

UNIVERSITÉ D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

9/74

Département Génie Civil



# Hangar d'Avion à Toiture en Structure Tridimensionnelle Métallique

1974

Proposé par : I. UNGUREANU

Étudié par : A. YOUNSI  
K. BRAHIMI

— JUIN 1974 —

Imp. Nat. Alg. — BLIDA

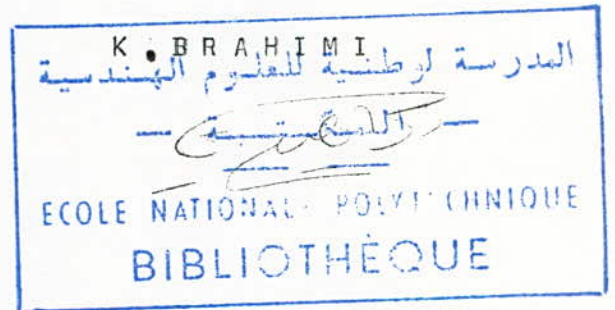


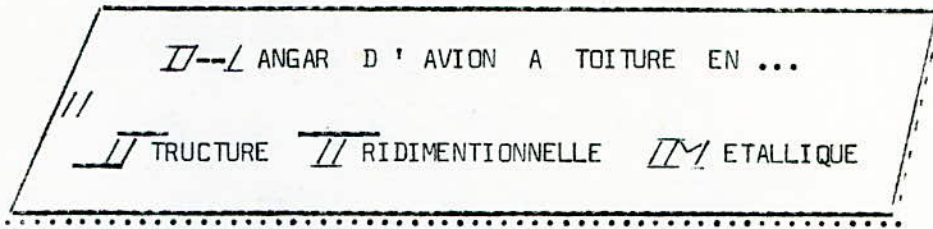
MES FRERES .

A . YOUNSI

7. MA FEMME ET MON FILS.

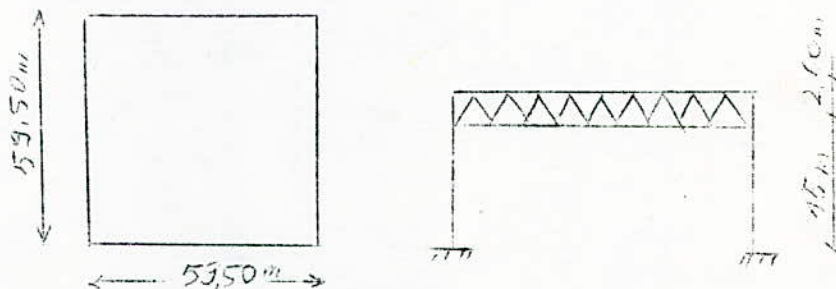
A. MES FRERES ET AMIS.





LE SUJET DE THESE DE FIN D' ETUDE PROPOSE  
DOIT REpondre AUX POINTS SUIVANTS :

1. ETUDE DE LA THEORIE DES POUTRES CROISEES .
2. APPLICATION DE CETTE THEORIE POUR LE CALCUL D'UNE STRUCTURE TRIDIMENTIONNELLE METALLIQUE DEMONTABLE UTILISEE COMME TOITURE POUR UN HANGAR D'AVION AYANT LES DIMENSIONS SUIVATES :



3. CALCUL DES POTEAUX ET DETAILS D'ASSEMBLAGE.
4. SCHEMA DE MONTAGE DE LA STRUCTURE ET PROPOSITION DE MISE EN PLACE
5. CALCUL DES FONDATIONS (Contrainte admissible du sol = 1,7 bars )

Les Regles : CM 66 -- NV 65 -- PS 69 -- seront utilisees

Le Promoteur : ION UNGUREANU

Ingenieur , Docteur d' Etat, Professeur ENPA

UNIVERSITE D'ALGER

Ecole Nationale Polytechnique

Departement Genie Civil

I 9 7 3  $\frac{00}{00}$  I 9 7 4

Cette thèse de fin d'étude porte sur l'étude d'un hangar métallique de forme carrée de 59,50m de côté sans piliers intermédiaires dont une façade doit être prévue entièrement ouverte et les trois autres fermées .

L'intérêt de cette étude réside surtout dans le mode de couverture qui est une structure tridimensionnelle métallique démontable composées d'éléments préfabriqués - modules - qui , assemblés les<sup>uns</sup> aux autres forment un système de poutres croisées à deux(2) directions.

La totalité des assemblages sont effectués par boulons et seul le module constitue un élément rigide obtenu par soudage de cornières. Cette toiture repose du côté des façades fermées sur des poteaux articulés inclinés en trillis et recouverts d'un bardage.

Du côté de la façade ouverte ; elle repose sur une poutre triangulée - "poutre maîtresse" qui doit franchir la longueur de la façade sans appuis intermédiaires.

Le mode de fermeture de l'entrée n'entre pas dans le cadre de cette étude.

Les structures tridimensionnelles ont fait leur apparition depuis une vingtaine d'années et continuent de se développer de nos jours à un rythme rapide. Leur champ d'application ne cesse de s'étendre et on les retrouve généralement là où il est nécessaire de couvrir de grands espaces sans appuis intermédiaires, elles offrent par la même occasion la possibilité d'avoir une toiture horizontale.

Parmi les ouvrages auxquels elles sont couramment destinées on peut citer:

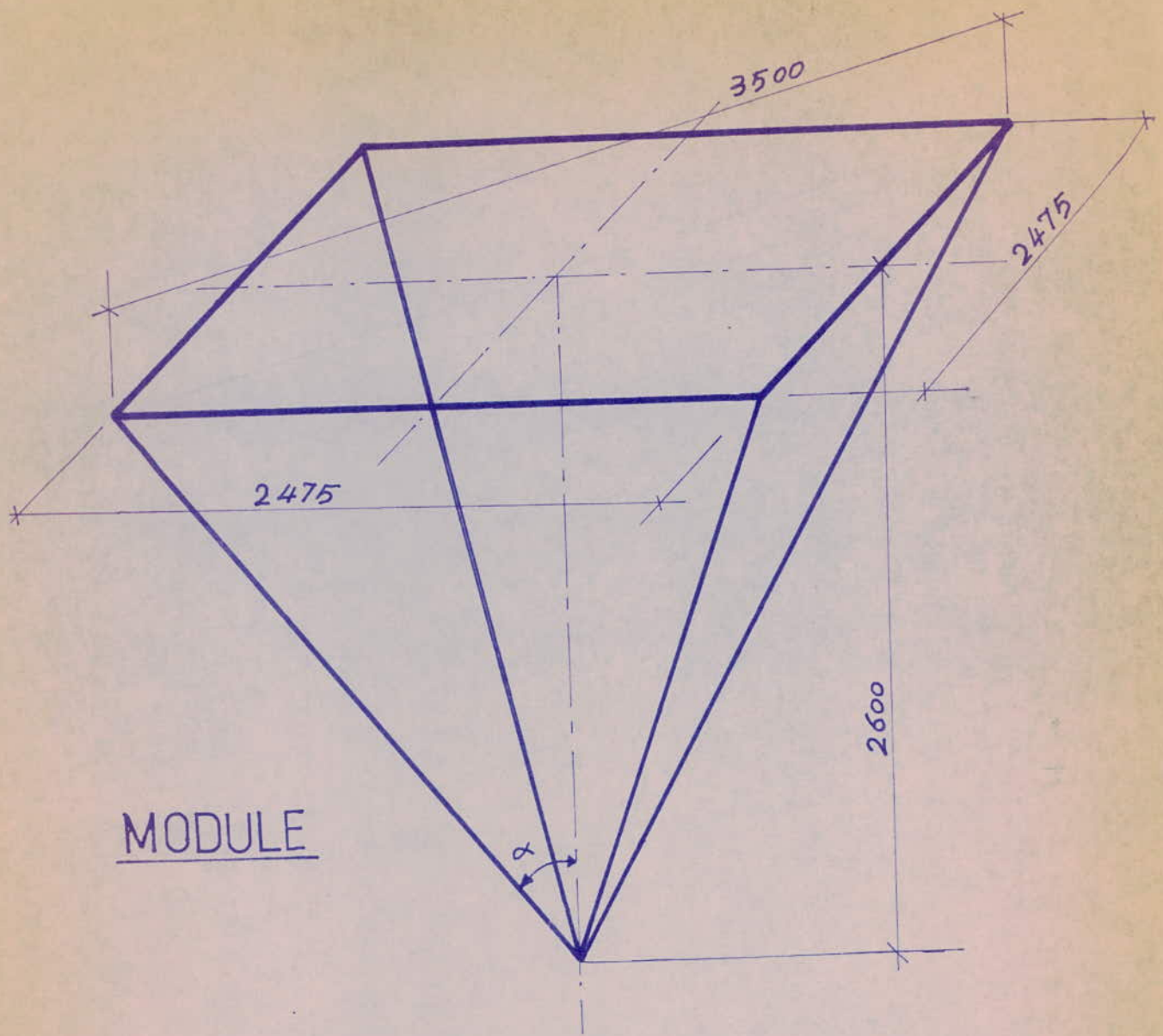
- Piscines
- Grands restaurants
- Salles d'exposition
- Entrepôts
- Hangars d'avion ...etc

pratiquement ces structures présentent toutes la même constitution : elles sont constituées de deux (2) lits ou nappes de barres (respectivement supérieures et inférieures) qui sont reliées entre-elles par un réseau de barres inclinées les diagonales.

Cet assemblage apparemment complexe de barres est en fait obtenu par un procédé très simple : on assemble les uns aux autres des éléments de base de forme pyramidale - les modules - auxquels on ajoute des tirants.

La forme géométrique d'ensemble donnée à cette "mosaïque" de pyramides renversées, peut répondre aux exigences architecturales les plus diverses.

Parmi les nombreuses formes rencontrées, on peut citer :

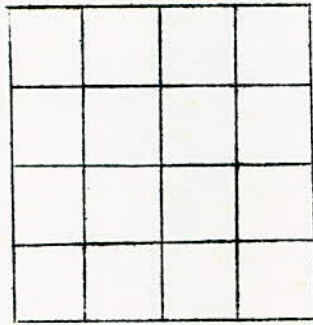


MODULE

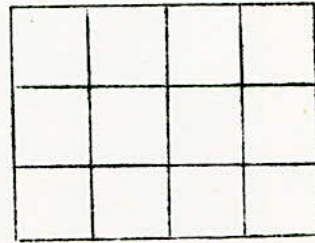
CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU MODULE

$$\frac{59.5}{17} = 3.5 \text{ m} \quad ; \quad \frac{35}{1.414} = 2.475 \text{ m.}$$

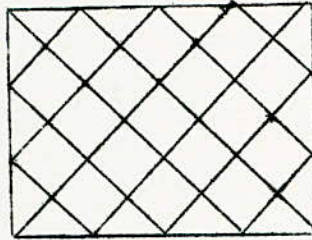
$\cos \alpha = 0.83$ $\sin \alpha = 0.558$	$\alpha = 33^{\circ} 54'$
---	---------------------------



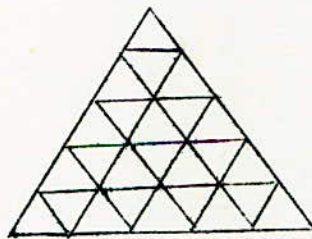
(1)



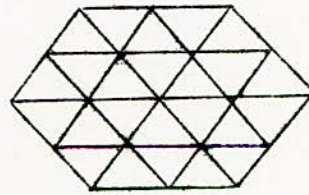
(2)



(3)



(4)



(5)

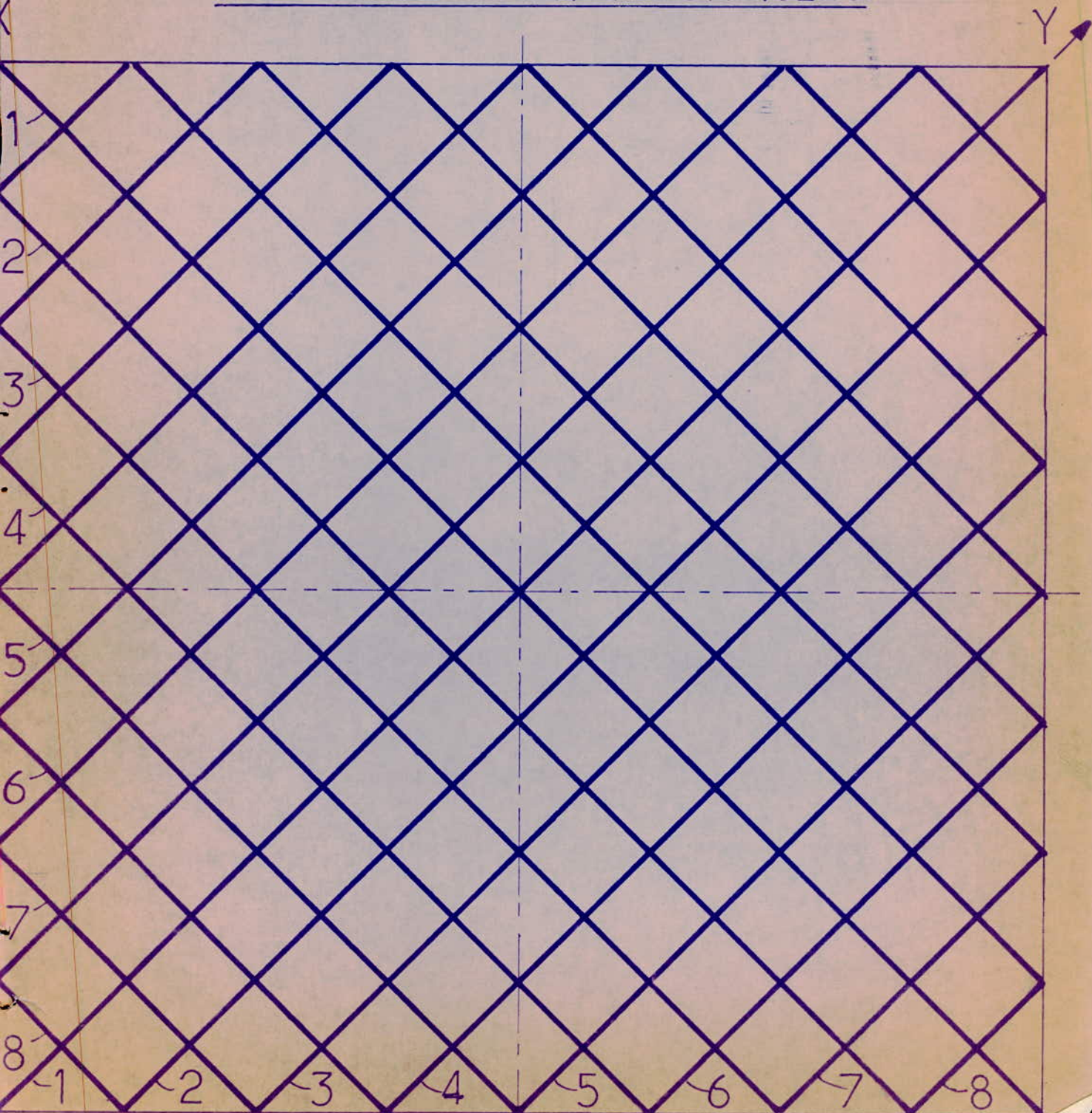
En plus des nombreux avantages offerts par ces structures aussi bien du point de vue économique que du comportement vis à vis des sollicitations extérieures, elles se prêtent bien à la préfabrication en atelier, ce qui rend leur mise en oeuvre rapide.

Cependant, leur réalisation nécessite une étude préalable poussée, une main d'oeuvre spécialisée et des moyens technologiques modernes.

NOTA: Les essais sur maquettes ont prouvé que les structures du type (3) ci-dessus résistent mieux aux efforts de torsion.  
Nous opterons pour une structure de ce type.



# RESEAU DE POUTRES CROISEES



THEORIE DES POUTRES CROISEES /

Généralités.

Il existe plusieurs méthodes de calcul applicables aux structures spatiales, et on ne peut affirmer à priori laquelle est la plus convenable, car elles sont basées sur des hypothèses différentes et les résultats ne concordent souvent qu'avec une certaine marge d'erreur.

Elles présentent des avantages et des inconvénients les unes par rapport aux autres du point de vue précision ou facilité de calcul, et parmi celles qui ont été éprouvées et qui méritent d'être mentionnées, on peut citer :

- Analogie avec une plaque. cette méthode consiste à assimiler toute la structure à une plaque continue et homogène et la calculer comme telle; or les structures tridimensionnelles offrent beaucoup de discontinuités, d'où les difficultés d'établir les conditions d'analogie.

- Isolation des noeuds. on isole chaque noeud et on écrit l'équation d'équilibre; on répète cette opération pour tous les noeuds du réseau. C'est la méthode la plus précise mais, elle s'avère laborieuse car elle nécessite la résolution d'un grand nombre d'équations.

- Théorie des poutres croisées. on considère que la structure est constituée par un réseau de poutres croisées et on applique les méthodes de calcul relatives à de tels systèmes.

Nous adopterons cette méthode qui est la plus couramment utilisée.

Dans ce chapitre, nous donnerons un bref exposé sur la méthode de calcul des réseaux de poutres croisées couramment rencontrés dans la construction des ponts, planchers, structures spatiales, ...etc.

On ne trouvera pas ici, la théorie complète, mais uniquement la partie relative à nos calculs; il existe des ouvrages -notamment RDM Courbon T2- qui traitent la question avec beaucoup plus de détails.

\* Reseau de poutres croisées, description.

Ils sont constitués de poutres coplanaires à plusieurs directions qui, en leur points de rencontre, s'entre-pénètrent de façon à former un noeud; ce procédé a pour effet de créer une solidarisation d'ensemble, d'où un gain en portée et en résistance. Les poutres d'une direction donnée sont généralement identiques (mêmes sections, inertie, et modes d'appuis), orthogonales ou obliques par rapport aux poutres d'une autre direction, et de caractéristiques parfois différentes qu'elles

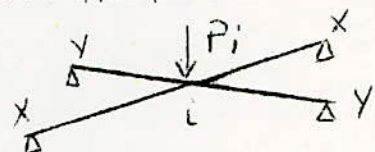
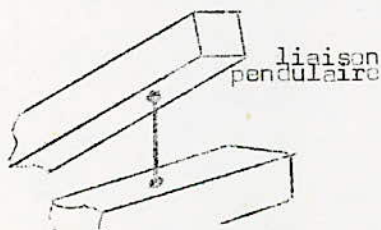
Cependant, dans le cas d'un réseau régulier, qui est le nôtre, à deux (2) directions, toutes les poutres ont la même section, sont orthogonales, et ont un écartement constant entre elles  $d$ .

\* Hypothèses admises dans les calculs.

- les poutres d'une direction restent stables si on supprime celles de la direction orthogonale.
- la liaison à un noeud est supposée être de nature pendulaire ce qui permet de faire abstraction des efforts de torsion (car une telle liaison empêche les déplacements linéaires mais pas les rotations).
- les effets de l'effort tranchant ne seront pris en compte car de peu d'importance, donc d'influence négligeable.
- on admet enfin que lorsque deux poutres se croisent en un point, elles accusent la même flèche en ce point.

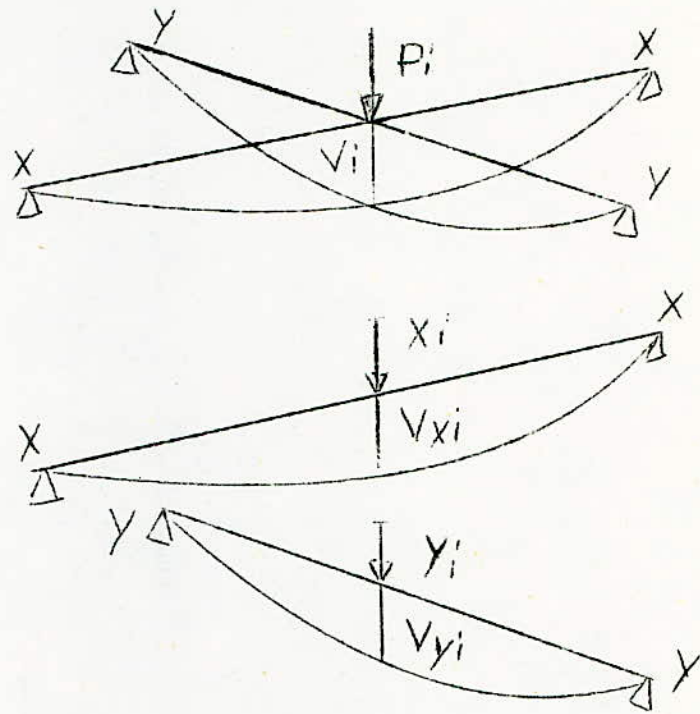
Nota : les charges sont supposées ponctuelles et appliquées aux noeuds.

\* Principe de calcul/



- en 'i':
- 1°/ XX reprend  $X_i$ , YY reprend  $Y_i$
  - 2°/ ll existe une flèche  $V_i$

La charge  $P_i$  appliquée à un nœud  $i$  est reprise par les 2 poutres  $XX$  et  $YY$ .



Le problème est de savoir la valeur des 2 parts  $X_i$  et  $Y_i$  revenant à chacune des poutres. Il s'agit donc de déterminer 2 inconnues et la relation de la statique  $X_i + Y_i = P_i$  (1) ne suffit pas.

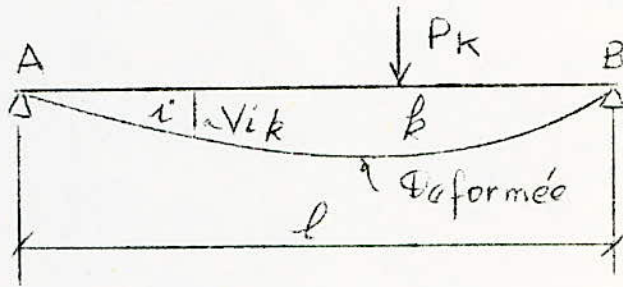
La deuxième équation est fournie par l'égalité des flèches :

En effet, en  $i$ , nous avons :  $v_{xi} = v_{yi} = v_i$  (2)

Ainsi nous avons 2 équations et 2 inconnues en chaque nœud, la résolution est donc possible après certains calculs préliminaires.

## Relation : Flèches - Forces

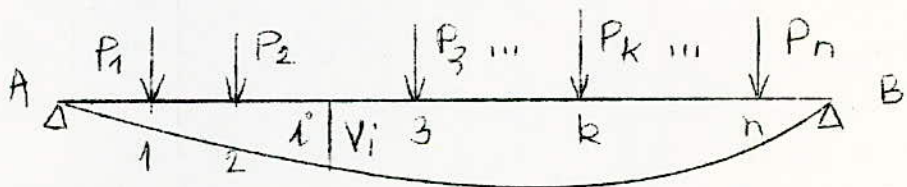
Soit une poutre AB, sur 2 appuis simples, de portée  $l$  et soumise à la charge  $P_k$  en  $k$  :



La flèche  $V_{ik}$  dans une section  $i$ , due à  $P_k$  est de la forme :  $V_{ik} = a_{ik} P_k$

c'est une relation linéaire, et  $a_{ik}$  est le coefficient de souplesse qui ne dépend que des caractéristiques géométriques et mécaniques de la poutre et des positions des section  $i$  &  $k$ .

Dans le cas de plusieurs charges  $P_k$  la flèche totale dans une section  $i$  due à l'ensemble des charges  $P_k$  s'obtient en faisant la somme algébrique des flèches élémentaires provoquées par chacune des charges.



$$V_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot P_k$$

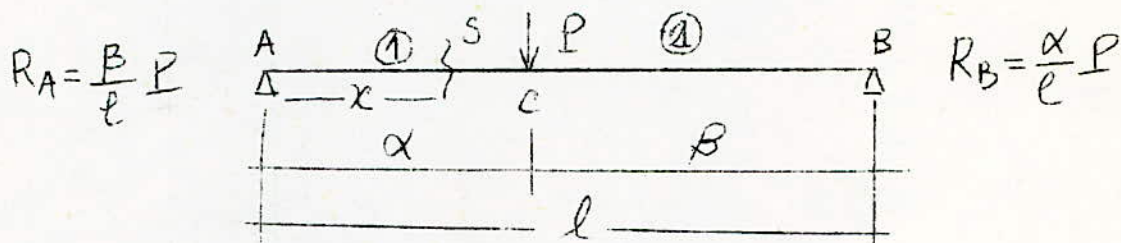
Étendue à l'ensemble des sections cette relation se généralise en écriture matricielle comme suit:

$$[V_i] = [a_{ik}] [P_k]$$

$[a_{ik}]$  = Matrice de souplesse de la poutre,  
symétrique  $a_{ik} = a_{ki}$   
(c.f. th. réciprocity de Maxwell)

### Détermination des coefficients $a_{ik}$

Soit une poutre AB, de portée  $l$ , soumise à une charge  $P_k$  en C d'abscisse  $x$  telle que  $(\alpha + \beta) = l$ .



- Nous supposons cette poutre de section constante  
 $EI = \text{cste}$
- Seule la flèche due au moment flechissant sera considérée -

Écrivons l'équation différentielle de la poutre élastique pour les 2 régions AC ①, et BC ②, en une section S d'abscisse  $x$  de ces 2 régions -

Pour obtenir, après intégration :

Region AC (1)

Region BC (2)

$$\frac{EI}{P} y_1'' = -M = -\frac{\beta}{\ell} x$$

$$\frac{EI}{P} y_1' = -\frac{\beta x^2}{2\ell} + C_1$$

$$EI y_1 = -\frac{\beta x^3}{3 \cdot 2\ell} + C_1 x + D_1$$

$$\frac{EI}{P} y_2'' = -M = -\frac{\alpha}{\ell} x$$

$$\frac{EI}{P} y_2' = -\frac{\alpha x^2}{2\ell} + C_2$$

$$\frac{EI}{P} y_2 = -\frac{\alpha x^3}{3 \cdot 2\ell} + C_2 x + D_2$$

- Calcul des constantes  $C_1, C_2, D_1, D_2$  -

Conditions aux limites:

$$\left. \begin{array}{l} x = \ell \\ x = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow y = 0 \Rightarrow D_1 = D_2 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = \alpha \\ x_2 = \beta \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{y_1 = y_2} \quad \& \quad \boxed{y_1' + y_2' = 0}$$

$$y_1' + y_2' = 0 \Rightarrow -\frac{\beta x^2}{2\ell} + C_1 - \frac{\alpha x^2}{2\ell} + C_2 = 0$$

$$\text{soit } -\frac{\beta \alpha^2}{2\ell} + C_1 - \frac{\alpha \beta^2}{2\ell} + C_2 = 0$$

$$C_1 + C_2 = \frac{\alpha \beta}{2\ell} (\alpha + \beta) = \frac{\alpha \beta \ell}{2} \Rightarrow \boxed{C_1 + C_2 = \frac{\alpha \beta}{2}}$$

$$y_1 = y_2 \Rightarrow -\frac{\beta x^3}{3 \cdot 2\ell} + C_1 x = -\frac{\alpha x^3}{3 \cdot 2\ell} + C_2 x$$

$$\text{soit } -\frac{\beta \alpha^3}{6\ell} + C_1 \alpha = -\frac{\alpha \beta^3}{6\ell} + C_2 \beta$$

$$C_1 \alpha - C_2 \beta = \frac{\alpha \beta}{6\ell} [\alpha^2 - \beta^2] = \frac{\alpha \beta}{6} (\alpha - \beta)$$

$$\begin{cases} C_1 \alpha - C_2 \beta = \frac{\alpha \beta}{6} (\alpha - \beta) \\ C_1 \beta + C_2 \beta = \frac{3 \alpha \beta^2}{6} \end{cases}$$

$$C_1(x+\beta) = \frac{\alpha\beta}{6} (x-\beta+3\beta) \Rightarrow C_1 = \frac{\alpha\beta}{6l} (x+2\beta)$$

$$\text{Soit } C_1 = \frac{\beta}{6l} (x^2 + 2\alpha\beta)$$

$$x^2 + 2\alpha\beta = (x+\beta)^2 - \beta^2 = l^2 - \beta^2 ; \text{ finalement.}$$

$$\text{on obtient : } \begin{cases} C_1 = \frac{\beta}{6l} (l^2 - \beta^2) = \frac{l-x}{6l} (2l-x)\alpha \\ C_2 = \frac{\alpha}{6l} (l^2 - x^2) \end{cases}$$

Soit dans la section  $S$ , s'exprime par :

Région ①  $x \leq \alpha$

$$V_i = \frac{P}{6EI} \left[ \frac{(l-x)x^3}{l} + \frac{(l-x)(2l-x)\alpha \cdot x}{l} \right]$$

Région ②  $x \geq \alpha$

$$V_i = \frac{P}{6EI} \left[ \frac{\alpha(l-x)^3}{l} + \frac{\alpha(l^2 - x^2)(l-x)}{l} \right]$$

Ces formules peuvent s'écrire sous la forme :

$$V_i = \frac{P}{6EI} \begin{cases} \frac{x(l-x)}{l} [\alpha(2l-x) - x^2] & \underline{x \leq \alpha} \\ \frac{\alpha(l-x)}{l} [x(2l-x) - x^2] & \underline{x \geq \alpha} \end{cases}$$

Si nous posons :  $\begin{cases} l = (n+1)d \\ \alpha = kd \\ x = id \end{cases}$  avec :  
 $n$  = nombre d'intervalles  
 $d$  : intervalle

Les expressions ci-dessus s'écriront :



$$V_i = \frac{Pd^3}{6EI} \begin{cases} i \frac{(n+1-k)}{n+1} [k(2n+2-k) - i^2] \\ k \frac{(n+1-i)}{n+1} [i(2n+2-i) - k^2] \end{cases}$$

on passe de la formule (1) à (2) en changeant  $i$  en  $k$ .

Cette dernière formule est plus commode pour le calcul sur ordinateur car elle fait intervenir des valeurs entières ( $i$ ,  $k$ , et  $n$ )

Le facteur  $P/6EI$  étant constant, l'équation

$$V_{xi} = V_{yi} \text{ s'écrit } \sum a_{ik}^{(x)} \cdot X_k = \sum a_{ik}^{(y)} \cdot Y_k$$

Les coefficients  $a_{ik}$  ne contiennent pas le  $P/6EI$  et ont été calculés par ordinateur.

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux.

Ainsi, en chaque nœud du réseau de poutres, nous écrivons l'égalité des flèches en prenant les charges revenant à chacune des poutres ( $X_k = Y_k$ ), comme inconnues, en utilisant l'équation suivante:

en un nœud  $i$  :

$$\sum a_{ik}^{(x)} \cdot X_k = \sum a_{ik}^{(y)} \cdot Y_k$$

ce qui nous donne l'équation au nœud.

MATRICES DES COEFFICIENTS DE SOUPLESSE

~~XX~~ DES POUTRES ~~XX~~

---

Poutre n°	1	:	nombre de noeuds	15
"	2		"	13
"	3		"	11
"	4		"	9
"	5		"	7
"	6		"	5
"	7		"	3
"	8		"	1

NOMBRE DE NOEUDS = 1

1.0000

NOMBRE DE NOEUDS = 3

4.5000 5.5000 3.5000

5.5000 8.0000 5.5000

3.5000 5.5000 4.5000

NOMBRE DE NOEUDS = 5

8.3333 12.6666 13.0000 10.3333 5.6666

12.6666 21.3333 23.0000 18.6666 10.0000

13.0000 23.0000 27.0000 23.0000 13.0000

10.3333 18.6666 23.0000 21.3333 12.6666

5.6666 10.3333 13.0000 12.6666 8.3333

NOMBRE DE NOEUDS = 7

12.2500 20.2500 23.7500 23.5000 20.2500 14.7500 7.7500

20.2500 36.0000 43.7500 44.0000 38.2500 28.0000 14.7500

23.7500 43.7500 56.2500 58.5000 51.7500 38.2500 20.2500

23.5000 44.0000 58.5000 64.0000 58.5000 44.0000 23.5000

20.2500 36.2500 51.7500 58.5000 56.2500 43.7500 23.7500

14.7500 28.0000 38.2500 44.0000 43.7500 36.0000 20.2500

7.7500 14.7500 20.2500 23.5000 23.7500 20.2500 12.2500

NOMBRE DE NOEUDS = 9

16.2000	28.0000	35.0000	37.8000	27.0000	33.2000	27.0000	19.0000	9.8000
28.0000	51.2000	65.8000	72.0000	71.0000	64.0000	52.2000	36.8000	19.0000
35.0000	65.8000	88.2000	99.0000	99.0000	90.0000	73.8000	52.2000	27.0000
37.8000	72.0000	99.0000	115.2000	118.0000	108.8000	90.0000	64.0000	33.2000
37.0000	71.0000	99.0000	118.0000	125.0000	118.0000	99.0000	71.0000	37.0000
33.2000	64.0000	90.0000	108.8000	118.0000	115.2000	99.0000	72.0000	37.0000
27.0000	52.2000	73.8000	90.0000	99.0000	99.0000	88.2000	65.8000	35.0000
19.0000	36.8000	52.2000	64.0000	71.0000	72.0000	65.8000	51.2000	28.0000
9.8000	19.0000	27.0000	33.2000	37.0000	37.8000	35.0000	28.0000	16.2000

NOMBRE DE NOEUDS = 11

20.1666	35.8333	46.5000	52.6666	54.8333	53.5000	49.1666	42.3333	33.5000	23.1666	11.8333
35.8333	66.6666	88.5000	101.3333	106.1666	104.0000	95.8333	82.6666	65.5000	45.3333	33.5000
46.5000	88.5000	121.5000	142.0000	150.5000	148.5000	137.5000	119.0000	94.5000	65.5000	33.5000
52.6666	101.3333	142.0000	170.6666	184.3333	184.0000	171.6666	149.3333	119.0000	82.6666	42.3333
54.8333	106.1666	150.5000	184.3333	204.1666	207.5000	195.8333	171.6666	137.5000	95.8333	49.1666
53.5000	104.0000	148.5000	184.0000	207.5000	216.0000	207.5000	184.0000	148.5000	104.0000	53.5000
49.1666	95.8333	137.5000	171.6666	195.8333	207.5000	204.1666	184.3333	150.5000	106.1666	54.8333
42.3333	82.6666	119.0000	149.3333	171.6666	184.0000	184.3333	170.6666	142.0000	101.3333	52.6666
33.5000	65.5000	94.5000	119.0000	137.5000	148.5000	150.5000	142.0000	121.5000	88.5000	46.5000
23.1666	45.3333	65.5000	82.6666	95.8333	104.0000	106.1666	101.3333	88.5000	66.6666	35.8333
11.8333	23.1666	33.5000	42.3333	49.1666	53.5000	54.8333	52.6666	46.5000	35.8333	20.1666

NOMBRE DE NCEUDS = 13

24.1428	43.7142	58.1428	67.8571	73.2857	74.8571	73.0000	68.1428	60.7142	51.1428	39.8571	27.2857
43.7142	82.2857	111.5714	131.4285	142.7142	146.2857	143.0000	133.7142	119.2857	100.5714	78.4285	53.7142
58.1428	111.5714	155.5714	186.4285	204.4285	210.8571	207.0000	194.1428	173.5714	146.5714	114.4285	78.4285
67.8571	131.4285	186.4285	228.5714	254.5714	265.1428	262.0000	246.8571	221.4285	187.4285	146.5714	100.5714
73.2857	142.7142	204.4285	254.5714	289.2857	305.7142	305.0000	289.2857	260.7142	221.4285	173.5714	119.2857
74.8571	146.2857	210.8571	265.1428	305.7142	329.1428	333.0000	318.8571	289.2857	246.8571	194.1428	133.7142
73.0000	143.0000	207.0000	262.0000	305.0000	333.0000	343.0000	333.0000	305.0000	262.0000	207.0000	143.0000
68.1428	133.7142	194.1428	246.8571	289.2857	318.8571	333.0000	329.1428	305.7142	265.1428	210.8571	146.2857
60.7142	119.2857	173.5714	221.4285	260.7142	289.2857	305.0000	305.7142	289.2857	254.5714	204.4285	142.7142
51.1428	100.5714	146.5714	187.4285	221.4285	246.8571	262.0000	265.1428	254.5714	228.5714	186.4285	131.4285
39.8571	78.4285	114.4285	146.5714	173.5714	194.1428	207.0000	210.8571	204.4285	186.4285	155.5714	111.5714
27.2857	53.7142	78.4285	100.5714	119.2857	133.7142	143.0000	146.2857	142.7142	131.4285	111.5714	82.2857
13.8571	27.2857	39.8571	51.1428	60.7142	68.1428	73.0000	74.8571	73.2857	67.8571	58.1428	43.7142

NOMBRE DE NOEUDS = 15

250	92.125	96.875	97.875	95.500	90.125	82.125	71.875	59.750	46.125	31.375	15.875
000	180.125	190.000	192.375	188.000	177.625	162.000	141.875	118.000	91.125	62.000	31.375
750	259.875	275.625	280.125	274.500	259.875	237.375	208.125	173.250	133.875	91.125	46.125
000	327.250	350.000	357.750	352.000	334.250	306.000	268.750	224.000	173.250	118.000	59.750
250	378.125	409.375	421.875	417.500	398.125	365.625	321.875	268.750	208.125	141.875	71.875
000	409.375	450.000	469.125	468.000	448.875	414.000	365.625	306.000	237.375	162.000	82.125
750	421.875	469.125	469.125	500.500	483.875	448.875	398.125	334.250	259.875	177.625	90.125
000	417.500	468.000	500.500	512.000	500.500	468.000	417.500	352.000	274.500	188.000	95.500
250	398.125	448.875	483.875	500.500	496.125	469.125	421.875	357.750	280.125	192.375	97.875
000	365.625	414.000	448.875	468.000	469.125	450.000	409.375	350.000	275.625	190.000	96.875
750	321.875	365.625	398.125	417.500	421.875	409.375	378.125	327.250	259.875	180.125	92.125
000	268.750	306.000	334.250	352.000	357.750	350.000	327.250	288.000	231.750	162.000	83.250
250	208.125	237.375	259.875	274.500	280.125	275.625	259.875	231.750	190.125	134.875	69.875
000	141.875	162.000	177.625	188.000	192.375	190.000	180.125	162.000	134.875	98.000	51.625
750	71.875	82.125	90.125	95.500	97.875	96.875	92.125	83.250	69.875	51.625	28.125

ETABLISSEMENT DU SYSTEME

D'EQUATIONS

ooo

ooo

---





EN chaque <sup>point</sup> de croisement nous écrirons l'égalité des flèches prises par les poutres dans les deux (2) directions. Les calculs seront détaillés pour les deux (2) premiers points seulement. Nous convenons d'appeler  $A_{ik}$  &  $B_{jh}$  les coefficients d'influence respectivement dans les directions X & Y

EQUATION. AU POINT I

$$\begin{aligned}
 A_{1,1} \cdot X_1 = & B_{1,1}(P-X_1) + B_{1,2}(P-X_5) + B_{1,3}(P-X_{10}) + B_{1,4}(P-X_{14}) \\
 & + B_{1,5}(P-X_{19}) + B_{1,6}(P-X_{23}) + B_{1,7}(P-X_{28}) + B_{1,8}(P-X_{32}) \\
 & + B_{1,9}(P-X_{28}) + B_{1,10}(P-X_{23}) + B_{1,11}(P-X_{19}) + B_{1,12}(P-X_{14}) \\
 & + B_{1,13}(P-X_{10}) + B_{1,14}(P-X_5) + B_{1,15}(P-X_1)
 \end{aligned}$$

En portant les valeurs des coefficients on obtient :

$$\begin{aligned}
 I \cdot X_1 = & 28,125(P-X_1) + 51,625(P-X_5) + 69,875(P-X_{10}) + 83,250(P-X_{14}) \\
 & + 92,125(P-X_{19}) + 96,875(P-X_{23}) + 97,875(P-X_{28}) + 95,500(P/2) \\
 & + 90,125(P-X_{28}) + 82,125(P-X_{23}) + 71,875(P-X_{19}) + 59,750(P-X_{14}) \\
 & + 46,125(P-X_{10}) + 31,375(P-X_5) + 15,875(P-X_1)
 \end{aligned}$$

Et l'équation finale s'écrit :

$$\begin{aligned}
 45,0000 X_1 + 83,0000 X_5 + 116,0000 X_{10} + 143,0000 X_{14} + 164,0000 X_{19} \\
 + 179,0000 X_{23} + 183,0000 X_{28} = 964,75 P
 \end{aligned}$$

EQUATION AU POINT 2

$$\begin{aligned} A_{1,1}X_2 + A_{1,2}X_5 + A_{1,3}X_9 &= B_{1,1}(P-X_2) + B_{1,2}(P-X_6) + B_{1,3}(P-X_{11}) \\ + B_{1,4}(P-X_{15}) + B_{1,5}(P-X_{20}) + B_{1,6}(P-X_{24}) + B_{1,7}(X_{28})^* + B_{1,8}(P-X_{31}) \\ + B_{1,9}(P-X_{27}) + B_{1,10}(P-X_{22}) + B_{1,11}(P-X_{18}) + B_{1,12}(P-X_{13}) \\ + B_{1,13}(P-X_9) \end{aligned}$$

En portant les valeurs des coefficients on obtient :

$$\begin{aligned} 4.5000 X_2 + 5.5000 X_5 + 3.5000 X_9 &= \\ 24.1428 (P-X_2) + 43.7142(P-X_6) + 58.1428(P-X_{11}) + 67.8571(P-X_{15}) \\ + 73.2857(P-X_{20}) + 74.8571(P/2)^* + 73.0000(X_{28})^* + 68.1428(P/2)^* \\ + 60.7142(P-X_{27}) + 51.1428(P-X_{22}) + 39.8571(P-X_{18}) + 27.2857(P-X_{13}) \\ + 13.8571(P-X_9) \end{aligned}$$

EQUATION 2 AU POINT 2

$$\begin{aligned} 28.6428 X_2 + 5.5000 X_5 + 43.7142 X_6 + 17.3571 X_9 + 58.1428 X_{11} \\ + 27.2857 X_{13} + 67.8571 X_{15} + 39.8571 X_{18} + 73.2857 X_{20} + 51.1428 X_{22} \\ + 60.7142 X_{27} - 73.0000 X_{28} = 531.50 P \end{aligned}$$

EQUATION 3 AU POINT 3

$$28.5000 X_3 + 12.6666 X_6 + 35.8333 X_7 + 13.0000 X_{10} + 46.5000 X_{12} \\ + 10.3333 X_{13} + 17.5000 X_{17} - 54.8333 X_{20} + 23.1666 X_{21} - 53.5000 X_{23} \\ + 33.5000 X_{26} - 49.1666 X_{27} = 218.50 P$$

EQUATION 4 AU POINT 4

$$28.4500 X_4 + 20.2500 X_7 + 23.7500 X_{11} - 35.0000 X_{12} + 23.6000 X_{14} \\ - 37.8000 X_{15} + 20.2500 X_{18} - 37.0000 X_{19} + 14.7500 X_{21} + 33.2000 X_{22} \\ + 17.5500 X_{25} - 27.0000 X_{26} = 49.50 P$$

EQUATION 5 AU POINT 5

$$83.0000 X_1 + 5.5000 X_2 + 168.0000 X_5 + 5.5000 X_9 + 226.0000 X_{10} \\ + 280.0000 X_{14} + 322.0000 X_{19} + 352.0000 X_{23} + 370.0000 X_{28} \\ = 1887.0000 P$$

EQUATION 6 AU POINT 6

$$43.7142 X_2 + 12.6666 X_3 + 103.6190 X_6 + 27.2857 X_9 + 23.0000 X_{10} \\ + 111.5714 X_{11} + 72.3808 X_{13} + 131.4285 X_{15} + 10.3333 X_{17} \\ + 78.4285 X_{18} + 142.7142 X_{20} + 100.5714 X_{22} + 119.2857 X_{27} \\ - 143.0000 X_{28} = 1031.0000 P$$

EQUATION 7 AU POINT 7

$$\begin{aligned} & 35.8333 X_3 + 20.2500 X_4 + 112.6666 X_7 + 43.7500 X_{11} + 88.5000 X_{12} \\ & + 44.0000 X_{14} + 23.1666 X_{17} + 38.2500 X_{18} - 106.1666 X_{20} \\ & + 73.3333 X_{21} - 104.0000 X_{23} + 14.7500 X_{25} + 65.5000 X_{26} \\ & - 95.8333 X_{27} = 417.0000 P \end{aligned}$$

EQUATION 8 AU POINT 9

$$\begin{aligned} & 17.3571 X_2 + 5.5000 X_5 + 27.2857 X_6 + 28.6428 X_9 + 39.8571 X_{11} \\ & + 43.7142 X_{13} + 51.1428 X_{15} + 58.1428 X_{18} + 60.7142 X_{20} \\ & + 67.8571 X_{22} + 73.2857 X_{27} - 73.0000 X_{28} = 531.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 9 AU POINT 10

$$\begin{aligned} & 116.0000 X_1 + 13.0000 X_3 + 226.0000 X_5 + 23.0000 X_6 + 351.0000 X_{10} \\ & + 23.0000 X_{13} + 405.0000 X_{14} + 13.0000 X_{17} + 468.0000 X_{19} \\ & + 513.0000 X_{23} + 440.0000 X_{28} = 2729.2500 P \end{aligned}$$

EQUATION 10 AU POINT 11

$$\begin{aligned} & 58.1428 X_2 + 23.7500 X_4 + 111.5714 X_6 + 43.7500 X_7 + 39.8571 X_9 \\ & + 211.8214 X_{11} + 78.4285 X_{13} + 58.5000 X_{14} + 186.4285 X_{15} \\ & + 166.1785 X_{18} + 204.4285 X_{20} + 38.2500 X_{21} + 146.5714 X_{22} \\ & + 20.2500 X_{25} + 173.5714 X_{27} - 207.0000 X_{28} = 1471.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 11 AU POINT 12

$$\begin{aligned} &46.5000 X_3 - 35.0000 X_4 + 88.5000 X_7 + 209.7000 X_{12} + 99.0000 X_{17} \\ &+ 99.0000 X_{19} - 150.5000 X_{20} + 65.5000 X_{21} + 90.0000 X_{22} \\ &- 178.5000 X_{23} - 27.0000 X_{25} + 168.3000 X_{26} - 137.5000 X_{27} \\ &= 459.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 12 AU POINT 13

$$\begin{aligned} &27.2857 X_2 + 10.3333 X_3 + 72.3808 X_6 + 43.7142 X_9 + 23.0000 X_{10} \\ &+ 78.4285 X_{11} + 103.6190 X_{13} + 100.5714 X_{15} + 12.6666 X_{17} \\ &+ 111.5714 X_{18} + 119.2857 X_{20} + 131.4285 X_{22} + 142.7142 X_{27} \\ &- 143.0000 X_{28} = 1031.0000 P \end{aligned}$$

EQUATION 13 AU POINT 14

$$\begin{aligned} &143.0000 X_1 + 23.5000 X_4 + 280.0000 X_5 + 44.0000 X_7 + 405.0000 X_{10} \\ &+ 58.5000 X_{11} + 576.0000 X_{14} + 58.5000 X_{18} + 596.0000 X_{19} \\ &+ 44.0000 X_{21} + 656.0000 X_{23} + 23.5000 X_{25} + 692.0000 X_{28} \\ &= 3460.0000 P \end{aligned}$$

EQUATION 14 AU POINT 15

$$\begin{aligned} &67.8571 X_2 - 37.8000 X_4 + 131.4285 X_6 + 51.1428 X_9 + 186.4285 X_{11} \\ &+ 99.0000 X_{12} + 100.5714 X_{13} + 343.7714 X_{15} + 146.5714 X_{18} \\ &+ 118.0000 X_{19} + 254.5714 X_{20} + 296.2285 X_{22} - 33.2000 X_{25} \\ &+ 90.0000 X_{26} + 221.4285 X_{27} - 262.0000 X_{28} = 1693 P \end{aligned}$$

EQUATION 15 AU POINT 17

$$\begin{aligned} & 17.5000 X_3 + 10.3333 X_6 + 23.1666 X_7 + 13.0000 X_{10} + 33.5000 X_{12} \\ & + 12.6666 X_{13} + 28.5000 X_{17} - 49.1666 X_{20} + 35.8333 X_{21} \\ & - 53.5000 X_{23} + 46.5000 X_{26} - 54.8333 X_{27} = 218.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 16 AU POINT 18

$$\begin{aligned} & 39.8571 X_2 + 20.2500 X_4 + 78.4285 X_6 + 38.2500 X_7 + 58.1428 X_9 \\ & + 166.1785 X_{11} + 111.5714 X_{13} + 58.5000 X_{14} + 146.5714 X_{15} \\ & + 211.8214 X_{18} + 173.5714 X_{20} + 43.7500 X_{21} + 186.4285 X_{22} \\ & + 23.7500 X_{25} + 204.4285 X_{27} - 207.0000 X_{28} = 1471.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 17 AU POINT 19

$$\begin{aligned} & 164.0000 X_1 - 37.0000 X_4 + 322.0000 X_5 + 468.0000 X_{10} + 99.0000 X_{12} \\ & + 118.0000 X_{15} + 825.0000 X_{19} + 118.0000 X_{22} + 775.0000 X_{23} \\ & - 37.0000 X_{25} + 99.0000 X_{26} + 820.0000 X_{28} = 3908.7500 P \end{aligned}$$

EQUATION 18 AU POINT 20

$$\begin{aligned} & 73.2857 X_2 - 54.8333 X_3 + 142.7142 X_6 - 106.1666 X_7 + 60.7142 X_9 \\ & + 204.4285 X_{11} - 150.5000 X_{12} + 119.2857 X_{13} + 254.5714 X_{15} \\ & - 49.1666 X_{17} + 173.5714 X_{18} + 493.4523 X_{20} - 95.8333 X_{21} \\ & + 221.4285 X_{22} + 207.5000 X_{23} - 137.5000 X_{26} + 456.5475 X_{27} \\ & - 305.0000 X_{28} = 1325.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 19 AU POINT 21

$$\begin{aligned} &23.1666 X_3 + 14.7500 X_4 + 73.3333 X_7 + 38.2500 X_{11} + 65.5000 X_{12} \\ &+ 44.0000 X_{14} + 35.8333 X_{17} + 43.7500 X_{18} - 95.8333 X_{20} \\ &+ 102.6666 X_{21} - 104.0000 X_{23} + 20.2500 X_{25} + 88.5000 X_{26} \\ &-106.1666 X_{27} = 417.0000 P \end{aligned}$$

EQUATION 20 AU POINT 22

$$\begin{aligned} &51.1428 X_2 - 33.2000 X_4 + 100.5714 X_6 + 67.8571 X_9 + 146.5714 X_{11} \\ &+ 90.0000 X_{12} + 131.4285 X_{13} + 296.2285 X_{15} + 186.4285 X_{18} \\ &+ 118.0000 X_{19} + 221.4285 X_{20} + 343.7714 X_{22} - 378.0000 X_{25} \\ &+ 99.0000 X_{26} + 254.5714 X_{27} - 262.0000 X_{28} = 1693.0000 P \end{aligned}$$

EQUATION 21 AU POINT 23

$$\begin{aligned} &179.0000 X_1 - 53.5000 X_3 + 352.0000 X_5 - 104.0000 X_7 + 513.0000 X_{10} \\ &- 148.5000 X_{12} + 656.0000 X_{14} - 53.5000 X_{17} + 775.0000 X_{19} \\ &+ 207.5000 X_{20} - 104.0000 X_{21} + 1080.0000 X_{23} - 148.5000 X_{26} \\ &+ 207.5000 X_{27} + 918.0000 X_{28} = 3695.0000 P \end{aligned}$$

EQUATION 22 AU POINT 25

$$\begin{aligned} &17.5500 X_4 + 14.7500 X_7 + 20.2500 X_{11} - 27.0000 X_{12} + 23.5000 X_{14} \\ &- 33.2000 X_{15} + 23.7500 X_{18} - 37.0000 X_{19} + 20.2500 X_{21} \\ &- 37.8000 X_{22} + 28.4500 X_{25} - 35.0000 X_{26} = 49.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 23 AU POINT 26

$$\begin{aligned} & 33.5000 X_3 - 27.0000 X_4 + 65.5000 X_7 + 168.3000 X_{12} + 46.5000 X_{17} \\ & + 99.0000 X_{19} - 137.5000 X_{20} + 88.5000 X_{21} + 99.0000 X_{22} \\ & - 148.5000 X_{23} - 35.0000 X_{25} + 209.7000 X_{26} - 150.5000 X_{27} \\ & = 459.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 24 AU POINT 27

$$\begin{aligned} & 60.7142 X_2 - 49.1666 X_3 + 119.2857 X_6 - 95.8333 X_7 + 73.2857 X_9 \\ & + 173.5714 X_{11} - 137.5000 X_{12} + 142.7142 X_{13} + 221.4285 X_{15} \\ & - 54.8333 X_{17} + 204.4285 X_{18} + 456.5475 X_{20} - 106.1666 X_{21} + \\ & + 254.5714 X_{22} + 207.5000 X_{23} - 150.5000 X_{26} + 493.4523 X_{27} \\ & - 305.0000 X_{28} = 1325.5000 P \end{aligned}$$

EQUATION 25 AU POINT 28

$$\begin{aligned} & 188.0000 X_1 - 73.0000 X_2 + 370.0000 X_5 - 143.0000 X_6 - 73.0000 X_9 \\ & + 540.0000 X_{10} - 207.0000 X_{11} - 143.0000 X_{13} + 692.0000 X_{14} \\ & - 262.0000 X_{15} - 207.0000 X_{18} + 820.0000 X_{19} - 305.0000 X_{20} \\ & - 262.0000 X_{22} + 918.0000 X_{23} - 305.0000 X_{27} + 1323.0000 X_{28} \\ & = 2445.2500 P \end{aligned}$$



La résolution de ce système par l'ordinateur IBM 1130 du centre de calcul de l' E.N.P.A. a donné les résultats suivants :

N°	Xi	Yi
1	16.8886	-15.8886
2	10.1206	-9.1206
3	5.9226	-4.9226
4	2.2690	-1.2690
5	-4.8842	5.8842
6	-1.4686	2.4686
7	-0.3146	1.3146
9	10.1206	-9.1206
10	2.2396	-1.2396
11	1.0494	-0.0494
12	0.6583	0.3417
13	-1.4686	2.4686
14	0.4110	0.5890

N°	Xi	Yi
15	0.5035	0.4965
17	5.9226	- 4.9226
18	1.0494	- 0.0494
19	0.6249	0.3751
20	0.5328	0.4672
21	- 0.3147	1.3147
22	0.5035	0.4965
23	0.5226	0.4774
25	2.2690	- 1.2690
26	0.6503	0.3417
27	0.5328	0.4672
28	0.5080	0.4920

Nous remarquons la parfaite symétrie qui existe entre :

2 et 9	4 et 25	12 et 26
3 et 17	7 et 21	15 et 22
6 et 13	11 et 18	20 et 27

VERIFICATION DU SYSTEME

La vérification du système a été faite sur ordinateur . Nous avons constaté des écarts de l'ordre de 0.7% . Les résultats sont consignés dans le tableau suivant . Nous donnerons ci-après un exemple ( pour l'équation I ) .

$$45 \times 16.8886 + 83 \times (-4.8642) + 116 \times 2.2396 + 143 \times 0.4110 + 164 \times 0.6249 + 179 \times 0.5226 + 188 \times 0.5080 = 964.75$$

$$964.6977 = 964.75$$

L'écart est de :  $964.75 - 964.6977 = 0.0523$  pour une valeur de l'ordre de 1000

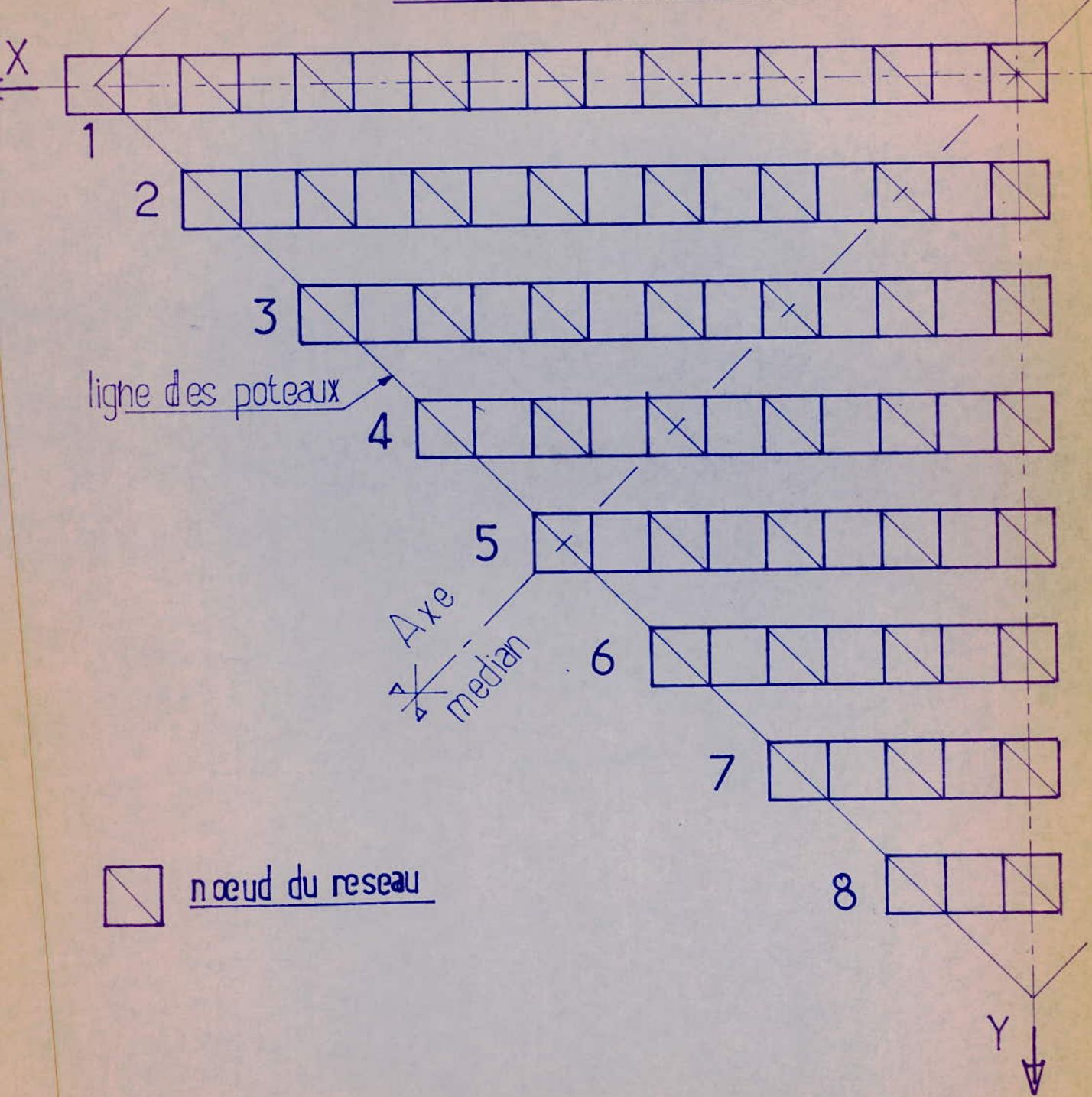
M A T R I C E DU 2 <sup>e</sup> M E M B R E			
C a l c u l		V é r i f i c a t i o n	
C a l c u l	V é r i f i c a t i o n	C a l c u l	V é r i f i c a t i o n
964.75	964.6977	1693.00	1692.8986
531.50	531.4813	218.50	218.5090
218.50	218.5089	1471.50	1471.4460
49.50	49.5106	3908.75	3908.4848
1887.00	1886.8967	1325.50	1325.3923
1031.00	1030.9648	417.00	417.0150
417.00	417.0149	1693.00	1692.8986
531.50	531.4813	3695.00	3694.7138
2729.25	2729.1015	49.50	49.5106
1471.50	1471.4458	459.50	459.4928
459.50	459.4927	1325.50	1325.3925
1031.00	1030.9650	2445.25	2445.0654
3460.00	3459.8051		


DETERMINATION DES EFFORTS

ooo DANS LES ROUTES ooo

---

# DEMI-POUTRES X



 noeud du reseau

Dans ce qui précède nous avons déterminé la part de charge revenant à chaque poutre au droit de ses noeuds; d'autre part, nous avons supposé jusqu'ici les poutres confondues avec leurs axes, comme s'il s'agissait de poutres à âme pleine; Par conséquent, les résultats précédents ne constituent qu'une approche de la réalité, et il faudra se ramener au réseau réel qui est formé de poutres évidées ( voir schémas ci-après ) pour connaître les efforts qui sollicitent les barres .

Dans ce chapitre nous considérerons donc chaque poutre isolée et soumise aux charges qui lui reviennent, appliquées aux noeuds secondaires, ensuite nous écrirons les équations d'équilibre aux intersections des barres pour avoir les efforts dans celles-ci .(I)

(I) : ces efforts ne sont pas définitifs, nous verrons plus loin comment parvenir aux efforts finaux .

Nota: Nous considérerons successivement, dans le sens X ,

les demi-poutres n° : 1 ; 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 .

Pour chacune d'elles, à un noeud principal  $i$ , la charge agissante  $X_i$  est partagée par les quatre noeuds secondaires (ex. A , A' , B , B' ) de façon égale,

POUTRE n° : I

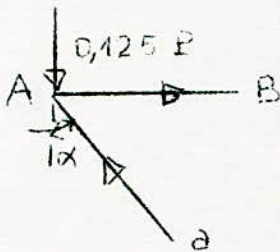
# - POUTRE 1 -

Reaction d'appui:

$$R_a = \sum P_i = 4P(0,125 + 1,471 + 0,147 + 0,094 + 0,119 + 0,123) \\ + 2P(0,125) - 4P(3,972 + 0,310) \\ \underline{R_a = -8,560 P}$$

Equilibre des noeuds

- Noeud A -



Projection verticale:  $D_{AB}$  ?

$$0,125 P - D_{AB} \cos \alpha = 0$$

$$\Rightarrow D_{AB} = \frac{0,125}{0,83} = 0,150 P$$

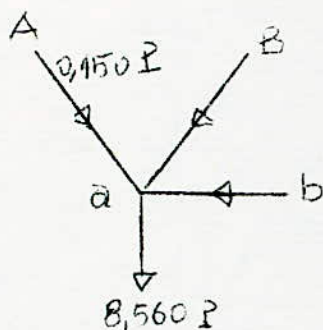
Projection horizontale =  $S_{AB}$  ?

$$S_{AB} - D_{AB} \sin \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0$$

$$S_{AB} = 0,150 P \cdot 0,3945 = 0,059 P$$

$$S_{AA} = 0,150 \cdot 0,3945 = 0,059 P$$

- Noeud a -



Proj. vertic.  $D_{AB}$  ?

$$(2 \cdot 0,150 P + 2 D_{AB}) \cos \alpha + 8,560 P = 0$$

$$D_{AB} = -\frac{8,560 P}{2 \cdot 0,83} - 0,150 P = -5,308 P$$

Proj. horizontale =  $T_{ab}$  ?

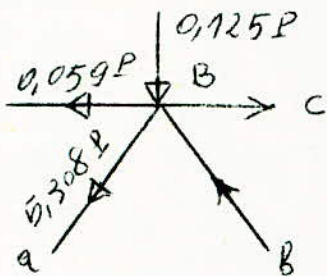
$$T_{ab} - 2 \cdot 0,150 P \sin \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} - 5,308 P \cdot 2 \cdot \sin \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$T_{ab} = 2P(0,150 + 5,308) \cdot 0,3945 = 4,301 P$$

Remarque: - les efforts ainsi calculés sont les efforts internes des barres.

- les efforts négatifs signifient que le sens est à inverser -

### Noeud B



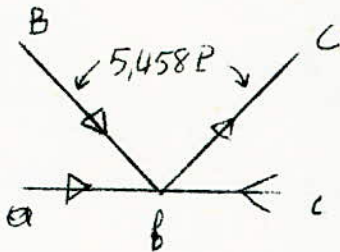
$$D_{BB} = 5,308P + \frac{0,125}{0,83} = 5,458P$$

$$S_{BC} = 0,059 + (5,308 + 5,458)P \cdot 0,394$$

$$S_{BC} = 4,300P$$

$$S_{BB} = (5,458 - 5,308) \cdot 0,394 = 0,059P$$

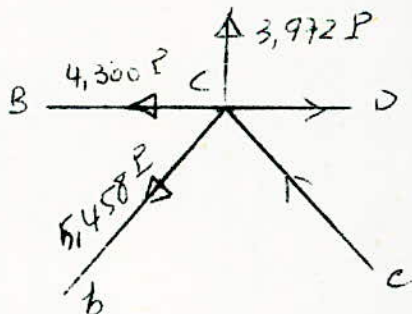
### Noeud b



$$J_{bc} = 4,300P + 5,458P \cdot 4 \cdot 0,394$$

$$J_{bc} = 12,924P$$

### Noeud c



$$D_{cc} = 5,458 - \frac{3,972}{0,83} = 0,671P$$

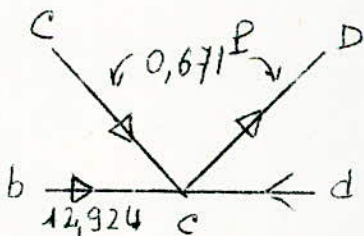
$$S_{CD} = 4,300 + (5,458 + 0,671) \cdot 0,394$$

$$= 6,715P$$

$$S_{cc} = (0,671 - 5,458) \cdot 0,394$$

$$= -1,886P$$

### Noeud c

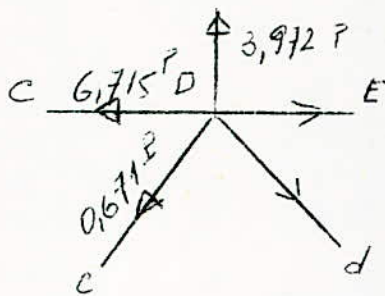


$$J_{cd} = 12,924 + 1,58 \times 0,671$$

$$= 13,984P$$



Nœud D.



$$D_{Dd} = \frac{3,972}{0,83} - 0,671 = 4,115 P$$

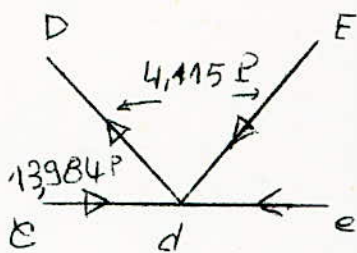
$$S_{DE} = 6,715 P + (0,671 \times -4,115) P \cdot 0,394$$

$$= 5,358 P$$

$$S_{Dd} = -(0,671 + 4,115) P \cdot 0,394$$

$$= -1,88 P$$

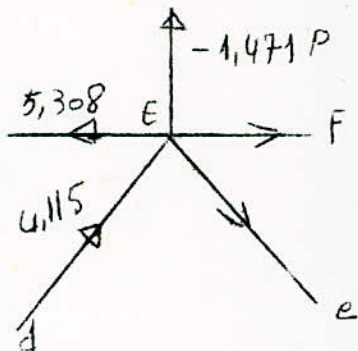
Nœud d



$$J_{de} = 13,984 P - 1,58 \cdot 4,115 P$$

$$= 7,482 P$$

Nœud E



$$D_{EE} = 4,115 - \frac{1,471}{0,83} = 2,342 P$$

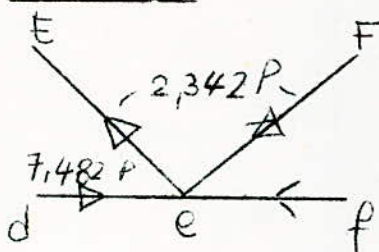
$$S_{EF} = 5,308 - (4,115 + 2,342) P \cdot 0,394$$

$$= 2,814 P$$

$$S_{EE} = (4,115 - 2,342) P \cdot 0,394$$

$$= 0,697 P$$

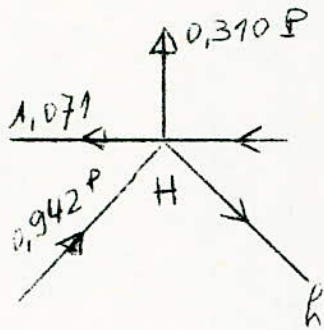
Nœud e



$$J_{ef} = 7,482 P - 1,58 \times 2,342 P$$

$$= 2,882 P$$

### Noeud H

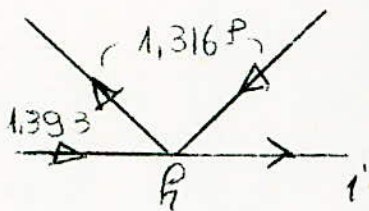


$$D_{Hh} = 0,942 + \frac{0,310}{0,83} = 1,316 P$$

$$S_{HI} = (0,942 + 1,316) P \cdot 0,394 - 1,071 P \\ = 0,181 P$$

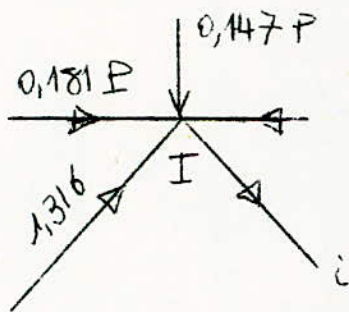
$$S_{HH} = (1,316 - 0,924) \cdot 0,394 \cdot P \\ = 0,147 P$$

### Noeud R



$$J_{hi} = 1,58 \cdot 1,316 - 1,393 P \\ = 0,686 P$$

### Noeud I

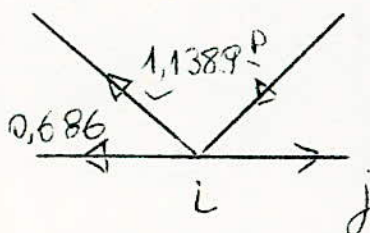


$$D_{Ii} = 1,316 - \frac{0,147}{0,83} = 1,1389 P$$

$$S_{IJ} = 0,181 P + (1,316 + 1,1389) P \cdot 0,394 \\ = 1,148 P$$

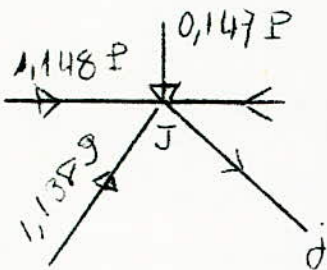
$$S_{II} = 0,0697 P$$

### Noeud L



$$J_{ij} = 0,686 + 1,58 \cdot 1,1389 P \\ = 2,485 P$$

### Noeud J

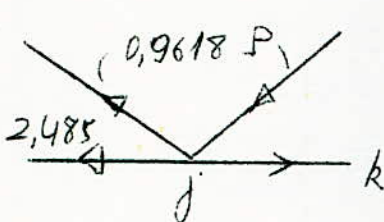


$$D_{Jj} = 1,1389 - \frac{0,147}{0,83} = 0,9618 P$$

$$S_{JK} = 1,148 + (1,1389 + 0,9618) \cdot 0,394 \\ = 1,975 P$$

$$S_{Jj} = (1,1389 - 0,9618) \cdot 0,394 \\ = 0,069 P$$

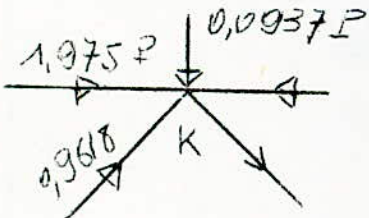
### Noeud j



$$J_{jk} = 2,485 + 1,58 \cdot 0,9618 P$$

$$= 4,005 P$$

### Noeud K

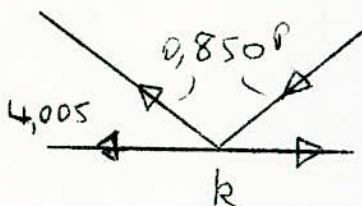


$$D_{Kk} = 0,9618 - \frac{0,0937}{0,83} = 0,850 P$$

$$S_{Kl} = 1,975 + (0,9618 + 0,850) \cdot 0,394 P \\ = 2,689 P$$

$$S_{Kk} = (0,9618 - 0,850) \cdot 0,394 P \\ = 0,045 P$$

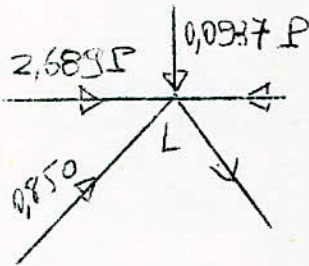
### noeud k



$$J_{kl} = 4,005 + 1,58 \cdot 0,850 P$$

$$= 5,345 P$$

Nœud L

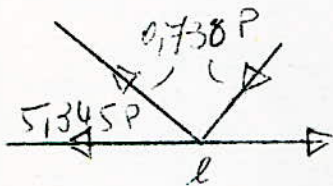


$$D_{Le} = 0,750 - \frac{0,0937}{0,83} = 0,738 P$$

$$S_{LM} = 2,689 + (0,850 + 0,738) \cdot 0,394 P \\ = 3,318 P$$

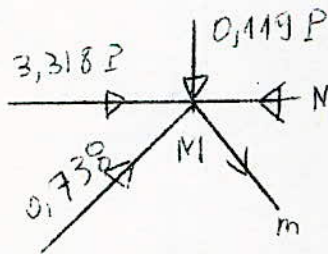
$$S_{LL} = (0,850 - 0,738) \cdot 0,394 \\ = 0,044 P$$

nœud l



$$J_{em} = 5,345 + 1,58 \cdot 0,738 P \\ = 6,511 P$$

Nœud M

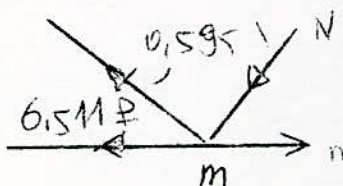


$$D_{Mm} = 0,738 - \frac{0,119}{0,83} = 0,595 P$$

$$S_{MN} = 3,318 + (0,738 + 0,595) \cdot 0,394 P \\ = 3,844 P$$

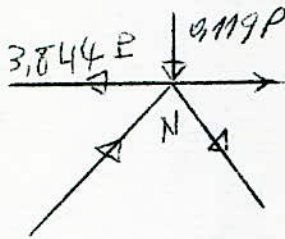
$$S_{MM} = (0,738 - 0,595) \cdot 0,394 P \\ = 0,0564 P$$

nœud m



$$J_{mn} = 6,511 + 1,58 \cdot 0,595 \\ = 7,451 P$$

Noeud N

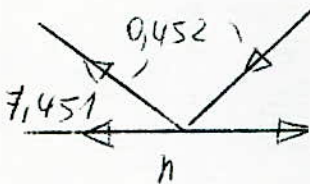


$$\Delta Nn = 0,595 - \frac{0,119}{0,83} = 0,452 P$$

$$S_{NO} = 3,844 + (0,595 + 0,452) \cdot 0,384 P \\ = 4,257 P$$

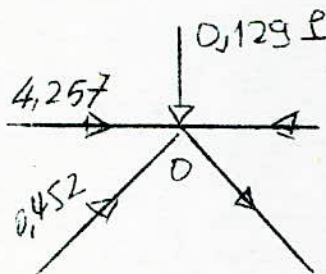
$$S_{MM} = (0,595 - 0,452) \cdot 0,384 \\ = 0,0564 P$$

noeud n



$$T_{no} = 7,451 + 1,58 \cdot 0,452 P \\ = 8,166 P$$

Noeud O

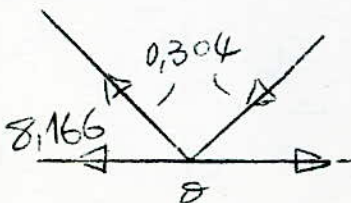


$$\Delta O_{08} = 0,452 - \frac{0,129}{0,83} = 0,304 P$$

$$S_{Op} = 4,257 + (0,452 + 0,304) \cdot 0,384 P \\ = 4,552 P$$

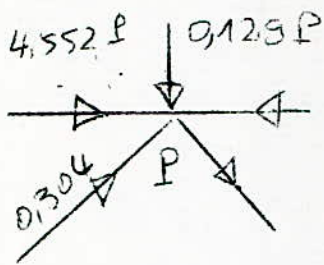
$$S_{OO} = (0,452 - 0,304) \cdot 0,384 P \\ = 0,0585 P$$

noeud o



$$T_{op} = 8,166 + 1,58 \cdot 0,304 P \\ = 8,637 P$$

Noeud P

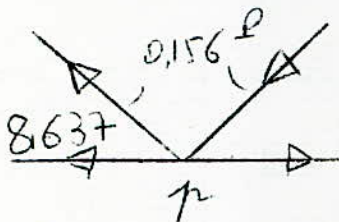


$$D_{pq} = 0,304 - \frac{0,125}{0,83} = 0,156$$

$$S_{pq} = 4,552 + (0,304 + 0,156) \cdot 0,394 P \\ = 4,733 P$$

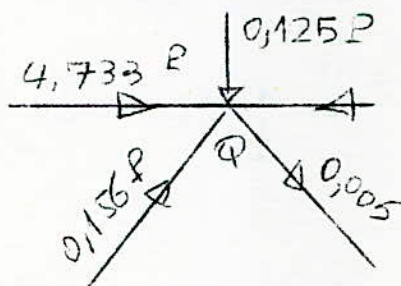
$$S_{pp} = (0,304 - 0,156) \cdot 0,394 P \\ = 0,0585 P$$

Noeud r



$$J_{pr} = 8,637 + 1,58 \cdot 0,156 P \\ = 8,883 P$$

Noeud Q



$$D_{qq} = 0,156 - \frac{0,125}{0,83} \approx 0,006 P \\ \approx 0,000 P$$

$$S_{qq} = 4,733 + (0,156 + 0,006) \cdot 0,394 P \\ = 4,797 P$$

$$S_{qp} = (0,156 - 0,006) \cdot 0,394 P \\ = 0,058 P$$

*P* O U T R E n° : 2

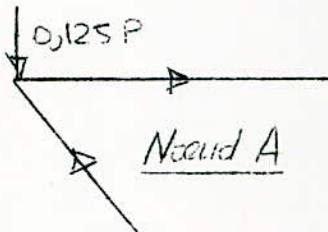
---

## Poutre - 2.

Reaction d'appui :  $R_a = \sum P_i$

$$R_a = 4P(0,125 + 0,617 + 0,124 + 0,1168 + 0,125) + 2P \cdot 0,125 - 4P(2,280 + 0,0123)$$

$$\underline{R_a = -4,4837 P}$$



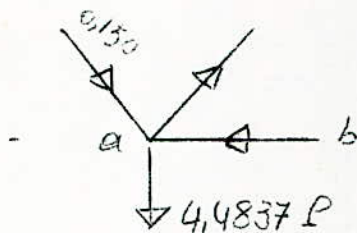
Equilibre des nœuds

$$D_{AA} = \frac{0,125}{0,83} = 0,150 P$$

$$S_{AB} = 0,150 P \cdot 0,394 = 0,059 P$$

$$S_{AA} = 0,150 \cdot 2 \cdot 0,394 = 0,059 P$$

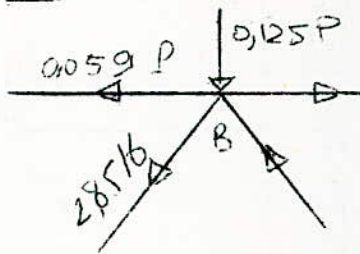
**a**



$$D_{aB} = 0,150 + \frac{4,4837}{2 \cdot 0,83} = 2,8516 P$$

$$J_{ab} = (0,150 + 2,8516) 2 \cdot 0,394 P = 2,3712 P$$

**B**

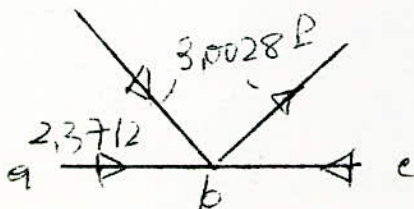


$$D_{Bb} = 2,8516 + \frac{0,125}{0,83} = 3,0028 P$$

$$S_{Bc} = 0,059 + (2,8516 + 3,0028) 0,394 P = 2,3656 P$$

$$S_{BB} = (3,0028 - 2,8516) 0,394 P = 0,059 P$$

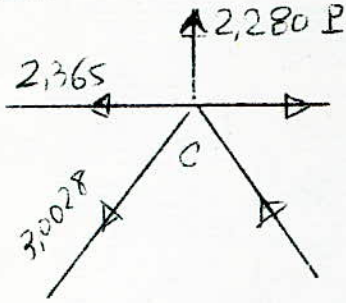
**b**



$$J_{bc} = 2,3712 + 1,58 \cdot 3,0028 = 7,1156 P$$



c



$$\Pi_c = 3,0028 - \frac{2,280}{0,83} = 0,2551 P$$

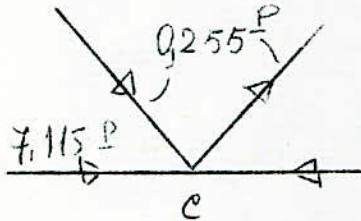
$$S_{cD} = 2,365 + (3,0028 + 0,2551) \cdot 0,394 P$$

$$= 3,4481 P$$

$$S_{cc} = (0,2551 - 3,0028) \cdot 0,394 P$$

$$= -1,0839 P$$

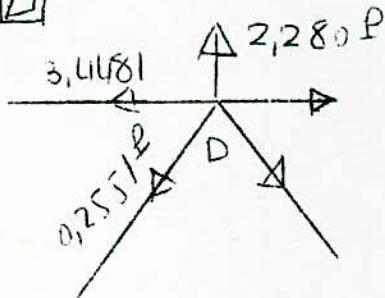
e



$$J_{ed} = 7,115 P + 1,58 \cdot 0,255 P$$

$$= 7,5186 P$$

d



$$D_{dd} = -0,2551 + \frac{2,280}{0,83} = 2,493 P$$

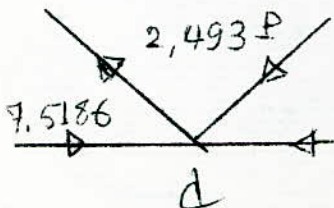
$$S_{de} = 3,4481 + (0,2551 - 2,493) \cdot 0,394 P$$

$$= 2,1769 P$$

$$S_{dd} = (0,2551 - 2,493) \cdot 0,394 P$$

$$= -1,0839 P$$

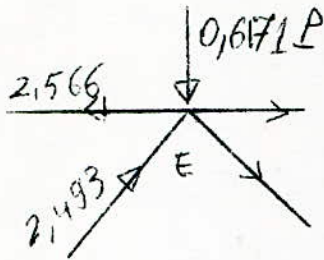
d



$$J_{de} = 7,5186 - 1,58 \cdot 2,493 P$$

$$= 3,580 P$$

E

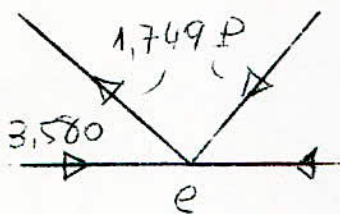


$$D_{EE} = 2,493 - \frac{0,617}{0,83} = 1,749 P$$

$$S_{EE} = 2,566 - (2,493 + 1,749) \cdot 0,394 P \\ = 0,895 P$$

$$S_{EE} = (2,493 - 1,749) \cdot 0,394 P \\ = 0,293 P$$

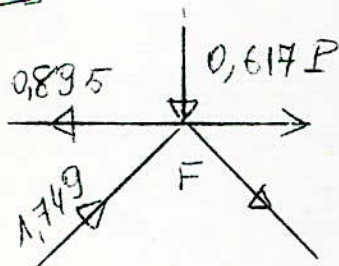
e



$$J_{ef} = 3,580 P - 1,58 \cdot 1,749 P$$

$$= 0,8169 P$$

F

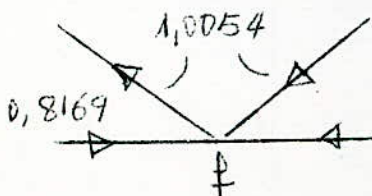


$$D_{FF} = 1,749 - \frac{0,617}{0,83} = 1,0054 P$$

$$S_{FG} = 0,895 - (1,749 + 1,0054) \cdot 0,394 P \\ = -0,1897 P$$

f

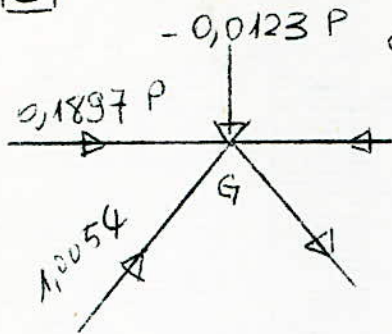
$$S_{FF} = (1,749 - 1,0054) \cdot 0,394 P \\ = 0,293 P$$



$$J_{fg} = 0,8169 P - 1,58 \cdot 1,0054 P$$

$$= -0,7716 P$$

G



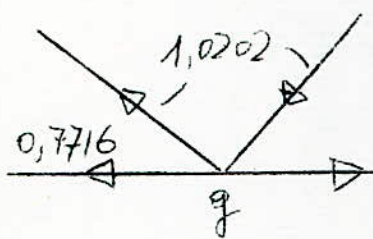
$$D_{Gg} = 1,0054 + \frac{0,0123}{0,83} = 1,0202 P$$

$$S_{GH} = 0,1897 + (1,0054 + 1,0202) 0,394 P$$

$$= 0,9877 P$$

$$S_{GG} = -(1,0054 - 1,0202) = 0,0058 P$$

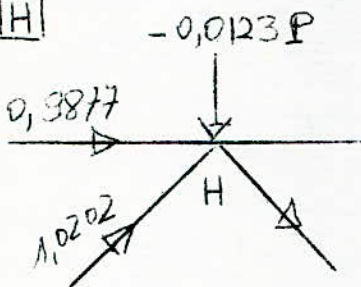
g)



$$J_{gh} = 0,7716 + 1,58 \cdot 1,0202$$

$$= 2,383 P$$

H



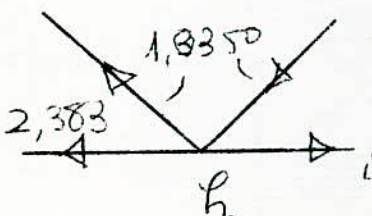
$$D_{HR} = 1,0202 + \frac{0,0123}{0,83} = 1,0350 P$$

$$S_{HI} = 0,3877 + (1,0202 + 1,0350) 0,394 P$$

$$= 1,797 P$$

$$S_{HH} = (1,0350 - 1,0202) 0,394 = 0,0058 P$$

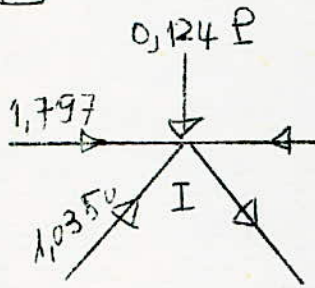
h)



$$J_{hi} = 2,383 P + 1,58 \cdot 1,0350 P$$

$$= 4,0188 P$$

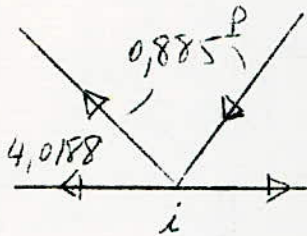
I



$$\Delta_{IE} = 1,0350 - \frac{0,124}{0,83} = 0,885 \text{ P}$$

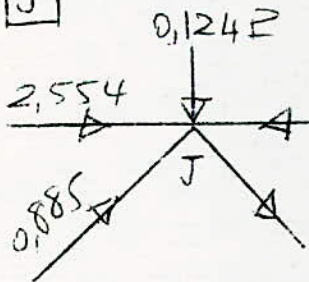
$$S_{IJ} = 1,797 + (1,0350 + 0,885) 0,394 \text{ P} \\ = 2,554 \text{ P}$$

i



$$J_{ij} = 4,0188 - 1,58 \cdot 0,885 \text{ P} \\ = 5,4178 \text{ P}$$

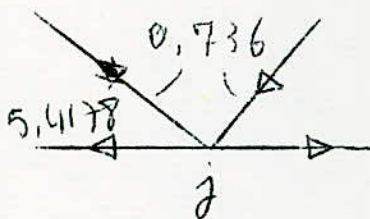
J



$$\Delta_{Jd} = 0,885 - \frac{0,124}{0,83} = 0,736 \text{ P}$$

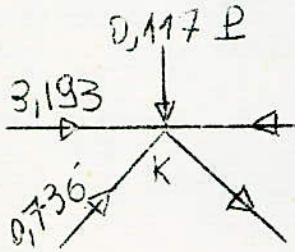
$$S_{JK} = 2,554 \text{ P} + (0,885 + 0,736) 0,394 \text{ P} \\ = 3,193 \text{ P}$$

j



$$J_{jK} = 5,4178 + 1,58 \cdot 0,736 \\ = 6,644 \text{ P}$$

K

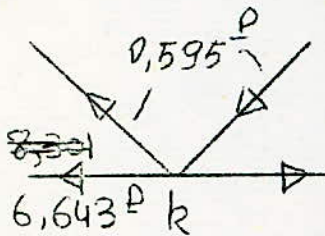


$$D_{Kk} = \frac{0,736P - 0,117P}{0,83} = 0,595P$$

$$S_{KL} = 3,193P + (0,736 + 0,595)0,394P = 3,717P$$

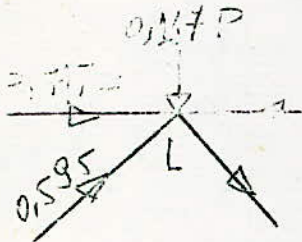
$$S_{Kk} = (0,736 - 0,595)0,394P = 0,055P$$

R1



$$J_{Rl} = 6,643P + 1,58 \cdot 0,595 = 7,584P$$

L

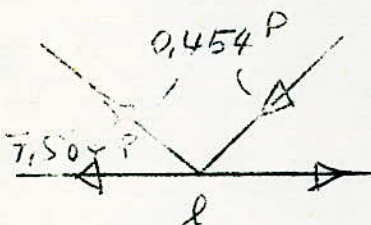


$$D_{Ll} = \frac{0,585P - 0,117P}{0,83} = 0,454P$$

$$S_{LH} = 7,584P + (0,585 + 0,454)0,394P = 4,1305P$$

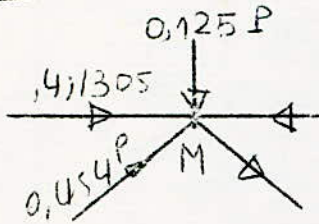
$$S_{Ll} = (0,585 - 0,454)0,394P = 0,055P$$

l



$$J_{lm} = 7,584 + 1,58 \cdot 0,454P = 8,301P$$

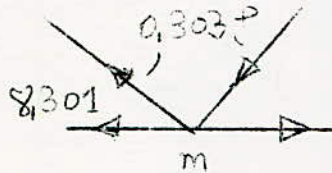
M



$$D_{Mm} = 0,454 - 0,1506 = 0,303 P$$

$$S_{MN} = 4,130 + (0,454 + 0,303) \cdot 0,394 P = 4,429 P$$

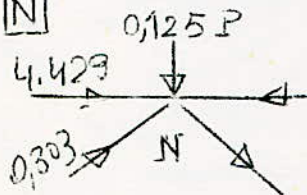
m



$$S_{mM} = (0,454 - 0,303) \cdot 0,394 P = 0,059 P$$

$$J_{mn} = 8,301 + 1,58 \cdot 0,303 P = 8,780 P$$

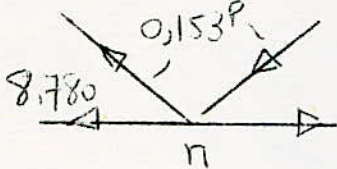
N



$$D_{Nn} = 0,303 - 0,1506 = 0,153 P$$

$$S_{NO} = 4,429 + (0,303 + 0,153) \cdot 0,394 P = 4,6086 P$$

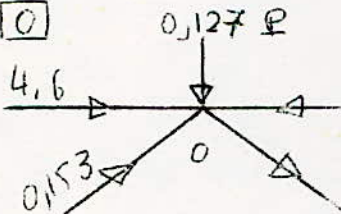
n



$$S_{nN} = (0,303 - 0,153) \cdot 0,394 P = 0,059 P$$

$$J_{no} = 8,780 + 0,153 \cdot 1,58 = 9,022 P$$

O



$$D_{Oo} = 0,153 - \frac{0,127}{0,83} = 0,000 P$$

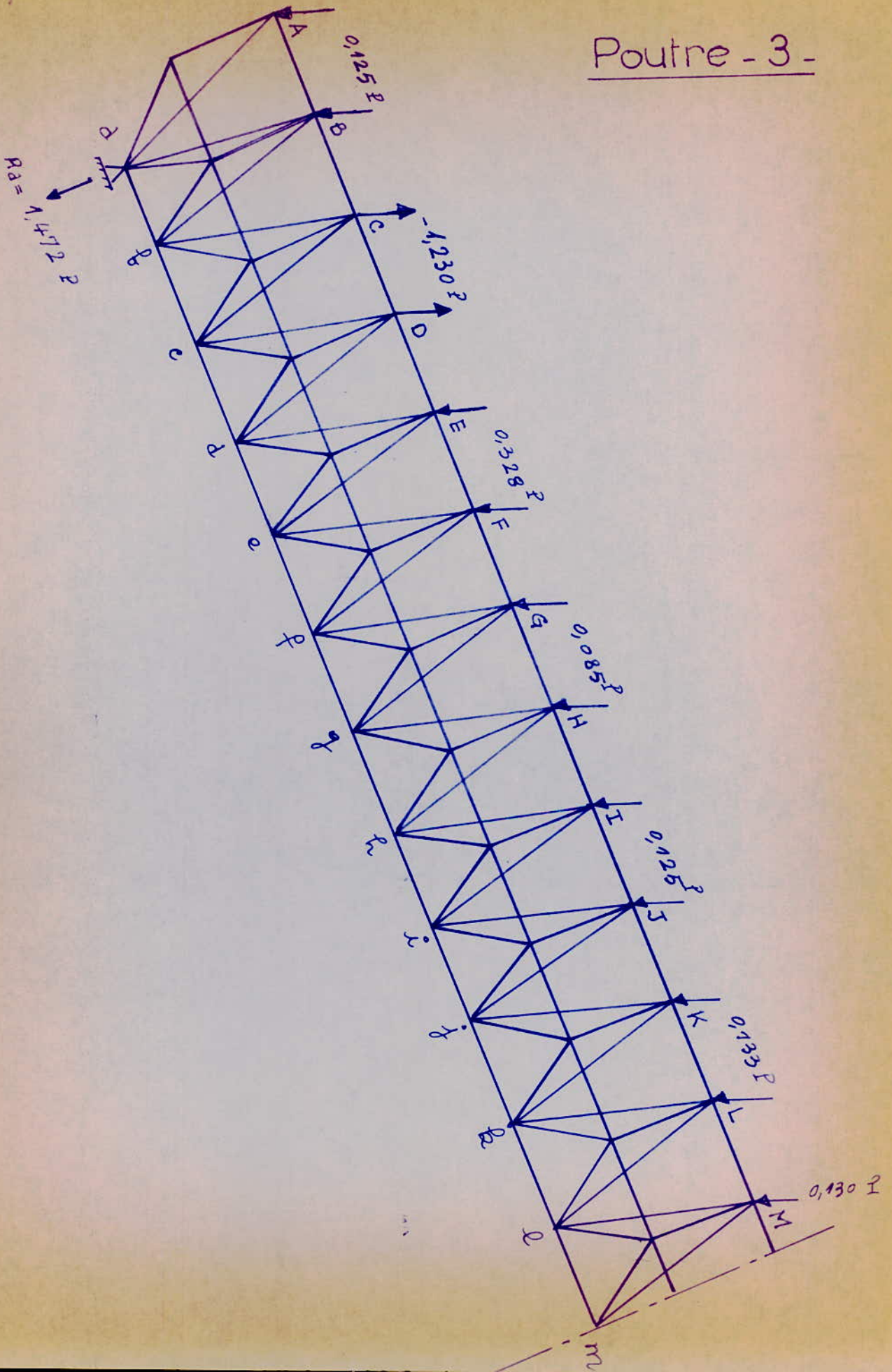
$$S_{Oo'} = 4,6086 + (0,153 \cdot 0,394 P) = 4,669 P$$

$$S_{Oo} = 0,153 \cdot 0,394 = 0,0602 P$$

*P* O U T R E n° : 3

---

# Poutre - 3 -





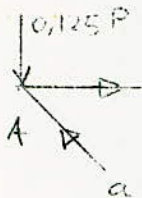
# Poutre 3

Reaction d'appui:  $R_a = \sum P_i = 4P(0,250 + 0,328 + 0,085 + 0,133)$

$$-4P \cdot 1,230 + 2P \cdot 0,130 = \underline{-1,472P}$$

Equilibre des nœuds:

[A]

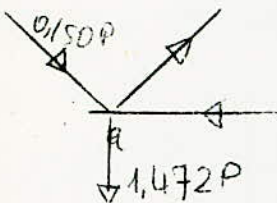


$$D_{AA} = \frac{0,125P}{0,83} = 0,150P$$

$$S_{AB} = 0,150P \cdot 0,394 = 0,059P$$

$$S_{AA} = 0,150P \cdot 0,394 = 0,059P$$

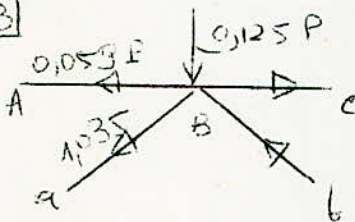
[a]



$$D_{aB} = 0,150 + \frac{1,472}{2 \cdot 0,83} = 1,035P$$

$$S_{ab} = (0,150 + 1,035) \cdot P \cdot 0,79 = 0,935P$$

[B]

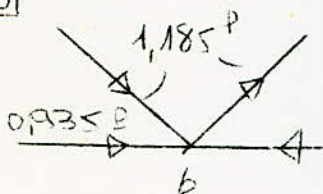


$$D_{Bb} = (0,150 + 1,035)P = 1,185P$$

$$S_{BC} = 0,059 + (1,035 + 1,185) \cdot 0,394P$$

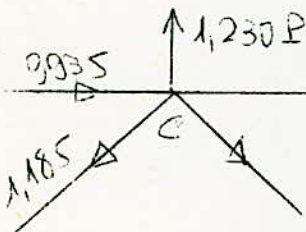
$$S_{BB} = (1,185 - 1,035) \cdot 0,394 = 0,059P$$

[b]



$$I_{bc} = 0,935P + 1,58 \cdot 1,185 = 2,717P$$

[C]

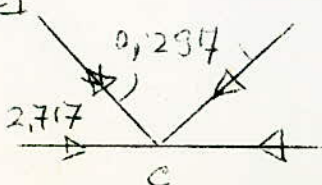


$$D_{cc} = \frac{1,230}{0,83} - 1,185P = 0,297P$$

$$S_{cd} = 0,935 + (1,185 - 0,297) \cdot 0,394 = 1,318P$$

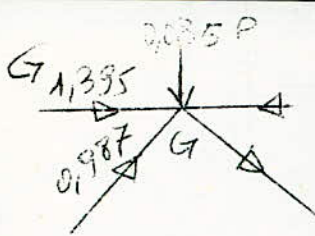
$$S_{cc} = -(1,185 + 0,297) \cdot 0,394 = -0,584P$$

[c]



$$I_{cd} = 2,717 - 1,58 \cdot 0,297P = 2,247P$$

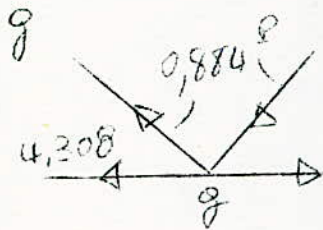
=



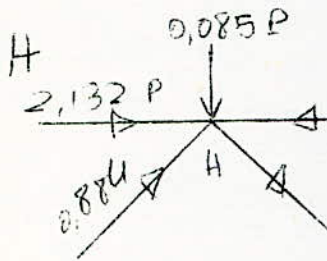
$$D_{Gg} = 0,987 - \frac{0,085}{0,83} = 0,884 P$$

$$S_{Gh} = 1,395 + (0,987 + 0,884) \cdot 0,394 P = 2,132 P$$

$$S_{Gk} = (0,987 - 0,884) \cdot 0,394 = 0,040 P$$



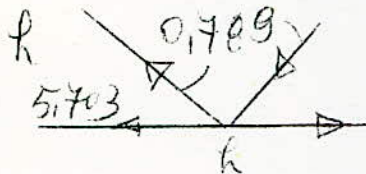
$$D_{JgR} = 4,308 + 1,58 \cdot 0,884 = 5,703 P$$



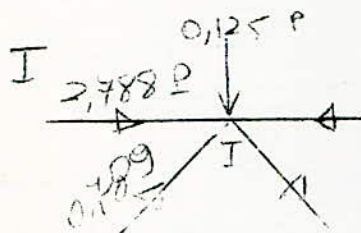
$$D_{HR} = 0,884 - \frac{0,085}{0,83} = 0,789 P$$

$$S_{Hh} = 2,132 + (0,884 + 0,789) \cdot 0,394 P = 2,788 P$$

$$S_{Hk} = (0,884 - 0,789) \cdot 0,394 = 0,040 P$$



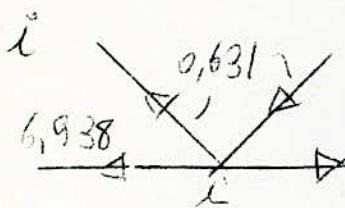
$$J_{Ri} = 5,703 + 1,58 \cdot 0,789 = 6,938 P$$



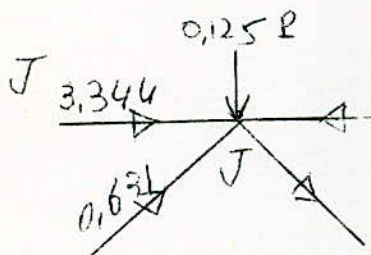
$$D_{Ii} = 0,789 - \frac{0,125}{0,83} = 0,631 P$$

$$S_{Ij} = 2,788 + (0,789 + 0,631) \cdot 0,394 P = 3,344 P$$

$$S_{Ik} = (0,789 - 0,631) \cdot 0,394 = 0,059 P$$



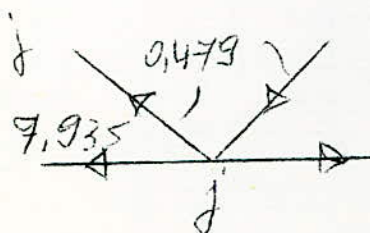
$$J_{ij} = 6,938 + 1,58 \cdot 0,631 = 7,935 P$$



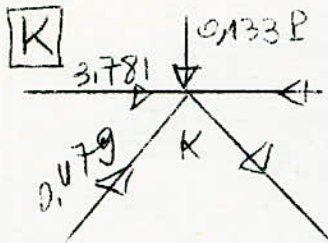
$$D_{Jj} = 0,631 - \frac{0,125 P}{0,83} = 0,479 P$$

$$S_{Jk} = 3,344 + (0,631 + 0,479) \cdot 0,394 P = 3,781 P$$

$$S_{Jl} = (0,631 - 0,479) \cdot 0,394 P = 0,059 P$$



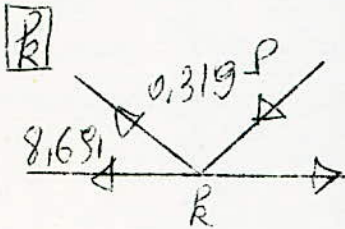
$$J_{jk} = 7,935 + 1,58 \cdot 0,479 P = 8,691 P$$



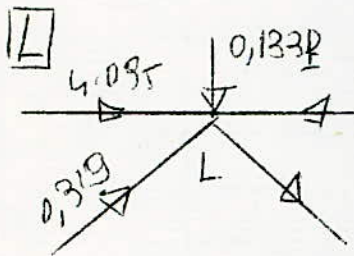
$$D_{Kk} = 0,479 - \frac{0,133}{0,83} = 0,319 P$$

$$S_{Kk} = 3,781 + (0,479 + 0,319) 0,394 = 4,095 P$$

$$S_{Kk} = (0,479 - 0,319) 0,394 P = 0,068 P$$



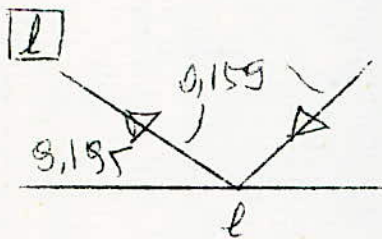
$$J_{Rk} = 8,691 + 1,58 \cdot 0,319 P = 9,195 P$$



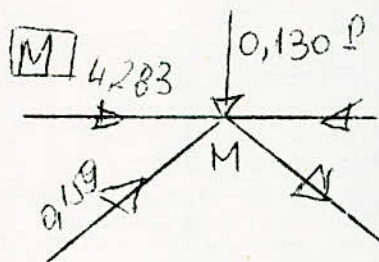
$$D_{Ll} = 0,319 - \frac{0,133}{0,83} = 0,159 P$$

$$S_{Ll} = 4,095 + (0,319 + 0,159) 0,394 P = 4,283 P$$

$$S_{Ll} = (0,319 - 0,159) 0,394 = 0,068 P$$



$$J_{lm} = 9,195 + 1,58 \cdot 0,159 P = 9,445 P$$

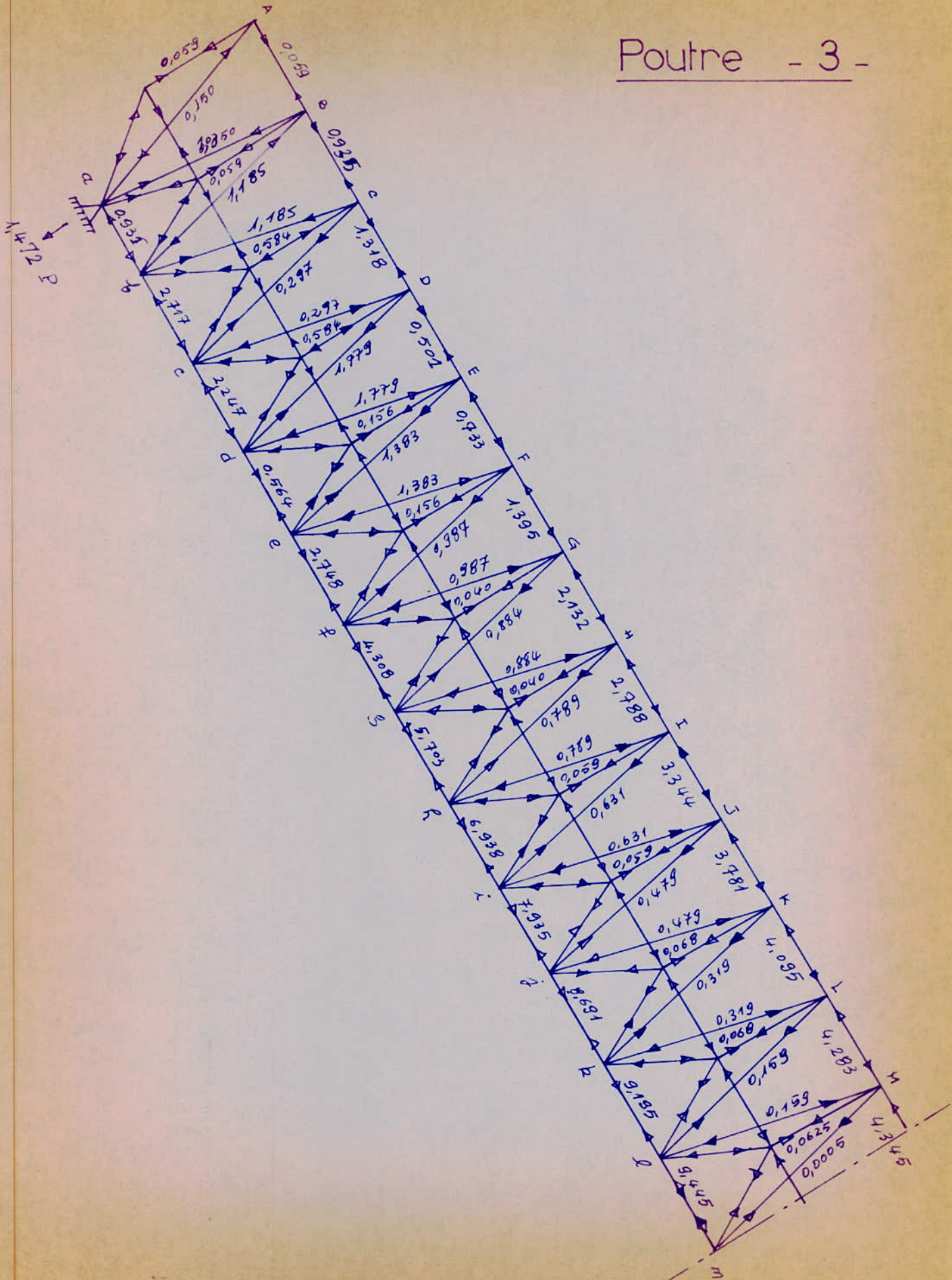


$$D_{Mm} = 0,159 - \frac{0,130}{0,83} = 0,0005 P$$

$$S_{Mm} = 4,283 + (0,159 + 0) 0,394 P = 4,345 P$$

$$S_{Mm} = 0,159 \cdot 0,394 =$$

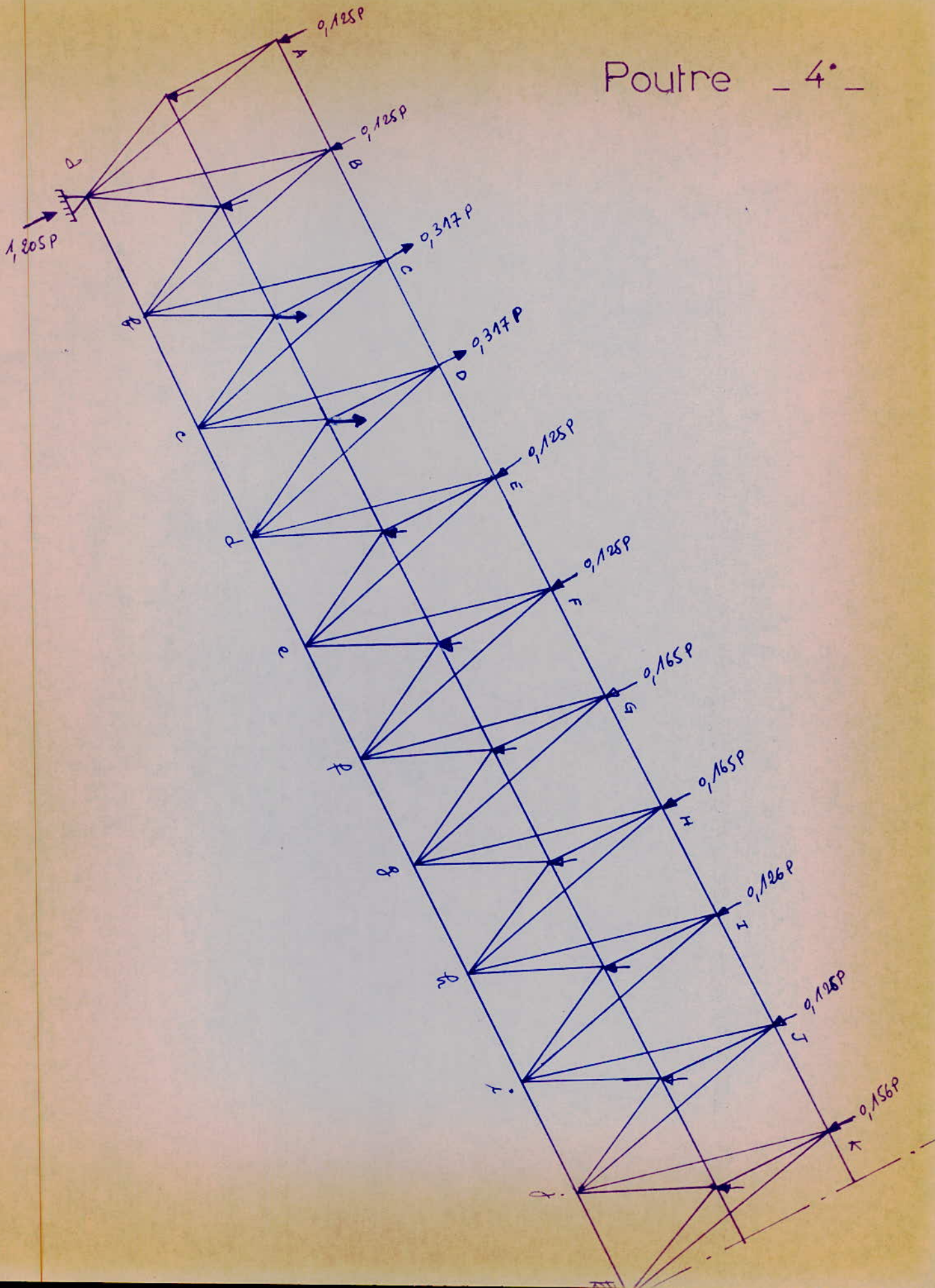
$$= 0,062 P$$



*P* O T T R E n° : 4

---

Poutre \_ 4° \_

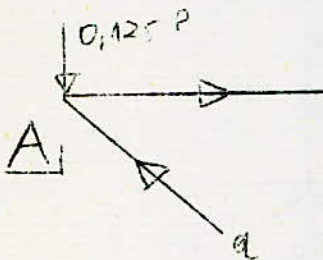


Poutre - 4 -

Reaction d'appui:  $R_a = \sum P_i = 4P(0,125 + 0,125 + 0,165 + 0,126) + 0,156$   
 $+ 2P \cdot 0,156 - 4P \cdot 0,317 = 1,205 P.$

$R_a = 1,205 P$

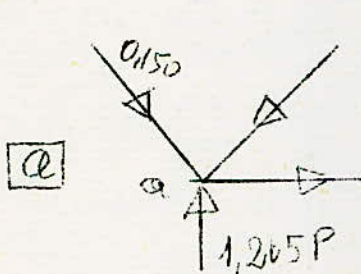
Equilibre des nœuds.



$D_{Aa} = \frac{0,125}{0,73} = 0,150 P.$

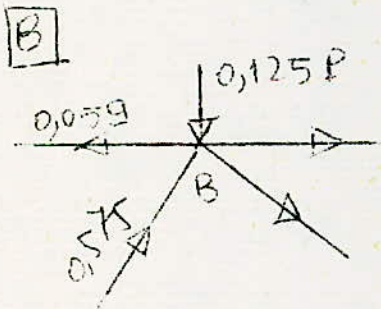
$S_{Aa} = 0,150 \cdot 0,394 = 0,059 P$

$S_{Aa} = 0,059 P$



$D_{Ba} = \frac{1,205 P}{2 \cdot 0,73} = 0,150 P = 0,1575 P$

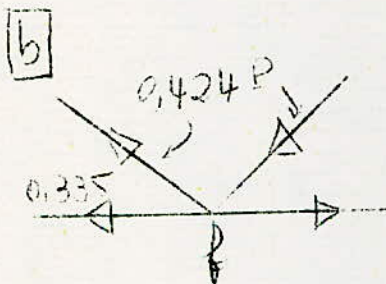
$J_{ab} = 2(0,1575 - 0,150) \cdot 0,394 \cdot P = 0,335 P$



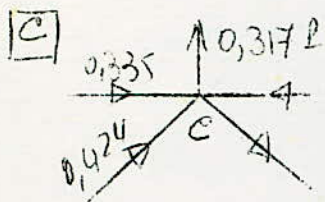
$D_{Bb} = 0,1575 - \frac{0,125}{0,73} = 0,424 P$

$S_{Bc} = 0,059 - (0,1575 + 0,424) \cdot 0,394 P$   
 $= -0,335 P$

$S_{Bb} = 0,059 P.$



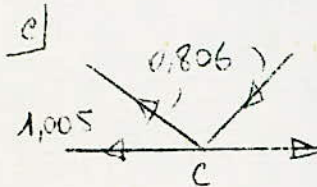
$J_{bc} = 0,335 + 1,58 \cdot 0,424 P$   
 $= 1,005 P$



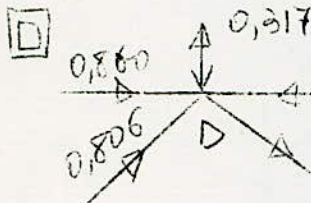
$$D_{cc} = 0,424 P + \frac{0,317}{0,83} = 0,806 P$$

$$S_{cd} = 0,335 P + (0,424 + 0,806) 0,394 P = 0,960 P$$

$$S_{cc} = (0,806 - 0,424) 0,394 P = 0,151 P$$



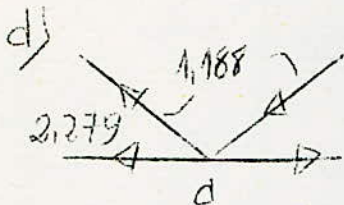
$$I_{cd} = 1,005 + 1,58 \cdot \frac{1,005}{0,83} = 2,279 P$$



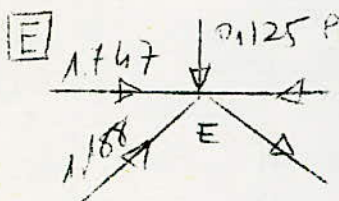
$$D_{dd} = 0,806 + \frac{0,317}{0,83} = 1,188 P$$

$$S_{de} = 0,860 + (0,806 + 1,188) 0,394 P = 1,747 P$$

$$S_{dd} = (0,806 + 1,188) 0,394 P = 0,151 P$$



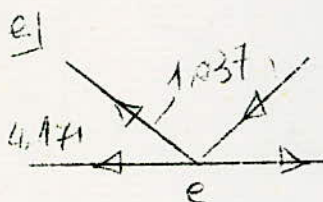
$$I_{de} = 2,279 + 1,58 \cdot 1,188 = 4,171 P$$



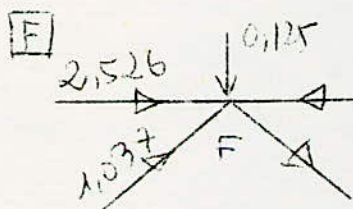
$$D_{ee} = 1,188 + \frac{0,125}{0,83} = 1,037 P$$

$$S_{ef} = 1,747 + (1,188 + 1,037) 0,394 P = 2,526 P$$

$$S_{ee} = (1,188 - 1,037) 0,394 = 0,059 P$$



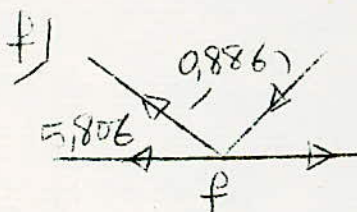
$$I_{ef} = 4,171 P + 1,58 \cdot 1,037 P = 5,806 P$$



$$D_{ff} = 1,037 - \frac{0,125}{0,83} = 0,886 P$$

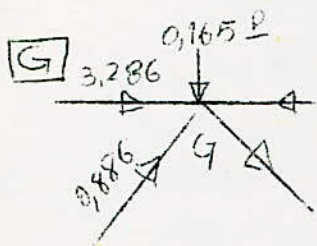
$$S_{fg} = 2,526 P + (1,037 + 0,886) 0,394 P = 3,256 P$$

$$S_{ff} = (1,037 - 0,886) 0,394 = 0,058 P$$



$$I_{fg} = 5,806 P + 0,886 \cdot 1,58 = 7,206 P$$





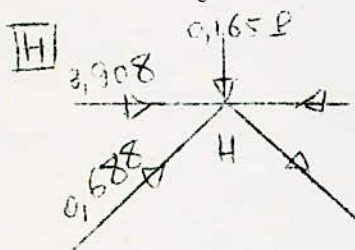
$$D_{Gg} = 0,886 - \frac{0,165}{0,83} = 0,688 P$$

$$S_{GH} = 3,286 P + (0,886 + 0,688) 0,394 P = 3,908 P$$

$$S_{GG} = (0,886 - 0,688) 0,394 P = 0,078 P$$



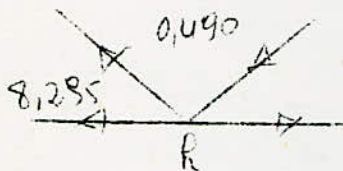
$$I_{gh} = 7,206 + 1,58 \cdot 0,688 P = 8,295 P$$



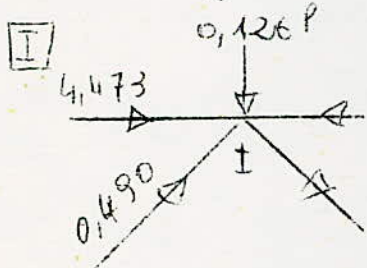
$$D_{Hh} = 0,688 - \frac{0,165}{0,83} = 0,490 P$$

$$S_{HI} = 3,908 + (0,688 + 0,490) 0,394 P = 4,473 P$$

$$S_{HH} = (0,688 - 0,490) 0,394 P = 0,078 P$$



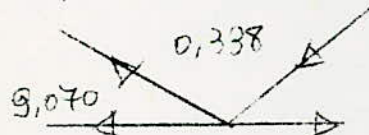
$$I_{hi} = 8,295 + 1,58 \cdot 0,490 = 9,070 P$$



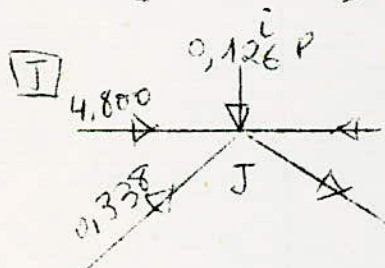
$$D_{Ii} = 0,490 - \frac{0,126}{0,83} = 0,338 P$$

$$S_{IJ} = 4,473 + (0,490 + 0,338) 0,394 = 4,800 P$$

$$S_{II} = (0,490 - 0,338) 0,394 = 0,060 P$$



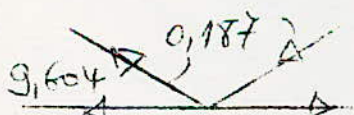
$$I_{ij} = 9,070 + 1,58 \cdot 0,338 = 9,604 P$$



$$D_{Jj} = 0,338 - \frac{0,126}{0,83} = 0,187 P$$

$$S_{JK} = 4,800 + (0,338 + 0,187) 0,394 = 5,075 P$$

$$S_{JJ} = (4,800 - 0,060) - (0,338 - 0,187) 0,394 = 0,060 P$$



$$I_{jk} = 9,604 + 1,58 \cdot 0,187 = 9,900 P$$



$$D_{Kk} = 0,187 - \frac{0,156}{0,83} = 0,000 P$$

$$S_{KK'} = 5,075 + 0,187 \cdot 0,394 = 5,149 P$$

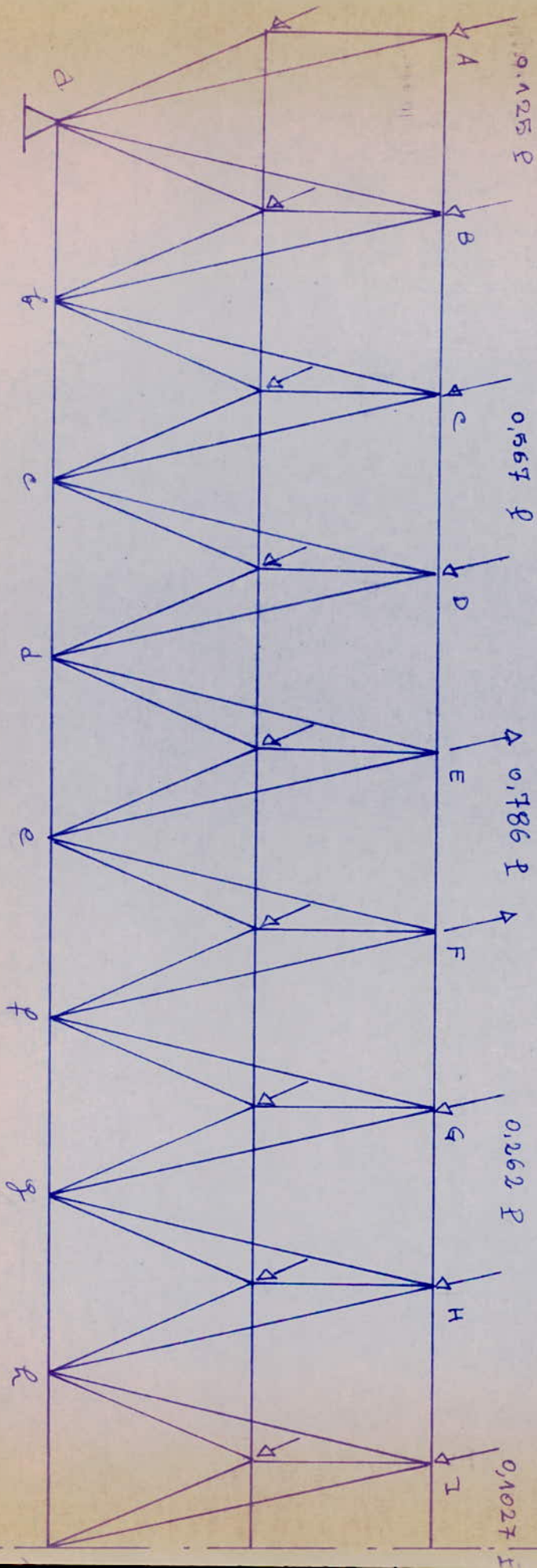
$$S_{KK} = 0,187 - 0,394 = 0,074 P$$



*IP* O U T R E n° : 5

---

# Poutre \_5\_

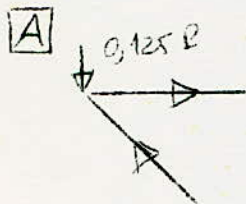


## Poutre - 5 -

$$R_a = \sum P_i = 4P(0,125 + 0,567 + 0,262) - 4P(0,786) + 2P \cdot 0,103 P$$

$$= 0,879 P.$$

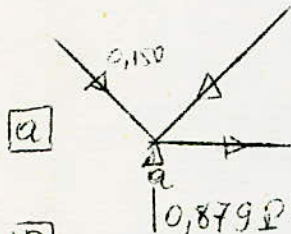
Equilibre des noeuds:



$$D_{AA} = \frac{0,125}{0,83} = 0,150 P$$

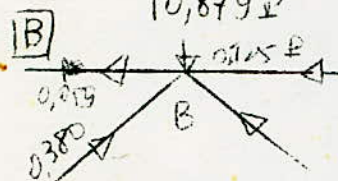
$$S_{AA} = 0,059 P$$

$$S_{AP} = 0,056 P$$



$$D_{aB} = \frac{0,879}{2 \cdot 0,83} - 0,150 = 0,380 P$$

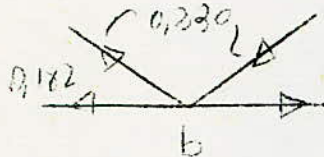
$$I_{ab} = (0,380 - 0,150) \cdot 0,70 = 0,162 P$$



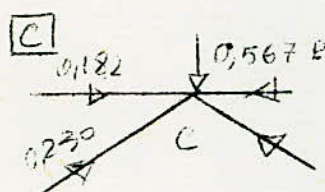
$$D_{BB} = 0,150 - \frac{0,380}{0,83} = -0,230 P$$

$$S_{BC} = 0,059 + (0,380 + 0,230) \cdot 0,394 = +0,182 P$$

$$S_{BB} = 0,056 P$$



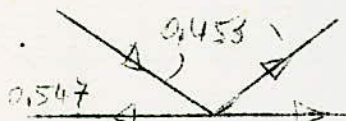
$$I_{ab} = 0,182 + 1,58 \cdot 0,230 = 0,545 P$$



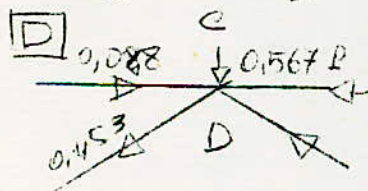
$$D_{CC} = \frac{0,567}{0,83} - 0,230 = 0,453 P$$

$$S_{CD} = 0,182 - (0,453 - 0,230) \cdot 0,394 P = 0,088 P$$

$$S_{CC} = (0,453 + 0,230) \cdot 0,394 P = 0,265 P$$



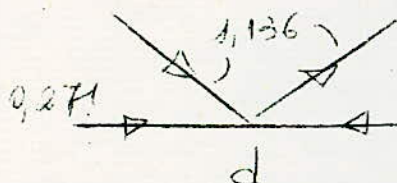
$$I_{cd} = 0,545 - 1,58 \cdot 0,453 P = -0,271 P$$



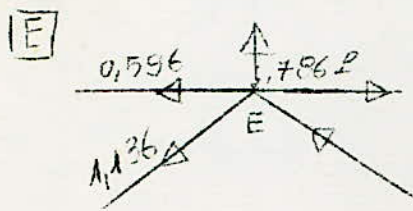
$$D_{DD} = 0,453 P + \frac{0,567 P}{0,83} = 1,136 P$$

$$S_{DE} = 0,029 - (0,453 + 1,136) \cdot 0,394 = -0,996 P$$

$$S_{DD} = (1,136 - 0,453) \cdot 0,394 = 0,269 P$$



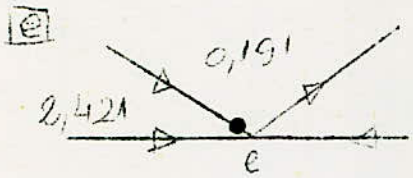
$$I_{de} = 0,271 + 1,58 \cdot 1,136 P = 2,421 P$$



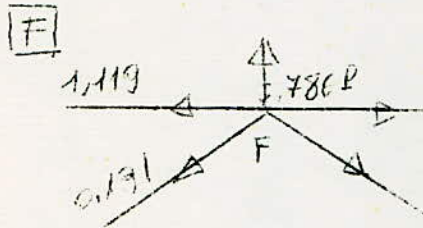
$$D_{EE} = 1,136 - \frac{0,786}{0,83} = 0,191 P$$

$$S_{EF} = 0,596 + (1,136 + 0,191) \cdot 0,394 = 1,119 P$$

$$S_{EE} = (0,191 - 1,136) \cdot 0,394 = -0,372 P$$



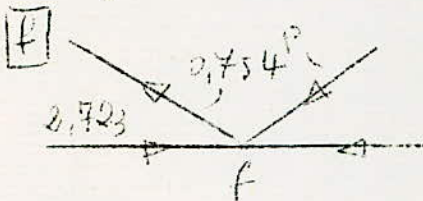
$$I_{EF} = 2,421 + 1,58 \cdot 0,191 P = 2,723 P$$



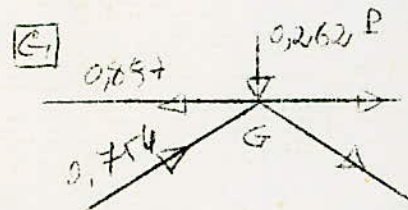
$$D_{FF} = -0,191 + 0,945 P = +0,754$$

$$S_{FG} = 1,119 - (0,754 - 0,191) \cdot 0,394 = 0,897 P$$

$$S_{FF} = (-0,191 - 0,754) \cdot 0,394 = -0,372 P$$



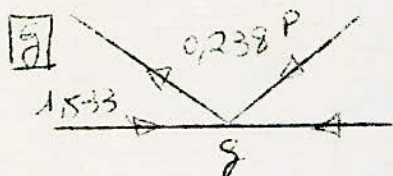
$$I_{FG} = 2,723 - 1,58 \cdot 0,754 = 1,533 P$$



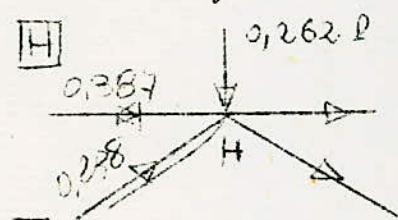
$$D_{GG} = 0,754 - \frac{0,262}{0,83} = 0,438 P$$

$$S_{GH} = 0,754 + (0,438 + 0,754) \cdot 0,394 = 0,387 P$$

$$S_{GG} = (0,754 - 0,438) \cdot 0,394 = 0,124 P$$



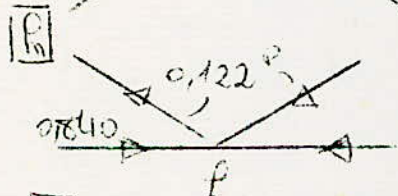
$$I_{GH} = 1,533 - 1,58 \cdot 0,238 P = 0,840 P$$



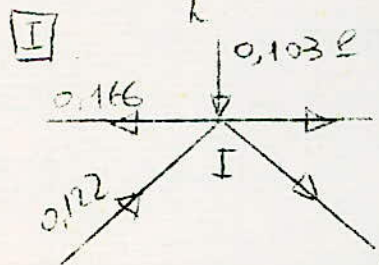
$$D_{HH} = 0,238 - \frac{0,262}{0,83} = 0,122 P$$

$$S_{HI} = 0,387 - (0,238 + 0,122) \cdot 0,394 = 0,166 P$$

$$S_{HH} = (0,238 - 0,122) \cdot 0,394 = 0,124 P$$



$$I_{HI} = 0,840 - 1,58 \cdot 0,122 = 0,647 P$$

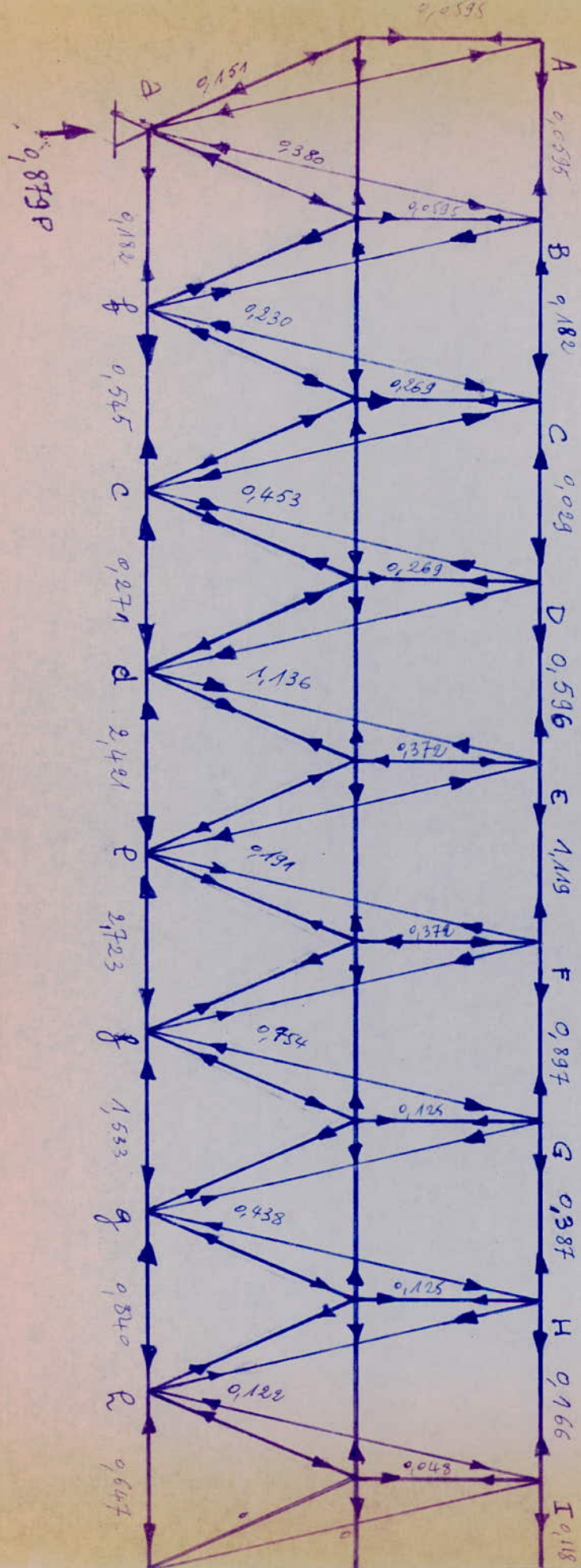


$$D_{II} = 0,122 - \frac{0,103}{0,83} = 0,0702 P$$

$$S_{II'} = 0,166 - 0,122 \cdot 0,394 = 0,118 P$$

$$S_{II} = 0,122 \cdot 0,394 = 0,048 P$$

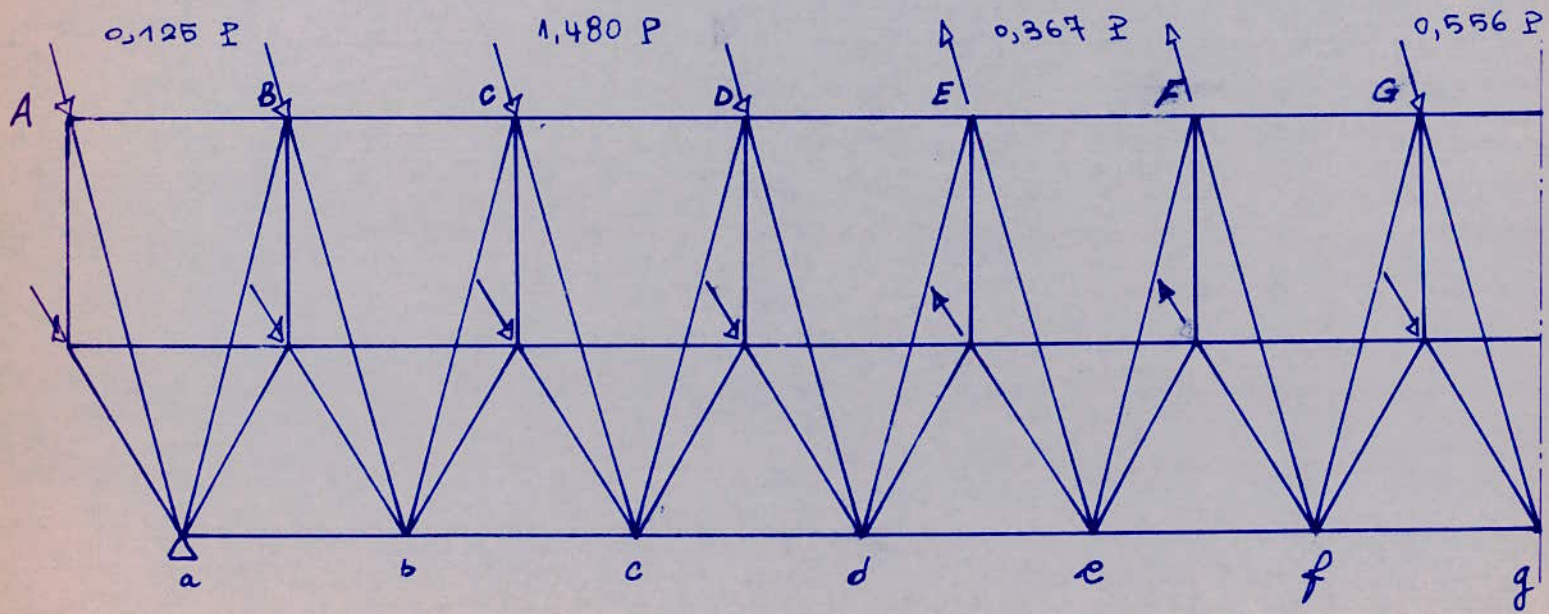
Poutre .5.



*P* O U T R E n° : 6

---



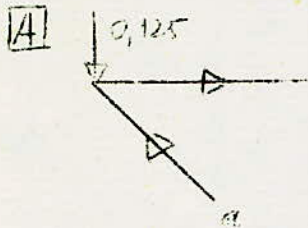


6

# Poutre - 6 -

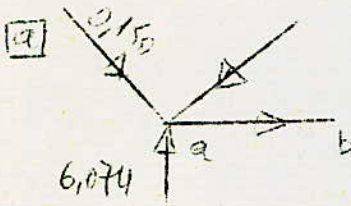
$$R_a = \sum P_i \cdot e_i = 4P(0,125 + 1,480) - 0,367 \cdot 4P + 2P \cdot 1,556$$

$$\underline{R_a = 6,074 P}$$



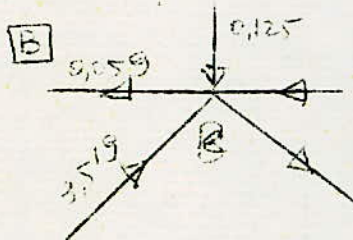
$$D_{Aa} = \frac{0,125}{0,83} = 0,150 P$$

$$S_{Aa} = 0,059 = S_{Aa}$$



$$D_{ab} = \frac{6,074}{2,083} - 0,150 = 3,519 P$$

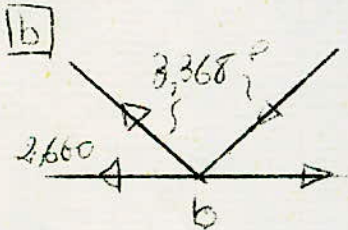
$$I_{ab} = (3,519 - 0,150) \cdot 0,394 = 2,660 P$$



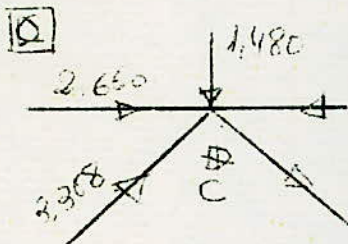
$$D_{Bb} = 3,519 - 0,150 = 3,368 P$$

$$S_{Bb} = 0,059 + (3,368 + 3,519) \cdot 0,394 = 2,660 P$$

$$S_{Bc} = 0,059 P$$



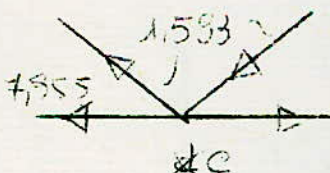
$$I_{bc} = 2,660 + 1,58 \cdot 3,368 = 7,955 P$$



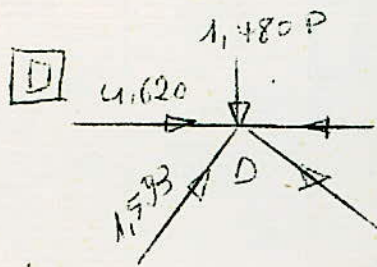
$$D_{Cc} = 2,68 - \frac{1,480}{0,83} = 1,553 P$$

$$S_{Cc} = 2,660 + (3,368 + 1,553) \cdot 0,394 = 4,620 P$$

$$S_{Cc} = (3,368 - 1,553) \cdot 0,394 P = 0,700 P$$



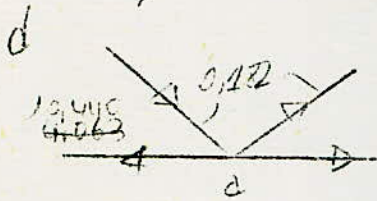
$$I_{bc} = 7,955 P + 1,58 \cdot 1,553 P = 10,440 P$$



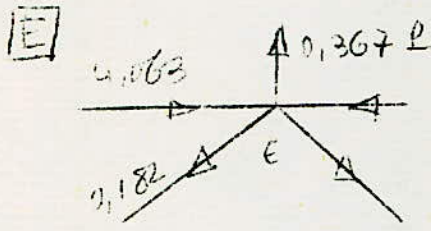
$$D_{Dd} = \frac{1,480}{0,83} - 1,593 = 0,182 \text{ P}$$

$$S_{DE} = 4,620 + (1,593 - 0,182) \cdot 0,394 = 4,063$$

$$S_{DD} = (1,593 - 0,182) \cdot 0,394 = 0,700 \text{ P}$$



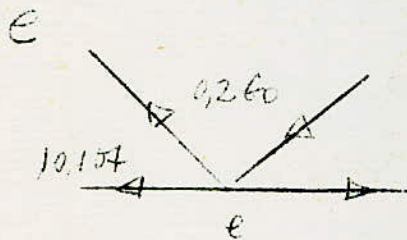
$$J_{Dd} = 10,445 - 1,58 \cdot 0,182 \text{ P} = 10,107 \text{ P}$$



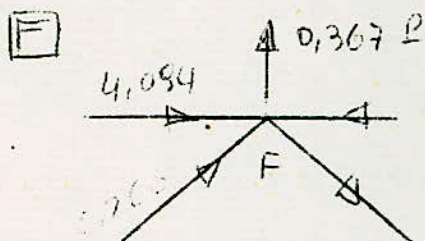
$$D_{Ee} = \frac{0,367}{0,83} - 0,182 \text{ P} = 0,260 \text{ P}$$

$$S_{EE} = 4,063 + (0,260 - 0,182) \cdot 0,394 = 4,094$$

$$S_{EE} = 0,174 \text{ P}$$



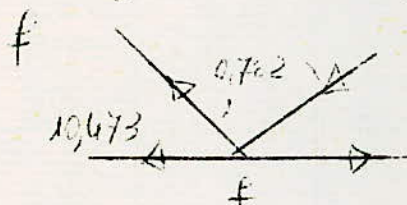
$$J_{Ee} = 10,107 + 1,58 \cdot 0,260 = 10,538 \text{ P}$$



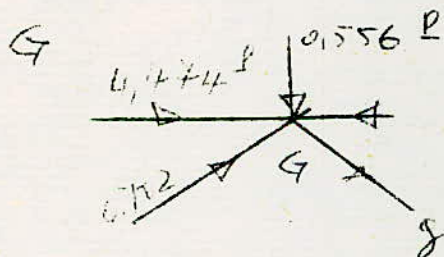
$$D_{Ff} = 0,260 + \frac{0,367}{0,83} = 0,702 \text{ P}$$

$$S_{FF} = 4,094 + (0,260 - 0,182) \cdot 0,394 = 4,474 \text{ P}$$

$$S_{FF} = (0,702 - 0,260) \cdot 0,394 = 0,174 \text{ P}$$

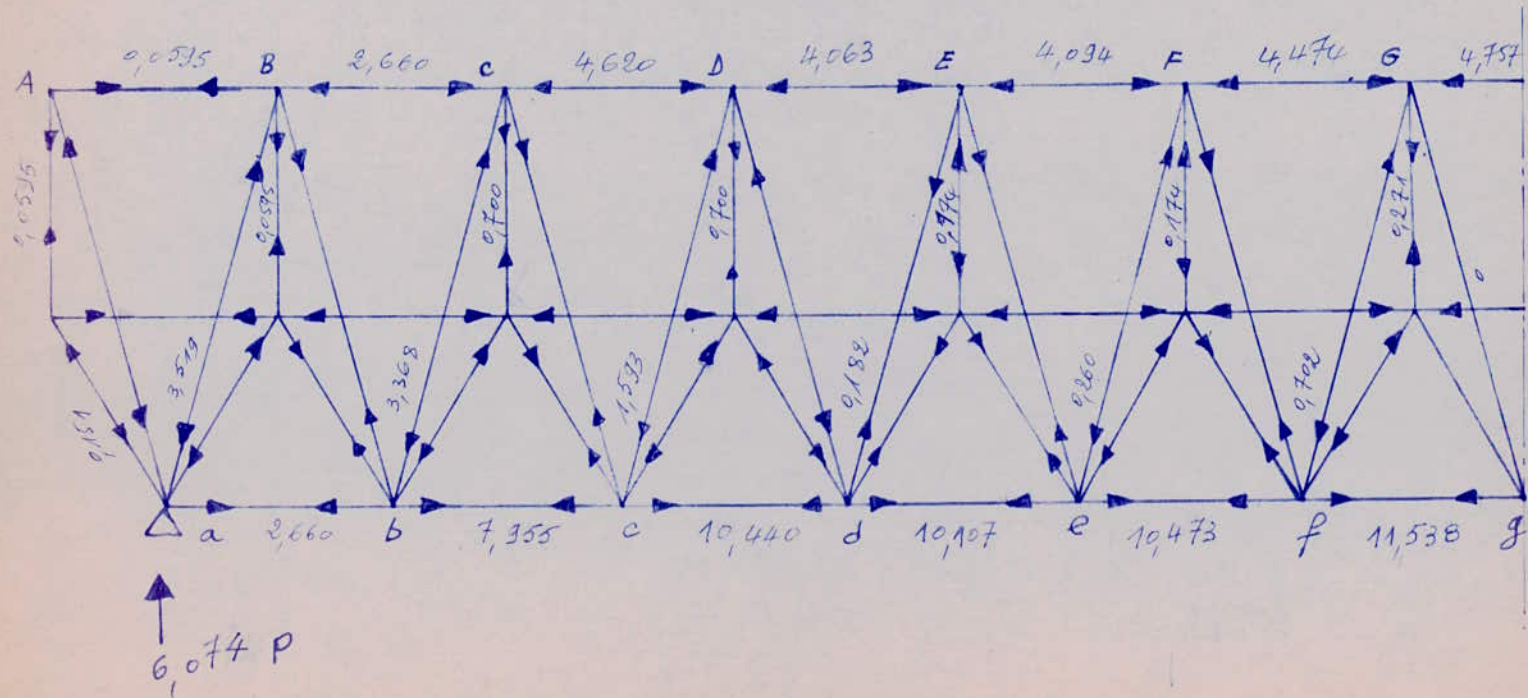


$$J_{Ff} = 10,473 + 1,58 \cdot 0,702 = 11,538 \text{ P}$$



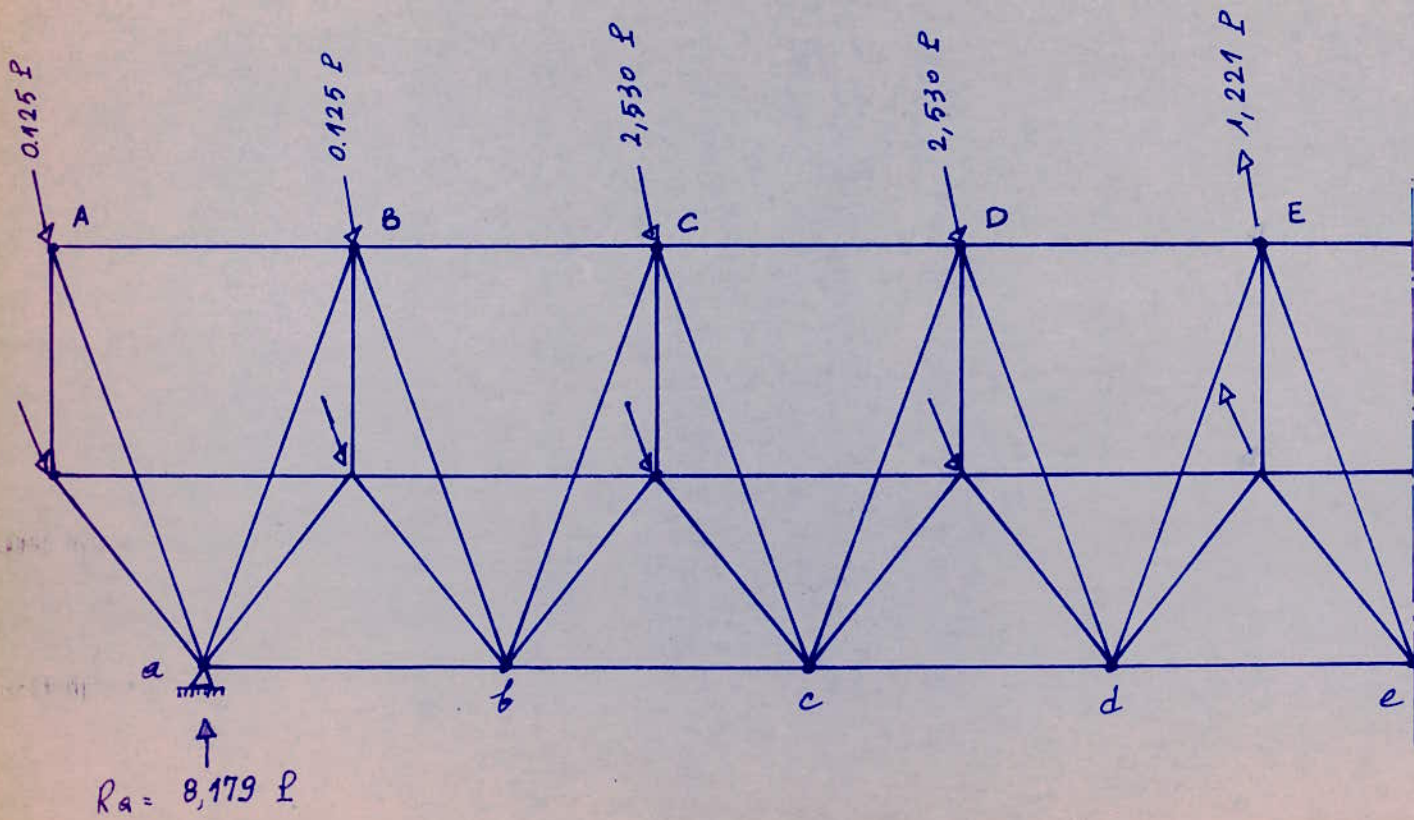
$$D_{Gg} = 0,702 - \frac{0,556}{0,83} = 0,0 \text{ P}$$

$$S_{GG} = 4,474 + 0,702 \cdot 0,394 = 4,757 \text{ P}$$



6

P O U T R E n° : 7

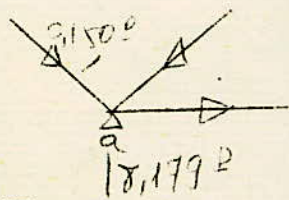


7

Charges aux nœuds

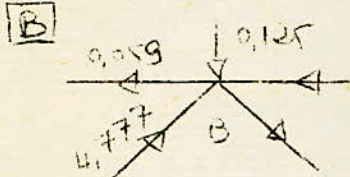
# Poutre - 7 -

$$R_a = 7,179 \text{ P}$$



$$D_{ab} = \frac{7,179}{2,013} - 0,150 = 4,777 \text{ P}$$

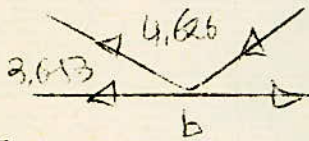
$$I_{ab} = (4,777 - 0,150) \cdot 0,394 = 3,653 \text{ P}$$



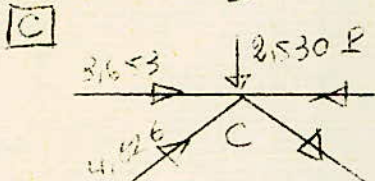
$$D_{ab} = 4,777 - 0,150 = 4,626 \text{ P}$$

$$S_{bc} = 0,059 + (4,777 + 4,626) \cdot 0,394 \text{ P} = 3,653 \text{ P}$$

$$S_{ab} = (4,777 - 4,626) \cdot 0,394 = 0,059 \text{ P}$$



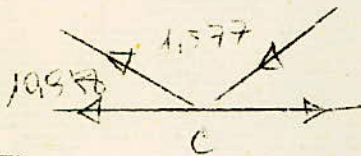
$$I_{bc} = 3,653 + 1,58 \cdot 4,626 \text{ P} = 10,958 \text{ P}$$



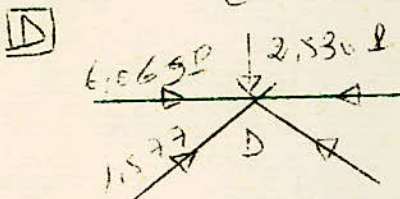
$$D_{cc} = 4,626 - \frac{2,530}{0,83} = 1,577 \text{ P}$$

$$S_{cd} = 3,653 + (4,626 + 1,577) \cdot 0,394 \text{ P} = 6,069 \text{ P}$$

$$S_{cc} = (4,626 - 1,577) \cdot 0,394 \text{ P} = 1,204 \text{ P}$$



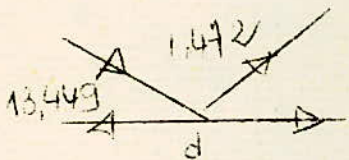
$$I_{cd} = 10,958 + 1,58 \cdot 1,577 = 13,449 \text{ P}$$



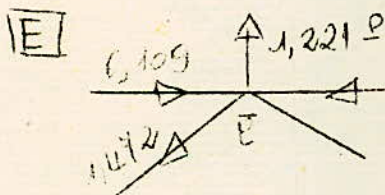
$$D_{dd} = \frac{2,530}{0,83} - 1,577 = 1,472 \text{ P}$$

$$S_{de} = 6,069 + (1,577 + 1,472) \cdot 0,394 = 6,109 \text{ P}$$

$$S_{dd} = (1,577 + 1,472) \cdot 0,394 = 1,204 \text{ P}$$



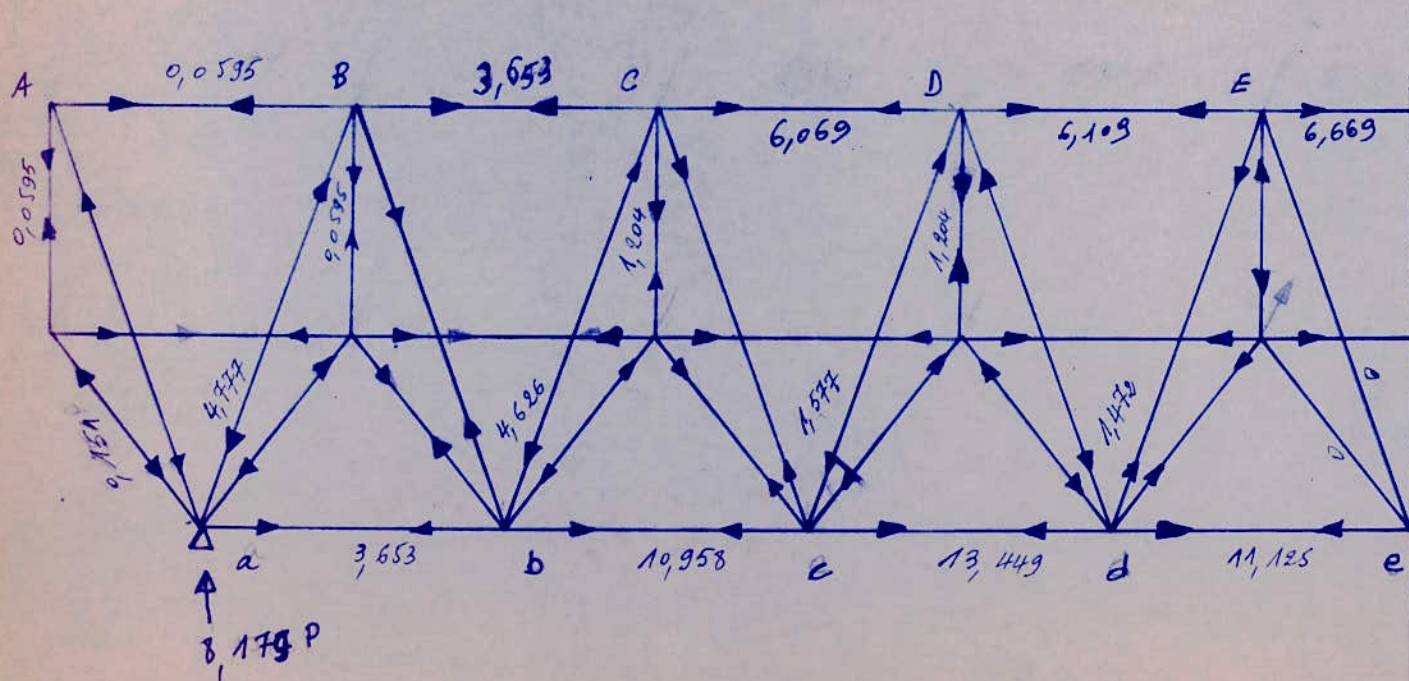
$$I_{de} = 13,449 - 1,58 \cdot 1,472 \text{ P} = 11,125 \text{ P}$$



$$D_{ee} = 1,472 \cdot \frac{1,221}{0,83} = 0,000 \text{ P}$$

$$S_{ee'} = 6,109 \text{ P} - 1,472 \cdot 0,394 = 6,669 \text{ P}$$

$$S_{ee} = 1,472 \text{ P} \cdot 0,394 = 0,584 \text{ P}$$



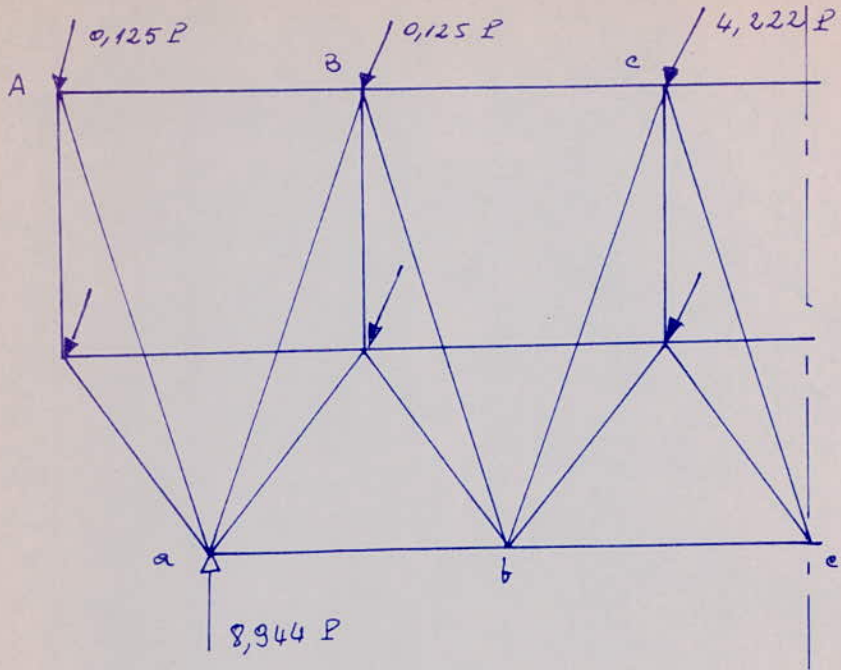
7

Efforts dans les barres

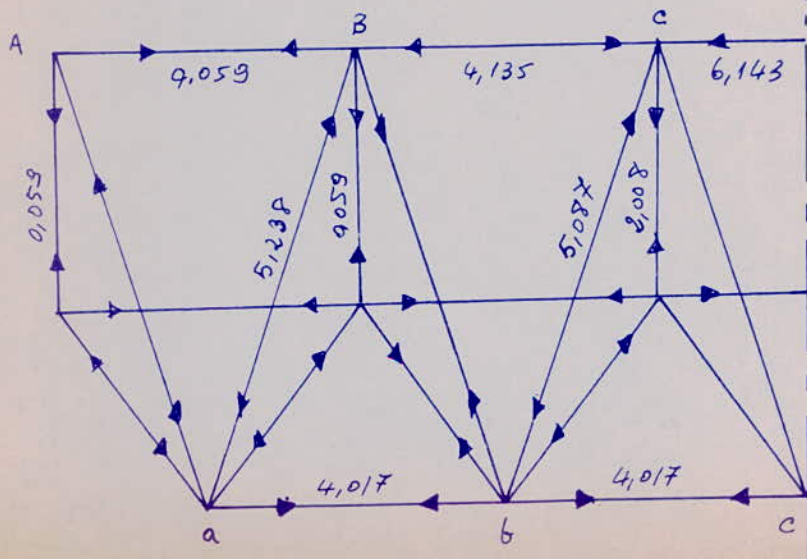


*P* O T T R E n° : 6

---

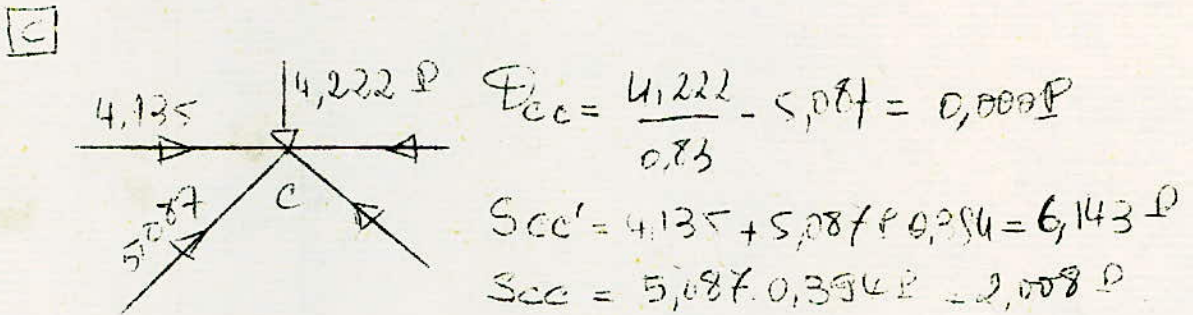
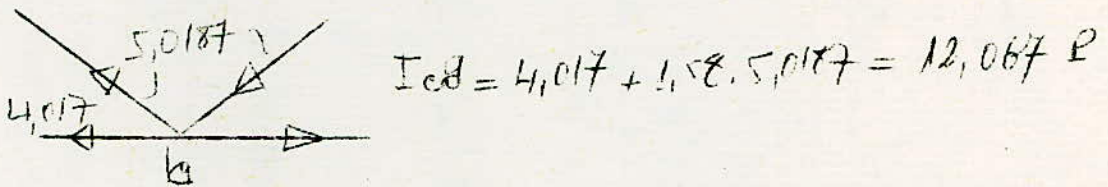
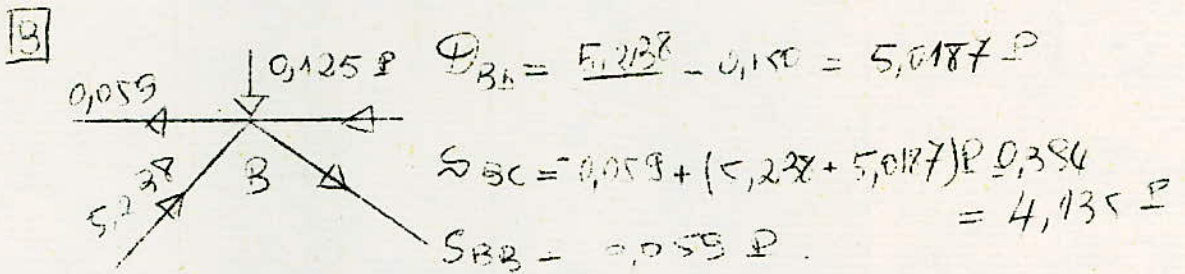
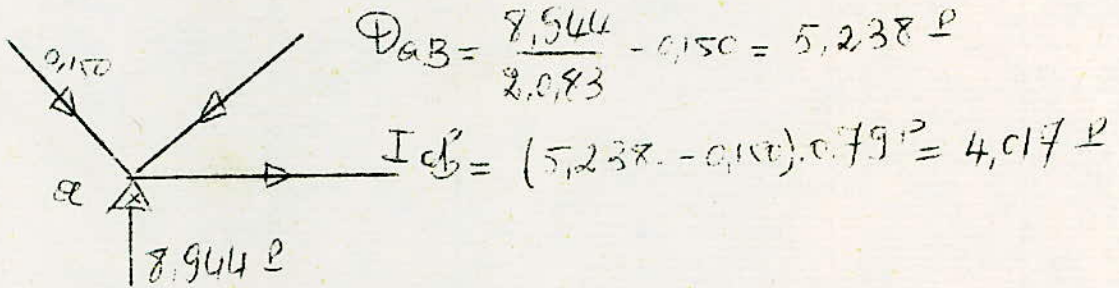


8



Foutre 8r

$R_a = 8,944 P$



2

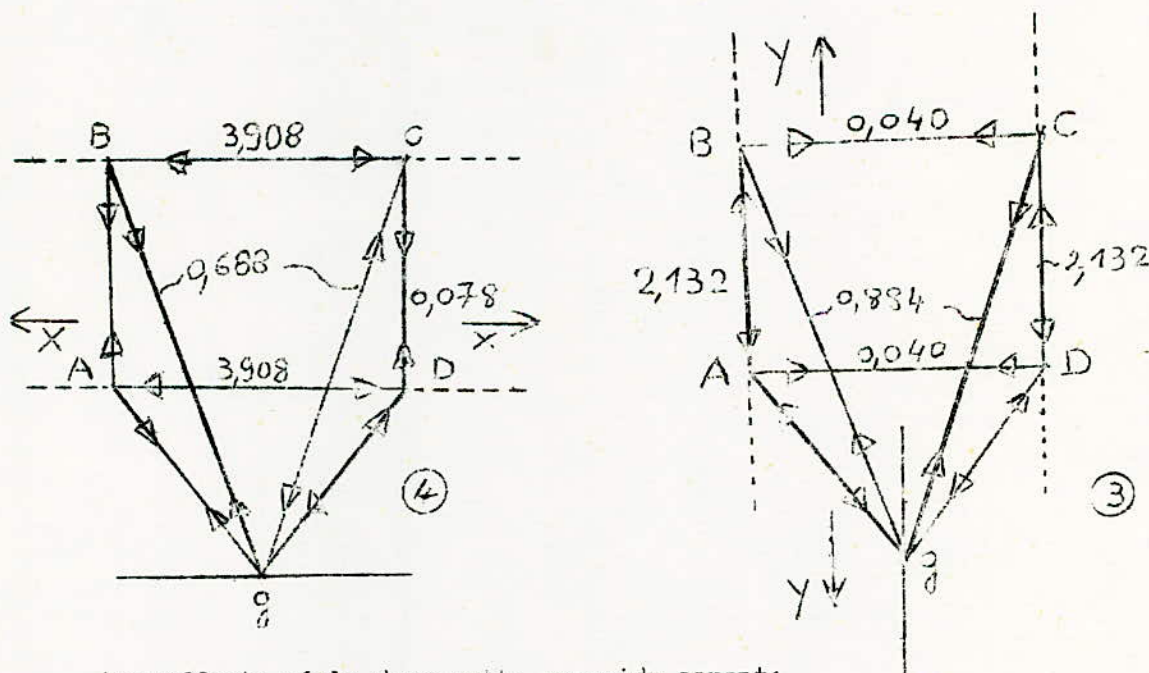
-//) DETERMINATION DES EFFORTS REELS DANS  
LES BARRES SUPERIEURES ET DIAGONALES - - -

Les efforts calculés précédemment pour chaque poutre supposée indépendante, ne représentent pas en fait ceux réels existant dans chaque barre si on la considère comme appartenant à la structure. En effet, vu que les réseaux de poutres X et Y se croisent aux nœuds, l'effort existant dans les barres communes est le résultat de deux efforts juxtaposés; dont la somme algébrique donnera l'effort cherché.

Nous avons réalisé le croisement des poutres X et Y et effectué successivement la combinaison des efforts dans tous les nœuds.

Les résultats de ce calcul sont consignés dans la planche intitulée:  
"EFFORTS REELS"

Exemple: Considérons la septième pyramide de la poutre trois (3) de sens Y elle constitue également la septième pyramide de la poutre quatre (4) de sens X



Les efforts réels dans cette pyramide seront:

- dans les barres AB et DC :  $2,132 - 0,078 = 2,054$
- " " " BC et AD :  $3,908 - 0,040 = 3,868$
- " " diagonales :  $0,688 + 0,068 = 1,552$

(ces efforts sont à multiplier par P).

17 e t e r m i n a t i o n

d e s

C H A R G E S

&

S U R C H A R G E S

DETERMINATION DES CHARGES. /

1. Effets des charges permanentes:

Structure :	estimee à	50 kg/m <sup>2</sup>
Couverture :	TN 40	10 "
Pannes en bois		10 "
	Total	Cp= 70 Kg/m <sup>2</sup>

2. Effets de la neige:

Ces effets dependent de la region et de l'altitude. Alger: Reg.I  
 Altit. inf. 200m

D'apres les règles NV 65 on a : Nn = 35,7 Kg/m<sup>2</sup>  
 Ne = 61,2 Kg/m<sup>2</sup>

3. Effets du Vent:

3.1. Caracteristiques geometriques:

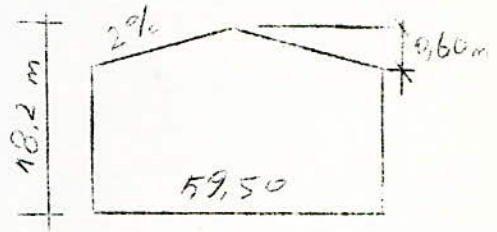
Toiture pente 2% ; flèche : 0,60m

Hauteur totale : 18,2 m.

Carré de coté : 59,50 m.

$$\lambda a = \lambda b = H/L = 18,2 / 59,5 = 0,306$$

Le coefficient  $\gamma_c$  est donné par abaque ( NV 65 p. 81 )  $\gamma_c = 0,88$



3.2. Pression dynamique de base:

Region 2 ; Site normal ; Protégé . Pour une hauteur de 18,2 m

les Regles NV 65 donnent : Vn = 82,6 kg / m<sup>2</sup>

$$Ve = 143,8 \text{ kg/m}^2$$

3.3. Determination des coefficients de pression ( Ci & Ce )

3.3.1 .Construction fermée :

1° cas de vent (normal aux génératrices toiture)

... Actions exterieures -

Parois verticales - au vent : Ce = +0,8  
 -s/s le vent : Ce = -(1,3  $\gamma_c$  - 0,8) = -0,34

Toiture -versant au vent : Ce = -0,31  
 - " s/s " : Ce = -0,29

...Actions interieures :

On considerera successivement une surpression et une depression:

$$\text{surpression : } Ci = 0,6( 1,8 - 1,3\gamma_c ) = + 0,4$$

$$\text{depression : } Ci = -0,6(1,3\gamma_c - 0,8) = -0,2$$

2° cas de vent ( parallèle aux génératrices toit.)

...Actions exterieures :

parois au vent Ce = + 0,8 Toiture : Ce = - 0,30  
 " s / s " Ce = - 0,34

... Actions interieures : surpression Ci = + 0,4

depression Ci = - 0,2

### 3.3.2 Construction ouverte : ( cas d'une paroi entièrement ouverte )

1°/ paroi ouverte au vent :

...actions extérieures : ( v.construction fermée )

...actions intérieures : ( simultanées )

- surpression  $C_i = + 0,8$  sur les parois fermées et la toiture
- dépression  $C_i = - 0,2$  sur la paroi ouverte

2°/ paroi ouverte sous le vent (indifféremment //ou<sup>i</sup> au vent)

... Actions extérieures : (voir construction fermée)

... Actions intérieures : (simultanées)

- Dépression  $C_i = -(1,3 \text{ ou } 0,8) = - 0,34$
- Surpression  $C_i = 0,6( 1,8 - 1,3 \text{ ou } 0 ) = 0,4$

#### // -> action du vent sur la toiture

C'est le cas de vent : " construction ouverte, ouverture au vent  
qui nous donne la plus grande action :  $C=1,09$  ( soulèvement )

$$V_n = 82,6 \times 1,09 = 90 \text{ Kg/m}^2$$

$$V_e = 143,8 \times 1,09 = 157 \text{ Kg/m}^2$$

Dans le sens descendant nous avons pour  $C=0,05$  :

$$V_n = 82,6 \times 0,05 = 4,13 \text{ Kg/m}^2$$

$$V_e = 143,8 \times 0,05 = 7,19 \text{ Kg/m}^2$$

#### cas de charge retenu pour la toiture :

..Combinaison en surcharges normales

$$3/2 \cdot N_n + 4/3 \cdot C_p = 147 \text{ kg/m}^2$$

$$3/2 \cdot V_n + (4/3) C_p = 135 - 70 = 65 \text{ kg/m}^2$$

..Combinaison en surcharges extrêmes :

$$N_e + C_p = 61,2 + 70 = 131,2 \text{ kg/m}^2$$

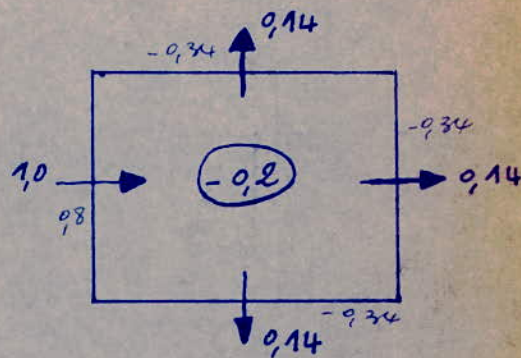
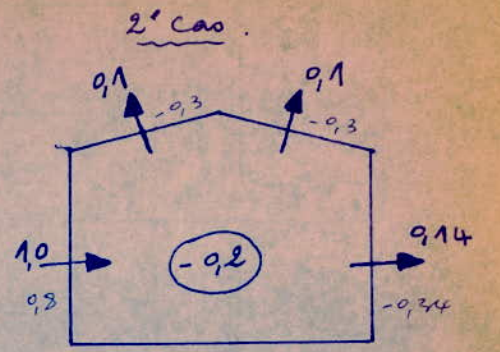
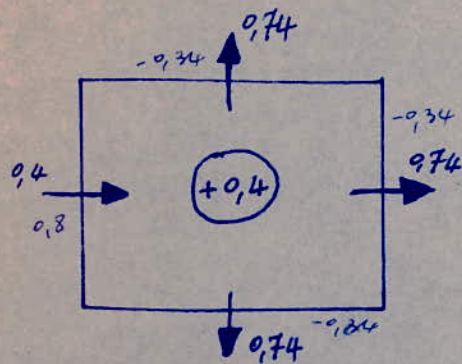
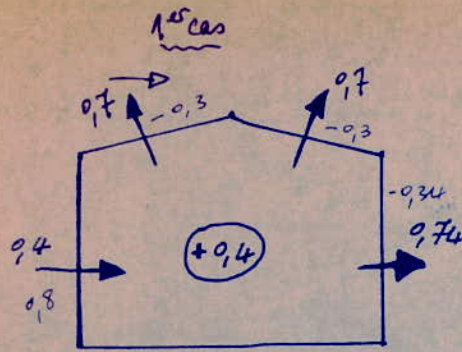
$$V_e + C_p = 157 - 70 = 87 \text{ kg/m}^2$$

Nous retenons la combinaison maximale de  $q = 147 \text{ kg / m}^2$

$$\text{La surface revenant à un noeud est : } S = 2 \cdot d^2 = 2 \cdot 3,5^2 = 24,5 \text{ m}^2$$

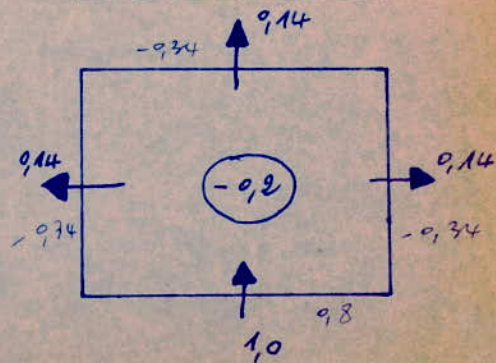
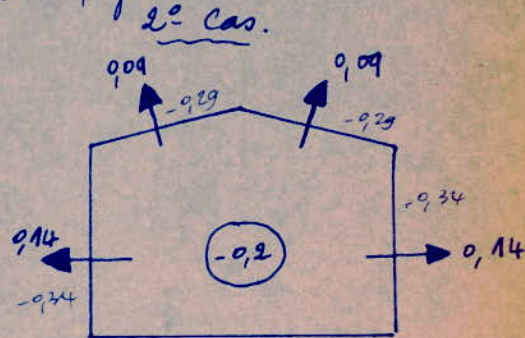
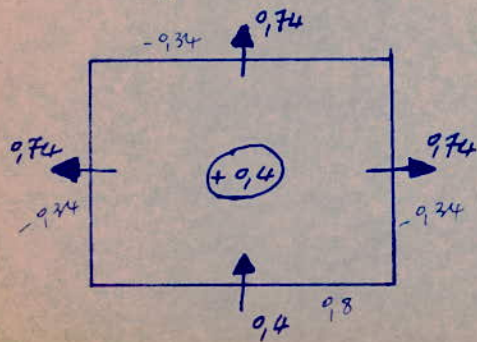
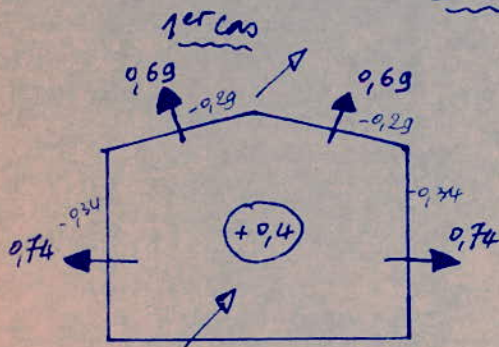
$$\text{La charge de calcul est } P = S \cdot q = 147 \times 24,5 = 3600 \text{ kg / } P = 3,6 \text{ t.}$$

Vent 1 sur long pan



fermée - Construction fermée - Construction fermée - constructions.

Vent 2 sur pignon.





## CALCUL DE LA TOITURE

La toiture présente deux (2) versants plans inclinés à 2%. La couverture repose sur des pannes en bois reliées à la structure par des montants métalliques. La couverture est en tôle TN 40 galvanisée. Nous disposerons les pannes tous les 1.75m.

### DIMENSIONNEMENT DES PANNES :

Schéma statique :



Nous négligerons la composante horizontale ( car pente faible : 2% )

$$C_p + N_e = 75 \text{ kg/m}^2$$

$$q_x = 75 \times 1.75 = 130 \text{ kg/ml}$$

$$M_x = 130 \times (3.5)^2 / 8 = 200 \text{ kgm}$$

$$W_x = 20000 / 100 = 200 \text{ cm}^3$$

On fixe :  $b = 8.0 \text{ cm}$

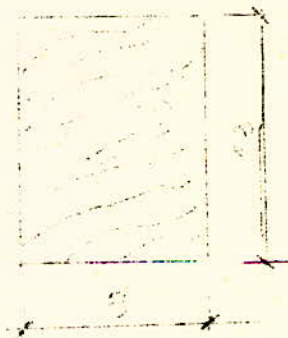
$$W_x = bh^2 / 6$$

$$h = (6W_x / b)^{1/2} = (6 \times 200 / 8)^{1/2} = 12.5 \text{ cm}.$$

Nous adopterons :

$$b = 8.0 \text{ cm}$$

$$h = 13.0 \text{ cm}$$



Après la détermination de la charge aux noeuds P (charge pondérée) les efforts réels des barres peuvent alors être exprimés directement en tonnes.

Après avoir fixé le choix des profilés utilisés pour chaque type de barres, un calcul simple de détermination donnera la section du profilé.

Etant donné que les efforts sont différents d'une barre à l'autre d'où le nombre très élevé de celles-ci. Il ne saurait être question d'employer autant de profilés qu'il existe d'efforts différents, d'autant plus qu'une telle solution serait économiquement erronée.

Nous avons choisi la méthode de classification des efforts qui consiste à former des groupes d'efforts tous voisins d'un effort moyen et dont le plus grand servira à déterminer la section du profilé de ce groupe. Pour cela il faut classer les efforts des barres supérieures, diagonales et tirants suivant un ordre décroissant et découper la liste obtenue en un certain nombre de tranches qu'on réduira le plus possible.

Pour dimensionner, on considère l'élément maximal de chaque tranche. Ceci permet de répondre au souci d'homogénéité de la structure sans altérer l'économie en acier.

Pour des raisons constructives nous nous imposerons comme profil minimum des I et IL 60.60.60 et des diamètres de 60mm pour les tubes.

-A- // )imentionnement Des BARRES SUPERIEURES -

-A1- Barres soumises à la traction

L'effort maximum pondéré en traction est de :

$$8.723 P = 8.723 \times 3.6 = 31.4 \text{ tonnes}$$

Essayons : 60.60.7

$$A = 1596 \text{ mm}^2$$

Si nous employons deux (2) rivets  $\varnothing 16$  dans une section droite, section nette :  $A_n = 1596 - 2 \cdot 7 \cdot 16 = 1372 \text{ mm}^2$   
section minimale nécessaire :  $A_m = 31400 / 24 = 1305 \text{ mm}^2$   
donc le profil choisi convient, mais il sera écarté et remplacé par 70.70.7 afin d'éviter une grande gamme de profils.

Caracteristiques du 70.70.7

$$A = 1382 \text{ mm}^2 \text{ avec deux rivets } \varnothing 14 : A_n = 1214 \text{ mm}^2$$

Effort maximum repris en traction :  $F = 1214 \times 24$

$$\text{Soit } F = 29130 \text{ kg}$$

Pour la raison invoquée dans la page précédente, tous les efforts inférieurs à 29130 kg seront repris par ce profilé.

-A2- Barres comprimées

Pour ces calculs nous supposons que les sont biarticulées

$$l_f = 2.475 \text{ m}$$

Exemple de calcul pour C1

$$F = 8.023 \times 3.6 = 28.9 \text{ tonnes}$$

Essayons le 80.80.8

$$A = 2460 \text{ mm}^2 \quad i = 2.43 \text{ cm}$$

$$f = 28900 / 2460 = 11.75 \text{ kg/mm}^2$$

$$\lambda = 247.5 / 2.43 = 102 \quad K = 1.947$$

$$K \cdot f = 1.947 \times 11.95 = 22.9 \text{ kg/mm}^2 \quad 24$$

le profil convient

Ce calcul est donné à titre d'exposé; les autres profilés sont donnés par un calcul analogue : les résultats sont :

C1 - 80.80.8

C2 - 70.70.7 } (v. planche)

C3 - 60.60.7 }

*prendre l'unité*

- B - DIMENSIONNEMENT DES DIAGONALES.


Les diagonales sont dimensionnées d'après l'effort de compression qui est plus défavorable que l'effort de traction.

Elles sont considérées comme biarticulées, hypothèse qu'on devra s'efforcer de respecter au moment de la réalisation. Elles seront prévues en cornières simples.

Exemple de Calcul :

$$l_t = l = 2,60/0,83 = 314 \text{ cm.}$$

$$C_5 = \text{effort maxi} : F = 5,458 \times 3,6 = 19,65 \text{ tonnes.}$$

- Essayons  100 x 100 x 10

$$A = 1920 \text{ mm}^2$$

$$I = 3,04 \text{ cm.}$$

*attention:  
il faudra prendre l'axe  
et non  $i_x = i_y$ .*

$$\lambda = 314/3,04$$

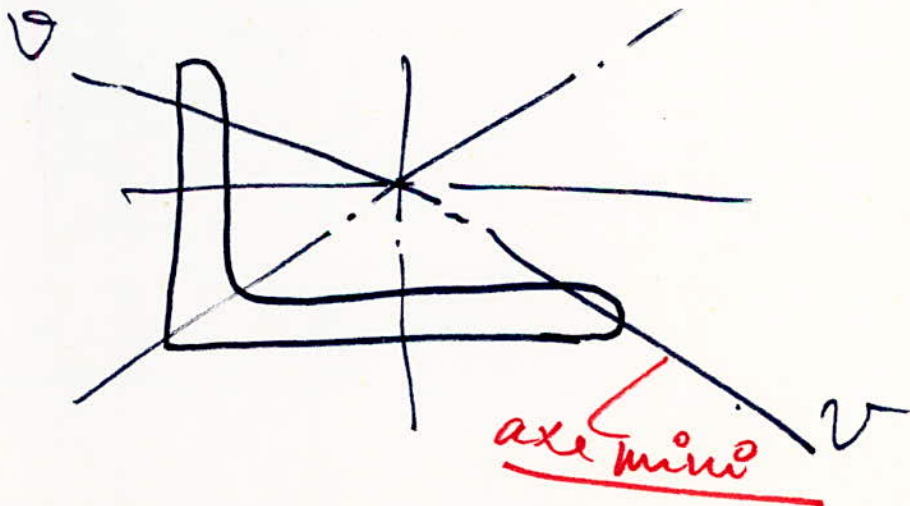
$$= 103,2$$



$$K = 1,981.$$

$$K \sigma = 10,33 \cdot 1,981 = 20,3 \text{ kg/mm}^2 < 24.$$

Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau intitulé "Diagonales".



## C - DIMENSIONNEMENT DES TIRANTS :

Le profil choisi pour constituer le réseau inférieur de barres dans la structure est le tube car il présente une symétrie axiale qui améliore la répartition des efforts tout en ayant un comportement favorable vis-à-vis de la torsion.

D'autre part nous avons opté pour les tubes sans soudures laminés à chaud qui présentent plusieurs avantages sur les tubes "gaz" notamment : légèreté, facilité, de préfabrication malgré leur diamètre plus important etc... Dans le calcul ils seront considérés comme biarticulés.

### Exemple de calcul :

#### 1°/ Tirants en Compression :

$$C I = F = 18,984 \times 3,6 = 50,3 \text{ tonnes}$$

$$l_f = l = 2,475 \text{ m. } A_{\text{mini.}} = 50300 / 24 = 2100 \text{ mm}^2.$$

- Essayons le tube I68,3/4,50.

$$A = 23/6 \text{ mm}^2 \quad i = 5,793 \text{ cm.}$$

$$= 247,5 / 5,793 = 42,8 \quad K = 1,079.$$

$$K = 1,079 \cdot 50300 / 2316 = 23,5 \text{ kg/mm}^2 \quad 24$$

#### 2°/ Tirant en Traction :

$$= 13,443 \cdot 3,6 = 49,5 \text{ tonnes.}$$

$$I59/4,50 \quad A = 2184 \text{ mm}^2.$$

$$49,5 \text{ t} \quad 2184 \cdot 24 = 52,5 \text{ tonnes} \quad \text{convient.}$$

-----

REMARQUE : Tous les tubes calculés ont été remanié afin de réduire leur nombre important ; les choix des primitifs sont consignés dans la planche ci-jointe. Ceci est fait dans le sens de la sécurité.

*//* A L C U L

DES POTEAUX & MASSIFS DE FONDATIONS

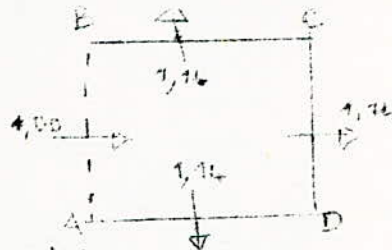
- oOo - C A L C U L D E S P O T E A U X - oOo -

Les poteaux en tubes assureront la stabilité du bâtiment dans les sens longitudinal et transversal .

Chaque poteau est sollicité par:

- Une force verticale due aux réactions de la structure.
- Une force horizontale parallèle au plan contenant ce poteau.
- Un moment de flexion dû au vent normal au plan contenant ce poteau.
- A son poids propre et celui du bardage (qui a été négligé dans les calculs) .

La combinaison la plus défavorable est obtenue quand la construction est ouverte avec le côté ouvert au vent .



les surfaces des parois AB et CD sont :

$$S_{AB} = S_{CD} = 59.5 \times ( 15 + 2.60 + 0.30 ) = 1065 \text{ m}^2$$

On suppose que la paroi AB est ouverte juste à la limite réglementaire (35%) et que toute l'ouverture est sur un seul côté pour reporter tout l'effort sur une seule file de poteaux .

$$H = 82.6 \times \left( \frac{1.14}{2} + 1.00 \times 0.65 \right) \times 1065 = 114000. \text{ Kg}$$

$$H = 114 \text{ tonnes}$$

Pondération CM 66:

$$H = 114 \times 1.75 = 200 \text{ tonnes}$$

Et la part revenant à un poteau:

$$H_0 = \frac{H}{16} = \frac{200}{16} = 12.5 \text{ tonnes}$$

Le poteau étant articulé en pied et en tête, le moment de flexion est :

$$M_f = ( 1.75 \times 82.6 \times 1.14 \times 3.50 ) \times \frac{15}{8} = 16200 \text{ Kg m}$$

Tous les poteaux courants seront identiques au poteau le plus chargé . Le poteau le plus chargé est 6-7 car chargé par 7.279p en compression ( flambement ) alors que le poteau 1-2 est chargé par 8.560 P mais en traction.

L'effort de compression dans le poteau est :

$$N = 12.50 \cos \alpha + 7.279 \sin \alpha = 28.34 \text{ tonnes.}$$

D'où les efforts sollicitant le poteau :

$$N = 28.34 + C_p = 28.34 + 4.58 = 32.92 = 33 \text{ tonnes.}$$

$$M = 16.2 \text{ tonnesmètre}$$

### DIMENTIONNEMENT DU POTEAU

Tube 273.0 / 25.00

$$A = 194.78 \text{ cm}^2$$

$$w = 1108 \text{ cm}^3$$

$$i = 8.812 \text{ cm}$$

$$\lambda = 1542 / 8.812 = 175$$

$$\sigma_k = 6.77 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_f = 16200 / 1108 = 14.6 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_n = 33000 / 19478 = 1.7 \text{ kg/mm}^2$$

$$K_f = 1.49$$

$$\mu = 6.77 / 1.7 = 3.98$$

$$K_I = 1.485$$

$$\sum \sigma = K_f \sigma_f + K_I \sigma_n = 24.27 \text{ kg/mm}^2$$

En tenant compte de l'adaptation plastique on majore  $w$  de 6% on obtient :

$$\sum \sigma = K_f \sigma_f / 1.06 + K_I \sigma_n = 23.02 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_e = 24 \text{ kg/mm}^2$$



## - CALCUL DES MASSIFS DE FONDATIONS

Du fait de l'articulation aucun moment n'est transmis aux fondations. Au niveau de chaque articulation le massif est soumis à l'effort vertical et deux (2) efforts horizontaux perpendiculaires. La réduction de ces efforts au centre de gravité du massif amène deux (2) moments supplémentaires dont l'un sera négligé dans les calculs (cf. effort TI). CES EFFORTS ne doivent pas entraîner une contrainte excessive dans le sol. On doit rester dans les domaines :

- Elastique en sollicitations totales pondérées du 1<sup>er</sup> genre .
- Plastique en sollicitations totales pondérées du 2<sup>ème</sup> genre .

Conformément aux règles C.C.BA 68 Art. 7.

Les charges non pondérées sollicitant la structure sont :

$$\begin{aligned} G &= 70 \text{ kg / m}^2 \\ N_n &= 35.7 \text{ kg / m}^2 \\ V_n &= 82.6 \text{ kg / m}^2 \\ P &= 0 \\ N_e &= 61.2 \text{ kg / m}^2 \\ V_e &= 143.8 \text{ kg / m}^2 \end{aligned}$$

### Sollicitations du 1<sup>er</sup> genre :

$$G + P + V + T$$

$$G + 1.2 P + V + T$$

$$q \text{ max} = G + V = 70 + 35.7 = 105.7 \text{ kg / m}^2$$

D'où la charge revenant à un nœud :

$$P = q \cdot s = 24.50 \times 105.7 = 2.59 \text{ Tonnes}$$

Les efforts horizontaux ne seront pas affectés par la pondération car ce sont les surcharges climatiques normales .

$$H = 114 / 16 = 7.12 \text{ t revenant à une palée}$$

$$T_2 = 82.6 \times 1.14 \times 3.50 \times 15 = 4950 \text{ kg}$$

### Sollicitation du 2<sup>nd</sup> genre :

$$G + 1.5 P + 1.5 V + T$$

$$G + P + w W + T \quad w = 1.1 \text{ car } P = 0$$

$$G + S1 + T$$

$$q \text{ max} = G + w V = 70 + 1.1 \times 61.2 = 137.3 \text{ kg / m}^2$$

D'où la charge revenant à un nœud :

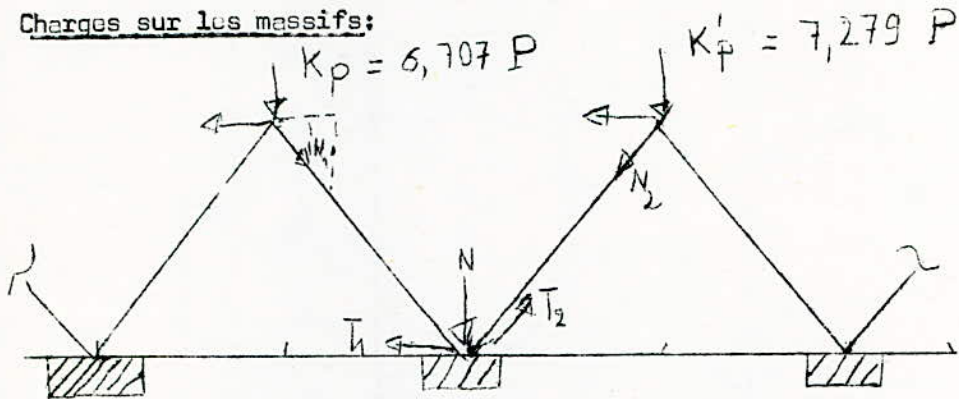
$$P = q s = 24.50 \times 137.3 = 3.365 \text{ t}$$

Les efforts horizontaux revenant à une palée sont:

$$H = 200 \times I.I / 16 = 220 / 16 = 13.75 \text{ tonnes}$$

$$T_2 = 4.95 \times 1.75 \times I.I = 9.52 \text{ tonnes}$$

Charges sur les massifs:



$N_I$  et  $N_2$  étant les efforts dans les poteaux comprimés nous avons :

$$N_I = -H \cos \alpha + K P \sin \alpha$$

$$N_2 = H \cos \alpha + K' P \sin \alpha$$

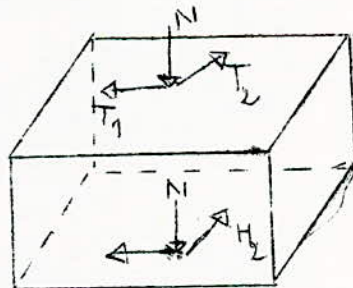
$$N = (N_I + N_2) \sin \alpha = (K + K') P \sin^2 \alpha$$

$$T_I = (N_2 - N_I) \cos \alpha = 2 H \cos^2 \alpha + (K' - K) P \sin \alpha \cos \alpha$$

$$K + K' = 6.707 + 7.279 = 13.986$$

$$K' - K = 7.279 - 6.707 = 0.572$$

Finalement nous obtenons :



1<sup>er</sup> Genre :

$$P = 2.59 \text{ t}$$

$$H = 7.12 \text{ t}$$

$$N = 34.2 \text{ t} + C_p (\text{ poteaux } ) = 34.2 + 4.7 = 38.9 = 39 \text{ tonnes.}$$

$$T_I = 1.066 \text{ t}$$

$$T_2 = 4.95 \text{ t}$$

2<sup>nd</sup> Genre:

$$P = 3,365 \text{ t}$$

$$H = 13,75 \text{ t}$$

$$N = 44,5 \text{ t} + C_p (\text{poteaux}) = 44,5 + 4,7 = 49,2 \text{ t}$$

$$T_1 = 1,05 \text{ t}$$

$$T_2 = 9,52 \text{ t}$$

Les efforts  $T_1$  étant inférieurs à  $0,36 \text{ N}$ , on peut admettre qu'ils seront repris par frottements.

Par ailleurs le massif doit pouvoir équilibrer les effets de soulèvement.

$$V_e + C_p = 157 - 70 = 87 \text{ Kg/m}^2$$

$$\text{soit } P = 87 \times 24,5 = 2130 \text{ Kg}$$

L'effort de soulèvement est:

$$N = (34,2/2,59) \cdot 2,13 - C_p (\text{poteaux}) = 23,35 \text{ t}$$

Donc le massif doit avoir un poids  $w \geq 23,35 \text{ t}$ , il serait souhaitable que  $w$  soit de l'ordre de  $1,3 \text{ N}$ , soit  $w = 1,3 \cdot 23,35 = 30,4 \text{ t}$ .

\* Choix du massif

1<sup>o</sup> Genre:

$$N = 39 + 30 = 69 \text{ t}$$

$$M = 4,95 \times 2 = 9,9 \text{ t.m}$$

$$\text{sol} = 69000/250.250 \pm 990000/250.250^2 = 1,105 \pm 0,063 = \begin{matrix} 1,17 \text{ b} \\ 1,04 \text{ b} \end{matrix} < 1,7 \text{ b}$$

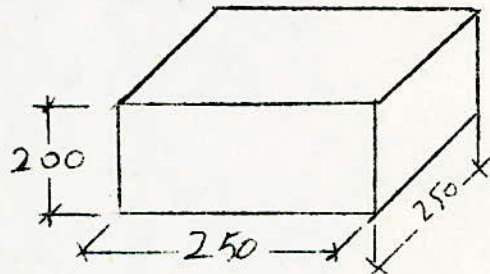
2<sup>o</sup> Genre:

$$N = 49,2 + 30 = 79,2 \text{ t}$$

$$M = 9,52 \times 2 = 19,04 \text{ t.m}$$

$$\text{sol} = 79200/250.250 \pm 1904000/250.250^2 = 1,27 \pm 0,122 = \begin{matrix} 1,39 \text{ b} \\ 1,15 \text{ b} \end{matrix}$$

On devra vérifier que ces deux contraintes restent inférieures à la contrainte plastique du sol qui est inconnue.



0000 DETAILS 0000

---

- Pyramide 1.
- Titrant T3
- Articulation des poteaux

## 000 DETAIL D'UNE PYRAMIDE DU TYPE P1

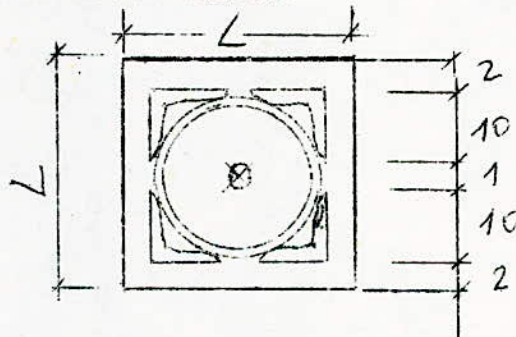
Les pyramides ont toutes la même constitution et ne diffèrent que par la section de leurs barres; les diagonales sont tordues à chaud à leur bout et soudées. (voir détail pyramide P5)

### \* Choix du nœud

Parmi les nombreuses solutions qui se présentent, nous avons retenu la suivante: le nœud sera constitué d'une plaque carrée de dimension 250x250/25 percée en son centre pour recevoir, le boulon de liaison avec les tirants; cette plaque est surmontée d'un cylindre sur lequel viendront se greffer les diagonales.

### \* Détermination de la plaque de la pyramide

Les diagonales sont des cornières de 100x100x10; leur projection sur la plaque est donnée par le schéma suivant:



d'où la largeur de la plaque :  $L = 2 + 10 + 1 + 10 + 2 = 25$  cm

Les marges de 1 et 2 cm sont réservées à la soudure.

### \* Calcul du boulon d'assemblage avec les tirants

L'effort maximum pondéré de cisaillement est de:

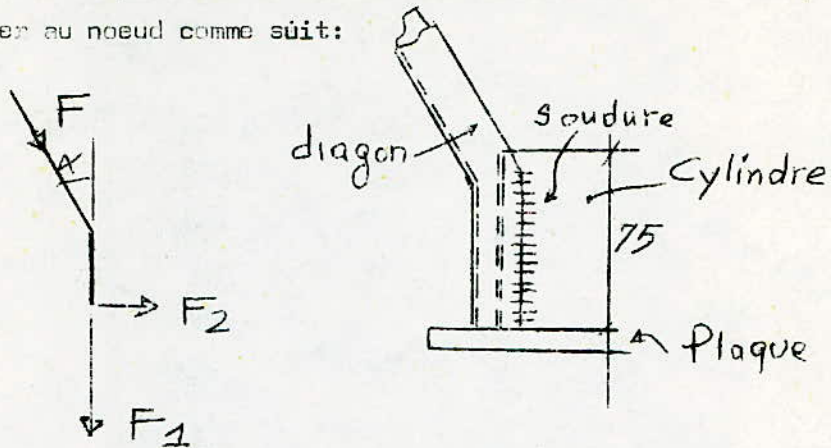
$$F = (1,393 + 0,606)P = 2,079 \times 3,6 = 7,5 \text{ t}$$

d'où  $A_r = 1,54 \times 750^2 / 24 = 450 \text{ mm}^2$  soit un boulon  $\varnothing = 24$  mm

Nous emploierons ce diamètre pour toutes les pyramides.

\* Calcul du cordon de soudure fixant les diagonales au noeud

L'effort de compression ou de traction existant dans une diagonale vient se décomposer au noeud comme suit:



$F_2$ : composante horizontale reprise par le cylindre

$F_1$ : composante verticale reprise par les deux cordons de soudure

$$F_{\text{maxi}} = 5,458.P = 5,458 \times 3,6 = 16,1 \text{ t}$$

$$F_1 = F \cdot \cos\theta = 16,10 \times 0,63 = 13,6 \text{ t}$$

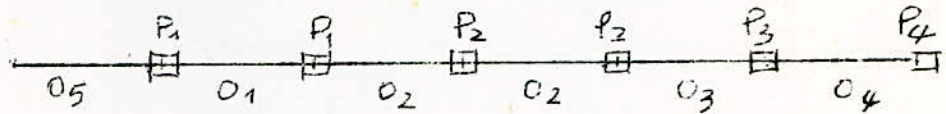
$$\text{longueur de soudure} = 2 \times 75 = 150 \text{ mm}$$

Les abaques en annexe CM66 donnent une épaisseur:  $a = 6 \text{ mm}$

Nous utiliserons cette épaisseur seulement pour les pyramides (1) et (2) qui résistent à de grands efforts.

Pour les autres pyramides, nous réduisons cette épaisseur à 4 mm.

Ce tirant comporte 6 tubes et 6 plaques qui assurent la liaison avec les pyramides :



$O_5, O_1$  : tube  $\varnothing 139,7/4,5$  Section :  $A= 1911 \text{ mm}^2$

$O_2$  : "  $\varnothing 133 /4$  " :  $A=1621 \text{ mm}^2$

$O_3$  : "  $\varnothing 114 /3,6$  " :  $A= 1252 \text{ mm}^2$

$O_4$  : "  $\varnothing 60,3/2,9$  " :  $A= 523 \text{ mm}^2$

$P_1, P_2, P_3, P_4$  Plaques à dimensionner.

\* Largeur d'une plaque :

La largeur d'une plaque sera égale au diamètre du plus grand des deux tubes qu'elle assemble, augmentée de 2cm de chaque côté afin de servir de support à la soudure. On obtient ainsi les largeurs suivantes pour les plaques :

$P_1$  :  $L=180 \text{ mm}$

$P_2$  :  $L=170 \text{ mm}$

$P_3$  ;  $L=160 \text{ mm}$

$P_4$  :  $L=100 \text{ mm}$

\* Longueur d'une plaque :

La longueur d'une plaque est obtenue après avoir déterminé :

- la plaque de la pyramide
- la longueur de soudure nécessaire à fixer la plaque au tube
- le jeu à laisser entre le tube et la plaque de la pyramide

\* Calcul de la longueur du cordon de soudure

Epaisseur de soudure :  $a=0,4 \rightarrow \alpha=1$  ; Nous emploierons 4 cordons ;

La plus grande section du tube est égale à :  $1911 \text{ cm}^2$

La contrainte de cisaillement caractéristique est  $24/1,54 = 15,6 \text{ kg/mm}^2$

L'équilibre des forces s'écrit :  $4 \times 0,4 \times L \times 15,6 = 1911 \times 24$

$L = 1911 \times 24 / 4 \times 0,4 \times 15,6 = 184$  mm; nous prendrons une longueur de 20 cm que nous généraliserons pour toutes les plaques .

Longueur d'une plaque:  $L = 25 + 2 \times 20 + 5 = 70$  cm

\* Epaisseur d'une plaque .

$e(180-24) = 1911$  d'où  $e = 1911 / 156 = 12,3$  mm ; nous adopterons  $e = 20$  mm

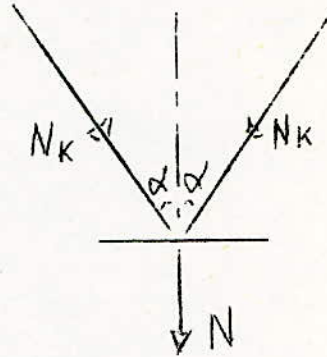


oOo ARTICULATION DES POTEAUX oOo

Nous nous placerons dans le sens de la sécurité en dimensionnant les éléments de l'articulation avec la charge critique des poteaux:

$$N_k = k \cdot A = 677 \times 194,79 = 132056 \text{ Kg}$$

a)- Calcul du boulon



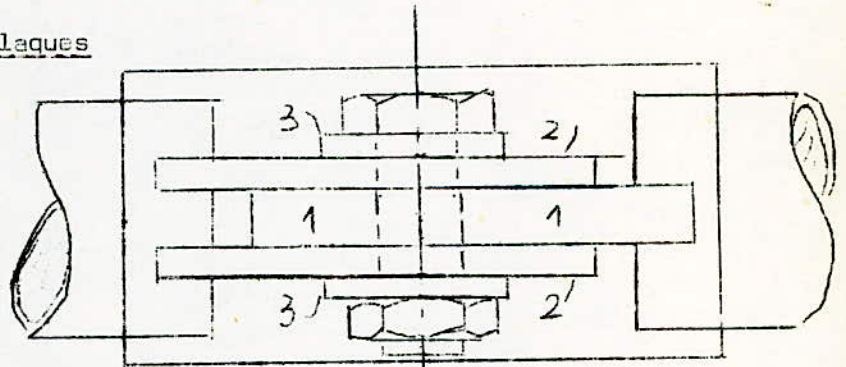
$$N = 2 \cdot N_k \cdot \sin \alpha = 250 \text{ t}$$

$$A = N / \sigma = 250000 / 1550 = 165,5 \text{ cm}^2$$

$$\text{soit } \varnothing = 14,53 \text{ cm}$$

Nous adopterons  $\varnothing = 150 \text{ mm}$

b)- Calcul des plaques



$$\text{Largeur: } l = \varnothing_t + 2 \times 30,5 = 273 + 67 = 340 \text{ mm}$$

$$\text{Épaisseur: } e = F / \sigma_e \cdot l = 133000 / 24 \cdot 340 = 16,3 \text{ mm}$$

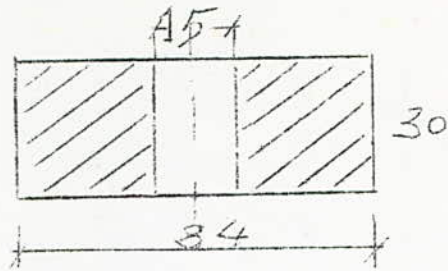
Nous adopterons les épaisseurs suivantes pour les plaques:

- plaque (1):  $e = 30 \text{ mm}$

- plaque (2):  $e = 15 \text{ mm}$

- plaque (3):  $e = 40 \text{ mm}$

\* Vérification de la plaque (1) dans la section du boulon



$$\text{Section nette} = \text{section totale} - e\phi = 34 \times 3 - 15 \times 3 = 57 \text{ cm}^2$$

$$57 \text{ cm}^2 \quad F/e = 133000/2400 = 55,4 \text{ cm}^2$$

c)- Calcul des soudures

Les poteaux sont liés aux plaques par 4 cordons de soudure d'épaisseur:

$$a = 6 \text{ mm} \quad (a = 5,6 \text{ mm})$$

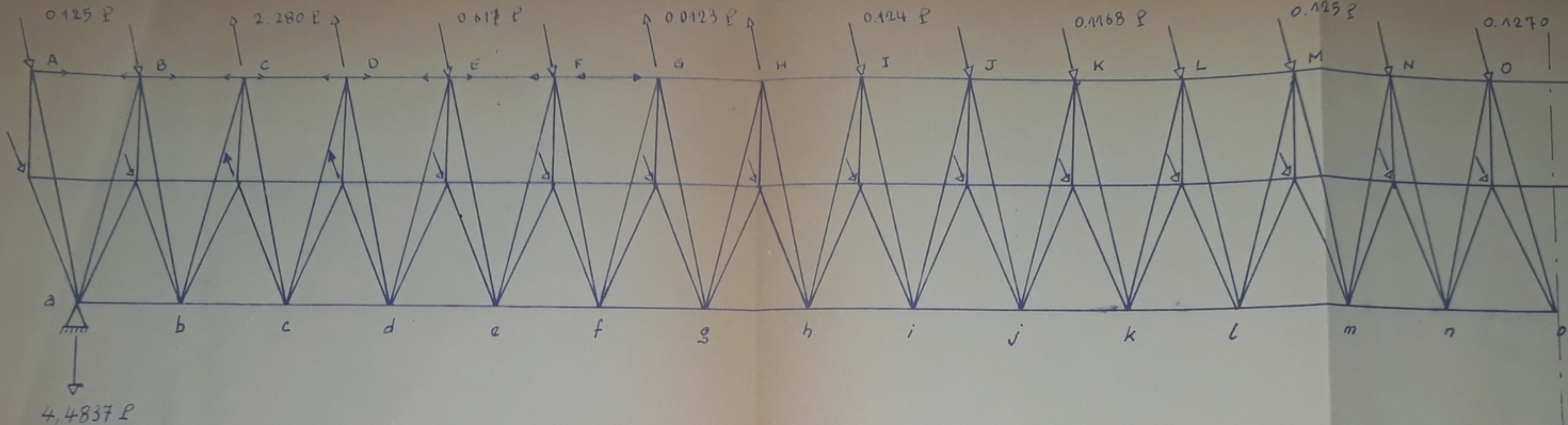
$$(F/4)/0,75 \cdot l \cdot a \quad e$$

$$\text{soit: } l \quad (F/4)/0,75 \cdot a \cdot e = 133000/0,75 \cdot 5,6 \cdot 24 \cdot 4 = 330 \text{ mm}$$

On prendra:  $l = 35 \text{ cm}$ .

LISTE DES PLANS :

- I : STRUCTURE
- 2 : MONTAGE STRUCTURE
- 3 : DETAIL TIRANT T3
- 4 : DETAIL PYRAMIDE P5
- 5 : FONDATIONS
- 6 : POTEAUX ET DETAILS



Poutre - 2 -

