2}{2} + R_A (x - l_0)$$

$$R_A = \frac{q}{2} (l + 2l_0) = \frac{7,8125}{2} (19,6) = 76,5625 \text{ t.}$$

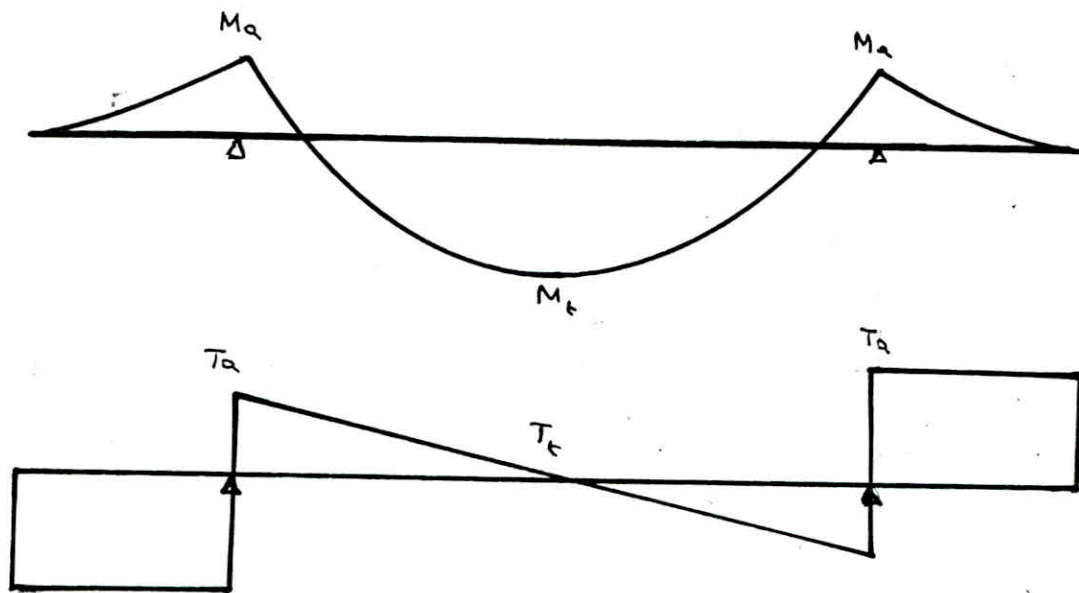
$$\begin{aligned} M_t &= M_x(x = \frac{l+2l_0}{2}) = -\frac{q}{2} \left(\frac{l+2l_0}{2}\right)^2 + R_A \left(\frac{l+2l_0}{2} - l_0\right) \\ &= -\frac{q}{8} (l+2l_0)^2 + 76,5625 \cdot \frac{l}{2} \end{aligned}$$

$$M_t = 99,53$$

$$T_t = 0$$

$$T_a = q \frac{l}{2} = 48,4375 \text{ t}$$

$\frac{7}{2}l + 9l_0 - 9l_0$

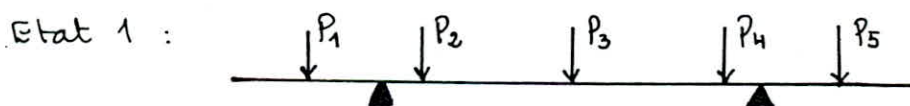


Efforts dus au verinage d'un seul tablier.

L'action du verinage d'un seul tablier se traduit par deux états de charge.

1° état : Il se compose de 5 forces ponctuelles amenées par le verinage.

2° état : Vu l'excentrement de ces forces par rapport à l'axe du chevron d'une distance  $e = 33$  cm, on a alors des moments de torsion.



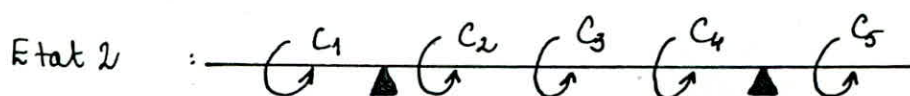
$$P_1 = 62,21 \text{ t}$$

$$P_2 = 62,21 \text{ t}$$

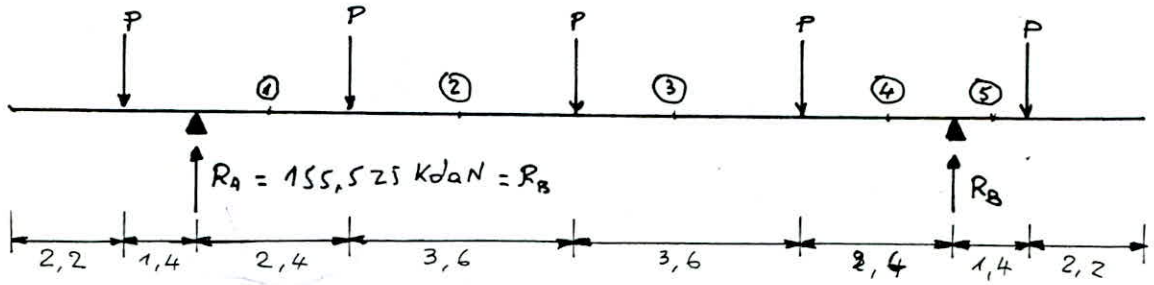
$$P_3 = 62,21 \text{ t}$$

$$P_4 = 62,21 \text{ t}$$

$$P_5 = 62,21 \text{ t}$$



$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = P \cdot e = 62,21 \times 0,33 = 20,53 \text{ m.kobN}$$



Section ①:  $1,4\text{m} < x < 3,8\text{m}$

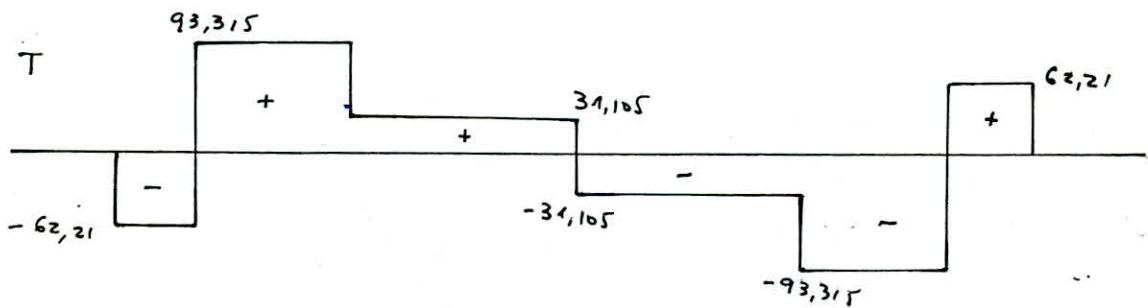
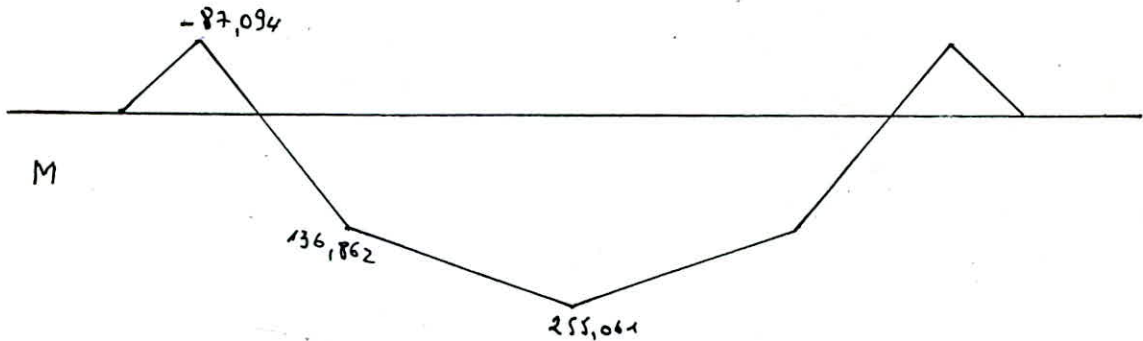
$$M = -Px + R_A(x - 1,4) \quad \begin{cases} x = 1,4 & M = -87,094 \text{ mKdaN} \\ x = 3,8 & M = 136,862 \text{ mKdaN} \end{cases}$$

Section ②:  $3,8\text{m} < x < 7,6\text{m}$

$$M = -Px + R_A(x - 1,4) - P(x - 3,8) \quad \begin{cases} x = 3,8 & M = 136,862 \text{ mKdaN} \\ x = 7,6 & M = 255,061 \text{ mKdaN} \end{cases}$$

Section ③:  $7,6\text{m} < x < 11,4\text{m}$

$$M = -Px + R_A(x - 1,4) - P(x - 3,8) - P(x - 7,6) \quad \begin{cases} x = 7,6 & M = 255,061 \text{ mKdaN} \\ x = 11,4 & M = 136,862 \text{ mKdaN} \end{cases}$$



Efforts :

Moment en travée :

$$M = M_{cp_t} + M_{t_{\text{verinage}}} = 99,53 + 255,061 = 354,591 \text{ mKdaN}$$

Effort tranchant en travée :

$$T = T_{cp_t} + T_{t_{\text{verinage}}} = 0 + 31,105 = 31,105 \text{ KdaN}$$

Sur appui :

$$M_a = -50,625 - 87,094 = -137,719 \text{ mKdaN}$$

$$T_a = 48,4375 + 93,315 = 141,7525 \text{ KdaN}$$

Calcul des aciers :

a/ En travée :

$$M = 354,591 \text{ mKdaN}$$

$$B = 2,5 \text{ m}$$

$$h_t = 1,25 \text{ m} \rightarrow h = 1,20 \text{ cm}$$

$$K = \frac{M}{bh^2} = \frac{354,591 \times 10^5}{250 \times (120)^2} = 9,84$$

$$K = 9,84 \text{ abaque} \Rightarrow \sigma'_b = 76 \text{ bar}$$

$$\sigma_a = 2667 \text{ bar}$$

$$\alpha = \frac{n \sigma'_b}{n \sigma'_b + \sigma_a} = \frac{15 \times 139}{15 \times 139 + 2800} = 0,299$$

$$\Rightarrow \delta = 1 - \frac{\alpha}{3} = 0,9$$

$$\mu = \frac{n M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \times 354,591 \times 10^5}{2667 \times 250 \times (120)^2} = 0,0554.$$

$$\mu = 0,0554 \quad \begin{array}{l} \text{tableau} \\ \text{page 146} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} \mu = 0,0558 \rightarrow \begin{cases} K = 35,8 \\ \varepsilon = 0,9016 \end{cases} \\ \mu = 0,0553 \rightarrow \begin{cases} K = 36,0 \\ \varepsilon = 0,9020 \end{cases} \end{array} \right.$$

En définitif on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} K = 35,9 \\ \varepsilon = 0,9018. \end{array} \right.$$

$$A = \frac{M}{\varepsilon h \bar{\sigma}_a} = \frac{354,591 \times 10^5}{0,9018 \times 120 \times 2667} = 122,86 \text{ cm}^2$$

Soit : 16 HA 32 = 128,64 cm<sup>2</sup> espacement t = 15 cm

b/ Sur Appui :

$$M = 137,719 \text{ mKdaN}$$

$$b = 250 \text{ cm}$$

$$h = 120 \text{ cm}$$

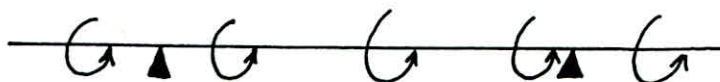
$$\mu = \frac{15 \times 137,719 \times 10^5}{250 \times 2667 \times (120)^2} = 0,0215 \quad \begin{array}{l} \text{tableau charon} \\ \text{page 146} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} K = 62,4 \\ \varepsilon = 0,9354 \end{array} \right.$$

$$A = \frac{M}{\varepsilon h \bar{\sigma}_a} = 46 \text{ cm}^2$$

Soit : 6 HA 32 = 48,24 cm<sup>2</sup> t = 42 cm

Torsion :

Etat ②

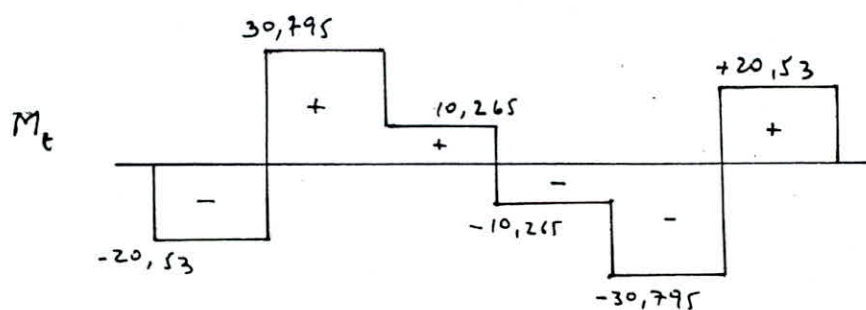


⑥ Le diagramme des moments flechissants est semblable au diagramme des efforts tranchants de l'état ①



$$P_e = 20,53$$

$$R_A = R_B = 51,325$$



Pour les sections rectangulaires, la contrainte tangente de torsion est maximale au milieu des grands côtés et a pour valeur :

$$\tau_{bm} = \frac{K \cdot M_t}{h_t^2 \cdot b}$$

$\tau_{bm}$  : valeur maximale de la contrainte tangente de torsion.

$M_t$  : Moment de torsion max agissant dans la section

$h_t$  : hauteur de la section.

$b$  : largeur de la section.

$$M_t = 30,975 \cdot m \cdot kdaN$$

$$h_t = 1,25 \text{ m}$$

$$b = 2,5 \text{ m}$$

$$\frac{b}{h_t} = \frac{2,5}{1,25} = 2 \xrightarrow{\text{tableau page 355}} K = 4,07$$

donc :

$$\tau_{bm} = \frac{K \cdot M_t}{b h_t^2} = \frac{4,07 \times 30,795 \times 10^5}{250 \times (125)^2}$$

$$\tau_{bm} = 3,21 \text{ kg/cm}^2$$

Calcul des armatures longitudinales et des cadres  
(Charon page 356).

On a une section rectangulaire avec  $\frac{b}{h_t} < 3,5$

$$\Rightarrow \bar{w}_g = \bar{w}_t = \frac{b + h_t}{3b} \cdot \frac{\sigma_{bm}}{\sigma_a} = \frac{250 + 125}{3 \times 250} \cdot \frac{3,21}{2667} \\ = 6,018 \cdot 10^{-4}$$

Armatures longitudinales.

$$A_L = \bar{w}_g \cdot b \cdot h_t = 6,018 \times 10^{-4} \times 250 \times 125 = 18,806 \text{ cm}^2$$

On adopte 4 T 25 = 19,6 cm<sup>2</sup>.

Volume par cm des armatures transversales.

$$v = \bar{w}_t \cdot b \cdot h_t \cdot 1 = 18,806 \text{ cm}^3$$

On adopte des cadres HA 12 (au lieu de T 12).

$$\text{volume d'un cadre} : 1,13 (240 + 115) \times 2 = 802,3 \text{ cm}^3$$

L'espacement d'un cadre sera :

$$e = \frac{\text{Volume d'un cadre}}{\text{volume / cm des } A_t} = \frac{802,3}{18,806} = 42,66 \text{ cm}$$

soit  $e = 43 \text{ cm}$ .

Calcul d'un cours d'armatures transversales :

$$s = \frac{e v}{h} = \frac{43 \times 18,806}{120} = 6,74 \text{ cm}$$

Effort tranchant

$$T = 31,105 \text{ t} \quad (\text{en travée})$$



$$\sigma_b = \frac{T}{b z} = \frac{31,105 \times 10^3}{250 \times \frac{7}{8} \times 120} = 1,185 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_b = 3,5 \bar{\sigma}_b = 3,5 \times 7,5 = 26,25 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b < \bar{\sigma}_b$$

$$\bar{\sigma}_{at} = \left(1 - \frac{\sigma_b}{9 \bar{\sigma}_b}\right) \bar{\sigma}_{en} = \left(1 - \frac{1,185}{9 \times 7,5}\right) 4000 = 3929,77 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{E} = \max(\bar{E}_1, \bar{E}_2)$$

$$\bar{E}_1 = 0,2 h = 0,2 \times 120 = 24 \text{ cm}$$

$$\bar{E}_2 = h \left(1 - 0,3 \frac{\sigma_b}{\bar{\sigma}_b}\right) = 120 \left(1 - 0,3 \times \frac{1,185}{7,5}\right) = 114,312 \text{ cm}$$

$$\bar{E} = 114,312 \text{ cm}$$

$$t = 43 \text{ cm}$$

$$A_t = \frac{t \cdot T}{z \bar{\sigma}_{at}} = \frac{43 \times 31105}{\frac{7}{8} \times 120 \times 3929,77} = 3,24 \text{ cm}^2$$

Enfinement la section totale d'un cours d'armatures transversales est :

$$A = s + A_t = 6,74 + 3,24 = 9,98 \text{ cm}^2$$

$$\text{Soit : } 9 \text{ HA } 12 = 10,17 \text{ cm}^2$$

Sur appuis :

$$T = 141,7525 \text{ t}$$

$$\sigma_b = \frac{T}{b z} = \frac{141,7525 \times 10^3}{250 \times \frac{7}{8} \times 120} = 5,4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{\sigma}_b = 26,25 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b < \bar{\sigma}_b$$

$$\bar{\sigma}_{at} = \left(1 - \frac{e_b}{9\bar{\sigma}_b}\right) \bar{\sigma}_{en} = \left(1 - \frac{5,4}{9 \times 7,5}\right) 4000 = 3680 \text{ Kg/cm}^2$$

$$t = 43 \text{ cm}$$

$$A_t = \frac{43 \times 141952,5}{\frac{7}{8} \times 120 \times 3680} = 15,77 \text{ cm}^2$$

$$A = S + A_t = 6,74 + 15,77 = 22,51 \text{ cm}^2$$

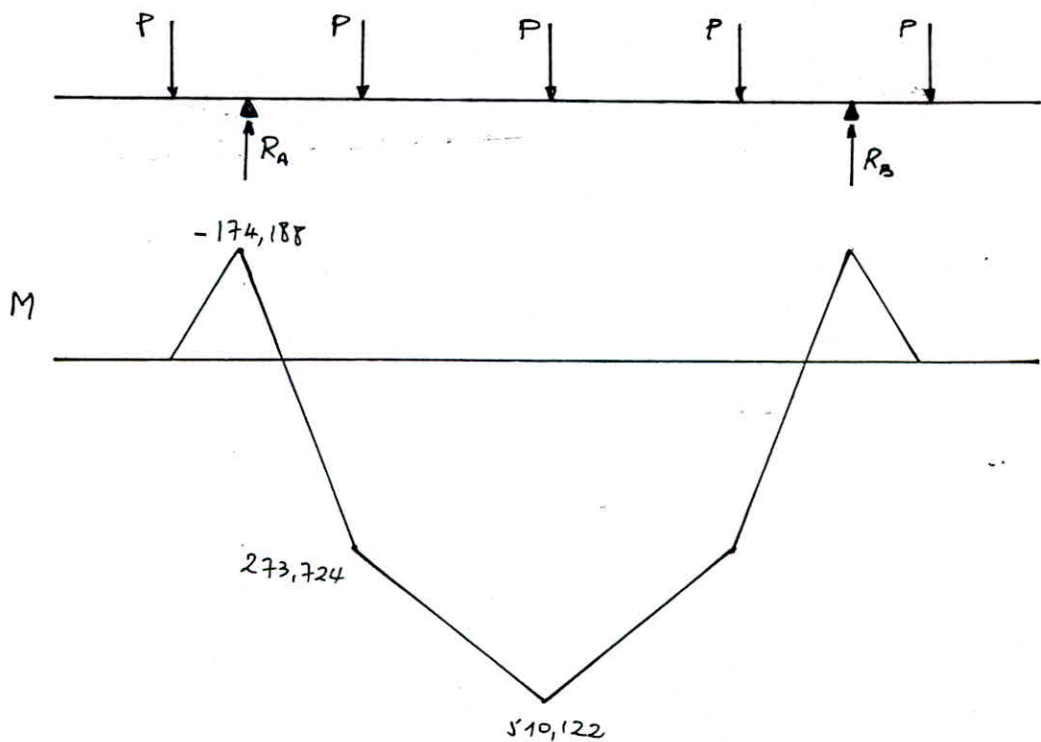
$$\text{Soit } 20 \text{ HA } 12 = 22,6 \text{ cm}^2$$

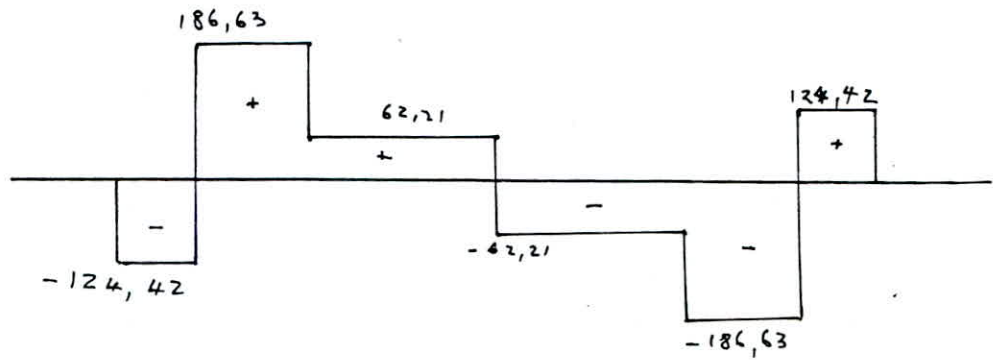
Efforts dus au verinage de 2 tabliers :

L'action du verinage de deux tabliers en même temps se traduit uniquement par des forces ponctuelles  $P_i$  ( $i = 1 \div 5$ ).

Ces forces sont appliquées sur le plan vertical de symétrie du chevêtre.

$$P = P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 2 \times 62,21 = 124,42 \text{ t}$$





. Calcul des sections d'acier :

a. En travée :

$$M_t = M_{cp} + M_{\text{verinage}} = 99,53 + 510,122 = 609,652 \text{ tm}$$

$$T_t = T_{cp} + T_{\text{verinage}} = 0 + 62,21 = 62,21 \text{ t}$$

b. A l'appui :

$$M_a = M_{cp} + M_{\text{verinage}} = -50,625 + (-174,188) = -224,813$$

$$T_a = T_{cp} + T_{\text{verinage}} = 48,4375 + 186,63 = 235,07 \text{ t}$$

$$a/ M = 609,652$$

$$\mu = \frac{15M}{h^2 \sqrt{a} b} = \frac{15 \cdot 609,652 \cdot 10^5}{120^2 \cdot 2667 \cdot 250} = 0,0952$$

$$\rightarrow K = 25,5 \quad \varepsilon = 0,8765$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{K} = \frac{2667}{25,5} = 104,55 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma}'_b = 180 \text{ kg/cm}^2$$

$$A = \frac{M}{\varepsilon h \sigma_a} = \frac{609,652 \cdot 10^5}{0,8765 \cdot 120 \cdot 2667} = 217,33 \text{ cm}^2$$

On prendra 28 HA 32 = 225,12 cm<sup>2</sup>

$$b/ M = 224,813 \text{ m kdaN}$$

$$\mu = \frac{15 \cdot 224,813 \cdot 10^5}{120^2 \cdot 2667 \cdot 250} = 0,0351$$

$$\rightarrow K = 47,3 \quad \varepsilon = 0,9195$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{K} = \frac{2667}{47,3} = 56,38 \text{ kg/cm}^2 < \bar{\sigma}'_b = 180 \text{ kg/cm}^2$$

$$A = \frac{M}{Eh \bar{\sigma}_a} = \frac{224,813 \cdot 10^5}{0,9195 \cdot 120 \cdot 2667} = 76,39 \text{ cm}^2$$

$$\text{Soit } 16 \text{ HA } 25 = 78,4 \text{ cm}^2$$

Armatures transversales

$$T_{\max} = 235,07 \text{ t}$$

$$\bar{\sigma}_b = \bar{\sigma}_b \left( 4,5 - \frac{\sigma'_b}{\bar{\sigma}'_b} \right) = 7,5 \left( 4,5 - \frac{56,38}{180} \right) = 31,4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b = \frac{T}{b \cdot z} = \frac{235,07 \cdot 10^3}{250 \cdot \frac{7}{8} \cdot 120} = 8,95 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b < \bar{\sigma}_b$$

$$\bar{\sigma}_{at} = \left( 1 - \frac{\sigma_b}{9\bar{\sigma}_b} \right) \bar{\sigma}_e = \left( 1 - \frac{8,95}{9 \cdot 7,5} \right) 4200 = 3643,11 \text{ kg/cm}^2$$

$$t = 43 \text{ cm}$$

$$A = \frac{t \cdot T}{z \cdot \bar{\sigma}_{at}} = \frac{43 \cdot 235,07 \cdot 10^3}{\frac{7}{8} \cdot 120 \cdot 3643,11} = 26,42 \text{ cm}^2$$

$$\text{Soit : } 24 \text{ HA } 12 = 27,12 \text{ cm}^2$$

Verifications à la résistance sous les sollicitations du 2<sup>e</sup> genre :

L'effet du sisme sur le chevêtre (pendant le verinage des 2 tabliers) se traduit par un effort horizontal et un effort vertical.

$$H = S \times e_p$$

$$V = \pm 2 S (e_p + 0,5 P_v)$$

$$S_2 = e_p + S I$$

Definition de  $s$  :

$$s = s_1 \times s_2 \times s_3 \quad : \quad \text{Coefficient sismique.}$$

$$s_1 = \text{Coefficient de zone} \quad s_1 = 0,07$$

$$s_2 = \text{Coefficient de terrain} \quad s_2 = 1$$

$$s_3 = \text{Coefficient de profondeur de fondation}$$

$$s_3 = 1,3 \quad (\text{Sol meuble})$$

$$s = 0,091$$

$$H = s \cdot CP = 0,091 (471,3 + 8,36 + 153,125) = 57,58 \text{ t}$$

$$V = \pm 2s (CP + 0,5 P_v) = \pm 2s (CP)$$

$$= \pm 2 \cdot 0,091 (471,3 + 8,36 + 153,125) = \pm 115,17 \text{ t}$$

a. En travée :

$$M = M_{cp} + M_{verinage} = \frac{R + V}{2}$$

$$M = 99,53 + 510,122 \times \frac{311,05 + 115,17}{311,07} = 798,53$$

$$A = 28 \text{ HA } 32 = 225,12 \text{ cm}^2$$

$$H = 57,58 \text{ t}$$

$$b = 250 \text{ cm}$$

$$h_t = 125 \text{ cm} \quad h = 120 \text{ cm}$$

$$\bar{w} = \frac{n}{15} \cdot \frac{100 A}{bh} = \frac{100 \times 225,12}{120 \times 250} = 0,7504$$

$$a = \frac{M}{H} + \frac{h}{2} = \frac{798,53 \cdot 10^2}{57,58} + \frac{120}{2} = 1446,82 \text{ cm}$$

$$\frac{h}{0,15 a} = \frac{120}{0,15 \cdot 1446,82} = 0,5529$$

$$M_{at} = H N_a = 833,078$$

$$\bar{w}_1 = \bar{w} + \frac{h}{0,15 a} \mu_1 = 0,7504 + 0,5529 \mu_1$$

En se referant au tableau N°9 P146 du charon vert

on a  $m_1 = 0,676$

On est amene' donc à faire l'etage suivante .

$$\bar{w} + \frac{0,01 \cdot h}{0,15 \cdot a} = 0,7504 + \frac{0,01 \cdot 120}{0,15 \cdot 1446,82} = 0,7559 > 0,07$$

⇒ On ne peut utiliser le 1° abaque .

$$\bar{w} + \frac{0,01 \cdot h}{0,15 \cdot a} > 0,07$$

$$\bar{w} + \frac{0,21 \cdot h}{0,15 \cdot a} = 0,7504 + \frac{0,21 \cdot 120}{0,15 \cdot 1446,82} = 0,8665 < 1,68$$

⇒ On utilise le 2° abaque .

$$\bar{w}_1 = 0,7504 + 0,5529 \mu_1$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_1 = 0 \rightarrow \bar{w}_1 = 0,7504 \\ \mu_1 = 0,25 \rightarrow \bar{w}_1 = 0,888625 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{2° abaque 12} \\ \text{intersection en B} = 0,106 \end{array}$$

$$0,100 < \mu_1 < 0,110 \quad \begin{array}{l} \text{tableau 9} \\ \text{page 146} \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0,04760 \\ m_1 = 8,102 \end{array} \right.$$

$$\text{done : } \mu_1 = \frac{P_1 + \bar{w}}{m_1 - \frac{h}{0,15 \cdot a}} = \frac{0,0476 + 0,7504}{8,102 - \frac{120}{0,15 \cdot 1446,82}}$$

$$\mu_1 = 0,10570848$$

$$\mu_1 = 0,1057 \rightarrow K = 23,85$$

$$\sigma_a = \frac{n \cdot \text{Mat}}{\mu_1 \cdot b \cdot h^2} = \frac{15 \cdot 833,078 \cdot 10^5}{0,1057 \cdot 250 \cdot (120)^2} = 3283,97 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_a < \sigma_{en} = 4000 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{K} = \frac{3283,97}{23,85} = 137,69 \text{ kg/cm}^2 < 1,5 \cdot \bar{\sigma}_b = 270 \text{ kg/cm}^2$$

Sur appui :

$$M = M_{cp} + M_{verinage} \cdot \frac{R+V}{R}$$

$$M = -50,625 - 174,188 \cdot \frac{311,05 + 115,17}{311,05} = -289,31$$

$$A = 164 A_{25} = 78,4 \text{ cm}^2$$

$$b = 250 \text{ cm} \quad h_t = 125 \text{ cm} \rightarrow h = 120 \text{ cm}$$

$$\bar{w} = \frac{n}{15} \cdot \frac{100 A}{bh} = \frac{100 \cdot 78,4}{250 \cdot 120} = 0,2613$$

$$a = \frac{M}{H} + \frac{h}{2} = \frac{289,31 \cdot 10^5}{57,58 \cdot 10^3} + \frac{120}{2} = 562,45 \text{ cm}$$

$$\frac{h}{0,15 \cdot a} = \frac{120}{0,15 \cdot 562,45} = 1,422351771$$

$$Mat = Ha = 323,858$$

$$\bar{w}_1 = \bar{w} + \frac{h}{0,15 \cdot a} \mu_1 = 0,2613 + 1,4223 \mu_1$$

On utilise le 2° abaque  $\rightarrow \mu_1 = 0,044$

$$0,040 < \mu_1 < 0,045 \rightarrow m_1 = 7,614 \quad p_1 = 0,01310$$

$$\text{donc } \mu_1 = \frac{p_1 + \bar{w}}{m_1 - \frac{h}{0,15 \cdot a}} = \frac{0,0131 + 0,2613}{7,614 - 1,422351771} = 0,044317763$$

tableau 2  $\rightarrow K = 41,18$

page 27

$$\sigma_a = \frac{n Mat}{\mu_1 b h^2} = \frac{15 \cdot 323,858 \cdot 10^5}{0,04432 \cdot 250 \cdot 120^2} = 3044,69 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_a < \sigma_{en} = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{3044,69}{41,18} = 73,94 \text{ kg/cm}^2 < 1,5 \bar{\sigma}'_b = 270 \text{ kg/cm}^2$$

Ferraillage du fût.

L'appui N°11 présente un biais de  $78,858 \text{ grad} = \alpha$   
On considèrera les efforts agissant sur un seul fût.  
La combinaison donnant les efforts prépondérants est :

$$CP + B_{\text{min}} + Fr$$

$$CP = \left[ 471,3 + \frac{8,36}{2} + 153,125 + 63,5 \right] \cdot \frac{1}{2} = 346,05 \text{ t}$$

$$B_{\text{min}} = 28,138 \times 1,2 = 33,76 \text{ kóóN}$$

$$Fr = 30 \text{ t}$$

$$N = 346,05 + 1,2 (28,138 \times 0,5305) = 363,96 \text{ t}$$

$$M_L = 1,2 (8,25 \times 15 + 9,285 \times 0,5305) = 154,41$$

$$M_t = 1,2 \times 0,5305 \times 167,42 = 106,58$$

Le moment  $M_L$  se décompose en 2 composantes :

- L'une parallèle à l'axe longitudinal de la pile  $M_{L\parallel}$
- L'autre perpendiculaire à l'axe longitudinal de la pile  $M_{L\perp}$ .

$$M_L \begin{cases} M_{L\parallel} = M_L \cos(100 - \alpha) = 154,41 \cos 21,142 = 145,97 \text{ tm} \\ M_{L\perp} = M_L \cos \alpha = 154,41 \cos 78,858 = 50,342 \text{ tm} \end{cases}$$

Le moment résultant sera donc :

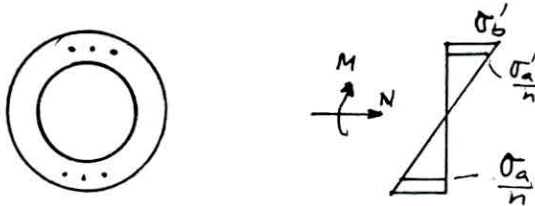
$$M_R = \sqrt{M_{L\perp}^2 + (M_t + M_{L\parallel})^2}$$

$$M_R = \sqrt{(50,342)^2 + (106,58 + 145,97)^2}$$

$$M_R = 257,52 \text{ m kóóN}$$

16. Le fût sera donc ferrailé en flexion composée.  
Pour cela on utilisera la méthode de P. Charon  
pour les sections circulaires évidées





$$e = \frac{MR}{N} = \frac{257,52}{363,96} = 0,707 \text{ m}$$

$$\frac{R_m}{2} = \frac{D_m}{4} = \frac{1}{4} \left[ \frac{2+1,3}{2} \right] = 0,4125 \text{ m}$$

$e > \frac{R}{2} \Rightarrow$  la section est partiellement comprimée

Calcul des armatures :

$$e = 0,707 \text{ m}$$

$$\eta = \frac{e}{2R} = \frac{0,707}{2 \cdot 0,825} = 0,428484848$$

$$\mu' = \frac{MR}{2 \bar{\sigma}_b' \cdot B \cdot R_m} \quad \text{avec} \quad B = 2\pi R_m \left[ \frac{R-r}{2} \right]$$

$$B = 2 \cdot \pi \cdot 0,825 \cdot \frac{2-1,3}{2} = 1,814 \text{ m}^3 = 18142,7 \text{ cm}^3$$

$$\mu' = \frac{257,52 \cdot 10^5}{2 \cdot 180 \cdot 18142,7 \cdot 82,5} = 0,047791719$$

Comme la plus faible valeur de  $\mu_1$  donnée par l'abaque 10 page 123 est supérieure à  $\mu'$ , on ferraillera avec le pourcentage minimum des aciers

$$\bar{w} = 0,5$$

$$K = 34$$

$$A = \frac{15}{n} \bar{w} \frac{B}{100} = 0,5 \cdot \frac{18142,7}{100} = 90,7 \text{ cm}^2$$

On prendra donc 19 HA 25 = 93,29 cm<sup>2</sup>.

17

$$\bar{\sigma}_a = \frac{n}{15} K \bar{\sigma}'_b \quad \text{et} \quad \bar{\sigma}'_a = n \bar{\sigma}'_b$$

$$\bar{\sigma}'_b = \frac{\bar{\sigma}_a}{K} = \frac{2667}{34} = 78,44 < \bar{\sigma}'_b$$

$$\bar{\sigma}'_a = 15 \times 78,44 = 1176,62 < \bar{\sigma}_a$$

Armatures transversales :

On mettra des cerces en HA12 espacés de 20 cm en zone courante. Par contre à la base du fût, on doit avoir :

$$\gamma = 4 > \frac{0,4 \phi_t^2 \cdot \bar{\sigma}_{ent}}{\phi_t^2 \cdot \bar{\sigma}_{ent}} = \frac{0,4 \cdot 25^2 \cdot 2667}{12^2 \cdot 2800} = 1,65 \quad \underline{\text{verifié}}$$

On gardera donc le même espacement  $t = 20$  cm  
On disposera les cerces en 2 couronnes .

Verification à la resistance sous les sollicitations du 2<sup>e</sup> genre

La combinaison la plus defavorable est :

$$CP + B_{emin} + Fr + SI$$

L'effet du seisme sur le fût se traduit par une force horizontale  $H$  de direction qq et une force verticale  $V$  ascendante ou descendante

$$V = \pm 2 S (e_p + 0,5 P_v)$$

$$V = \pm 2 \cdot 0,091 [346,05 + 0,5(28,138 \times 0,5303)] = \pm 64,34 t$$

$$1^{\circ} \text{ cas : } V = +64,34 t$$

$M_R$  et  $M_H$  ont même sens :

$$N = 346,05 + 28,138 \times 0,5305 + 64,34 = 425,32 t$$

$$M_e = 8,25 \times 15 + 9,285 \times 0,5305 = 128,675 \text{ mKdN}$$

$$M_t = 0,5305 \times 167,42 = 88,82 \text{ mkdaN}$$

$$H = s \cdot c_p = 0,091 \times 346,05 = 31,49 \text{ t}$$

$$M_H = H \cdot d = 31,49 \times 8,25 = 259,8 \text{ mkdaN}$$

$$M_l \begin{cases} M_{l\parallel} = M_l \cos(100 - \alpha) = 128,675 \cos 21,142 = 120 \\ M_{l\perp} = M_l \cos \alpha = 128,675 \cos 78,858 = 24,86 \end{cases}$$

$$M_{l\parallel} = 120 \text{ mkdaN}$$

$$M_t + M_{l\parallel} = 88,82 + 120 = 208,82 \text{ mkdaN}$$

$$M_{l\perp} = 24,86 \text{ mkdaN}$$

$$M_H = 259,8 \text{ mkdaN}$$

$$M_R = M_H + \sqrt{M_{l\perp}^2 + (M_t + M_{l\parallel})^2}$$

$$= 259,8 + \sqrt{(24,86)^2 + (208,82)^2}$$

$$M_R = 470,1 \text{ mkdaN}$$

On va vérifier si la section d'acier trouvée passe au service exceptionnel :

$$N = 425,32 \text{ t}$$

$$A = 19 \text{ HA } 25 = 93,29 \text{ cm}^2$$

$$M_R = 470,1 \text{ mkdaN}$$

$$e = \frac{M_R}{N} = \frac{470,1}{425,32} = 1,1 \text{ m}$$

$$\eta = \frac{e}{2R_m} = \frac{1,1}{2 \times 0,825} = 0,669869958 = 0,67$$

$$\bar{w} = \frac{n}{15} \cdot \frac{100 A}{B} = \frac{n}{15} \cdot \frac{100 A}{2\pi R_m \left(\frac{R-z}{z}\right)} = \frac{100 \cdot 93,29}{2\pi \cdot 825 \cdot 35}$$

$$\bar{w} = 0,5142$$

$$\rightarrow K = 31,3$$

$$N' = 0,138$$

$$\sigma'_b = \frac{M_R}{2 \mu' B R_m} = \frac{470,1 \cdot 10^5}{2 \cdot 0,138 \cdot 825 \cdot 2\pi \cdot 825 \cdot 35}$$

$$= 113,8 \text{ daN/cm}^2 < 1,5 \bar{\sigma}'_b$$

$$\sigma_a = \kappa \sigma'_b = 31,3 \times 113,8 = 3562 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{en} = 4000$$

2e cas :  $V = -64,34 \text{ t}$

$$N = 346,05 + 28,138 \cdot 0,5305 - 64,34 = 296,64 \text{ kdaN}$$

$$M_L = 128,675 \text{ mKdaN}$$

$$M_t = 88,82 \text{ mKdaN}$$

$$M_{L \parallel} = 120 \text{ mKdaN}$$

$$H = 31,49 \text{ t}$$

$$M_{L \perp} = 24,86 \text{ mKdaN}$$

$$M_H = 259,8 \text{ mKdaN}$$

$$M_R = 470,1$$

$$e = \frac{M_R}{N} = \frac{470,1}{296,64} = 1,585 \text{ m}$$

$$\eta = \frac{e}{2 R_m} = \frac{1,585}{2 \times 0,825} = 0,96$$

$$\bar{w} = 0,5142$$

$$\rightarrow \kappa = 34 \quad \mu' = 0,1575$$

$$\sigma'_b = \frac{M_R}{2 \cdot \mu' B R_m} = 99,7 \text{ daN/cm}^2 < 1,5 \bar{\sigma}'_b = 270 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma_a = \kappa \sigma'_b = 34 \times 99,7 = 3390 \text{ daN/cm}^2 < \sigma_{en} = 4000 \text{ daN/cm}^2$$

Vérification à la résistance pour les sollicitations du 2<sup>ème</sup> genre:

Pour les sollicitations du second genre, la combinaison la plus défavorable est:

$$Cp + B_{cmin} + F_r(B_c) + SI$$

L'effet du séisme sur le fût se traduit par une force horizontale  $H$  de direction quelconque et une force verticale ascendante ou descendante.

$$V = \pm 2 \Delta (Cp + 0,5 P_v)$$

$$V = \pm 2 \times 0,091 (346,05 + 0,5 \times 33,76 \times 0,5305) = \pm 64,61$$

On prendra  $V = -64,61$  kdaN pour avoir l'effet le plus défavorable.

$$N = 346,05 + 33,76 \times 0,5305 - 64,61 = 299,35 \text{ kdaN}$$

$$M_g = 8,25 \times 15 + 9,285 \times 0,5305 = 128,68 \text{ mKdaN}$$

$$M_e = 88,82 \text{ mKdaN}$$

La composante horizontale du séisme est:

$$H = \Delta \cdot Cp = 0,091 \times 346,05 = 31,49 \text{ kdaN}$$

$$M_H = H \times 8,25 = 31,49 \times 8,25 = 259,8 \text{ mKdaN}$$

$$M_g \begin{cases} M_g' = 128,68 \cos(100 - 78,858) = 121,65 \text{ mKdaN} \\ M_{gt} = 128,68 \cos 78,858 = 41,95 \text{ mKdaN} \end{cases}$$

$$M_R = M_H + \sqrt{M_g'^2 + M_{gt}^2} \quad \text{avec} \quad M_e' = M_e + M_{gt} = 130,77 \text{ mKdaN}$$

$$\text{d'où} \quad M_R = 438,4 \text{ mKdaN}$$

On va vérifier si la section d'acier trouvée en service normal reste suffisante en service exceptionnel

$$N = 299,35 \text{ kdaN}$$

$$M = 438,4 \text{ mKdaN}$$

$$A = 19HA25 = 93,29 \text{ cm}^2$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{438,4 \cdot 10^2}{299,35} = 1,47 \text{ m}$$

$$\eta = \frac{e}{2r} = \frac{147}{2 \times 82,5} = 0,89$$

$$\bar{\omega} = \frac{\eta}{15} \frac{100A}{B}; \quad B = 2\pi r l = 2 \times \pi \cdot 0,825 \times 0,35 = 1,813 \text{ m}^2$$

$$\bar{\omega} = \frac{100 \times 93,29}{18130} = 0,5145 \Rightarrow \begin{cases} K = 31,4 \\ \mu' = 0,1442 \end{cases}$$

$$\sigma'_b = \frac{M}{2\mu'Br} = \frac{438,4 \cdot 10^5}{2 \times 0,1442 \times 18130 \times 82,5} = 101,63 \text{ bar} < 1,5\bar{\sigma}'_b = 270 \text{ bar}$$

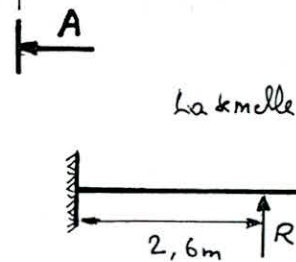
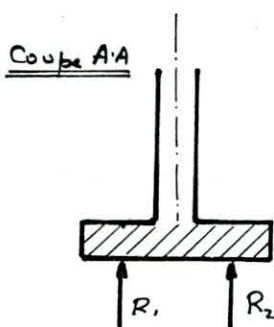
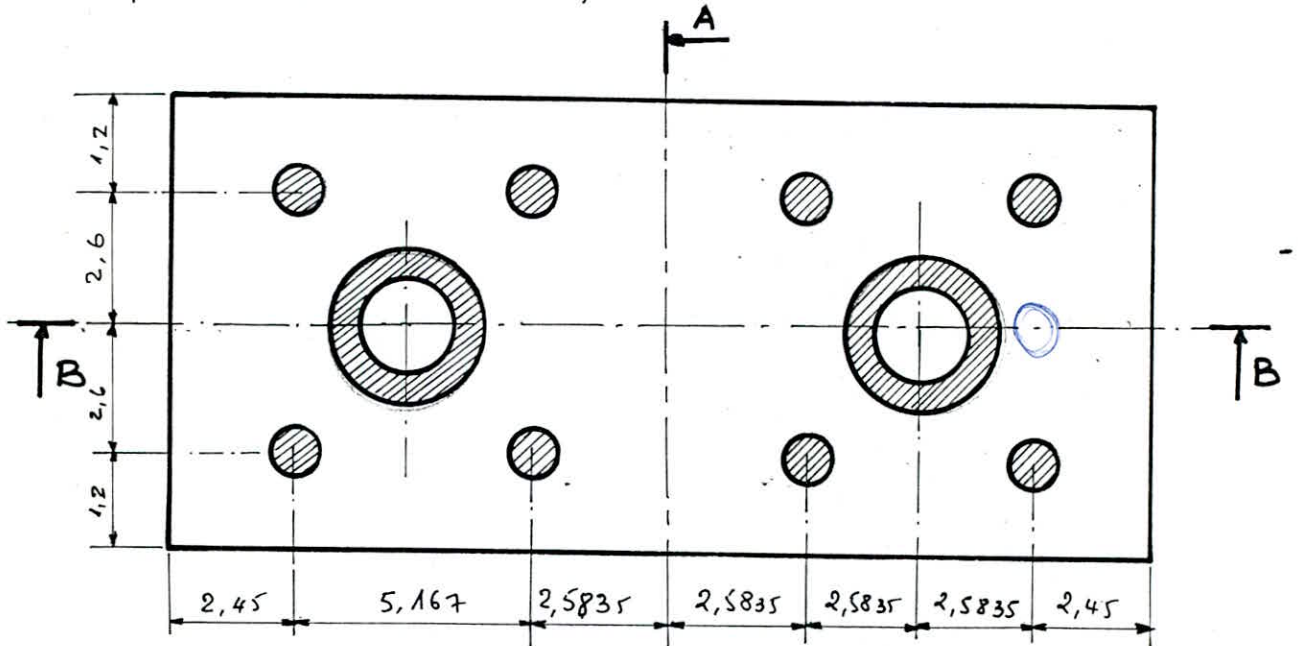
$$\sigma_a = K\sigma'_b = 31,4 \times 101,63 = 3191,18 \text{ bar} < \bar{\sigma}_{eq} = 4000 \text{ bar}$$

### Conclusion:

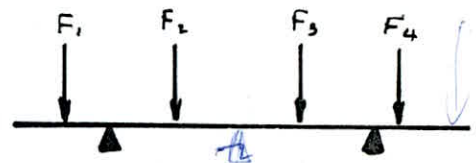
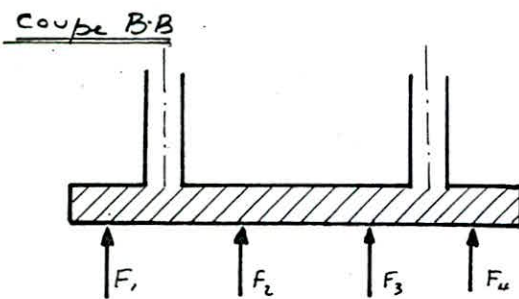
La section d'aciers trouvée en service normal reste valable en service exceptionnel.

### Ferrailage de la semelle sur pieux:

Pour le ferrailage de la semelle sur pieux, il suffit de connaître la répartition des charges sur chaque pieu donc la réaction du pieu à partir de laquelle, on pourra trouver la force de traction dans les aciers.



La nappe transversale sera ferrillée en console encastrée à la bande longitudinale contenant les 2 fûts



La nappe longitudinale: la semelle sera supposée appuyer sur les 2 fûts, soumise aux réactions des pieux.

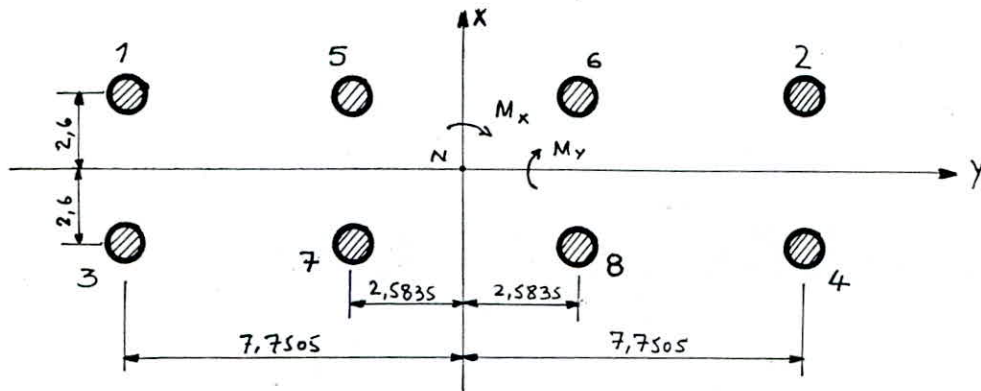
### Détermination des réactions sur chaque pieu

Pour la détermination des réactions sur chaque pieu, il faudra émettre les hypothèses suivantes :

- Semelle infiniment rigide
- Pieux encastrés dans la semelle
- Les pieux sont considérés comme des poteaux élastiques
- Tous les pieux sont identiques.

Dans ces conditions, on peut appliquer la formule suivante :

$$F = \frac{N}{m} \pm \frac{M_y \cdot X}{\sum X^2} \pm \frac{M_x \cdot Y}{\sum Y^2}$$



$N$  : effort normal

$m$  : nombre de pieux

$M_x$  : moment par rapport à l'axe  $Ox$

$M_y$  : moment par rapport à l'axe  $Oy$

$\sum X^2$  : somme des moments d'inertie par unité de surface par rapport à  $Oy$

$\sum Y^2$  : somme des moments d'inertie par unité de surface par rapport à  $Ox$

$$\sum Y^2 = 4 \times \overline{7,7505^2} + 4 \times \overline{2,5835^2} = 266,98 \text{ m}^2$$

$$\sum X^2 = 8 \times \overline{2,6^2} = 54,08 \text{ m}^2$$



La combinaison donnant les réactions max est:

$$CP + B_{c_{4v}, 2t} + 2 \text{ trottoirs}_{2t} + F_n (Bc)$$

$$N = 1449,26 \text{ KdaN}$$

$$M_x = 837,64 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 109,39 \text{ mKdaN}$$

Calcul des réactions sur les pieux:

$$F_1 = \frac{1449,26}{8} - \frac{837,64 \times 7,7505}{266,98} + \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 162,1 \text{ KdaN}$$

$$F_2 = \frac{1449,26}{8} + \frac{837,64 \times 7,7505}{266,98} + \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 210,73 \text{ KdaN}$$

$$F_3 = \frac{1449,26}{8} - \frac{837,64 \times 7,7505}{266,98} - \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 151,58 \text{ KdaN}$$

$$F_4 = \frac{1449,26}{8} + \frac{837,64 \times 7,7505}{266,98} - \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 200,21 \text{ KdaN}$$

$$F_5 = \frac{1449,26}{8} - \frac{837,64 \times 2,5835}{266,98} + \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 178,31 \text{ KdaN}$$

$$F_6 = \frac{1449,26}{8} + \frac{837,64 \times 2,5835}{266,98} + \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 194,52 \text{ KdaN}$$

$$F_7 = \frac{1449,26}{8} - \frac{837,64 \times 2,5835}{266,98} - \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 167,79 \text{ KdaN}$$

$$F_8 = \frac{1449,26}{8} + \frac{837,64 \times 2,5835}{266,98} - \frac{109,39 \times 2,6}{54,08} = 184 \text{ KdaN}$$

$$\max F_i = F_2 = 210,73 \text{ KdaN}$$

$$\min F_i = F_3 = 151,58 \text{ KdaN}$$

Nappe transversale:

Les pieux travaillent tous en même temps. Pour avoir le moment max à mi-travers de la semelle (transversalement), il faudrait envisager le cas où d'une part la réaction sur le pieu est maximale et d'autre part la réaction sur l'autre pieu est min.



$$M_{e1} = R_{\max} \times 2,6 = 210,73 \times 2,6 = 547,898 \text{ mKdaN}$$

$$M_{e2} = R_{\min} \times 2,6 = 151,58 \times 2,6 = 394,108 \text{ mKdaN}$$

Le moment résultant de ces sollicitations sera :  $M = M_{e1} - M_{e2} = 153,79 \text{ mKdaN}$

La force de traction dans les pieux sera donc :  $N_a = \frac{M}{z}$

$$\text{avec } z = \frac{7}{8} h \quad \text{et } h = h_e - d = 1,5 - 0,05 = 1,45 \text{ m}$$

$$\rightarrow z = \frac{7}{8} \cdot 1,45 = 126,875 \text{ cm}$$

$$N_a = \frac{153,79 \cdot 10^3}{126,875} = 121,21 \text{ KdaN}$$

Donc la section d'aciers transversaux inférieurs relative à un couple de pieux sera :

$$A = \frac{N_a}{\bar{\sigma}_a} = \frac{121,21 \cdot 10^3}{2800} = 43,29 \text{ cm}^2$$

$$\text{on adoptera donc : } 14 \text{ HA } 20 = 43,97 \text{ cm}^2$$

qui seront répartis sur une distance  $t = \phi + h = 1,2 + 1,45 = 2,65 \text{ m}$

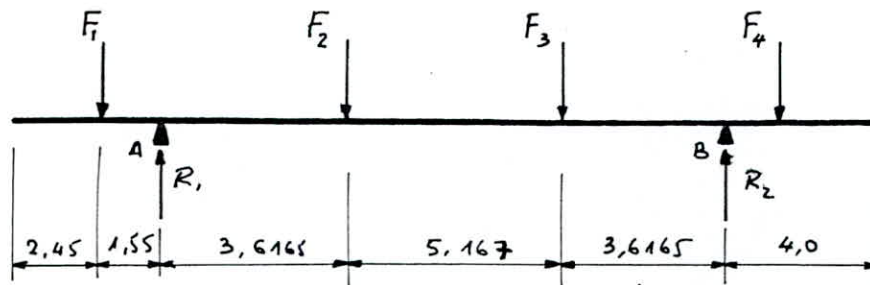
donc l'espacement sera :  $e = 22 \text{ cm}$

Par contre, pour les armatures transversales supérieures, on prendra un

$$\text{ferraillage de répartition : } A_r = \frac{A}{10} = \frac{43,97}{10} = 4,397 \text{ cm}^2 \text{ soit } 2 \text{ HA } 20 = 6,28 \text{ cm}^2$$

Nappe Longitudinale:

On suppose que la semelle est appuyée sur les 2 fûts et soumise aux réaction des pieux



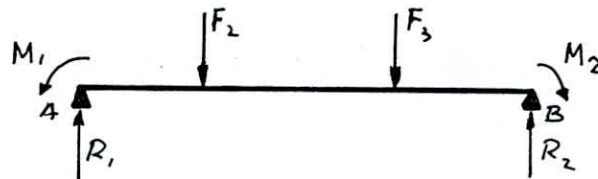
$$F_1 = 162,1 + 151,58 = 313,68 \text{ KdaN}$$

$$F_2 = 178,31 + 167,79 = 346,1 \text{ KdaN}$$

$$F_3 = 194,52 + 184 = 378,52 \text{ KdaN}$$

$$F_4 = 210,73 + 200,21 = 410,94 \text{ KdaN}$$

Le système précédent est équivalent au système :

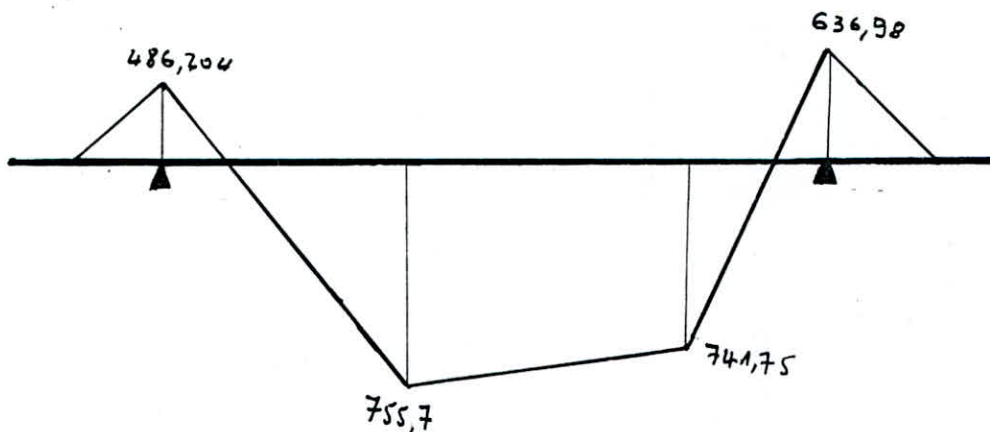


avec :  $M_1 = F_1 \times 1,55 = 313,68 \times 1,55 = 486,204 \text{ mKdaN}$

$$M_2 = F_4 \times 1,55 = 410,94 \times 1,55 = 636,957 \text{ mKdaN}$$

$$\sum M/A = 0 \Rightarrow R_2 = 381,22 \text{ KdaN}$$

$$\sum M/B = 0 \Rightarrow R_1 = 343,4 \text{ KdaN}$$



Ferrailage:

Les armatures supérieures nécessaires dans le sens longitudinal doivent aller au delà des pieux extrêmes.

$$M = 636,98 \text{ mKdaN}$$

$$h_t = 150 \text{ cm} ; h = h_t - 0,08 = 142 \text{ cm} ; B = 7,2 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{15M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \cdot 636,98 \cdot 10^5}{2667 \cdot 720 \cdot 142^2} = 0,02467 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9315 \\ \kappa = 58 \end{cases}$$

$$A = \frac{M}{\bar{\sigma}_a \epsilon h} = \frac{636,98 \cdot 10^5}{2667 \cdot 0,9315 \cdot 142} = 180,56 \text{ cm}^2$$

$$\text{Soit } 24 \text{ HA } 32 = 193,01 \text{ cm}^2 ; e = 33 \text{ cm}$$

$$\sigma'_b = \frac{\bar{\sigma}_a}{\kappa} = \frac{2667}{58} = 45,98 \text{ bar} < \bar{\sigma}'_b = 180 \text{ bar}$$

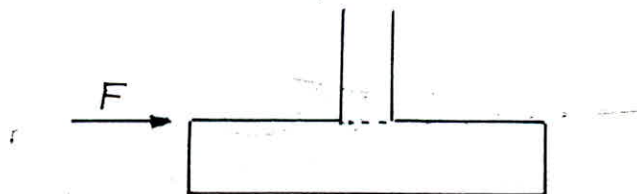
Dans la zone centrale (entre pieux extrêmes), la section d'armatures inférieures sera:

$$A = \frac{M}{\frac{7}{8} \bar{\sigma}_a} = \frac{755,7 \cdot 10^5}{\frac{7}{8} \cdot 142 \cdot 2667} = 228,05 \text{ cm}^2$$

$$\text{soit } 30 \text{ HA } 32 = 241,26 \text{ cm}^2 ; e = 25 \text{ cm}$$

Vérification au cisaillement:

a/ Au niveau de la jonction fût - semelle:



F: effort de freinage type Bc

$$\sigma_b = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4F}{\pi D^2} = \frac{4 \times 15 \cdot 10^3}{\pi \cdot 200^2} = 0,477 \text{ bar} < \bar{\sigma}_b$$

b/ Au niveau de la semelle:

$$\sigma_b = \frac{T}{b z} = \frac{210,73 \cdot 10^3}{720 \times \frac{7}{8} \cdot 142} = 2,356 \text{ bar} < \bar{\sigma}_b = 3,5 \bar{\sigma}'_b = 22,5 \text{ bar}$$

Vérification à la résistance de la semelle sous les sollicitations du 2<sup>ème</sup> genre:

On considèrera la même combinaison que précédemment à savoir:

$$CP + B_{c_{4v,2t}} + 2 \text{ trottoirs}_{,2t} + F_r(B_c) + SI$$

$$V = \pm 2 A (CP + 0,5 P_v)$$

$$= \pm 2 \times 0,091 (1190,81 + 0,5 (196,536 + 18,84)) = \pm 236,33 \text{ KdaN}$$

$$N_{\text{sup}} = 1190,81 + 196,536 + 18,84 + 236,33 = 1642,516 \text{ KdaN}$$

$$M_x = M_{t_1} = M_t + M_p \sin \theta = 1281,21 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = M_{q_1} = M_p \cos \theta = 292,74 \text{ mKdaN}$$

Recherche des réactions des pieux:

$$F_1 = \frac{1642,516}{8} - \frac{1281,21 \times 7,7505}{266,98} + \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 182,2 \text{ KdaN}$$

$$F_2 = \frac{1642,516}{8} + \frac{1281,21 \times 7,7505}{266,98} + \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 256,6 \text{ KdaN}$$

$$F_3 = \frac{1642,516}{8} - \frac{1281,21 \times 7,7505}{266,98} - \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 154,05 \text{ KdaN}$$

$$F_4 = \frac{1642,516}{8} + \frac{1281,21 \times 7,7505}{266,98} - \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 228,43 \text{ KdaN}$$

$$F_5 = \frac{1642,516}{8} - \frac{1281,21 \times 2,5835}{266,98} + \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 207 \text{ KdaN}$$

$$F_6 = \frac{1642,516}{8} + \frac{1281,21 \times 2,5835}{266,98} + \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 231,79 \text{ KdaN}$$

$$F_7 = \frac{1642,516}{8} - \frac{1281,21 \times 2,5835}{266,98} - \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 178,84 \text{ KdaN}$$

$$F_8 = \frac{1642,516}{8} + \frac{1281,21 \times 2,5835}{266,98} - \frac{292,74 \times 2,6}{54,08} = 203,64 \text{ KdaN}$$

$$\max F_i = F_2 = 256,6 \text{ KdaN} < 2 F_p = 600 \text{ KdaN}$$

$$\min F_i = F_3 = 154,05 \text{ KdaN} > 0$$

Pas de poinçonnement ni d'arrachement du pieu.

Nappe transversale:

$$A = 43,97 \text{ cm}^2 (= 14 \text{ HA}20)$$

$$h = 1,45 \text{ m} ; b = 20,4 \text{ m}$$

$$M = (F_{\max} - F_{\min}) \times 2,6 = 266,63 \text{ mKdaN}$$

$$\bar{\omega} = \frac{m}{15} \cdot \frac{100A}{B} = \frac{100 \cdot 43,97}{2040 \times 145} = 0,01486 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9784 \\ k = 216 \end{cases}$$

$$\sigma_a = \frac{M}{A \epsilon h} = \frac{266,63 \cdot 10^5}{43,97 \times 0,9784 \times 145} = 4274 \text{ bar} > \sigma_{\text{em}} = 4200 \text{ bar}$$

La contrainte dans les aciers dépasse la valeur nominale, il faudra donc augmenter la section des aciers

on prendra donc 20 HA14 soit  $A = 62,82 \text{ cm}^2$

$$\bar{\omega} = \frac{100 \cdot 62,82}{2040 \times 145} = 0,0212 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9744 \\ k = 180 \end{cases}$$

$$\sigma_a = \frac{M}{A \epsilon h} = \frac{266,63 \cdot 10^5}{145 \cdot 0,9744 \times 62,82} = 3004 \text{ bar} < \sigma_{\text{em}}$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{3004}{180} = 16,69 \text{ bar} \ll 1,5 \bar{\sigma}'_b = 270 \text{ bar}$$

Donc transversalement, on aura :

lit inférieur : 20 HA14

lit supérieur : 2 HA14

Nappe Longitudinale:

$$\text{On a un moment } M = (F_2 + F_4) \times 1,55 = 751,8 \text{ mKdaN}$$

$$A = 180,56 \text{ cm}^2 ; h = 142 \text{ cm} ; b = 720 \text{ cm}$$

$$\bar{\omega} = 100 \cdot \frac{186,56}{720 \times 142} = 0,18247 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9306 \\ k = 57 \end{cases}$$

$$\sigma_a = \frac{M}{A \epsilon h} = \frac{751,8 \cdot 10^5}{186,56 \cdot 0,9306 \cdot 142} = 3049,5 \text{ bar} < \sigma_{\text{em}}$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{3049,5}{57} = 53,5 \text{ bar} < 1,5 \bar{\sigma}'_b = 270 \text{ bar}$$

Ceci pour les armatures supérieures.

Armatures inférieures:

$$M = 859,25 \text{ mKdaN}$$

$$A = 241,26 \text{ cm}^2 ; b = 720 \text{ cm} ; h = 142 \text{ cm}$$

$$\bar{\omega} = 100 \cdot \frac{241,26}{720 \times 142} = 0,236 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9224 \\ \kappa = 49,4 \end{cases}$$

$$\sigma_a = \frac{M}{A \epsilon h} = \frac{859,25 \cdot 10^5}{241,26 \cdot 0,9224 \cdot 142} = 2719,1 \text{ bar} < \sigma_{\text{adm}}$$

$$\sigma'_b = \frac{\sigma_a}{\kappa} = \frac{2719,1}{49,4} = 55,04 \text{ bar} < 1,5 \bar{\sigma}'_b = 270 \text{ bar}$$

Conclusion:Nappe transversale

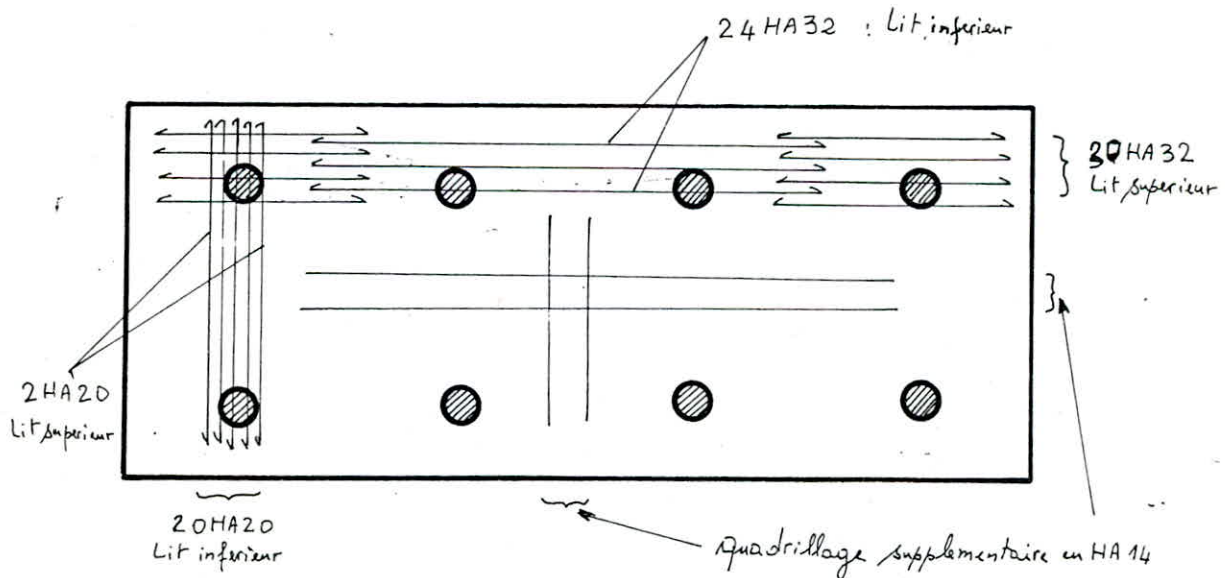
lit supérieur : 2 HA20

lit inférieur : 20 HA20

Nappe Longitudinale

lit supérieur : 30 HA32

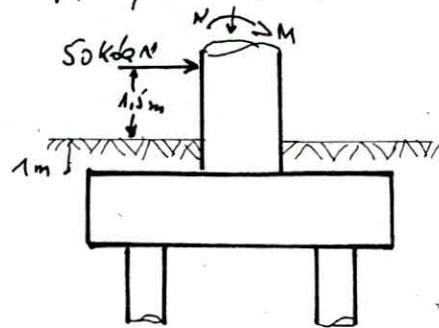
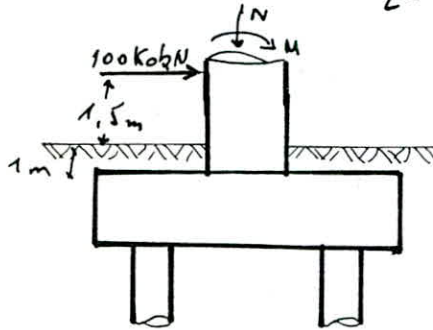
lit inférieur : 24 HA32



### Vérification au choc de véhicules routiers:

Valeurs nominales des chocs de véhicules.

- choc frontal  $F_1 = 100 \text{ kdaN}$  appliqué à  $1,50 \text{ m}$  du T.N.
- choc latéral  $F_2 = 50 \text{ kdaN}$  appliqué à  $1,50 \text{ m}$  du T.N.



Moment résultant :

$$M = 100 \times 2,5 + 257,52 = 507,52 \text{ m kdaN}$$

$$N = 363,96 \text{ kdaN}$$

Soit la sollicitation  $G + 1,5 P \rightarrow$

$$M = \frac{257,52}{1,2} \times 1,5 = 321,9 \text{ m kdaN}$$

$$N = \frac{363,96}{1,2} \times 1,5 = 454,95 \text{ kdaN}$$

$$e = \frac{M}{N} = 70,75 \text{ cm} < \frac{R+r}{2} = \frac{165}{2} = 82,5 \text{ cm}$$

$$B = 2\pi \left(\frac{R+r}{2}\right)(R-r) = 72534 \text{ cm}^2$$

$$A = 93,29 \text{ cm}^2 \rightarrow B + nA = 73933,5 \text{ cm}^2$$

$$\frac{I}{v} = 73933,5 \times 82,5 = 6099513,8 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_1' = \frac{N}{B+nA} + \frac{M}{\frac{I}{v}} = \frac{454,95 \cdot 10^3}{73933,5} + \frac{321,9 \cdot 10^5}{6099513,8} = 11,43 \text{ bar}$$

$$\sigma_2' = 6,153 - 5,27 = 0,876 \text{ bar}$$

$$\sigma_a' = n \sigma_1' = 15 \times 11,43 = 171,45 \text{ bar} < \bar{\sigma}_a$$

Donc la vérification au choc est satisfaite



## ETUDE DE LA PILE-CULEE

Les culées sont les appuis extrêmes d'un pont. Ce sont des éléments de raccordement de l'ouvrage à la route.

Les culées jouent un double rôle : assurer l'appui du tablier d'une part et le soutènement des terres d'une autre part.

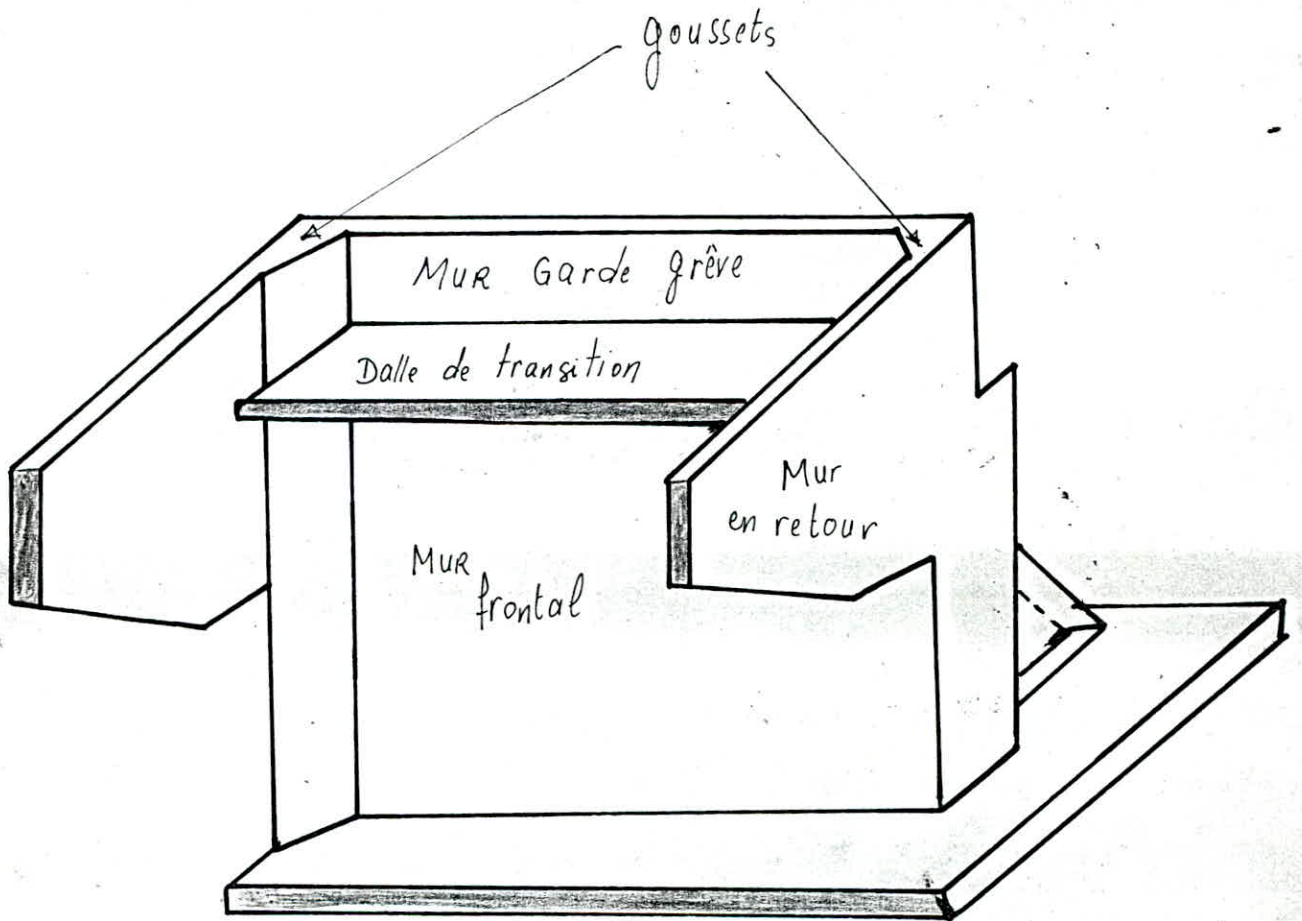
La culée est formée d'un groupe de murs :

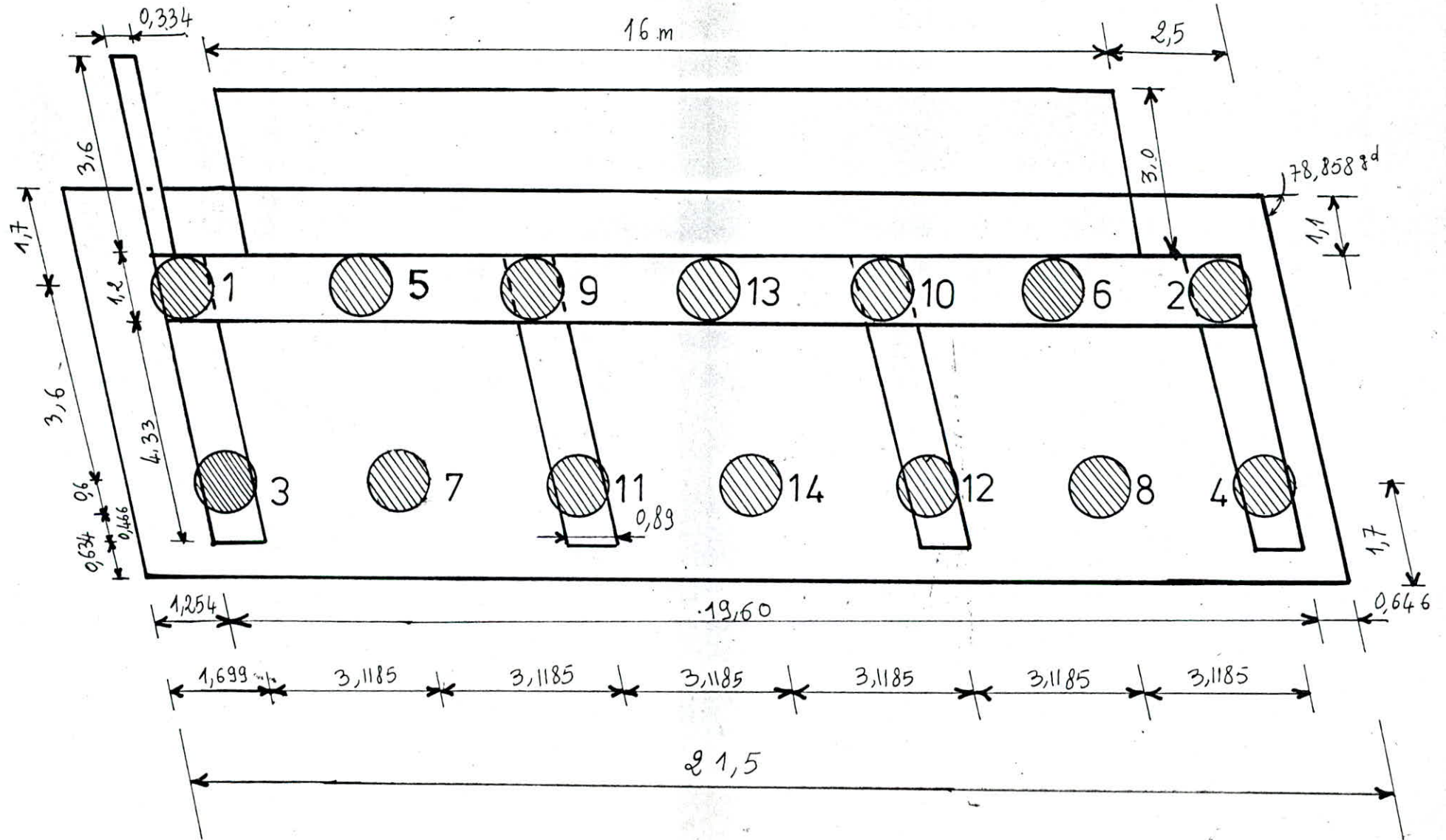
- Un mur frontal sur lequel s'appuie le tablier (et qui soutient les terres)
- Deux murs en retour dont le rôle est d'assurer le soutènement des terres en remblais
- Un mur garde grève dont le rôle est d'isoler le remblai du tablier.
- Une dalle de transition qui limite les déformations de la chaussée dues au tassement des remblais derrière la culée.

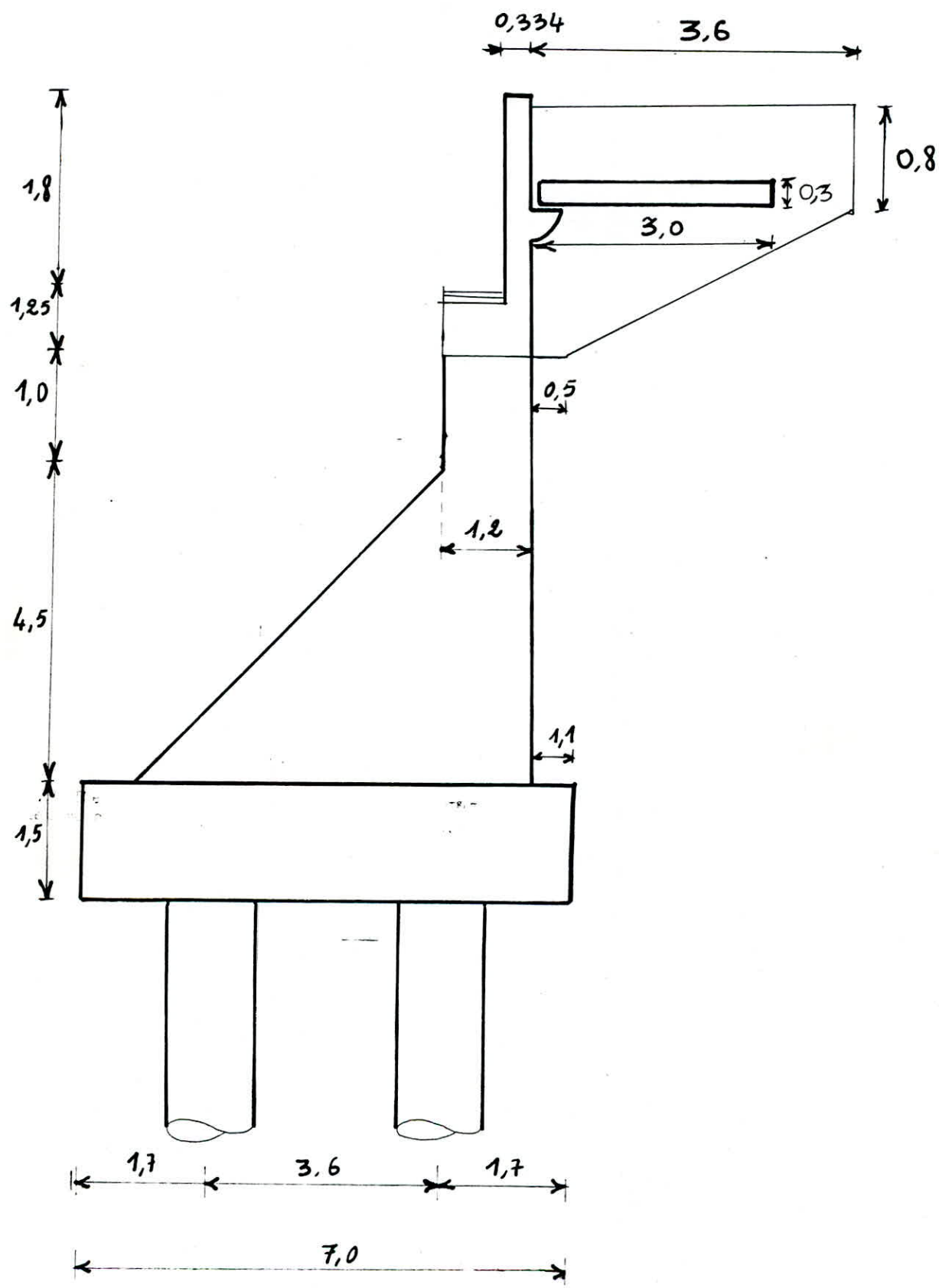
La partie supérieure du mur de front présente vers l'avant un rideau horizontal surmonté de dés d'appuis sur lesquels repose le tablier par l'intermédiaire d'appareil d'appui.

On doit prévoir lors de l'exécution de la culée les dispositifs suivants :

- Un dispositif de drainage évacuant ainsi les eaux qui s'infiltrent par le joint de chaussée.
- Des trous ou barbicanes dans le mur frontal pour éviter que l'eau le met en charge.

Conception de la Pile Culée





## Determination des axes principaux de la semelle:

### - Determination du centre de gravité de la section

$$X_G = \frac{\sum S_i x_i}{\sum S_i} \quad ; \quad Y_G = \frac{\sum S_i y_i}{\sum S_i}$$

$$\text{ou } S_i = \pi \frac{\phi^2}{4} = \pi \cdot \frac{1,2^2}{4} = 1,13 \text{ m}^2$$

On a 14 pieux identiques de 1,2 m de diamètre

On fixe un repère droit  $O_x, O_y$  d'origine confondue avec le centre de gravité du pieu  $n^o = 1$ . On a alors :

$$\begin{aligned} 14 S X_G &= S \times 0 + S \times 3,1185 + S \times 2 \times 3,1185 + S \times 3 \times 3,1185 + S \times 4 \times 3,1185 + S \times 5 \times 3,1185 \\ &+ S \times 6 \times 3,1185 + S \cdot 1,183 + S(1,183 + 3,1185) + S(1,183 + 2 \times 3,1185) \\ &+ S(1,183 + 3 \times 3,1185) + S(1,183 + 4 \times 3,1185) + S(1,183 + 5 \times 3,1185) \\ &+ S(1,183 + 6 \times 3,1185) \end{aligned}$$

$$X_G = \frac{139,258}{14} = 9,947 \text{ m}$$

$$14 S Y_G = 7 \times S \times 0 + 7 \times S \times 3,4 \rightarrow Y_G = \frac{-7 \times 3,4}{14} = -1,7 \text{ m}$$

### - Determination des axes principaux d'inertie:

$$I_{xx} = 7 S \times (1,7)^2 \times 2 + 14 \frac{\pi \phi^4}{64} = 47,144 \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} I_{yy} &= 2 S (9,947^2 + 6,8285^2 + 3,71^2 + 0,5915^2 + 2,527^2 + 5,6455^2 + 8,764^2) + \\ &+ \frac{\pi \phi^4}{64} \times 14 \end{aligned}$$

$$I_{yy} = 549,5 \times S + \frac{\pi \phi^4}{64} \times 14 = 622,36 \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} I_{xy} &= S \times 1,7 (-9,947 - 6,8285 - 3,71 - 0,5915 + 2,527 + 5,6455 + 8,764) \\ &+ S (-1,7) (-8,764 - 5,6455 - 2,527 + 0,5915 + 3,71 + 6,8285 + 9,947) \end{aligned}$$

$$I_{xy} = -15,91 \text{ m}^4$$

$$\tan 2\alpha = \frac{-2 I_{xy}}{I_{xx} - I_{yy}} = \frac{2 \times 15,91}{47,144 - 622,36} = -0,5531$$

$$\alpha = -1,583^\circ$$

On étudie la stabilité en calculant les réactions sur les 4 pieux extrêmes /  
 au axes principaux d'inertie  $\xi$  et  $\eta$  à l'aide de la formule de flexion composée déviée.

$$F = \frac{N}{n} \pm \left[ \frac{M_{\eta}}{I_{\eta}} \xi \pm \frac{M_{\xi}}{I_{\xi}} \eta \right] \cdot S$$

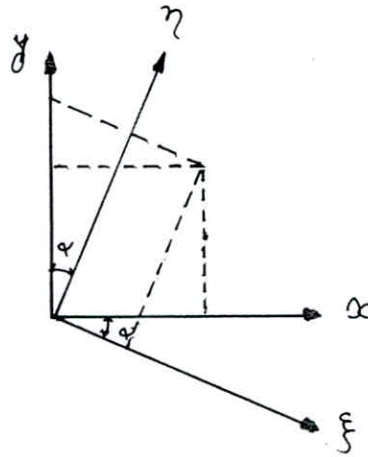
Changement d'axe :

$$\begin{cases} \xi = x \cos \alpha - y \sin \alpha \\ \eta = x \sin \alpha + y \cos \alpha \end{cases}$$

Les moments d'inertie par rapport

aux axes principaux sont :

$$\begin{cases} I_{\xi\xi} = I_{xx} \cos^2 \alpha + I_{yy} \sin^2 \alpha - I_{xy} \sin 2\alpha \\ I_{\eta\eta} = I_{xx} \sin^2 \alpha + I_{yy} \cos^2 \alpha + I_{xy} \sin 2\alpha \end{cases}$$



On calcule  $N, M_x, M_y$  sous les différentes combinaisons possibles du 1<sup>er</sup>  
 et 2<sup>ème</sup> genre, on projette les moments  $M_x, M_y$  sur les axes principaux.

$$M_{\xi} = M_x \cos \alpha + M_y \sin \alpha$$

$$M_{\eta} = M_x \sin \alpha - M_y \cos \alpha$$

A.N:  $\alpha = -1,583^\circ$

$$I_{\xi\xi} = 48,462 \text{ m}^4 \quad ; \quad I_{\eta\eta} = 621,11 \text{ m}^4$$

Caractéristique des pieux :

| N° du pieu | X (m)  | Y (m) | $\xi$ (m) | $\eta$ (m) | $W_{\xi}$ (m <sup>3</sup> ) | $W_{\eta}$ (m <sup>3</sup> ) |
|------------|--------|-------|-----------|------------|-----------------------------|------------------------------|
| 1          | -9,947 | 1,7   | -9,819    | 1,97       | 24,60                       | -62,80                       |
| 2          | 8,764  | 1,7   | 8,80      | 1,45       | 33,42                       | +70,58                       |
| 3          | -8,764 | -1,7  | -8,80     | -1,45      | -33,42                      | -70,58                       |
| 4          | 9,947  | -1,7  | 9,819     | -1,97      | -24,60                      | +62,80                       |

Calcul des charges et des moments :I Charges verticales1/ Semelle :

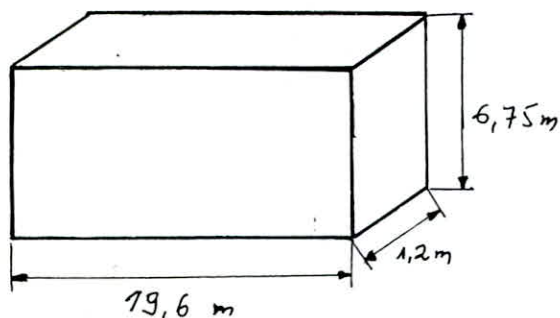
$$V = 21,5 \times 7 \times 1,5 \times 2,5 = 564,37 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,5 \text{ m} ; Y = 0 \text{ m}$$

$$V = 564,37 \text{ KdaN}$$

$$M_x = V \times Y = 0$$

$$M_y = V \times X = -282,18 \text{ mKdaN}$$

2/ Mur Frontal :

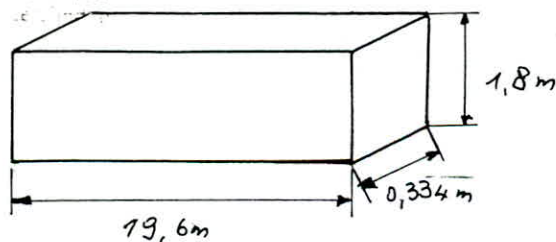
$$V = 19,6 \times 6,75 \times 1,2 \times 2,5 = 396,90 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m}$$

$$Y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = 674,73 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -256 \text{ mKdaN}$$

3/ Mur garde greve :

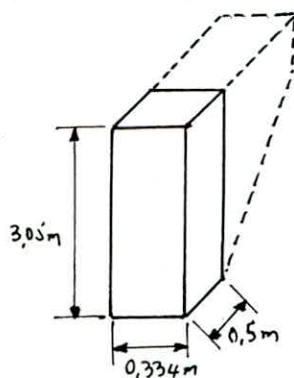
$$V = 19,6 \times 1,8 \times 0,334 \times 2,5 = 29,46 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,85 \text{ m}$$

$$Y = 2,11 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = 61,86 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -25,04 \text{ mKdaN}$$

4/ Mur en retour :

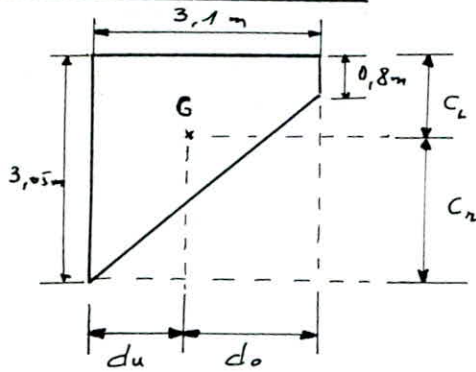
$$V = 0,5 \times 3,05 \times 0,334 \times 2,5 = 1,27 \text{ KdaN}$$

$$X = -10,30 \text{ m}$$

$$Y = 2,41 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = 3,06 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -13,08 \text{ mKdaN}$$

5/ Oruille de mur en retour:

$$V = \frac{3,05 + 0,8}{2} \times 3,1 \times 0,334 \times 2,5 = 4,98 \text{ kdaN}$$

Recherche du centre de gravité

$$a = 0,8 \text{ m} ; b = c_l + c_n = 3,05 \text{ m}$$

$$h = d_u + d_o = 3,1 \text{ m}$$

$$c_n = \frac{2b^2 + 2ab - a^2}{3(a+b)} = \frac{2}{3}b - \frac{a^2}{3(a+b)} = \frac{2}{3} \cdot 3,05 - \frac{0,8^2}{3(0,8+3,05)} = 1,97 \text{ m}$$

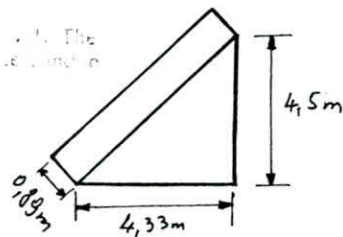
$$d_o = \frac{a + 2b}{3(a+b)} \cdot h = \frac{0,8 + 2 \times 3,05}{3(0,8 + 3,05)} \cdot 3,1 = 1,85 \text{ m}$$

$$d_u = \frac{2a + b}{3(a+b)} \cdot h = \frac{2 \times 0,8 + 3,05}{3(0,8 + 3,05)} \cdot 3,1 = 1,25 \text{ m}$$

$$X = -10,60 \text{ m} ; Y = 8,3 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 19,07 \text{ m kdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -52,79 \text{ m kdaN}$$

6/ MURS contre fort (4 murs):

$$V = 4 \times \frac{1}{2} \times 4,33 \times 4,5 \times 0,89 \times 2,5 = 86,7 \text{ kdaN}$$

$$X = -0,146 \text{ m} ; Y = -0,325 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = -28,17 \text{ m kdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -12,66 \text{ m kdaN}$$

7/ Tablier:

Le poids du tablier qui revient à la culée est:

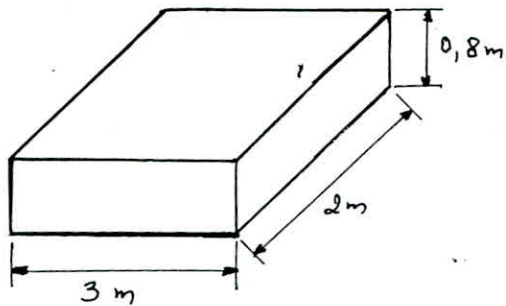
$$V = \frac{471,3}{2} = 235,65 \text{ kdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; Y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 400,6 \text{ m kdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -151,99 \text{ m kdaN}$$



8/ Butées para sísmiques:

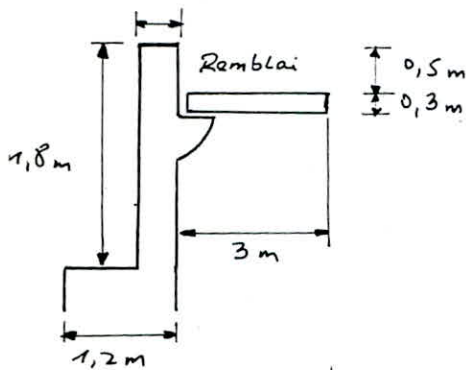
$$V = 2 \times 0,8 \times 2 \times 3 \times 2,5 = 24 \text{ KdaN}$$

$$X = 0,564 \text{ m}$$

$$Y = -0,69 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = -16,56 \text{ m KdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = 13,53 \text{ m KdaN.}$$

9/ Dalle de transition:

La dalle de transition repose sur deux appuis

$$Q = 3 \times 16 \times 0,3 \times 2,5 = 36 \text{ KdaN}$$

$$V = \frac{Q}{2} = 18 \text{ KdaN.}$$

$$X = -1,2 \text{ m} ; Y = 3,59 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 64,62 \text{ m KdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -21,60 \text{ m KdaN.}$$

10/ Remblai sur dalle de transition:

$$\gamma_R = 1,8 \text{ KdaN/m}^3$$

$$X = -1,2 \text{ m} ; Y = 3,59 \text{ m}$$

$$Q = 0,5 \times 3 \times 16 \times 1,8 = 43,2 \text{ KdaN} \rightarrow V = \frac{Q}{2} = 21,6 \text{ KdaN}$$

$$M_x = V \cdot y = 77,54 \text{ m KdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -25,92 \text{ m KdaN}$$

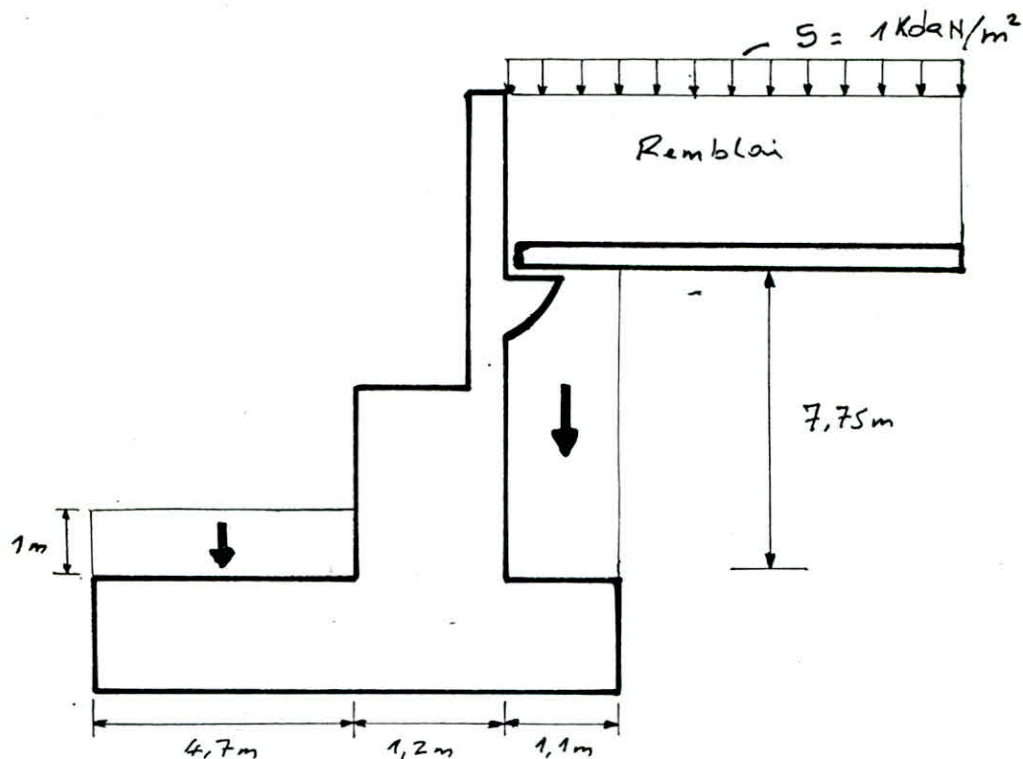
11/ Poids des terres:111/ Semelle avant:

$$V = 1,1 \times 7,75 \times 21,5 \times 1,8 = 329,92$$

$$X = -1,1 \text{ m} ; Y = 2,69 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 887,48 \text{ m KdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -362,91 \text{ m KdaN}$$



112/ Semelle arrière:

$$V = [21,5 - 4 \times 0,89] \times 4,7 \times 1 \times 1,8 = 151,77 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,35 \text{ m} \quad ; \quad Y = -1,182 \text{ m}$$

$$M_x = V \times Y = -179,39 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \times X = -53,12 \text{ mKdaN}$$

12/ Surcharges du remblai (Rouleau de compactage):

D'après le fascicule 61-TITRE II du CPC, la charge du remblai due au rouleau de compactage vaut  $q = 1 \text{ KdaN/m}^2$

$$V = 21,5 \times 1,1 \times 1 \times 1,2 = 28,38 \text{ KdaN}$$

$$X = -1,1 \text{ m} \quad ; \quad Y = 2,69 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = 76,34 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -31,22 \text{ mKdaN}$$

13/ Surcharge de trottoir: (150 Kg/m<sup>2</sup>)131/ Sur tablier:

$$V = 2 \times 2,1665 \times \frac{29}{2} \times 0,15 \times 1,2 = 11,31 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 19,22 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -7,29 \text{ mKdaN}$$

132/ Sur Pile Cubé:

$$V = 2 \times 2,1665 \times 3,6 \times 0,15 \times 1,2 = 2,81 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 4,77 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -1,81 \text{ mKdaN}$$

14/ Surcharges du trafic:141/ Système Bc 4 camions:

$$V = 1,2 \times 145,3 = 174,36 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 296,41 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -112,46 \text{ mKdaN}$$

142/ Bc min:

$$V = 1,2 \times 33,76 = 40,5 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot y = 68,85 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -26,12 \text{ mKdaN}$$

143/ A 4voies:

$$V = 1,2 \times 178,49 = 214,19 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; y = 1,7 \text{ m} ; M_x = V \cdot y = 364,12 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -138,15 \text{ mKdaN}$$

144/ MC120:

$$V = 1,2 \times 98,43 = 118,11 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; Y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = 200,78 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -76,18 \text{ mKdaN}$$

145/ système D:

$$V = 1,2 \times 163,03 = 195,63 \text{ KdaN}$$

$$X = -0,645 \text{ m} ; Y = 1,7 \text{ m}$$

$$M_x = V \cdot Y = 332,57 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = V \cdot X = -126,18 \text{ mKdaN}$$

II Charges horizontales:Calcul du coefficient de poussée

- Conditions normales  $\lambda = \frac{1}{3}$  selon Rankine

- Conditions sismiques : selon Coulomb modifié par MONOBE-OKABE

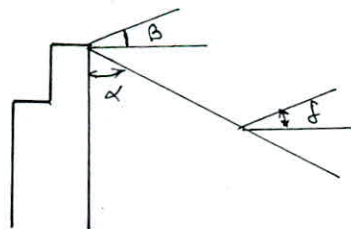
$$\lambda_s = \frac{\cos^2(\phi + \alpha - \theta)}{\cos^2 \alpha \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cos(\alpha + \beta)}}\right)} \cdot K \cdot \frac{\cos(\delta - \alpha)}{\cos(\delta - \alpha + \theta)}$$

$$K = \sqrt{E_H^2 + (1 \pm E_V)^2} \quad E_H = 10\% ; E_V = 7\% \quad (\text{selon SETRA})$$

$$\theta = \arctg \frac{E_H}{1 \pm E_V}$$

$$\alpha = \beta = \delta = 0$$

$\phi = 30^\circ$  : coefficient de frottement interne du remblai.



On obtient : 
$$\lambda_s = \frac{\cos^2(\phi - \theta) \cdot K}{(1 + \sin \phi)^2 \cos \theta}$$

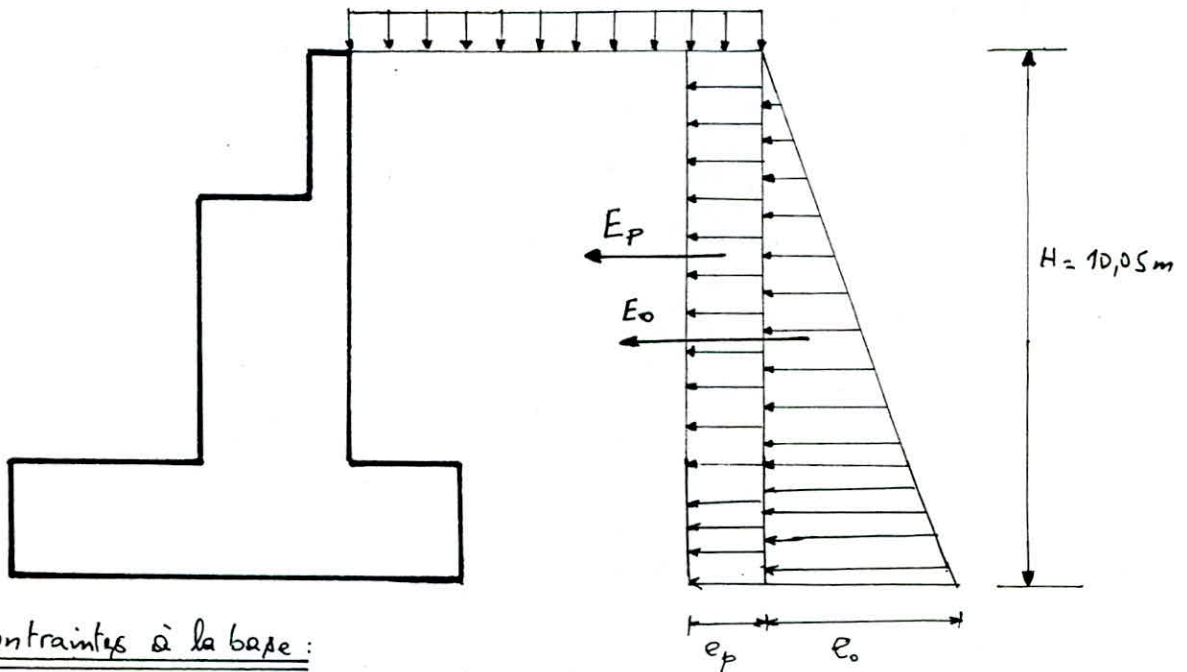
$$K_1 = \sqrt{E_H^2 + (1 + E_V)^2} = 1,0746$$

$$K_2 = \sqrt{E_H^2 + (1 - E_V)^2} = 0,9354$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{E_H}{1 + E_V} = 5,339$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{E_H}{1 - E_V} = 6,137$$

$$\lambda_s = 0,396$$



Contraintes à la base :

$$e_o = \lambda_s \cdot \gamma_R \cdot H \cdot L$$

$$e_p = \lambda_s \cdot p \cdot L$$

Poussée :

$$E_o = \frac{1}{2} e_o \cdot H \quad ; \quad E_p = e_p \cdot H$$

- Poussée des terres sur mur frontal:

1/ Poussée du remblai

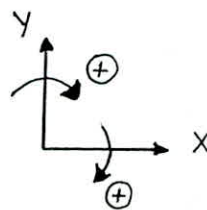
$$E_o = \frac{1}{2} \cdot \lambda_s \cdot \gamma_R \cdot H^2 \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 0,396 \cdot 1,8 \cdot 10,05^2 \cdot 19,6 = 705,54 \text{ kdaN}$$

2/ Poussée des surcharges:

$$E_p = \lambda_s \cdot p \cdot L \cdot H = 0,396 \cdot 1 \cdot 19,6 \cdot 10,05 \cdot 1,2 = 93,6 \text{ kdaN}$$

La poussée sur le mur frontal est normale à celui-ci et parallèle à l'axe Ox donc elle provoque un moment autour de l'axe Ox

Convention de signe :



$$M_{x_1} = E_0 \cdot \frac{H}{3} = 705,54 \cdot \frac{10,05}{3} = 2363,56 \text{ mKdaN}$$

$$M_{x_2} = E_{p_2} \times \frac{H}{2} = 93,6 \times \frac{10,05}{2} = 470,34 \text{ mKdaN}$$

- Poussée des terres sur mur en retour:

$$E_0 = \frac{1}{2} \times 0,396 \cdot 1,8 \times \overline{3,05}^2 \times \frac{3,6}{2} = 5,96 \text{ KdaN}$$

$$E_p = 0,396 \times 1 \times 1,2 \times 3 \times \frac{3,6}{2} = 2,56 \text{ KdaN}$$

Ces poussées sont parallèles à l'axe Ox et provoquent des moments autour de l'axe Oy

$$M_{y_1} = E_0 \cdot \left(\frac{h}{3} + 7\right) = 5,96 \cdot \left(\frac{3,05}{3} + 7\right) = 47,78 \text{ mKdaN}$$

$$M_{y_2} = E_p \left(\frac{h}{2} + 7\right) = 2,56 \left(\frac{3,05}{2} + 7\right) = 21,82 \text{ mKdaN}$$

- Poussée du talus sur le mur contrefort:

$$E_p = \frac{1}{2} \times 0,396 \times 4,33 \times \overline{4,5}^2 \times 1,8 = 31,25 \text{ KdaN}$$

$$M_y = E_p \cdot \frac{h}{3} = 31,25 \times \frac{4,5}{3} = 46,87 \text{ mKdaN}$$

- Freinage:

$$* B_c: \quad H_F = \pm 15 \text{ KdaN}$$

$$M_x = \pm 15 \times 10,05 = \pm 150,75 \text{ mKdaN}$$

\* A:

$$H_F = \pm 8,3 \text{ KdaN}$$

$$M_x = \pm 8,3 \times 10,05 = \pm 83,41 \text{ mKdaN}$$

1/ Charges permanentes

| Designation                    | V (kdaN) | P (kdaN) | X (m)  | $M_y$ (mkdaN) | Y (m)  | $M_x$ (mkdaN) | Z (m) |
|--------------------------------|----------|----------|--------|---------------|--------|---------------|-------|
| Semelle                        | 564,37   |          | -0,5   | -282,18       | 0      | 0             | 0     |
| Mur frontal                    | 396,90   |          | -0,645 | -256          | 1,70   | 674,73        |       |
| Mur garde grève                | 29,46    |          | -0,85  | -25,04        | 2,11   | 61,86         |       |
| Mur en retour                  | 1,27     |          | -10,30 | -13,08        | 2,41   | 3,06          |       |
| Oreille mur en retour          | 4,98     |          | -10,60 | -52,79        | 3,83   | 19,07         |       |
| Mur contre fort                | 86,70    |          | -0,146 | -12,66        | -0,325 | -28,17        |       |
| Sablier                        | 235,65   |          | -0,645 | -151,99       | 1,70   | 400,6         |       |
| Butée parasismique             | 24       |          | 0,564  | 13,53         | -0,69  | -16,56        |       |
| Dalle de transition            | 18       |          | -1,20  | -21,6         | 3,59   | 64,62         |       |
| Remblai au dalle de transition | 21,6     |          | -1,20  | -25,92        | 3,59   | 77,54         |       |
| Terre sur semelle avant        | 329,92   |          | -1,10  | -362,91       | 2,69   | 887,48        |       |
| Terre sur semelle arrière      | 151,77   |          | -0,35  | -53,12        | -1,182 | -179,39       |       |
| $\Sigma$                       | 1864,62  |          |        | -1243,76      |        | 1964,84       |       |

2/ Surcharges:

| Designation                          | V (kdaN) | P (kdaN) | X (m)  | $M_y$ (mkdaN) | Y (m) | $M_x$ (mkdaN) | Z (m) |
|--------------------------------------|----------|----------|--------|---------------|-------|---------------|-------|
| Remblai<br>(Rouleau de compactage)   | 28,38    |          | -1,10  | -31,22        | 2,69  | 76,34         |       |
| Surcharge de trottoir sur tablier    | 11,31    |          | -0,645 | -7,29         | 1,70  | 19,22         |       |
| Surcharge de trottoir sur Pile Culée | 2,81     |          | -0,645 | -1,81         | 1,70  | 4,77          |       |
| B <sub>c</sub> (4 convois)           | 174,36   |          | -0,645 | -112,46       | 1,70  | 296,41        |       |
| B <sub>c</sub> min                   | 40,5     |          | -0,645 | -26,12        | 1,70  | 68,85         |       |
| A 4 voies                            | 214,19   |          | -0,645 | -138,15       | 1,70  | 364,12        |       |
| M <sub>c</sub> 120                   | 118,11   |          | -0,645 | -76,18        | 1,70  | 200,78        |       |
| D                                    | 195,63   |          | -0,645 | -126,18       | 1,70  | 332,57        |       |

3/ Poussées:

| Designation             | V (kdaN) | P (kdaN)  | X (m) | $M_y$ (mkdaN) | Y (m) | $M_x$ (mkdaN) | Z (m) |
|-------------------------|----------|-----------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| Poussée MF $\Delta$     |          | 705,54    |       |               |       | 2363,56       | 3,35  |
| Poussée MF $\square$    |          | 93,60     |       |               |       | 470,34        | 5,025 |
| Poussée MR $\Delta$     |          | 5,96      |       | 47,78         |       |               | 8,01  |
| Poussée MR $\square$    |          | 2,56      |       | 21,82         |       |               | 8,525 |
| Poussée MCF $\Delta$    |          | 31,25     |       | -46,87        |       |               | 1,5   |
| Freinage B <sub>c</sub> |          | $\pm 15$  |       |               |       | $\pm 150,75$  | 10,05 |
| Freinage A              |          | $\pm 8,3$ |       |               |       | $\pm 83,41$   | 10,05 |



## Vérification de la stabilité sous la sollicitation du 1<sup>er</sup> genre:

Pour se faire, on doit considérer un certain nombre de cas de charges appliqués aux pieux les plus sollicités (1, 2, 3, 4)

### Cas de Charges:

- 1/ Pile Culée vide ( sans tablier ni remblai )
- 2/ Pile Culée en service ( poids propre + remblai + tablier vide )
- 3/ Pile Culée en service +  $A_{14v}$  + surch. trottoir + surcharge remblai + freinage .
- 4/ Pile Culée en service +  $B_{4convois}$  + trottoir + surch. remblai + freinage .
- 5/ Pile Culée en service +  $N_{120}$  + trottoir + surch. remblai .
- 6/ Pile Culée en service +  $D$  + trottoir + surch. remblai .
- 7/ Pile Culée en service +  $B_{min}$  + trottoir + surch. remblai + freinage
- 8/ Pile Culée en service +  $B_{min}$  + freinage .
- 9/ Pile Culée en service +  $B_{4convois}$  + freinage .

| Cas de charges | Effort    |                        |                        |                        |                        | Reaction sur les pieux (Kolan) |        |        |        |
|----------------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|
|                | V (Kolan) | M <sub>x</sub> (Kolan) | M <sub>y</sub> (Kolan) | M <sub>z</sub> (Kolan) | M <sub>∑</sub> (Kolan) | 1                              | 2      | 3      | 4      |
| 1              | 1125,7    | 778,6                  | -649,8                 | 796,2                  | -628                   | 128,28                         | 97,27  | 117,38 | 105,68 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 55,13                          | 43,43  | 63,54  | 32,53  |
| 2              | 1864,6    | 1964,8                 | -1243,7                | 1998,4                 | -1188,9                | 246,37                         | 181,72 | 219,79 | 203,58 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 62,78                          | 46,58  | 84,65  | 19,99  |
| 3              | 2121,3    | 2436,3                 | -1422,2                | 2474,6                 | -1354,3                | 289,56                         | 213,51 | 256,87 | 240,82 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 62,22                          | 46,58  | 89,53  | 13,48  |
| 4              | 2081,5    | 2361,5                 | -1396,5                | 2399,2                 | -1330,7                | 282,83                         | 208,49 | 251,10 | 234,94 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 62,41                          | 46,25  | 88,86  | 14,52  |
| 5              | 2025,2    | 2265,9                 | -1360,2                | 2302,6                 | -1297,1                | 273,76                         | 201,74 | 243,27 | 227,08 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 62,2                           | 46,03  | 87,56  | 15,54  |
| 6              | 2102,7    | 2397,7                 | -1410,2                | 2435,7                 | -1343,4                | 286,25                         | 211,   | 254,05 | 237,90 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 62,48                          | 46,32  | 89,34  | 14,13  |
| 7              | 1947,6    | 2284,7                 | -1310,2                | 2320                   | -1246,6                | 268,11                         | 197,60 | 237,51 | 223,25 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 54,97                          | 40,71  | 80,62  | 10,11  |
| 8              | 1905,1    | 2184,3                 | -1269,8                | 2218,5                 | -1208,9                | 259,73                         | 191,73 | 230,44 | 216,23 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 55,92                          | 41,71  | 80,42  | 12,42  |
| 9              | 2038,9    | 2411,9                 | -1356,2                | 2448,4                 | -1289,1                | 281,29                         | 207,78 | 249,05 | 229,63 |
|                |           |                        |                        |                        |                        | 56,36                          | 42,21  | 83,48  | 9,97   |

max  $F_{max} = 289,56$  Kolan (Pieu n° 1, 3<sup>ème</sup> cas de charge)

min  $F_{min} = 9,97$  Kolan (Pieu n° 4 ; 9<sup>ème</sup> cas de charge)

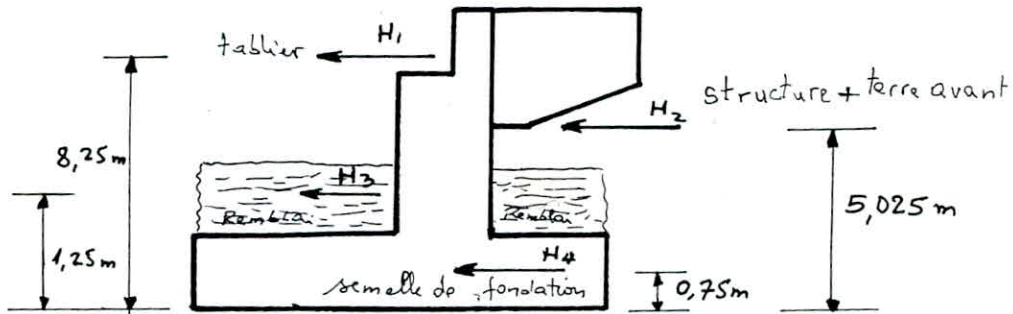
Vérification de la stabilité de la pile soulevée en conditions sismique :

$$G + P + SI$$

$$SI_H = \Delta \cdot G_v \quad : \text{composante horizontale}$$

$$SI_v = \pm 2\Delta (G_v + 0,5 P_v) \quad : \text{composante verticale}$$

1/ Composante horizontale



$$H_1 = 0,091 \times 235,65 = 21,44 \text{ KdaN}$$

$$H_2 = 0,091 (396,9 + 29,46 + 1,27 + 4,98 + 86,7 + 24 + 21,6 + 323,92)$$

$$H_2 = 81,43 \text{ KdaN}$$

$$H_3 = 0,091 \times 151,77 = 13,81 \text{ KdaN}$$

$$H_4 = 0,091 \times 564,37 = 51,36 \text{ KdaN}$$

Ces forces provoquent les moments suivants :

$$M_{x_1} = 21,44 \times 8,25 = 176,88 \text{ mKdaN}$$

$$M_{x_2} = 81,43 \times 5,025 = 409,18 \text{ mKdaN}$$

$$M_{x_3} = 13,81 \times 1,25 = 17,26 \text{ mKdaN}$$

$$M_{x_4} = 51,36 \times 0,75 = 38,52 \text{ mKdaN}$$

Effort sismique supplémentaire provoqué par les poussées des terres :

$$H_{(SI)_x} = 0,091 (705,54) = 64,2 \text{ KdaN}$$

$$H_{(SI)_y} = 0,091 (5,96 + 31,25) = 3,39 \text{ KdaN}$$

et provoque les moments :

$$M_x = 0,091 \times 2363,56 = 215,1 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 0,091 (47,78 - 46,87) = 0,08 \text{ mKdaN}$$

2/ Composante verticale:

$$SI_v = \pm 2 \Delta (G_v + 0,5 P_v) = \pm 2 \Delta G_v \pm \Delta P_v$$

\* Pour les charges permanentes:

$$\pm 2 \Delta G_v = \pm 2 \times 0,091 \times 1864,62 = \pm 339,36 \text{ KdaN}$$

ce qui provoque les moments:

$$M_x = \pm 2 \times 0,091 \times 1964,84 = \pm 357,6 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = \pm 2 \times 0,091 \times (-1243,76) = \mp 226,36 \text{ mKdaN}$$

\* Pour les surcharges:

- Surcharge remblai:  $\Delta P_v = 0,091 \times 28,38 = 2,58 \text{ KdaN}$

$$M_x = 0,091 \times 76,34 = 6,95 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 0,091 \times (-31,22) = -2,84 \text{ mKdaN}$$

- Surcharge de trottoir

\* Sur tablier:  $\Delta P_v = 0,091 \times 11,31 = 1,03 \text{ KdaN}$

$$M_x = 0,091 \times 19,22 = 1,75 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 0,091 \times (-7,29) = \pm 0,66 \text{ mKdaN}$$

\* Sur Pile Culée:  $\Delta P_v = 0,091 \times 2,81 = 0,256 \text{ KdaN}$

$$M_x = 0,091 \times 4,77 = 0,434 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 0,091 \times (\pm 1,81) = \pm 0,165 \text{ mKdaN}$$

- Surcharge de trafic:  $A_{\text{voies}}^-$  (le plus défavorable)

$$\Delta P_v = 0,091 \times 214,19 = 19,49 \text{ KdaN}$$

$$M_x = 0,091 \times 364,12 = 33,13 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 0,091 \times (-138,15) = -12,57 \text{ mKdaN}$$

- Surcharge Bc min:  $\Delta P_v = 0,091 \times 40,5 = 3,68 \text{ KdaN}$

$$M_x = 0,091 \times 68,85 = 6,26 \text{ mKdaN}$$

$$M_y = 0,091 \times (-26,12) = -2,37 \text{ mKdaN}$$

- Surcharges dues au freinage :

\* Freinage  $B_c$  :  $M_x = \pm 0,091 \times 150,75 = \pm 13,72 \text{ mkdaN}$

\* Freinage A :  $M_x = \pm 0,091 \times 83,41 = \pm 7,59 \text{ mkdaN}$

Soit les cas de charges suivants :

- ① Pile Culée vide +  $SI_H^{\oplus}$  +  $SI_V \downarrow$
- ② Pile Culée vide +  $SI_H^{\ominus}$  +  $SI_V \uparrow$
- ③ Pile Culée en service + remblai + trottoir +  $SI_H^{\oplus}$  +  $SI_V \downarrow$
- ④ Pile Culée en service +  $A_{4v}$  + freinage $^{\oplus}$  + remblai + trottoir +  $SI_H^{\oplus}$  +  $SI_V \downarrow$
- ⑤ Pile Culée en service +  $A_{4v}$  + freinage $^{\ominus}$  + remblai + trottoir +  $SI_H^{\ominus}$  +  $SI_V \uparrow$
- ⑥ Pile Culée en service +  $B_{cmin}$  + freinage $^{\ominus}$  +  $SI_H^{\ominus}$  +  $SI_V \uparrow$
- ⑦ Pile Culée en service +  $B_{cmin}$  + freinage $^{\oplus}$  +  $SI_H^{\oplus}$  +  $SI_V \uparrow$
- ⑧ Pile Culée en service +  $SI_H^{\ominus}$  +  $SI_V \uparrow$
- ⑨ Pile Culée en service +  $B_{c4v}$  + freinage +  $SI_H^{\oplus}$  +  $SI_V \downarrow$  + remblai + trottoirs

| Cas de charges | Effort   |                        |                        |                        |                        | Reaction (kdan)<br>sur les poutres |        |        |        |
|----------------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|
|                | V (kdan) | M <sub>x</sub> (mkdan) | M <sub>y</sub> (mkdan) | M <sub>z</sub> (mkdan) | M <sub>w</sub> (mkdan) | 1                                  | 2      | 3      | 4      |
| 1              | 1705     | 2002                   | -420                   | 2013                   | -365                   | 220,82                             | 184,00 | 195,69 | 207,68 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 35,88                              | 47,87  | 59,56  | 22,75  |
| 2              | 1705     | -445                   | -880                   | -421                   | -892                   | 157,17                             | 121,74 | 150,3  | 146,15 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 118,49                             | 93,27  | 121,6  | 86,39  |
| 3              | 2486     | 3288                   | -1054                  | 3315,6                 | -963                   | 347,20                             | 274,26 | 305,09 | 312,54 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 42,59                              | 50,04  | 80,88  | 7,94   |
| 4              | 2720     | 3783                   | -1179                  | 3804                   | -1074                  | 388,34                             | 305,71 | 340,10 | 349,69 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 38,87                              | 48,46  | 82,86  | 0,22   |
| 5              | 2720     | 1889                   | -1179                  | 1921                   | -1126                  | 302,78                             | 241,21 | 277,26 | 262,26 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 126,3                              | 111,3  | 147,36 | 85,78  |
| 6              | 2488     | 639                    | -1503                  | 680                    | -1485                  | 235,67                             | 176,93 | 224,48 | 182,23 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 173,19                             | 141,09 | 178,49 | 119,75 |
| 7              | 2488     | 2655                   | -1502                  | 2695                   | -1428                  | 327,2                              | 245,97 | 291,70 | 275,81 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 79,61                              | 63,73  | 109,45 | 28,22  |
| 8              | 2443,53  | 742                    | -1474                  | 782                    | -1453                  | 236,6                              | 177,71 | 224,24 | 184,31 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 164,76                             | 124,8  | 171,36 | 112,47 |
| 9              | 2677     | 3676                   | -1115                  | 3705                   | -1013                  | 379,63                             | 300,26 | 332,70 | 300,31 |
|                |          |                        |                        |                        |                        | 39,25                              | 49,72  | 82,15  | 2,79   |

## Calcul des murs de la pile calée:

On doit commencer par le mur garde grève et l'oreille du mur en retour qui influencent respectivement sur le mur frontal et le mur en retour.

La méthode utilisée est celle indiquée dans le document du SETRA: Piles et Tables 73

### 1/ Mur garde grève:

hauteur :  $h = 1,8 \text{ m}$  ; épaisseur  $e = 0,334 \text{ m}$

#### 1.1/ Actions et sollicitations:

\* Forces verticales. Elles comprennent:

- Le poids propre
- La réaction d'une charge indirectement appliquée sur le garde grève
- La réaction d'une dalle de transition.

Le poids propre et la réaction d'une charge supposée centrée ne créent pas de moments dans le garde grève: comme leur effet est plutôt favorable vis à vis des efforts de flexion dus aux forces horizontales, on les négligera.

En ce qui concerne la réaction de la dalle de transition, qui est excentrée d'environ  $0,3 \text{ m}$  par rapport au plan moyen du garde grève, il en résulte un moment indépendant de la hauteur du garde grève, mais dont l'effet vient en déduction des moments maximaux produits par les forces horizontales.

Pour ces différentes raisons, on peut donc négliger l'effet des forces verticales.

\* Forces horizontales. Elles sont au nombre de 3:

- Pousée des terres.
- Pousée d'une charge locale située en arrière du mur garde grève
- Force de freinage d'un camion type B<sub>c</sub>

#### a/ Pousée des terres:

En ne tenant pas compte de la présence de la chaussée (phase de remblaiement derrière le mur garde grève, le moment d'encastrement vaut:

$$M_T = \frac{i \Delta h^3}{6}$$

où :  $i$  : coefficient de poussée  $i = 0,3$

$\Delta$  : poids volumique des terres de remblai  $\Delta = 1,8 \text{ kdaN/m}^3$

$h$  : hauteur du garde grève  $h = 1,8 \text{ m}$

$$M_T = \frac{0,3 \times 1,8 \times \frac{1,8^3}{6}}{6} = 0,525 \text{ mKdaN}$$

b/ Poussée d'une charge locale située en arrière du garde grève :

Selon le document PP73 du SETRA, il a été vérifié que la sollicitation totale due au camion  $B_c$  (poussée des charges locales + freinage) était plus défavorable pour le mur garde grève dans le domaine  $0,5 \text{ m} \leq h \leq 3,0 \text{ m}$

L'effet le plus défavorable est produit par 2 roues arrière de 6 kdaN de deux camions accolés, placés de telle manière que les rectangles d'impact soient au contact de la face arrière du garde grève.

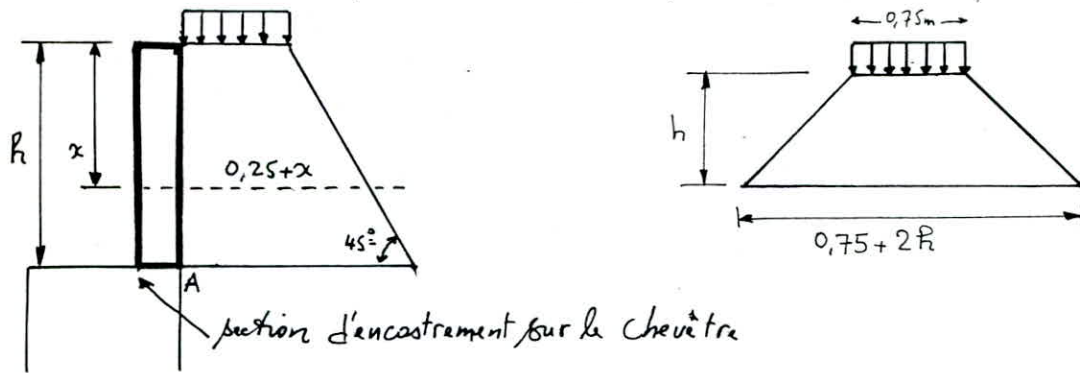
Compte tenu de ce qui a été dit précédemment concernant les incertitudes sur la transmission des efforts, on procédera de la manière suivante :

- les charges réelles soit 2 roues de 6 kdaN distantes de 0,50 m soient remplacées par une charge uniformément répartie de 12 kdaN sur un rectangle de  $0,25 \times 0,75$  circonscrit aux carrés d'impact de chacune des roues.
- On admet que la pression sur le rectangle d'impact ainsi défini se répartie à  $45^\circ$  latéralement et en arrière du mur de façon uniforme sur un rectangle horizontal dont les dimensions croissent linéairement avec la profondeur. Cette pression engendre en tout point du mur une poussée élémentaire qui crée un certain moment au niveau de la section d'encastrement sur le chevetre.
- On suppose d'autre part que les efforts correspondants se répartissent uniformément à  $45^\circ$  le long du garde grève, de part et d'autre du rectangle d'impact.



- On néglige l'effet des roues situées à 1,50 m en arrière.

Les schémas ci-après définissent les principaux paramètres :



Le moment flechissant en A à la profondeur h

a pour expression générale :

$$M_P = \frac{12K}{0,75+2h} \int_0^h \frac{h-x}{0,25+x} dx \quad [\text{mkdAN/ml}]$$

Avec :  $K = i \gamma \delta b_c$

$i$  : Coefficient de poussée  $i = 0,3$

$\gamma$  : Coefficient de pondération  $\gamma = 1,2$

$\delta$  : (charge sur remblai) : Coefficient de majoration dynamique  $\delta = 1,1$

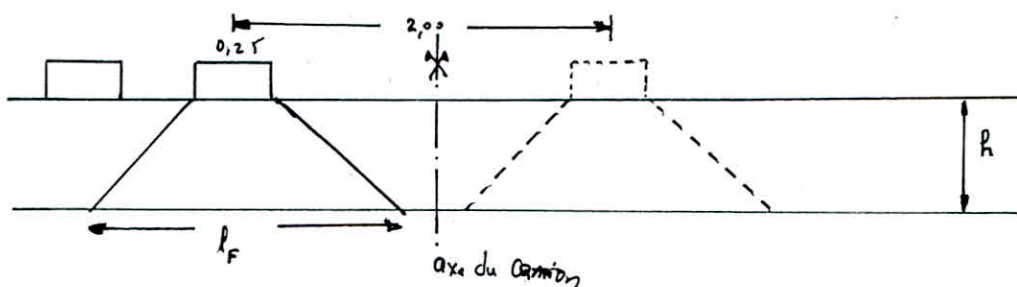
$b_c = 0,8$  (pont de 1<sup>ère</sup> classe, 4 voies chargées)

$$K = 0,3 \times 1,2 \times 1,1 \times 0,8 = 0,3168$$

$$M_P = \frac{12 \times 0,3168}{0,75 + 2 \times 1,8} \int_0^{1,8} \frac{1,8-x}{0,25+x} dx = 2,197 \text{ mkdAN/ml.}$$

c/ Force de freinage d'un essieu du camion  $B_c$  :

On considère un essieu au contact du garde grève et l'on néglige l'effet de l'autre essieu situé à 1,5m en arrière.



Compte tenu de l'écartement des roues d'un essieu (2,00 m), on ne considère que l'effet d'une seule roue (une des roues accolées considérées précédemment) et l'on admet une répartition des efforts suivant des directions inclinées à  $45^\circ$  à partir des bords du rectangle d'impact donc  $l_F = 0,25 + 2h$  la force de freinage est prise égale au poids d'une roue soit 6 kdaN

$$\text{et l'on a : } M_F = \frac{6h}{0,25 + 2h} \cdot \gamma = \frac{6 \times 1,8}{0,25 + 2 \times 1,8} \cdot 1,2 = 3,36 \text{ mKdaN/ml}$$

Le moment total d'encastrement sera donc :

$$M = M_T + M_P + M_F = 0,525 + 2,197 + 3,36 = 6,082 \text{ mKdaN/ml}$$

Remarque : la formule approchée donnant le moment d'encastrement est :

$$M = 2,5 (R + 1) = 2,5 (1,8 + 1) = 7 \text{ mKdaN/ml}$$

L'effort tranchant total est :

$$T = T_T + T_P + T_F = 0,29 + 0,874 + 1,86 = 3,02 \text{ kdaN/ml}$$

Ferraillage :

La section est  $b = 100 \text{ cm}$  ;  $h = 33,4 - 3 = 30,4 \text{ cm}$

avec  $\bar{\sigma}_a = 2800 \text{ bar}$  ;  $\bar{\sigma}_b' = 180 \text{ bar}$

$$\mu = \frac{15M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \cdot 6,082 \cdot 10^5}{2800 \cdot 100 \cdot (30,4)^2} = 0,0352 \rightarrow \begin{cases} \varepsilon = 0,9196 \\ k = 47,2 \\ \alpha = 0,2411 \end{cases}$$

$$A = \frac{M}{\bar{\sigma}_a \varepsilon h} = \frac{6,082 \cdot 10^5}{2800 \cdot 0,9196 \cdot 30,4} = 7,76 \text{ cm}^2/\text{ml} \text{ soit } 4 \text{ HA } 16 = 8,04 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

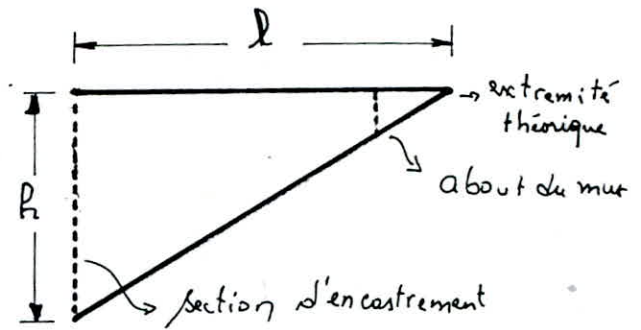
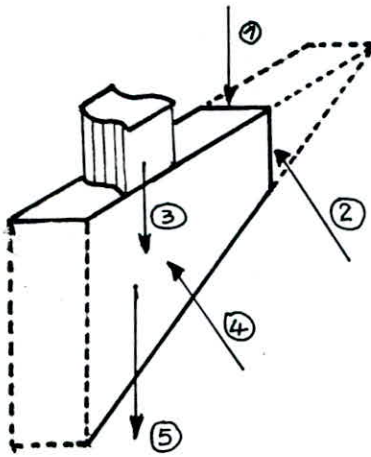
$$\sigma_b' = \frac{\bar{\sigma}_a}{k} = \frac{2800}{47,2} = 59,32 \text{ bar} < \bar{\sigma}_b' = 180 \text{ bar}$$

Armatures de répartition :

$$\frac{A}{4} \leq A_r \leq \frac{A}{2} \Leftrightarrow 2,01 \leq A_r \leq 4,02$$

$$A_r = 3 \text{ HA } 12 = 3,39 \text{ cm}^2$$

## Oreille du mur en retour:



- ① : une charge concentrée de 4 kdaN à l'extrémité du mur. Elle est accidentelle (conventionnelle). Elle permet de négliger les frottements verticaux sur le mur
- ② Une force accidentelle de 2 kdaN
- ③ Poids de la superstructure (corniche, garde corps ...) =  $0,3l = 0,3(3,1+1,1) = 1,26 \text{ kdaN}$
- ④ Poussée du remblai uniformément répartie d'intensité égale à :
- $$\frac{h}{3} + 0,5 = \frac{3,05}{3} + 0,5 = 1,516 \text{ kdaN/m}^2$$
- (0,5 : coefficient de poussée au repos)
- ⑤ Poids du mur =  $\frac{3,05+0,8}{2} \times 3,1 \times 0,334 \times 2,5 = 4,98 \text{ kdaN}$

### Calcul des sollicitations:

Effort tranchant (selon la verticale) :  $T = 4 + 1,26 + 4,98 = 10,24 \text{ kdaN}$

Le moment d'encastrement vaut :

$$M = 4 \times 3,1 + 1,26 \times \frac{3,1}{2} + 4,98 \times \frac{2 \times 0,8 + 3,05}{3(0,8 + 3,05)} \times 3,1 = 20,578 \text{ mKdaN}$$

Effort tranchant (selon l'horizontale) :  $T = 2 + 1,516 = 3,516 \text{ kdaN}$

$$M = 2 \times 5 + 1,516 \times \frac{3,05+0,8}{2} \times \frac{3,1}{2} = 24,02 \text{ mKdaN/}$$

$$\text{soit } M = \frac{24,02}{3,05} = 7,87 \text{ mKdaN/ml}$$

Remarque: Pour le ferrailage d'attache, on pourra vérifier de façon séparée l'attache du mur sous les deux moments dus aux forces verticales et horizontales appliquées au mur.

Ferrailage:

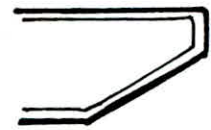
On prendra une hauteur moyenne  $h_c = \frac{3,05 + 0,8}{2} = 1,925 \text{ m}$

$$\Rightarrow h = h_c - d = 1,925 - 0,05 = 1,875 \text{ m}$$

Sens vertical:  $\mu = \frac{15 \cdot M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \cdot 20,578 \cdot 10^5}{2800 \times 3,1 \cdot 10^2 \cdot 1,875^2} = 0,001 \rightarrow \begin{cases} E = 0,9851 \\ K = 320 \end{cases}$

$$A = \frac{M}{E \bar{\sigma}_a h} = \frac{20,578 \cdot 10^5}{0,9851 \cdot 2800 \cdot 1,875} = 3,97 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \text{ HA } 16 = 4,02 \text{ cm}^2$$

$$\sigma'_b = \frac{\bar{\sigma}_a}{K} = \frac{2800}{320} = 8,75 \text{ bar} << \bar{\sigma}'_b = 180 \text{ bar}$$



Sens horizontal:  $\mu = \frac{15 \cdot M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \cdot 7,87 \cdot 10^5}{2800 \cdot 100 \cdot 30,4^2} = 0,0456 \rightarrow \begin{cases} E = 0,9099 \\ K = 40,5 \end{cases}$

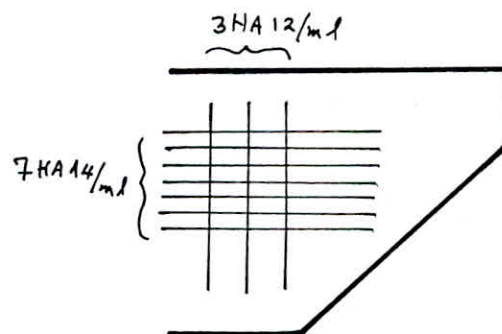
$$A = \frac{M}{\bar{\sigma}_a E h} = \frac{7,87 \cdot 10^5}{2800 \cdot 0,9099 \cdot 30,4} = 10,16 \text{ cm}^2/\text{ml} \rightarrow 7 \text{ HA } 14/\text{ml} = 10,77 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$e = 14 \text{ cm}$

$$\sigma'_b = \frac{\bar{\sigma}_a}{K} = \frac{2800}{40,5} = 63,13 \text{ bar} << \bar{\sigma}'_b = 180 \text{ bar}$$

Aciers de répartition

$$\frac{A}{4} = 3 \text{ HA } 12/\text{ml} = 3,39 \text{ cm}^2/\text{ml}$$



### Effet de la dilatation sur la culée :

La variation de la température affecte les éléments de la culée et donne à ces derniers une dilatation empêchée au niveau des encastrement. Ce qui provoque des fissures. Pour cela, et au lieu de prévoir des joints de dilatation, on préfère calculer les tractions engendrées par la dite dilatation en égalisant cette contrainte à celle de la fissuration pour avoir le pourcentage d'armatures nécessaires.

Pour une plaque, la relation contrainte-déformation est comme suit :

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x)$$

La longueur  $l_0$  intervenue par la dilatation sous l'effet de la variation de température est :

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta t) \rightarrow \Delta l = l - l_0 = l_0 \alpha \Delta t$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta t \quad \text{d'où} \quad \epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) = \alpha \Delta t$$

$$\text{ou encore : } (\sigma_x - \mu \sigma_y = \alpha E \Delta t) \text{ (1) et } (\sigma_y - \mu \sigma_x = \alpha E \Delta t) \text{ (2)}$$

en multipliant la relation (2) par  $\mu$ , on a :

$$(\mu \sigma_y - \mu^2 \sigma_x = \alpha \mu E \Delta t) \text{ (3)}$$

en faisant la somme des relations (1) et (3), on a :

$$\sigma_x (1 - \mu^2) = (1 + \mu) \alpha E \Delta t \rightarrow \sigma_x (1 - \mu) = \alpha E \Delta t$$

on a alors :

$$\sigma_x = \frac{\alpha E \Delta t}{1 - \mu} \quad \text{et} \quad \sigma_y = \frac{\alpha E \Delta t}{1 - \mu}$$

$\alpha$  : coefficient de dilatation thermique du béton armé  $\alpha = 10^{-5}$  (art 4.1 CCB468)

$\mu$  : coefficient de poisson  $\mu = 0,2$

$$\Delta t = 30^\circ$$

$$E = 21000 \sqrt{\sigma_j'} = 21000 \sqrt{300} = 363730 \text{ bar} \quad (\text{art 9.6 CCB468})$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{10^{-5} \cdot 363730 \cdot 30}{(1-0,2)} = 136,4 \text{ bar}$$

$\sigma_x$  et  $\sigma_y$  ne sont autre que des contraintes de fissuration et comme  $\sigma_1 > \sigma_2$  en général, on prend  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_1 \rightarrow \frac{K \eta}{\phi} \frac{w_f}{1+10w_f} = 136,4$

$\eta = 1,6$  (acier HA) ;  $K = 10^5$  fissuration préjudiciable

$\phi = 16 \text{ mm}$  : mur frontal ;  $\phi = 14 \text{ mm}$  : (mur en retour

a/ mur frontal :

$$\frac{K \eta}{\phi} \frac{w_f}{1+10w_f} = 136,4 \Rightarrow \frac{w_f}{1+10w_f} = 136,4 \cdot \frac{16}{10^5 \cdot 1,6} = 1364 \cdot 10^{-6}$$

$$\rightarrow w_f = 1364 \cdot 10^{-6} + 1364 \cdot 10^{-5} \cdot w_f$$

$$\rightarrow w_f (1 - 1364 \cdot 10^{-5}) = 1364 \cdot 10^{-6}$$

$$\rightarrow w_f = 0,00138 = 0,138 \%$$

b/ mur en retour :

$$\frac{w_f}{1+10w_f} = 136,4 \cdot \frac{14}{1,6 \cdot 10^5} = 1193,5 \cdot 10^{-6}$$

$$\rightarrow w_f = 0,00103 = 0,103 \%$$

$w_f = \frac{A}{B_f}$  et puisqu'il s'agit d'une traction engendrée par dilatation,  $B_f$  est confondu avec la section totale de la pièce.

ferraillage : \* mur frontal :

$$h_f = 120 \text{ cm} \rightarrow \bar{B}_f = b \cdot h_f = 100 \times 120 = 12000 \text{ cm}^2$$

$$\frac{A}{B_f} = w_f \rightarrow A = \bar{B}_f \cdot w_f = 12000 \times 0,138\% = 16,56 \text{ cm}^2$$

On place 2 nappes, l'une des nappes a déjà été calculée sous l'effet des surcharges donc on prévoit une seule nappe  $A = \frac{16,56}{2} = 8,28 \text{ cm}^2$

soit  $5 \text{ HA } 16 = 10,05 \text{ cm}^2$  ;  $e = 25 \text{ cm}$

\* Mur en retour :

$$B_f = 33,4 \times 100 = 3340 \text{ cm}^2 \rightarrow A = B_f \cdot w_f = 3340 \times 0,103\% = 3,44 \text{ cm}^2$$

on prévoit  $\frac{A}{2} = 1,72 \text{ cm}^2$  soit  $3 \text{ HA } 10 = 2,36 \text{ cm}^2$   $e = 33 \text{ cm}$

## Ferrailage du sommier d'appui

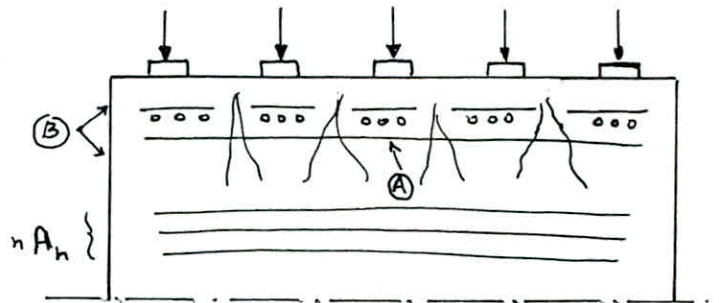
Il y a risque de fissuration du béton suivant les plans vertical et oblique sous l'effet des charges constituées par les descentes de charges localisées au niveau des appareils d'appui.

On dispose les armatures telles que (A)

formant un chaînage contre la fissuration et telles que (B) de

surface et d'éclatement sous

les appareils d'appui et sous l'action des verins.



### a/ Armatures de chaînage:

Dans un but de simplification et de normalisation, le document PP73 du SETRA

propose une quantité d'acier  $A = 0,25 \frac{R_{max}}{\sigma_a}$  ;  $\bar{\sigma}_a = \frac{2}{3} \sigma_{em}$

$R_{max}$  : charge localisée la plus forte

$$R_{max} = R_{cp} + R_{ccp} + R_{surchmax} + R_{trottoir} = 47,126 + 79,33 + 2,82 = 129,28 \text{ kN}$$

$$A = 0,25 \cdot \frac{129,28 \cdot 10^3}{2800} = 11,54 \text{ cm}^2 \rightarrow 2 \text{ Nappes de } n \text{ HA16}$$

Pour limiter la propagation des fissures, on place des armatures  $A_h$  sur une hauteur égale à la moitié des espacements des appareils d'appui soit 1,8m

$$\text{avec } A_h = 0,125 \frac{R_{max}}{\sigma_a} = 0,125 \cdot \frac{129,28 \cdot 10^3}{2800} = 5,77 \text{ cm}^2$$

Comme on a prévu  $5 \text{ HA16} = 10,05 \text{ cm}^2$  pour le mur frontal dans le cas de la dilatation, il n'est donc pas nécessaire de prévoir  $A_h$

$$\text{car } 5 \text{ HA16} = 10,05 \text{ cm}^2 > A_h = 5,77 \text{ cm}^2$$

### b/ Armatures de surface et d'éclatement:

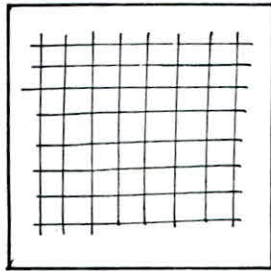
Elles sont constituées par des nappes de frettage (B) disposées au droit des appareils d'appui et des verins. Chaque frette est constituée par des armatures  $\phi 8$  capable de reprendre un effort de  $0,25(1-\delta)R$

$$\delta = \frac{a}{E} = \frac{\text{largeur de l'appareil d'appui}}{\text{épaisseur de l'appui}} = \frac{30}{78} = 0,384$$

$$\text{d'où } F = 0,25(1 - 0,384) 123,28 = 19,8 \text{ kdaN}$$

$$A = \frac{F}{\bar{\sigma}_a} = \frac{19,8 \cdot 10^3}{2800} = 7,07 \text{ cm}^2$$

On dispose une seule nappe dans les 2 directions.



### Calcul de la dalle de transition:

Du fait des imperfections de compactage à proximité du mur frontal, on prend comme précaution une dalle de transition qui évite tout tassement de la chaussée entraîné par le tassement du remblai.

Dimension de la dalle :

- largeur = 3,0 m
- longueur = largeur de la chaussée + 0,8 m de chaque côté soit 16 m
- épaisseur = 0,3 m

On calcule en premier lieu la longueur élastique

$$l_e = \sqrt[4]{\frac{4EI}{Kb}} \quad (\text{cf Fuentes : Calcul pratique des structures})$$

$$I: \text{inertie de l'élément} \quad I = \frac{bh^3}{12} = 100 \cdot \frac{30^3}{12}$$

$E$ : module d'élasticité du béton (on prend en moyenne 20000 daN/cm<sup>2</sup>)

$b$ : largeur de l'élément (on calcule pour 1m de largeur  $b = 1m$ )

$K$ : coefficient de raideur du sol = 2 daN/cm<sup>2</sup> (Remblai)

$$\text{soit } l_e = \left( \frac{4 \cdot 20000 \cdot 100 \cdot \frac{30^3}{12}}{2 \cdot 100} \right)^{\frac{1}{4}} = 173,2 \text{ cm} = 1,732 \text{ m}$$



On compare  $l$  à  $\frac{\pi}{2} l_e$

- Si  $l \leq \frac{\pi}{2} l_e$  : le calcul peut être fait en supposant une répartition linéaire des contraintes.
- Si  $l \geq \frac{\pi}{2} l_e$  : Il y a lieu de faire des calculs relatifs à la poutre sur sol élastique

On rappelle que la pression en un point est égale au produit du coefficient de raideur du sol par l'enfoncement en ce point  $p = ky$

donc  $l = 3 \text{ m} > \frac{\pi}{2} \cdot 1,732 = 2,72 \text{ m}$

Calcul des sollicitations :

- Poids propre :  $2,5 \times 0,3 \times 1 \times 1 = 0,75 \text{ kdaN/m}^2/\text{ml}$
- Remblai sur dalle :  $1,8 \times 0,5 \times 1 \times 1 = 0,9$
- Surcharge sur remblai :  $1 \times 1,2 = 1,2$

donc  $P = 0,75 + 0,9 + 1,2 = 2,85$

Calcul de la réaction du remblai sur la dalle :

Cette réaction est la pression  $p = ky$

La résultante sur la dalle sera :  $Q = P - p = P - ky$

Pour une poutre uniformément chargée et de charge  $P$  et simplement appuyée, le moment en une abscisse  $x$  est  $M(x) = P \frac{x}{2} (l - x)$  qui entraîne un

enfoncement  $y(x) = \frac{Px}{24EI} (l^3 - 2lx^2 + x^3)$

L'enfoncement est max pour  $x = \frac{l}{2} \rightarrow y\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5}{384} \frac{Pl^4}{EI}$

$E = 2 \cdot 10^6 \text{ kdaN/m}^2$

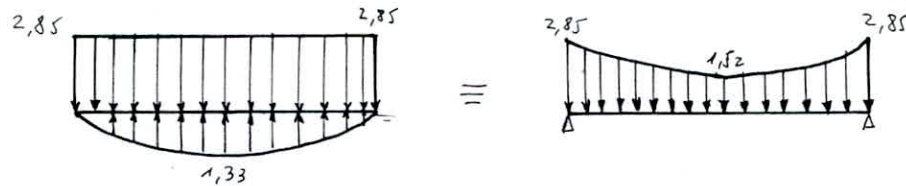
$I = 1 \cdot \frac{0,3^3}{12} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$

$y = \frac{5}{384} \cdot \frac{2,85 \cdot 3^4}{2 \cdot 10^6 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3}} = 0,6679 \cdot 10^{-3} \text{ m/ml}$

Soit  $p$  la réaction du sol par ml  $p = Ky \cdot b$  ( $b = 1m$ ),  $K = 2 \cdot 10^3 \text{ KdaN/m}^3$

$$p = 2 \cdot 10^3 \cdot 0,6679 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 1,33 \text{ KdaN/m/ml}$$

Donc la dalle est sollicitée par les charges suivantes:



Ferrailage:

Le moment max est la différence des 2 moments:

$$M_{b \max} = q \frac{l^2}{8} - \frac{5}{48} p l^2 = \frac{2,85 \cdot 3^2}{8} - \frac{5}{24} \cdot 1,33 \cdot 3^2 = 1,96 \text{ mKdaN/ml}$$

$$\mu = \frac{15 \cdot M_{b \max}}{\bar{\sigma}_a \cdot b \cdot h^2} = \frac{15 \cdot 1,96 \cdot 10^5}{2800 \cdot 100 \cdot 27^2} = 0,0144 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9466 \\ K = 78,75 \end{cases}$$

$$A = \frac{1,96 \cdot 10^5}{2800 \cdot 0,9466 \cdot 27} = 2,74 \text{ cm}^2/\text{ml} \rightarrow 3 \text{ HA } 12/\text{ml} = 3,39 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$e = 33 \text{ cm.}$$

$$\sigma'_b = \frac{\bar{\sigma}_a}{K} = \frac{2800}{78,75} = 35,55 \text{ bar} \ll \bar{\sigma}_b = 180 \text{ bar}$$

Armatures de répartition:

$$\frac{A}{4} < A_r < \frac{A}{2} \quad (\text{ferrailage des plaques})$$

$$\text{soit } 2 \text{ HA } 12/\text{ml} = 2,26 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Ferrailage du corbeau arrière:

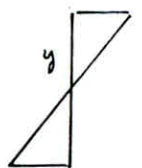
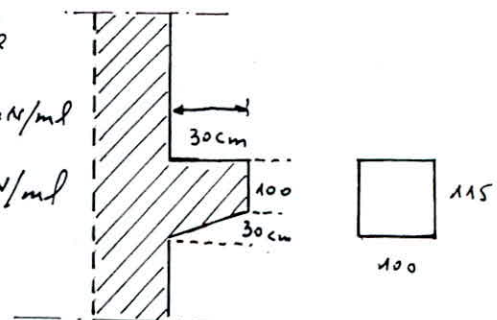
Il est soumis à la réaction de la dalle de transition  $R = q \frac{l}{2} - p \frac{l}{3} = 1,87 \text{ KdaN/ml}$   
d'où le moment  $M = R \times 0,3 = 0,56 \text{ mKdaN/ml}$

La hauteur moyenne du corbeau est: 1,15 m

Le moment provoque une force de traction

$$\text{égale à } F = \frac{1}{2} \sigma_y \cdot b = \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{I} \cdot v \cdot b \cdot y = \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{b h^3} \cdot 12 \cdot \frac{h}{2} \cdot b = \frac{3}{2} \frac{M}{h}$$

$$\text{avec } I = \frac{b h^3}{12}; \quad v = \frac{h}{2}; \quad y = \frac{h}{2}$$



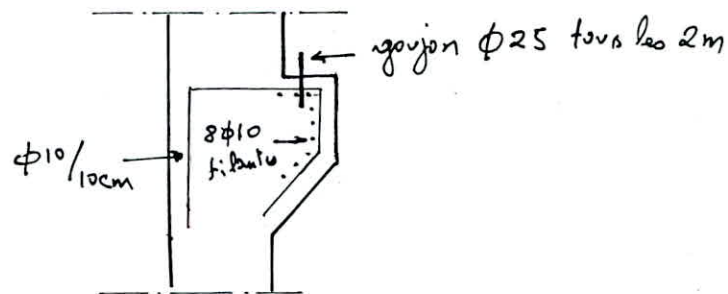
$$F = \frac{3}{2} \frac{M}{h} = 3 \cdot \frac{0,56 \cdot 10^5}{2(115)} = 730 \text{ daN}$$

$$A = \frac{F}{\bar{\sigma}_a} = \frac{730}{2800} = 0,26 \text{ cm}^2/\text{ml} \rightarrow 1 \text{ HA } 10/\text{ml} = 0,78 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

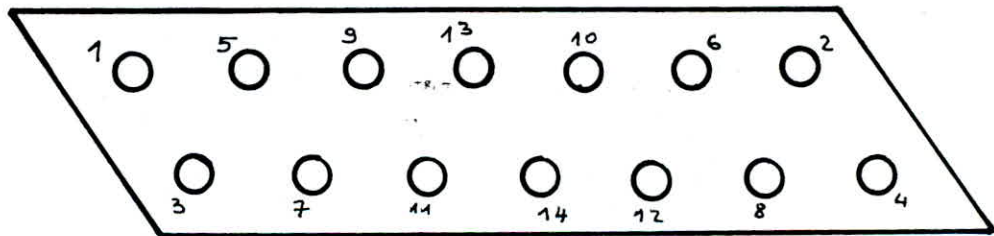
$$\bar{\sigma} = \frac{T}{b_3} = \frac{1,87 \cdot 10^3}{100 \cdot \frac{7}{8} \cdot 115} = 0,18 \text{ bar}$$

$$A = \frac{T}{\bar{\sigma}_a} = \frac{1,87 \cdot 10^3}{2800} = 0,66 \text{ cm}^2/\text{ml} \rightarrow 1 \text{ HA } 10/\text{ml} = 0,78 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

(mais le ferrailage type exigé par SETRA est :



### Ferrailage de la semelle :



Les pieux sont sollicités en flexion composée déviée.

La réaction sur chaque pieu est donné par :  $F = \frac{N}{n} \pm \left[ \frac{M_v}{I_v} u \pm \frac{M_u}{I_u} v \right] \times S$

La combinaison la plus défavorable est :

- Pile calculée en service +  $A_{4voies}$  + surcharge trottoir + surcharge remblai + freinage.

$$V = 2121,3 \text{ kdaN}$$

$$M_\xi = 2474,6 \text{ mKdaN}$$

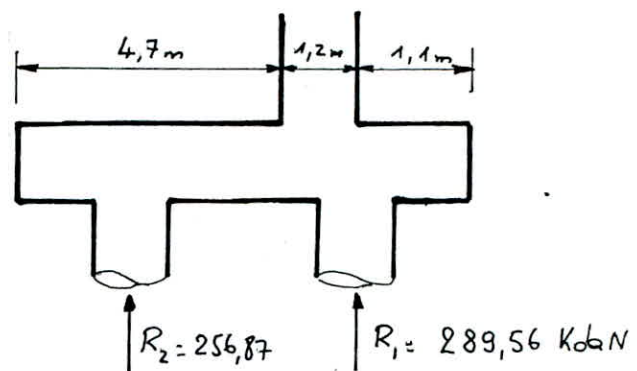
$$M_\eta = -1354,3 \text{ mKdaN}$$

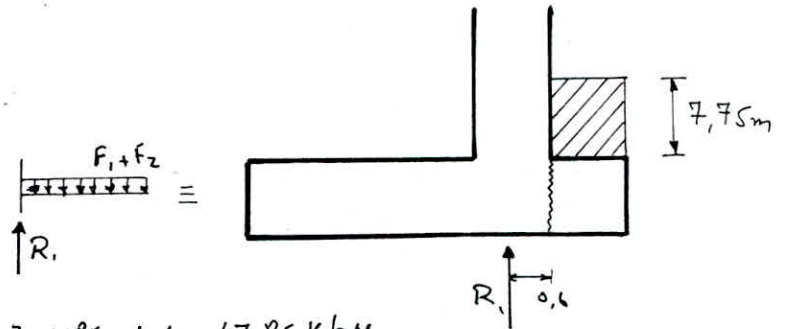
| n°<br>Pieu | X (m)  | Y (m) | $\xi$ (m) | $\eta$ (m) | $W_{\xi}$ (m <sup>2</sup> ) | $W_{\eta}$ (m <sup>2</sup> ) | $F_{max}$<br>(KdaN) | $F_{min}$<br>(KdaN) |
|------------|--------|-------|-----------|------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|
| 1          | -9,947 | 1,7   | -9,819    | 1,97       | 24,60                       | -62,80                       | 289,56              | 62,22               |
| 2          | 8,764  | 1,7   | 8,80      | 1,45       | 33,42                       | +70,58                       | 213,51              | 46,58               |
| 3          | -8,764 | -1,7  | -8,80     | -1,45      | -33,42                      | -70,58                       | 256,87              | 89,53               |
| 4          | 9,947  | -1,7  | 9,819     | -1,97      | -24,60                      | +62,80                       | 240,82              | 13,48               |
| 5          | -6,828 | 1,7   | -6,778    | 1,888      | 25,66                       | -91,63                       | 277,19              | 59,13               |
| 6          | +5,647 | 1,7   | 5,692     | 1,543      | 31,40                       | 109,12                       | 226,55              | 48,53               |
| 7          | -5,645 | -1,7  | -5,689    | -1,543     | -31,40                      | -109,12                      | 254,50              | 76,48               |
| 8          | 6,828  | -1,7  | 6,778     | -1,888     | -25,66                      | 91,63                        | 249,90              | 25,39               |
| 9          | -3,71  | 1,7   | -3,661    | 1,802      | 26,89                       | -169,65                      | 264,53              | 56,49               |
| 10         | 2,529  | 1,7   | 2,638     | 1,627      | 29,78                       | 235,44                       | 238,92              | 51,16               |
| 11         | 3,71   | -1,7  | 3,66      | -1,802     | -26,89                      | 169,70                       | 246,55              | 38,51               |
| 12         | -2,527 | -1,7  | -2,573    | -1,629     | -29,75                      | -241,39                      | 251,80              | 63,82               |
| 13         | -0,591 | 1,7   | -0,544    | 1,715      | 28,25                       | -1141,7                      | 251,83              | 65,11               |
| 14         | 0,591  | -1,7  | 0,543     | -1,715     | -28,25                      | -1143,85                     | 249,17              | 51,21               |

### Methode Appliquée:

Du fait que le mur frontal n'est pas centré sur la semelle, les bielles ne transportent pas les charges symétriques ; ceci dans le sens de la largeur, donc on applique la méthode des consoles.

Soient les pieux les plus chargés sous patins avant et arrière



Patin avant:

terre:  $F_1 = 1,8 \times 7,75 \times 3,1185 \times 1,1 = 47,85 \text{ kdaN}$

$$M_1 = -47,85 \times \frac{1,1}{2} = -26,32 \text{ mkdaN}$$

Poids propre du patin

$$F_2 = 2,5 \times 1,5 \times 3,1185 \times 1,1 = 12,86 \text{ kdaN}$$

$$M_2 = -12,86 \cdot \frac{1,1}{2} = -7,07 \text{ mkdaN}$$

Reaction du pieu

$$F_3 = 289,56 \text{ kdaN} ; M_3 = 0$$

Le moment total sera donc:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 = -33,4 \text{ mkdaN}$$

l'effort tranchant total sera:

$$T = 47,85 + 12,86 - 289,56 = -228,85 \text{ kdaN}$$

$$\mu = \frac{15 M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \cdot 33,4 \cdot 10^5}{1,1 \cdot 145^2 \cdot 2800} = 0,0077 \rightarrow \begin{cases} \varepsilon = 0,9603 \\ K = 111 \end{cases}$$

$$A = \frac{M}{\varepsilon \bar{\sigma}_a h} = \frac{33,4 \cdot 10^5}{0,9603 \cdot 2800 \cdot 145} = 8,56 \text{ cm}^2 \text{ soit } 6H14 = 9,23 \text{ cm}^2 \text{ pour } 1,1 \text{ m}$$

$$\sigma'_b = \frac{\bar{\sigma}_a}{K} = \frac{2800}{111} = 25,2 \text{ bar} < \bar{\sigma}'_b = 150 \text{ bar}$$

Dans le sens longitudinal, on prend des racines de repartition:

$$A_r = \frac{A}{4} = 2,31 \text{ cm}^2 / \text{ml} \text{ soit } 3H412 / \text{ml}$$

Patin arrière

terre:

$$F_1 = 1,8 \times 1 \times 3,1185 \times 4,7 = 26,38 \text{ KdaN}$$

$$M_1 = -26,38 \times \frac{4,7}{2} = -61,99 \text{ KdaN.m}$$

Poids Propre du patin:

$$F_2 = 2,5 \times 1,5 \times 3,1185 \times 4,7 = 54,96 \text{ KdaN}$$

$$M_2 = -54,96 \times \frac{4,7}{2} = -129,16 \text{ mKdaN}$$

Reaction du pieu:

$$F_3 = 256,87 \text{ KdaN} \quad ; \quad M_3 = +256,87 \times 3 = 770,61 \text{ mKdaN}$$

Le moment total sera donc:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 = 579,51 \text{ mKdaN}$$

L'effort tranchant sera:

$$T = 26,38 + 54,96 - 256,87 = -175,53 \text{ KdaN}$$

$$\mu = \frac{15M}{\bar{\sigma}_a b h^2} = \frac{15 \cdot 579,51 \cdot 10^5}{2800 \cdot 470 \cdot 145^2} = 0,0314 \rightarrow \begin{cases} \varepsilon = 0,9237 \\ K = 50,5 \end{cases}$$

$$A = \frac{15M}{0,9237 \cdot 145 \cdot 2800} = 154,52 \text{ cm}^2$$

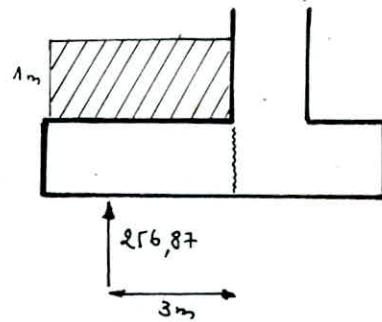
on augmente de diamètre des barres ( $\phi \geq 25 \text{ mm}$ ) donc  $\bar{\sigma}_a = 2667 \text{ bar}$

$$\mu = \frac{15 \cdot 579,51 \cdot 10^5}{2667 \cdot 470 \cdot 145^2} = 0,0329 \rightarrow \begin{cases} \varepsilon = 0,9224 \\ K = 49,4 \end{cases}$$

$$A = \frac{579,51 \cdot 10^5}{0,9224 \cdot 145 \cdot 2667} = 162,46 \text{ soit } 21 \text{ HA32} = 168,84 \text{ cm}^2 \text{ pour } 4,7 \text{ m}$$

soit 5 HA32/ml  $e = 25 \text{ cm}$

$$\sigma'_b = \frac{2667}{49,4} = 53,98 \text{ bar} < \bar{\sigma}'_b = 180 \text{ bar}$$



Les armatures longitudinales jouent un rôle de répartition dans la transmission des efforts entre les murs et les pieux de fondation donc on prend des armatures de répartition  $A_r = \frac{A}{4} = 10,05 \text{ cm}^2/\text{ml}$  soit  $3\text{HA}25/\text{ml} = 14,72 \text{ cm}^2/\text{ml}$

Du fait que les fibres supérieures de la semelle ne sont pas tellement tendues, on prend  $\frac{A}{4} = 3\text{HA}25/\text{ml} = 14,72 \text{ cm}^2/\text{ml}$ .

### Recapitulatif:

Nappe supérieure :

Aciers transversaux :  $3\text{HA}25/\text{ml}$

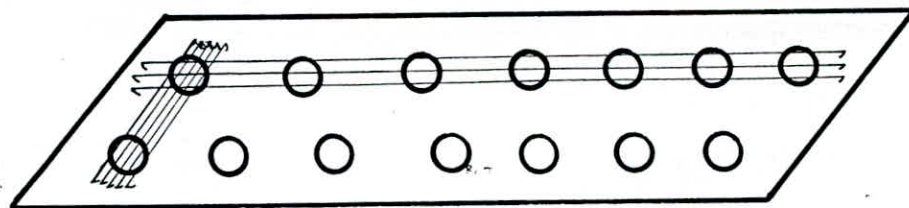
Aciers longitudinaux :  $3\text{HA}25/\text{ml}$

Nappe inférieure :

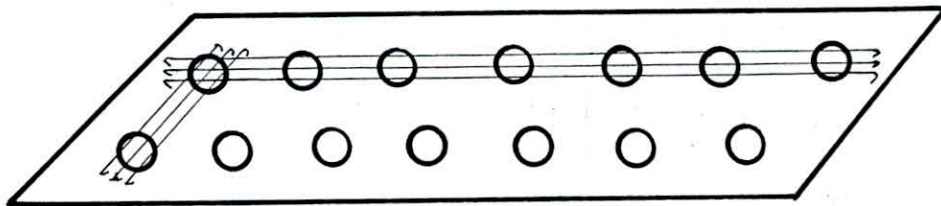
Aciers transversaux :  $5\text{HA}32/\text{ml}$

Aciers longitudinaux :  $3\text{HA}25/\text{ml}$

voir l'étude de



Nappe inférieure



Nappe supérieure

### Résistance à l'effort tranchant:

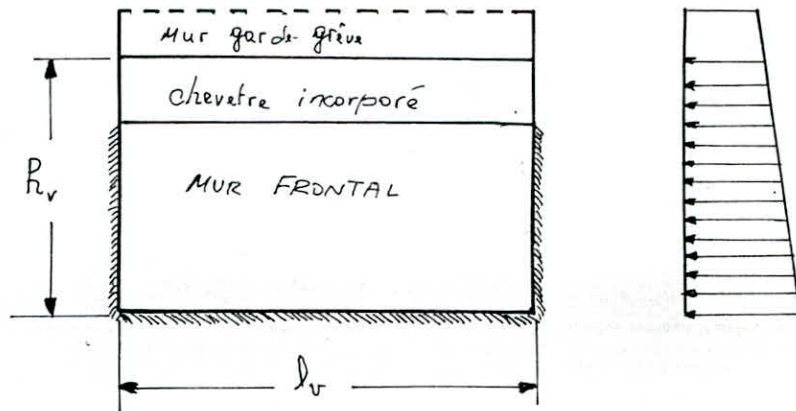
$$\tau_b = \frac{T}{b \cdot z} = \frac{338,21 \cdot 10^3}{470 \cdot \frac{7}{8} \cdot 145} = 5,67 \text{ bar} < 1,15 \bar{\tau}_b = 8,625 \text{ bar}$$

Voile frontal:

La voile frontal assure plusieurs fonctions:

- Une fonction soutènement vis à vis des terres
- Une fonction porteuse vis à vis des charges
- Une fonction raidisseur (avec les murs contreforts) de l'ensemble de la pile culée

La voile ou chaque élément de voile est assimilé à une plaque rectangulaire encastrée sur trois côtés à savoir les deux murs contreforts qui l'encadrent et la semelle, et libre sur le bord supérieur.



Le chevetre incorporé est inclut dans le mur frontal

$l_v = 5,35 \text{ m}$  entre mu de murs contreforts ;  $h_v = 6,75 \text{ m}$

La théorie de JOHANSEN sur les lignes de rupture permet de déterminer le moment de rupture correspondant à une dalle rectangulaire encastrée sur trois côtés, libre sur le quatrième, soumise à une charge uniformément répartie de densité  $p$ . Dans le cas où le ferrailage est symétrique et isotrope, on a la formule qui donne le moment de rupture en fonction du mécanisme de rupture.

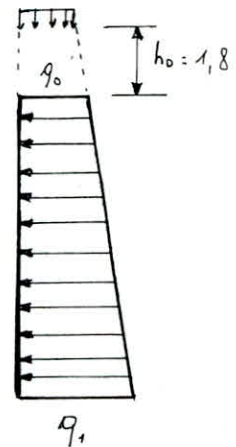
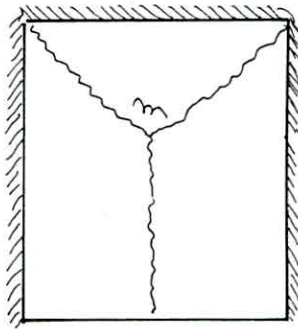
Pour  $\frac{h_v}{l_v} = \frac{6,75}{5,35} = 1,26 \geq 0,57$ , le mécanisme de rupture comprend trois charnières positives.



$$m = \frac{P l_v h_v}{8 \left( 1 + \frac{l_v}{2 h_v} + 2 \frac{h_v}{l_v} \right)}$$

$$P = q_0 + q_1$$

On prend un coefficient de sécurité par le moment de rupture égal à 1,7



En condition normale:

$$q_0 = \lambda_n p \times 1,2 + \lambda_n h_0 \gamma$$

$$= 0,3 (1 \times 1,2 + 1,8 \times 1,8) = 1,332 \text{ KdaN/m}^2$$

$$q_1 = q_0 + \lambda_n \gamma h_v = 1,332 + 0,3 \times 1,8 \times 6,75 = 4,977 \text{ KdaN/m}^2$$

$$\rightarrow P = q_0 + q_1 = 6,31 \text{ KdaN/m}^2$$

En condition sismique:

$$q_0 = \lambda_s (p \times 1,2 + h_0 \cdot \gamma) = 0,396 (1 \times 1,2 + 1,8^2) = 1,758 \text{ KdaN/m}^2$$

$$q_1 = q_0 + \lambda_s \gamma h_v = 1,758 + 0,396 \times 1,8 \times 6,75 = 6,57 \text{ KdaN/m}^2$$

$$\rightarrow P = q_0 + q_1 = 8,33 \text{ KdaN/m}^2$$

Ainsi en condition normale, on a:

$$m = \frac{6,31 \times 6,75 \times 5,35}{8 \left( 1 + \frac{5,35}{2 \times 6,75} + 2 \cdot \frac{6,75}{5,35} \right)} = 7,26 \text{ mKdaN/ml.}$$

$$M = 1,7 \times m = 12,34 \text{ mKdaN/ml.}$$

en condition sismique; on a:

$$m = \frac{8,33 \times 6,75 \times 5,35}{8 \left( 1 + \frac{5,35}{2 \times 6,75} + 2 \cdot \frac{6,75}{5,35} \right)} = 9,58 \text{ mKdaN/ml}$$

$$M = 1,7 \times m = 16,29 \text{ mKdaN/ml.}$$

Ferrailage en condition normale.

$$b = 100 \text{ cm} ; h = 115 \text{ cm}$$

$$\mu = \frac{15 M}{b h^2 \bar{\sigma}_a} = \frac{15 \cdot 12,34 \cdot 10^5}{100 \cdot 115^2 \cdot 2800} = 0,0054 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9677 \\ k = 140 \end{cases}$$

$$A = \frac{M}{\bar{\sigma}_a \epsilon h} = \frac{12,34 \cdot 10^5}{2800 \cdot 0,9677 \cdot 115} = 3,96 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

$$\text{soit } 6 \text{ HA } 10/\text{ml} = 4,71 \text{ cm}^2/\text{ml}$$

Vérification du séisme

$$\bar{\omega} = \frac{100 A}{b h} = \frac{100 \cdot 4,71}{100 \cdot 115} = 0,41 \rightarrow \begin{cases} \epsilon = 0,9650 \\ k = 128 \end{cases}$$

$$\sigma_a = \frac{M}{\epsilon h A} = \frac{16,29 \cdot 10^5}{0,9650 \cdot 115 \cdot 4,71} = 3116,55 \text{ bar} < \bar{\sigma}_{en} = 4200 \text{ bars}$$

$$\sigma_b' = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{3116,55}{128} = 24,35 \text{ bar} < 1,5 \bar{\sigma}_b' = 270 \text{ bar}$$

Fonction porteur et raidisseur

Le voile joue un rôle porteur de support des charges et peut être considéré comme une poutre fléchie (PP.73). Les sections d'armatures de flexion sont déterminées par application des formules suivantes inspirées de celles de l'annexe A.4 du titre VI du fascicule 61 du CPC relatif au calcul des poutres fléchies.

$$\text{Armatures supérieures : } \Omega_1 = \frac{2,4 M_0}{(l_v + 3h_v) \bar{\sigma}_a} \quad \text{pour } h_v \geq l_v$$

$$\text{Armatures inférieures : } \Omega_2 = \frac{1,5 M_0}{l_v \bar{\sigma}_a} \quad \text{pour } h_v \geq l_v$$

$M_0$  : Moment de référence en général

Dans le cas des charges localisées (Art A43 CCBA68)  $M_0 = M_{max}$

$$M_{max} = M_{cp} + M_{ccp} + M_D + M_{trott}$$

C'est le moment transversal  $M_t$  qui se répartit le long du mur frontal

$$M_{max} = 0 + 0 + 603,21 + 39,014 = 642,224 \text{ mKdaN}$$

$$M_{max \text{ maj}} = 1,2 \times 642,224 = 770,67 \text{ mKdaN}$$

Le moment sera repris par les 3 voiles identiques et de même inertie  
Donc le voile intermédiaire reprend  $M = 257 \text{ mKdaN}$

$$\text{soit : } \Omega_1 = \frac{2,4 \times 257 \cdot 10^3}{(5,35 + 3 \times 6,71) \times 2800} = 8,6 \text{ cm}^2 \text{ soit } 8 \text{ HA12 ; } e = 28 \text{ cm}$$

$$\Omega_2 = 1,5 \cdot \frac{257 \cdot 10^3}{5,35 \times 2800} = 25,73 \text{ cm}^2 \text{ soit } 9 \text{ HA20} = 28,27 \text{ cm}^2$$

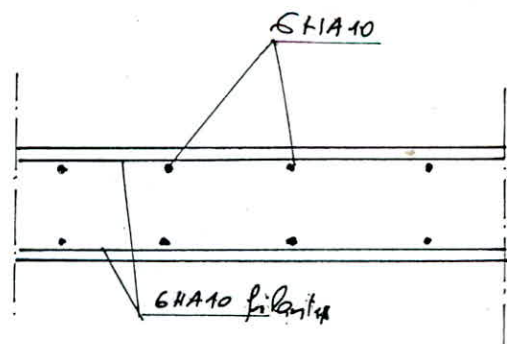
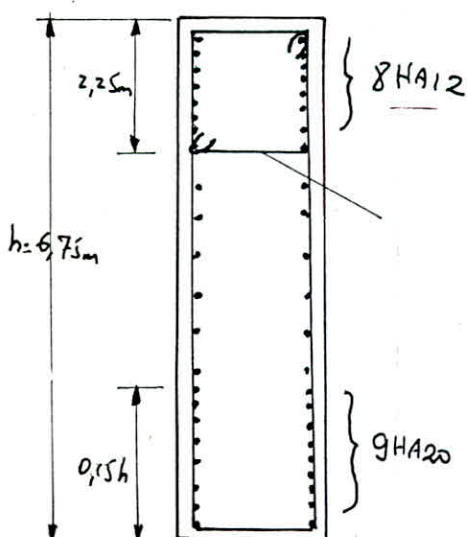
Ces armatures seront disposées dans une hauteur de  $0,15 h_v = 1,0125 \text{ m}$   
espacées de  $e = 11 \text{ cm}$ .

$\Omega_1$  est la section d'armature dans le chevêtre incorporé dans le voile  
due à la flexion longitudinale auxquelles il faut ajouter  $\Omega_r$  qui  
est la section d'armatures due à la flexion transversale due au poussées  
des terres sur les murs en retour.

Le moment transmis par les poussées est :  $M_h = 7,87 \text{ mKdaN/ml}$

$$A = \frac{M}{\frac{7}{8} h \bar{\sigma}_a} = \frac{7,87 \cdot 10^5}{\frac{7}{8} \cdot 115 \cdot 2800} = 2,79 \text{ cm}^2 \text{ soit } 3 \text{ HA12} = 3,39 \text{ cm}^2$$

... The  
... and so



## Calcul des pieux : Methode de WERNER.

Le pieu est suppose comme etant une poutre appuyee tout le long sur un sol elastique. De ce fait, on considere que la pression de contact entre le pieu et le sol est proportionnelle a la fleche du pieu.

$$P(z) = -Kv(z)$$

$v$ : fleche du pieu

$P$ : charge uniforme

$K = bC_u$  avec  $b$ : Largeur du pieu (diametre)

$C_u$ : module de reaction du sol

$$P(z) = -Kv(z) = -bC_u v(z)$$

$$\text{D'autre part, on a: } \frac{d^2 M}{dz^2} = -P(z) = +bC_u v(z) \quad (1)$$

L'equation differentielle de la ligne elastique s'ecrit par:

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = -\frac{M}{EI} \rightarrow M = -EI \frac{d^2 v}{dz^2}$$

$$\text{L'equation (1) devient: } \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[ -EI \frac{d^2 v(z)}{dz^2} \right] = bC_u v(z)$$

$$\text{donc on a: } -EI \frac{d^4 v(z)}{dz^4} = bC_u v(z)$$

$$\rightarrow EI \frac{d^4 v}{dz^4} + bC_u v = 0$$

$$\frac{d^4 v}{dz^4} + \frac{bC_u}{EI} v = 0$$

$$\text{Posons } \lambda = \left( \frac{bC_u}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{on a alors: } \frac{d^4 v}{dz^4} + 4\lambda^4 v = 0$$

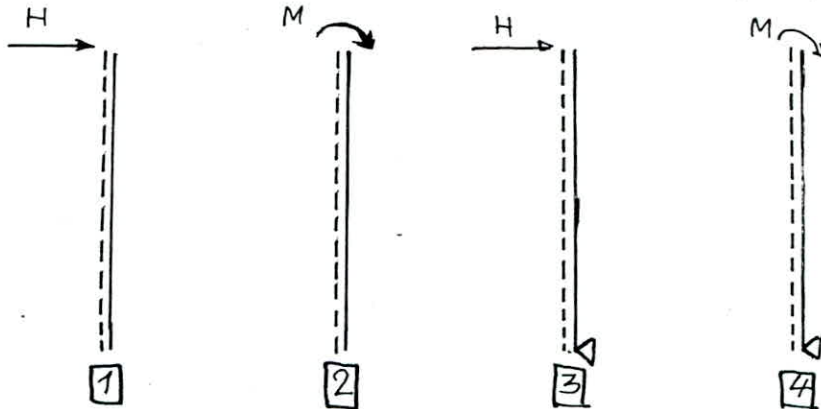
$\lambda$  est dit facteur d'amortissement.

La résolution de cette équation différentielle du 4<sup>ème</sup> ordre de la fleche nous donne le moment sollicitant le pieu.

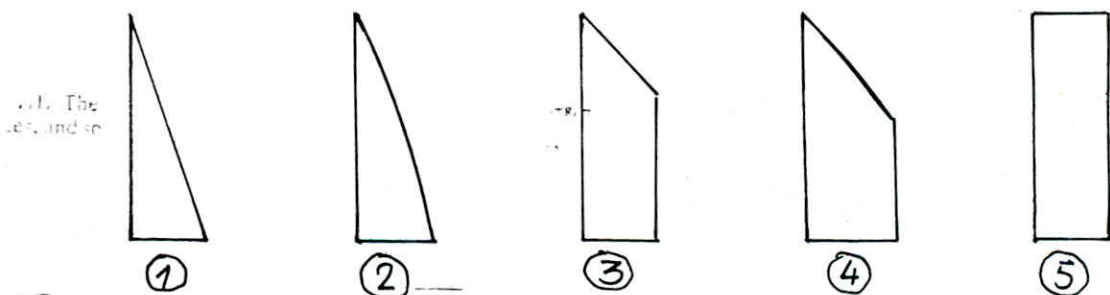
La solution de cette équation a pour forme :

$$v = e^{\lambda z} (A \sin \lambda z + B \cos \lambda z) + e^{-\lambda z} (C \sin \lambda z + D \cos \lambda z)$$

Les conditions aux limites nous donnent les coefficients A, B, C, D à l'aide de la méthode de WERNER qui suppose les 4 cas suivants :



Pour déterminer  $\lambda$ , la méthode de WERNER prévoit 5 cas de diagramme contrainte - profondeur selon la nature du sol.



Pour calculer les pieux, on considère les cas ① et ② selon les sollicitations. Le cas ① correspond à notre sol

$$C_u = 0,75 \text{ daN/cm}^3 \quad (\text{Terrain (marécageux)})$$

$$I = \frac{\pi \phi^4}{64} = 10173600 \text{ cm}^4$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ daN/cm}^2$$

$$\text{d'où } \lambda = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ (cm}^{-1}\text{)} = 0,182 \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$\text{d'où } \lambda l = 0,182 \times 30 = 5,47$$

Les pieux sont disposés en 2 files encastées dans la semelle donc la rotation est nulle en leur tête donc  $\varphi(0) = 0$

$$\rightarrow \chi_{\varphi} \frac{M}{l} + \chi_{\varphi} \frac{H}{l^2} = 0$$

La table III des Abaques de WERNER nous donne les  $\chi$  pour les cas de sollicitation 1 et 2

$$\chi_{\varphi(M)} = 1,843 \quad ; \quad \chi_{\varphi(H)} = 1,808$$

$$\text{L'effort } H \text{ horizontal} = \frac{651}{18} = 36,16 \text{ kdaN}$$

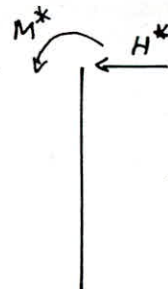
Donc le moment à l'encastement est :

$$1,843 \times \frac{M}{1,82 \cdot 10^{-3}} + 1,808 \cdot \frac{36160}{3,268 \cdot 10^{-6}} = 0$$

$$M = -197,5 \text{ m kdaN.}$$

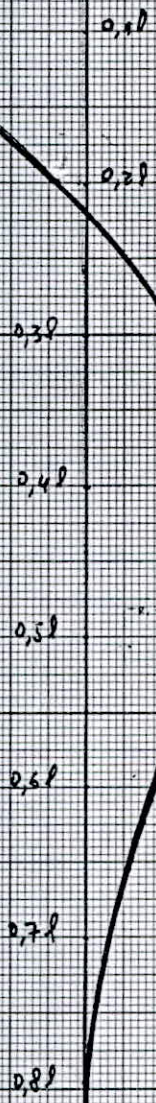
Connaissant le moment d'encastement et l'effort  $H$ , on peut isoler le pieu et calculer le moment le long du pieu  $M(z=0 \div l)$

$M(z=0 \div l) = \chi_M M^* + \chi_M \frac{H^*}{l}$   
à l'aide des abaques de WERNER, on tire les valeurs de  $\chi_M = f(2l)$  pour le cas ①



| cote sollicitation | 0,1l | 0,2l | 0,3l | 0,4l | 0,5l | 0,6l | 0,7l | 0,8l  |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| H ①                | 0,5  | 0,78 | 0,8  | 0,63 | 0,4  | 0,2  | 0,08 | 0,012 |
| M ②                | 0,57 | 0,85 | 0,6  | 0,36 | 0,18 | 0,05 | 0    | 0     |

$M$  (mkobn)



| $z$ (m) | $M$ (mkobn) |
|---------|-------------|
| 0,0     | -187,5      |
| 0,1     | -92,23      |
| 0,2     | -12,9       |
| 0,3     | 40,44       |
| 0,4     | 54,07       |
| 0,5     | 43,92       |
| 0,6     | 29,86       |
| 0,7     | 9,68        |
| 0,8     | 0           |

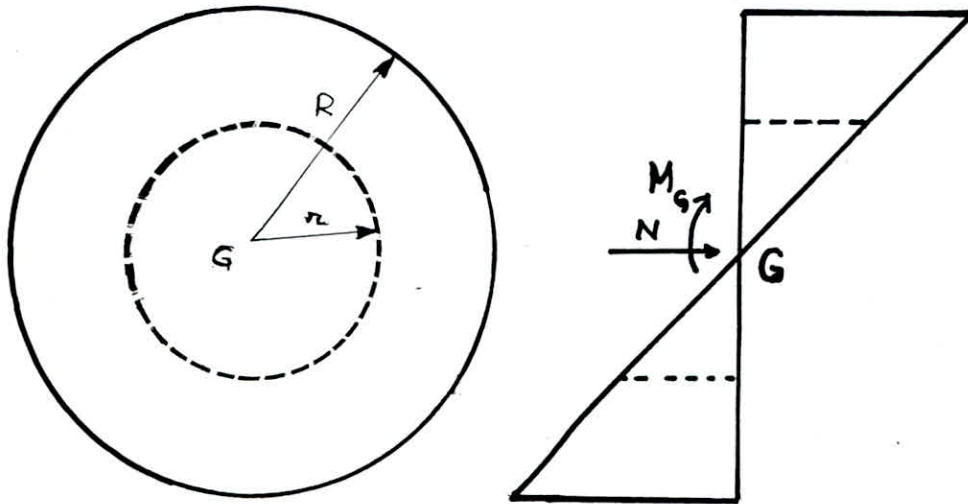
$z$  (m)

Ferrailage du pieu:

Soit l'effort normal minimal et le moment max

$$N = 9,97 \text{ kdaN} ; \quad M = 197,5 \text{ m kdaN}$$

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{M}{N} = 1981 \text{ cm} \\ \frac{R}{4} &= 30 \text{ cm} \end{aligned} \right\} \rightarrow e > \frac{R}{4} \Rightarrow \text{la section est partiellement comprimée}$$



$$\eta = \frac{e}{D} ; \quad r = 0,8R = 48 \text{ cm} ; \quad \eta = \frac{1981}{120} = 16,5$$

$$S = B = \pi R^2 = \pi \cdot 60^2 = 11304 \text{ cm}^2$$

$$\mu' = \frac{M}{\bar{\sigma}_b' \cdot B \cdot D} = \frac{197,5 \cdot 10^5}{180 \cdot 11304 \cdot 120} = 0,0808$$

Pour  $\mu' = 0,0808$  et  $\eta = 16,5$ , la table 7 du livre de P. Charon (chaos vert)

nous donne  $\bar{w} = 1,03$  ;  $k = 29,8$

$$A = \frac{11304}{100} \times \bar{w} = 116,43 \text{ cm}^2 \text{ soit } 24 \text{ HA } 25 = 117,79 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_b' = \frac{\sigma_a}{k} = \frac{2667}{29,8} = 89,5 \text{ bar} < \bar{\sigma}_b = 180 \text{ bar}$$

Aciers transversaux:

$$A_t = \frac{T}{3 \bar{\sigma}_{at}} = \frac{T}{0,8 \phi \cdot \bar{\sigma}_{at}} = \frac{36160}{0,8 \times 120 \times 2800} = 13,45 \text{ cm}^2 / \text{ml}$$

$$\text{soit : } 7 \text{ HA } 16 / \text{ml} = 14,07 \text{ cm}^2 / \text{ml} ; \quad e = 17 \text{ cm}$$



