

UNIVERSITE D'ALGER

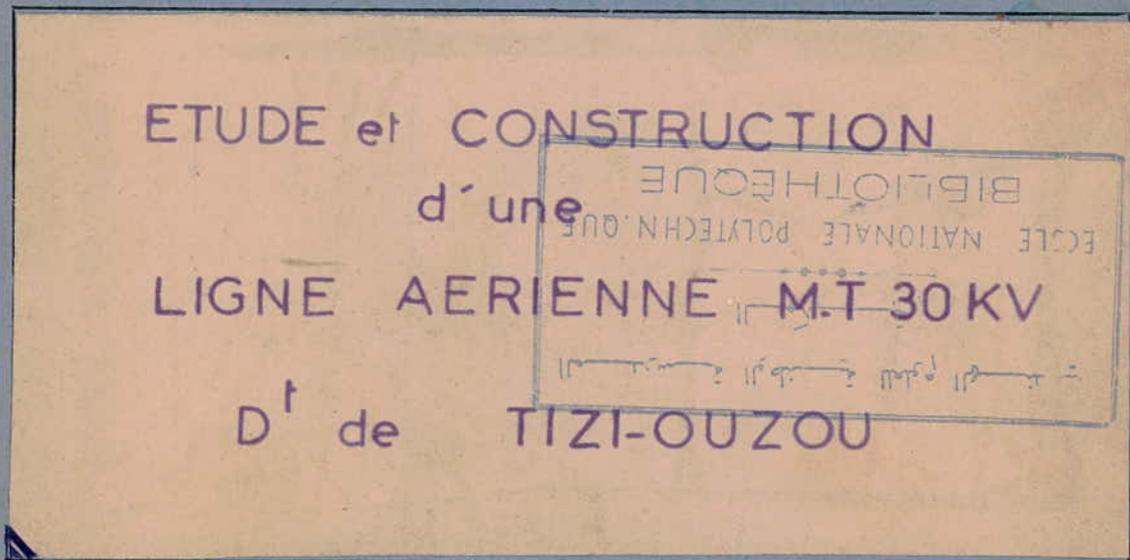
3/68

nea

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ETUDES



Dirigé par M. N. WADJIH

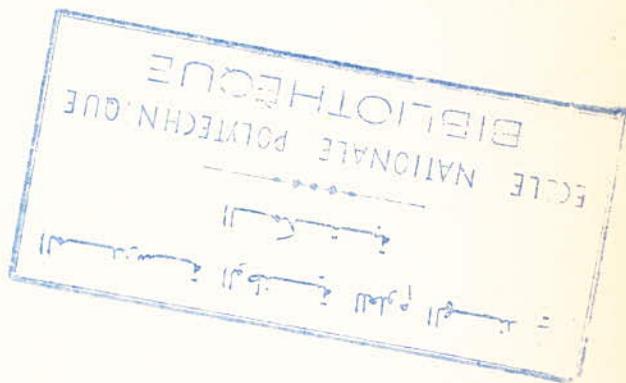
Etudré par A. BENDAOU

JUIN 1968

Je remercie , monsieur Wadjih , chef du
departement Electrotechnique, professeur Expert UNESCO,
d'avoir suivi avec attention cette etude .

Je remercie aussi tous les professeurs et assistants
qui ont contribué à ma formation ainsi qu'aux ingenieurs de
l'EGA pour leur collaboration.

Mes remerciements vont egalement au personnel du
laboratoire Electrotechnique.



SUJET :

Ce sujet a été proposé par les services de l'EGA.
Construction d'une ligne de transport d'énergie Moyenne ten.
BAGHLIA TAKDEMPDT dans l'arrondissement de DELLIS,
département de TIZI - OUZOU

Caractéristiques :

- Hypothèse Hiver -5° C vent 18 cpz
- " " Tempête $+ 20^{\circ}$ C vent 48 cpz
- " " été $+ 45^{\circ}$ C vent nul

Tension maximum $9,9 \text{ kg mm}^2$

I N T R O D U C T I O N

-:-:-:-

1) Le projet de la ligne aérienne que nous allons étudier comporte divers problèmes.

Etant donnée la puissance à transmettre ainsi que la distance en doit déterminer les conditions qui seront nécessaires, et c'est là le problème fondamental puisque les conducteurs interviennent non seulement pour ce qui est du bon fonctionnement de ligne, mais aussi sous le rapport de frais d'établissement qu'elle entrainera.

D'abord en considérant le problème sous son angle purement électrique. Il s'agira de déterminer, connaissant la chute de tension, la section du conducteur et aussi les puissances et la tension à l'arrivée.

Pour cela nous assimilerons la ligne à un quadripole en π , où la capacité entre conducteurs, qui est répartie uniformément le long de la ligne est remplacée par deux capacités égales chacune à la moitié de la capacité totale, placées l'une à l'origine, l'autre à l'extrémité de la ligne réelle. Ayant trouvé dans ce cas les inconnues du problème, nous les comparerons avec les résultats obtenus en négligeant l'effet capacitif. Pour cela notre ligne sera assimilée à un dipole constitué par 1 conducteur et le neutre.

2) Ensuite nous étudierons le tracé sur le terrain et nous ferons le piquetage en tenant compte des particularités topographiques.

Nous établirons un plan parcellaire où sont groupés les différents renseignements à savoir les routes les forêts les rivières etc. Ensuite nous tracerons le profil en long qui doit figurer sur la même feuille que le plan parcellaire. Ce profil en long définit la configuration du terrain existant sous l'emprise de la ligne. Sur ce plan doivent être indiqués la longueur des alignements et des renseignements tels que l'altitude du terrain, la distance entre supports, la distance partielle entre les points de relevé etc...

3) Nous ferons l'étude en considérant les problèmes mécaniques qui conditionnent la pose de la ligne. Par les équations de changement d'état, nous établiront des abaques de surcharge relatives aux hypothèses administratives et des abaques de tensions de pose et de flèches pour les différentes températures.

- Avec le paramètre de la chaînette à 45°C sans vent, nous détermineront les tensions mécaniques initiales. A partir de cet état initial nous déterminerons les abaques de surcharge.

- Ensuite nous déterminerons une tension de pose qui ne devra pas dépasser la tension maximum à laquelle on obtient la rupture du conducteur et ceci pour des circonstances devenant aussi défavorables que possible.

- Nous calculerons les flèches maximum à 45°C sans vent pour les différentes portées. A partir de la flèche maximum relative à la plus grande portée nous déterminerons la distance entre les conducteurs. Cette distance doit prévoir l'influence des surcharges brusques et des balancements qui pourraient les amener en contact. Du point de vue électrique cet écartement doit être suffisant pour que les pertes par effluve n'occasionnent pas l'amorçage d'arc entre conducteurs et le support.

- Ensuite nous déterminerons les efforts transmis aux supports par les conducteurs. Ces efforts proviennent du poids propre des conducteurs, de leur tension initiale et des efforts du vent. Pour ce qui est du vent nous supposerons qu'il agit normalement et simultanément sur chacune des deux portées.

Connaissant les flèches maximum et les particularités topographiques du terrain, nous évaluerons les hauteurs des supports à considérer.

4) Enfin nous choisirons les matériaux convenables pour la réalisation de notre ligne. Il faudrait ensuite déterminer la substance et fixer le choix sur les isolateurs. Le nombre d'isolateurs sera déterminé par la tension de service. Les éléments de la chaîne ne supportent pas tous la même tension. Ceci nous amènera à calculer la tension supportée par chaque isolateur. Nous déterminerons ensuite l'angle que prend la chaîne sous l'effet du vent et dans le cas d'un angle assez grand nous calculerons le contrepoids nécessaire à installer pour se trouver dans les mêmes conditions que pour les portées de niveau.

Ceci nous amènera à prévoir le type d'armement à utiliser.

Dans un dernier chapitre nous ferons le calcul pour un support d'alignement. Ce support sera choisi d'après l'effort en tête. En principe pour les lignes à moyenne tension ce support devra être en béton armé. S'il en est ainsi nous devons déterminer la section des armatures qui devra résister aux efforts de traction, le béton lui ne résiste bien qu'aux efforts de compression.

Ayant établi le support, et déterminé sa hauteur, nous calculerons les fondations relatives à ces supports. Les supports sont implantés dans le sol et doivent être maintenus dans la position d'équilibre pour des efforts qui sont susceptibles de leurs être appliqués. Pour cela nous devons faire apparaître un coefficient de stabilité qui est défini comme le rapport du moment de stabilité au moment de renversement.

//- R E S U L T A T S -//

I) ELECTRIQUES :

$R = 0,3 \Omega/\text{km}$	$P_a = 1,9814 \text{ MW}$
$\Delta U = 1,2 \%_2$	$Q_a = 1,4752 \text{ MVAR}$
$S = 94 \text{ mm}^2$	$\eta = 0,99$
$I = 48 \text{ A}$	$P_m = 17,3 \text{ MW}$
$C = 0,0091 \mu \text{ F}/\text{km}$	$\cos \varphi_a = 0,78$
$Z_c = 374$	
$\gamma = 0,76 \cdot 10^{-3}$	

II) MECANIQUES :

$a = 1300$
 $P_c = 245 \text{ m}$
 $P_m = 248 \text{ m}$
 $f_m = 9,8 \text{ m}$
 $d = 2,45 \text{ m}$

1) Isolateurs

$U_c = 178 \text{ KVe}ff$
 $U_{ei} = 450 \text{ KVe}ff$
 $V_1 = 69,5 \text{ KVe}ff$
 $V_2 = 57 \text{ "}$

$V_3 = 49,5 \text{ " "}$

$\eta = 89 \%$
Inclinaison de la chaîne

$\varphi = 62^\circ \text{ à } 77^\circ$

Contrepoids : 20 à 42 kg

2) Support en B.A

$Mf_1 = 486,9 \text{ kg}$

$Mf_2 = 1535 \text{ m kg}$

$Mf_3 = 1980 \text{ m kg}$

Armatures ²

$A'_1 = 210 \text{ mm}^2$

$A'_2 = 500 \text{ mm}^2$

$A'_3 = 300 \text{ mm}^2$

3) Fondations

$M_r = 4920 \text{ m kg}$

$a = 1,7 \text{ m}$

Poids support : 530 Kg

$M_s = 5690 \text{ m Kg}$

Poids massif : 7 150 kg

$\gamma_c = 1,15$

I) CALCUL ELECTRIQUE

Données :

$$P \text{ départ} = 2 \text{ MW}$$

$$V \text{ départ} = 30 \text{ KV}$$

$$\cos \varphi \text{ départ} = 0,8$$

$$L = 0,4 \Omega/\text{km}$$

longueur de la ligne $l = 9 \text{ km}$

La puissance au départ, la tension au départ et la longueur de la ligne étant données, il s'agira de déterminer la section du conducteur.

De nombreuses considérations doivent être mises à la base du choix de la section des lignes de transport et de distribution d'énergie.

Le choix de la ligne aérienne est d'habitude imposé par des considérations économiques ou par des circonstances locales. Les inconnues du problème sont : la section à adopter, le courant de ligne ainsi que les puissances et la tension à l'arrivée.

Nous allons tout d'abord faire le calcul dans le cas général en considérant l'effet dû à la capacité. Ensuite nous ferons le calcul en négligeant la capacité. Pour cela nous assimilerons la ligne à 1 dipôle constitué par 1 phase et le neutre.

Détermination de la section du conducteur :

La section d'une ligne doit être suffisante pour que l'intensité normale n'y provoque pas d'échauffement considérable.

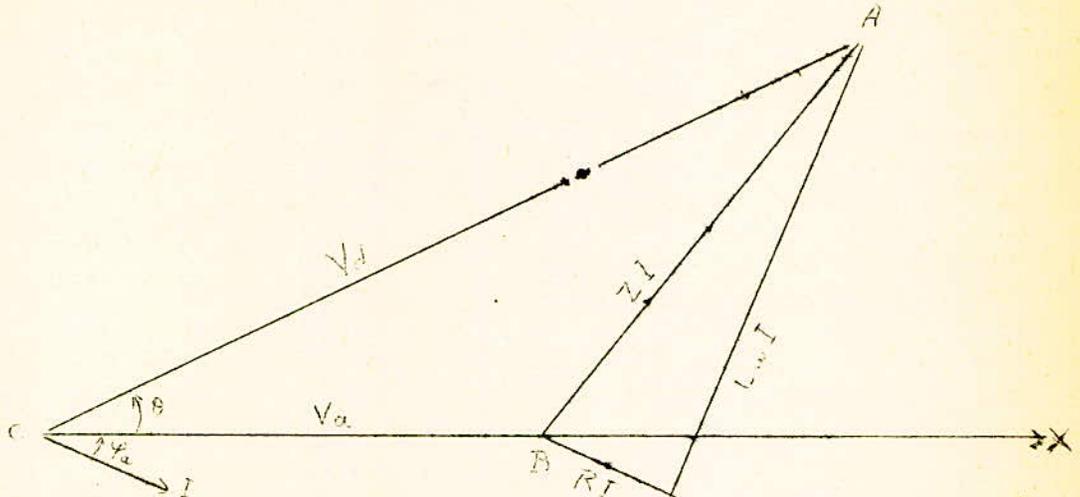
a) Calcul du courant:

$$P = U I \sqrt{3} \cos \varphi \quad I = \frac{P}{U \sqrt{3} \cos \varphi}$$
$$I = \frac{2 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3 \sqrt{3} \cdot 0,8} = 48 \text{ A}$$

Il faudrait aussi veiller à ce que le transfert de l'énergie ne s'accompagne pas d'une chute de tension trop importante.

b) Chute de tension

Assimilons la ligne à un dipôle constitué par un conducteur et le Neutre. Traçons le diagramme du dipôle.



Projetons V_d , V_a , RI et $L\omega I$ sur l'axe des x .
Nous obtenons l'équation :

$$V_d \cos \theta = V_a + RI \cos \varphi_\alpha + XI \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_\alpha \right)$$

$$\text{Or } \varphi_\alpha = \varphi_d - \theta \text{ et } \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_\alpha \right) = \sin \varphi_\alpha$$

$$V_d \cos \theta = V_a + RI \cos (\varphi_d - \theta) + XI \sin (\varphi_d + \theta) \quad (1)$$

En construisant le diagramme dans les grandeurs normales ou à l'échelle, nous voyons que le triangle caractéristique est très petit et l'on peut supposer que V_d et V_a sont parallèles. On peut considérer très faible et $\cos = 1$.

L'équation 1 devient :

$$V_d - V_a = RI \cos \varphi_d + XI \sin \varphi_d$$

$$\text{La chute de tension est } \frac{V_d - V_a}{V_d} = \frac{\Delta U}{U}$$

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{RI \cos \varphi_d + XI \sin \varphi_d}{V_d} \quad \text{Or } V_d = \frac{U_d}{\sqrt{3}}$$

$$\Delta U = \frac{(RI \cos \varphi_d + XI \sin \varphi_d) \sqrt{3}}{U_d}$$

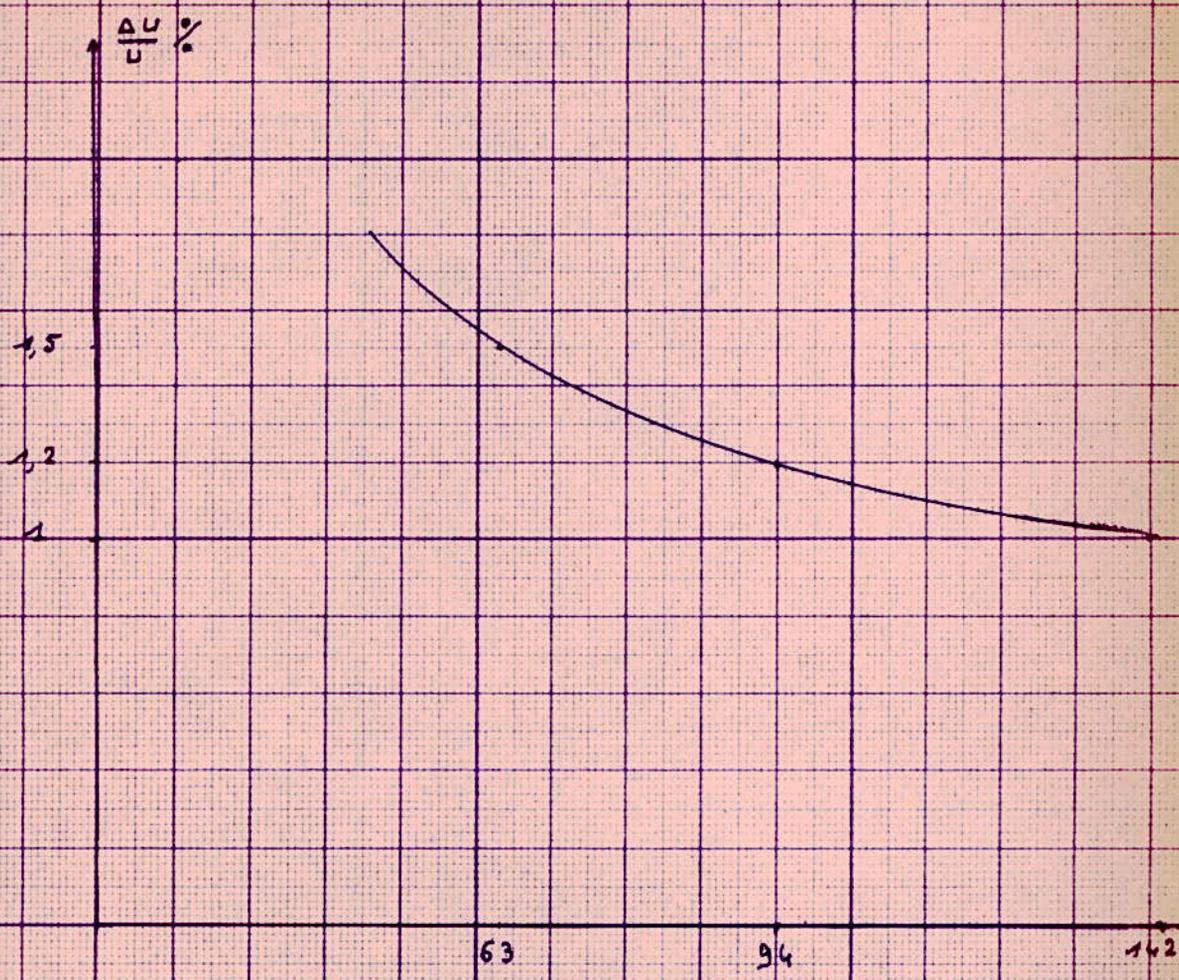
Tirons la valeur de R

$$R = \frac{U \cdot \frac{\Delta U}{U} - XI \sin \varphi_d \sqrt{3}}{I \cdot \sqrt{3} \cos \varphi_d}$$

Pour déterminer la résistance il faut se fixer la chute de tension.

$$\frac{\Delta U}{U} = 1 \%$$

$$R = \frac{30\,000 \times \frac{1}{100} - 0,4 \times 9 \times 48 \times 0,6 \times \sqrt{3}}{48 \times 9 \times \sqrt{3} \times 0,8}$$



Chute de tension en fonction de la section du conducteur.

$$R = 0,2 \Omega / \text{km}$$

$$S = \rho \frac{l}{R} \quad \text{avec } \rho = 5,15 \mu \Omega \text{cm}$$

$$S = 142 \text{ mm}^2$$

Pour 1 % la section est trop grande.

$$\frac{\Delta U}{U} = 1,5 \%$$

$$R = \frac{30\,000 \times 0,015 \cdot 0,4 \times 9 \times 48 \times 0,6 \times 3}{48 \times 9 \times 3 \times 0,8} = 0,45 \Omega / \text{km}$$

$$S = 63 \text{ mm}^2$$

Pour 1,5 % la section est faible

$$\frac{\Delta U}{U} = 1,2 \%$$

On trouve $R = 0,3 \Omega / \text{km}$ d'où $S = 94 \text{ mm}^2$

Nous allons adopter la section de $93,3 \text{ mm}^2$ conformément à celle prise par l'E.G.A.

$\frac{\Delta U}{U} \%$	$S \text{ mm}^2$
1	142
1,2	94
1,5	63

Caractéristique en charge $U_a = f(I)$

Connaissant V_d , I et R , nous allons déterminer la tension à l'arrivée. Le diagramme du dipôle nous donne la relation

$$U_d - U_a = I(R \cos \varphi_j + X \sin \varphi_j) \cdot \sqrt{3}$$

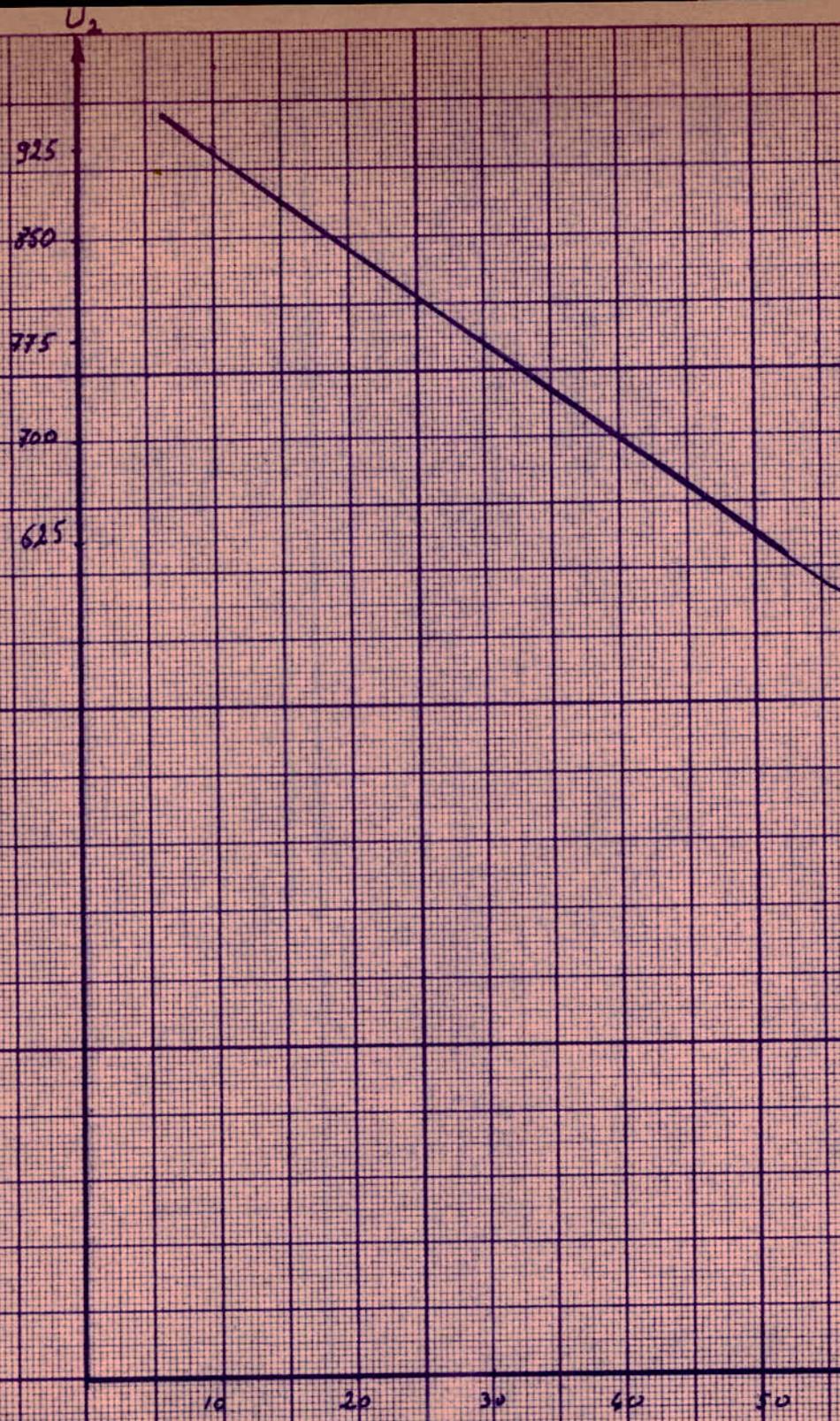
$$R \cos \varphi_j = 0,3 \times 0,8 = 0,24 \Omega$$

$$X \sin \varphi_j = 0,4 \times 0,6 = 0,24 \Omega$$

$$U_a = U_d - I(0,24 + 0,24) \times 9 \times \sqrt{3}$$

$$U_a = U_d - 7,5I$$

$$U_d = 30\,000 \text{ volts}$$



Tension à l'arrivé en fonction du Courant.

Pour les différentes valeurs de l'intensité, nous obtenons le tableau suivant :

I	A	Va	KV
10		29,925	
20		29,850	
30		29,775	
40		29,700	
48		29,640	
50		29,625	

La courbe obtenue est une droite. Nous remarquons que la tension à l'arrivée décroît lorsque le courant dans la 1^{re} augmente.

EFFETS DUS A LA CAPACITE

Une ligne aérienne constituée par des conducteurs séparés les uns des autres par un isolant (dans notre cas c'est l'air) est équivalente à un condensateur.

Capacité produite par deux conducteurs :

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{D}{r}}$$

D étant la distance entre conducteurs (calculée plus loin)

$$D = 2,45 \text{ m}$$

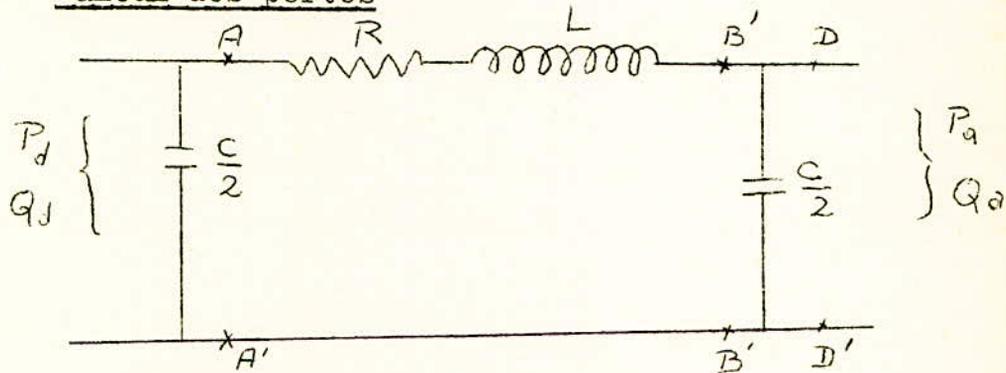
r est le rayon du conducteur $r = 5,4 \text{ mm}$

$$C = \frac{0,0242}{\log \frac{2,450}{5,4}} = \frac{0,0242}{2,66}$$

$$C = 0,0091 \mu\text{F/km}$$

Assimilons notre ligne à un quadripole en π et calculons les pertes par la méthode de la séparation des puissances.

Calcul des pertes



$$P_d = 2 \text{ 000 KW}$$

$$Q_d = P_t \tan \varphi = 1,5 \text{ MVAR} = 1500 \text{ KVAR}$$

Tension simple au départ

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{30 \text{ 000}}{\sqrt{3}} = 17,3 \text{ KV}$$

1) Puissance dissipée en AA'

La conductance étant négligée, il n'y a pas de pertes par effet Joules dans la branche verticale AA'. En ce qui concerne la capacité, elle peut soit fournir de l'énergie réactive en supposant qu'elle était primitivement chargée et qu'elle se déchargerait sur la branche AB, soit absorber la puissance réactive dans le cas où elle était primitivement déchargée.

Examinons le premier cas

Pe r tes dues à la capacité : ceux sont des pertes réactives

$$Q_r = \frac{C}{2} \omega U_1^2 = 9 \times 2,86 \cdot 10^{-6} \cdot 10^8 = 11,5 \text{ KVAR}$$

Il n'y a pas de pertes actives

donc en AA' les puissances sont :

$$P = 2 \text{ 000 KW}$$

$$Q = 1 \text{ 500} + 11,5 = 1511,5 \text{ KVAR}$$

Puissance apparente

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{4 \cdot 10^6 + 2,3 \cdot 10^6}$$

$$S = 2,5 \cdot 10^3 \text{ KVA}$$

Courant dans la branche AB.

$$S = 3 VI \quad \text{avec } V = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$I = \frac{2,5 \cdot 10^3}{30 \cdot \sqrt{3}} = 48,2 \text{ A}$$

2) Puissance dissipée en AB

-pertes joules due à la resistance

$$3 R I^2 l = 3 \times 0,3 \times (48,2)^2 \times 9 = 19 \text{ KW}$$

-pertes réactives dues à la réactance

$$3 L \omega I^2 l = 3 \times 0,4 \times (48,2)^2 \times 9 = 25 \text{ KVAR}$$

3) Puissance di ssipée en BB'

$$\left\{ \begin{array}{l} P_a = 2000 - 19 = 1981 \text{ KW} \\ Q_r = 1523 - 25 = 1498 \text{ KV AR} \end{array} \right.$$

puissance apparente :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$= \sqrt{3,93 \cdot 10^6 + 2,24 \cdot 10^6} = 2,48 \cdot 10^3 \text{ KVA}$$

Tension en ce point

$$\frac{2480}{3 \times 48,2} \cong 29,8 \text{ KV}$$

4) Puissance perdue dans la dernière dérivation :

$$\frac{C \omega U^2 l}{2} = 2,86 \cdot 10^{-6} \times (29,3)^2 \cdot 10^6 = 11 \text{ KVAR}$$

Puissances à l'arrivée :

$$3P = 1981 \text{ KW}$$

$$3Q = 1498 + 11 = 1509 \text{ KVAR}$$

$$\text{Tg } \varphi_a = \frac{1509}{1981} = 0,77 \quad \text{d'où } \cos \varphi_a = 0,78$$

Rendement de la transmission

$$\eta = \frac{1981}{2000} = 0,99$$

Calcul des constantes de la ligne :

1) Impédance caractéristique :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0,4}{2,86}} = \sqrt{0,14 \cdot 10^6} = 374 \Omega$$

2) Constante de propagation

$$\gamma = \sqrt{ZY} \quad \begin{cases} Z = R + jL\omega \\ Y = g + jC\omega \end{cases}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(g + jC\omega)}$$

en module, nous aurons :

$$\gamma^2 = \sqrt{(R^2 + L^2 \omega^2)(g^2 + C^2 \omega^2)} = LC\omega^2 \sqrt{1 + \frac{R^2}{L^2 \omega^2}}$$

$$\gamma^2 = 0,51 \cdot 10^{-6} \sqrt{1 + \frac{0,04}{0,16}} = 0,51 \cdot 10^{-6} \times 1,2$$

$$\gamma^2 = 0,57$$

$$\gamma = 0,76 \cdot 10^{-3}$$

3) Calcul de la constante d'atténuation

$$\alpha = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{r}{2Z_c} = \frac{0,3}{2 \times 374} = 4 \cdot 10^{-4}$$

4) CONSTANTE DE DEPHASAGE

$$\beta = \sqrt{LC\omega^2} = \sqrt{0,51 \cdot 10^6} = 7,14 \cdot 10^{-4}$$

Détermination des Puissances sans Effet de Capacité

1) Puissance active :

$P_a = P_d - p$ $p =$ pertes par effet Joules dans les conducteurs.

$$p = 3RI^2l$$

$$p = 3 \times 0,3 \times (48)^2 \times 9 = 0,0186 \text{ MW}$$

$$P_a = 2 - 0,0186 = 1,9814 \text{ MW}$$

2) Puissance réactive :

$$q = 3XI^2l = 0,0248 \text{ MVAR}$$

q étant les pertes inductives dues à la réactance de la ligne.

$$Q_a = Q_d - q$$

$$Q_d = P_d \tan \varphi_p = 2 \times 0,75 = 1,5 \text{ MVAR}$$

$$Q_a = 1,5 - 0,0248 = 1,4752 \text{ MVAR}$$

3) Rendement de la ligne :

$$\eta = \frac{P_a}{P_1} = \frac{P_a}{P_a + p} = \frac{1,9814}{2}$$

$$\eta = 0,99$$

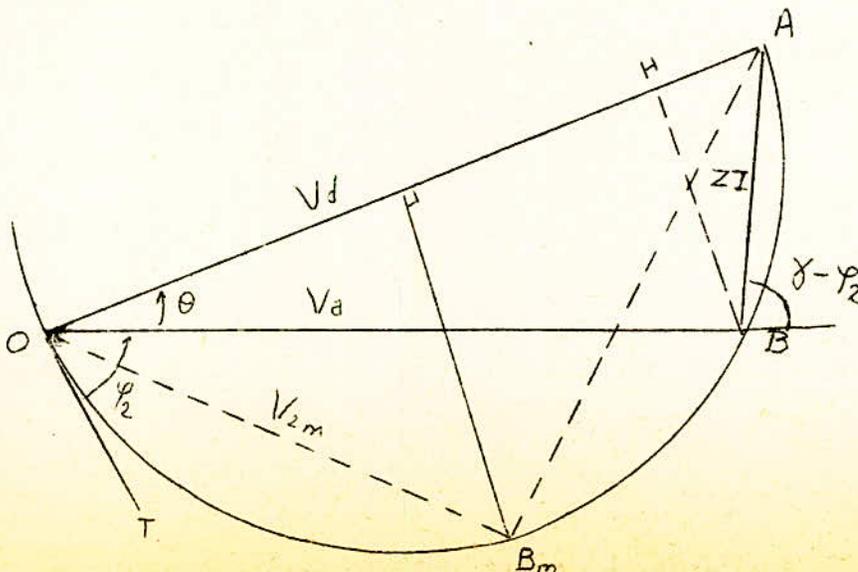
Seules les chutes ohmiques influent sur le rendement.

4) Recherche de la puissance maximum transmissible :

Nous avons V_d qui est constante et V_a variable.

On suppose $\varphi_2 =$ constante

$$\gamma - \varphi_2 = c^{tc}$$



Le point A est fixe puisque $\gamma - \varphi_2 = C^{te}$. Le point B décrit un arc de cercle passant par OB et A

Nous avons $P_a = V_d I \cos \varphi_a$

Dans le triangle OAB nous avons la relation des sinus :

$$\frac{ZI}{\sin \theta} = \frac{V_d}{\sin(\gamma - \varphi_2)} \Rightarrow P_a = \frac{V_d V_a}{Z} \sin \theta \frac{\cos \varphi_a}{\sin(\gamma - \varphi_2)}$$

$V_d \cdot V_a \sin \theta$ est l'aire du triangle OAB et comme $V_d = C^{te}$, la puissance maximum est proportionnelle à BH. Cette hauteur est maximum lorsque B se trouve au milieu de l'arc OA.

Nous avons dans ces conditions : $\theta = \frac{\gamma - \varphi_a}{2} = \gamma - \varphi_1$

$$\Rightarrow \boxed{\varphi_2 = 2\varphi_1 - \gamma}$$

$$\cos \varphi_{d1} = 0,8 \Rightarrow \varphi_{d1} = 37^\circ \quad \text{et } 2\varphi_{d1} = 74^\circ$$

$$\cos \gamma = \frac{R}{Z} = 0,6 \quad \gamma = 53^\circ$$

$$\varphi_a = 2\varphi_{d1} - \gamma = 74 - 53 = 21^\circ$$

$$\cos \varphi_a = 0,935$$

La puissance maximum transmissible sera :

$$P_{am} = \frac{V_d^2}{4Z} \frac{\cos \varphi_a}{\cos(\frac{\gamma - \varphi_a}{2})}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\begin{cases} R = 0,3 \times 9 = 2,7 \Omega \\ X = 0,4 \times 9 = 3,6 \Omega \end{cases}$$

$$Z = \sqrt{(2,7)^2 + (3,6)^2} = 4,4 \Omega$$

$$\cos \frac{\gamma - \varphi_a}{2} = 0,96$$

$$\frac{\gamma - \varphi_a}{2} = \frac{53 - 21}{2} = 16^\circ$$

$$\cos \left(\frac{\gamma - \varphi_a}{2} \right) = 0,92$$

$$P_m = \frac{(30\,000)^2 \cdot 0,935}{4 \times 4,4 \times 3 \times 0,92} = 17,3 \text{ MW}$$

La puissance maximum qui peut être transmise dans la ligne est de 17,3 MW ce qui est très possible. En effet pour la puissance active de 2 MW, nous avons trouvé une section électrique, qui en principe est inférieure à la section pratique. Pour trouver cette section il nous a fallu calculer la chute de tension correspondante. Pour une chute de tension bien déterminée, nous pouvons trouver la section qui pourrait véhiculer cette puissance maximum.

En conclusion, nous pouvons dire que les lignes à moyenne tension, l'effet de la capacité est négligeable d'autant plus que la ligne est assez courte. En effet, nous constatons que la puissance active n'a pas varié. De même le rendement de la transmission reste le même.

ECHAUFFEMENT DES CONDUCTEURS :

En principe, les lignes aériennes sont automatiquement refroidies par la température ambiante qui se trouve au voisinage du conducteur. La température d'une canalisation aérienne ne doit pas s'élever à plus de 20° C au dessus de la température ambiante pour le courant normal.

De ce fait, l'échauffement est négligeable et dans la pratique, pour la ligne 30 KV, nous n'en tiendrons pas compte.

Protection des lignes :

Nous ferons à l'étude en ce qui concerne les surtensions et les surintensités. On distingue les surtensions d'origine interne et celles d'origine externe. Les premières prennent naissance sur le réseau lors d'une variation brusque du régime enclenchement ou déclenchement d'un interrupteur, par exemple, donne lieu à un phénomène transitoire ; l'établissement d'un court-circuit ou l'amorçage d'un arc entre deux fils de ligne sont autant de phénomènes qui créent des surtensions.

Les surtensions d'origine externe proviennent soit d'un coup de foudre direct soit de l'induction électrostatique exercée par les charges électriques de l'atmosphère qui créent en certains points de la ligne un potentiel se superposant au potentiel normal.

Ces divers phénomènes, lorsqu'ils s'établissent, donnent lieu à des surtensions qui se propagent le long de la ligne à une vitesse très voisine de celle de la lumière, et qui en se réfléchissant en tous points de discontinuité du réseau peuvent amplifier la surtension primitive.

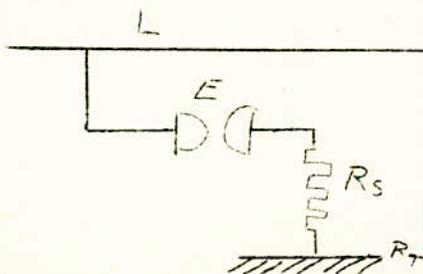
Protection contre les surtensions et les surintensités :

Il y a les dispositifs qui ont pour objet de dissiper l'énergie mise en jeu dans le phénomène de surtension : limiteurs de tension et parafoudres.

Il y a aussi d'autres dispositifs dont le but est d'empêcher le passage de l'onde dangereuse vers l'appareil à protéger.

En ce qui concerne le court-circuit il est impossible de les éviter, mais on peut en réduire les conséquences en assurant la mise hors-circuit immédiate de la partie défectueuse de la ligne. L'appareil utilisé est le disjoncteur.

Le parafoudre est un appareil, inséré en dérivation entre la ligne et la terre et destiné à protéger le matériel électrique contre les surtensions d'origine atmosphérique.



Il est constitué d'un éclateur E relié d'un côté à la ligne et de l'autre à la terre par l'intermédiaire d'une résistance R_s . L'éclateur est réglé de façon à ne pas s'amorcer pour la tension qui peut se développer entre un conducteur et la terre sous l'action des défauts susceptibles de se produire dans le fonctionnement du réseau. Lorsque, par suite d'une surtension, la tension de la ligne dépasse une certaine valeur, l'éclateur s'amorce et met la ligne en relation avec le sol à travers la résistance R_s et la résistance R_t de la prise de terre. La décharge peut alors s'écouler dans le sol, la tension aux bornes du parafoudre étant égale à :

$$U_z = (R_s + R_t)I_t$$

C'est à dire par la chute de tension produite par le passage du courant de décharge.

Lorsque, l'écoulement de la décharge est terminé, la tension normale de la ligne reste appliquée à l'éclateur anorcé. En l'absence de R_s , le réseau serait mis en court-circuit à la terre.

Le parafoudre doit être établi de façon à assurer le plus rapidement possible la coupure du courant qui s'établit et il faut que R_s soit choisie suffisante pour que la puissance dépensée dans le réseau soit acceptable.

=====

ETUDE DU PIQUETAGE

L'étude de notre ligne fait partie de tout le réseau TADMEIT-TAKDEMPT. Cependant, nous sommes limités à deux points BAGLIA-TAKDEMPT.

Plan parcellaire :

Ce plan établi à l'échelle cadastrale, de préférence 1/2000, comporte le relevé planimétrique du terrain.

Sur ce plan sont groupés les divers renseignements intéressant la construction de la ligne à savoir les Oueds, les arbres etc...

Après cette première opération, il faut procéder à une étude précise du tracé sur le terrain. Il faut déterminer le tracé en plan sans chercher à mesurer les dénivellations ni à faire étudier le profil en long le plus défavorable à la répartition des pylônes.

Profil en long :

Ce profil en long figure sur la même feuille que le plan parcellaire.

Il définit la configuration du terrain existant sous l'emprise de la ligne.

Dans la partie supérieure du plan nous avons indiqué la longueur des alignements, puis au dessous du profil dessiné les renseignements suivants :

- Niveau du plan de comparaison.
- Altitude du terrain.
- Distance partielle entre les points de relevé.
- Distance entre piquets.
- Distances cumulées entre piquets.

En dessous de ces renseignements, nous avons représenté le relevé planimétrique du terrain.

Détermination des supports de ligne :

D'après l'étude du plan parcellaire et du profil en long, nous devons procéder à la répartition, sur ces plans, des supports et de leurs caractéristiques.

Il faut que le tracé soit aussi rectiligne que possible en comportant un minimum d'angles. Pour notre part nous comptons cinq.

Les portées doivent être aussi régulières que possible pour éviter les efforts longitudinaux sur les supports.

La distance minimum entre les branches d'arbre et la ligne est de 5m

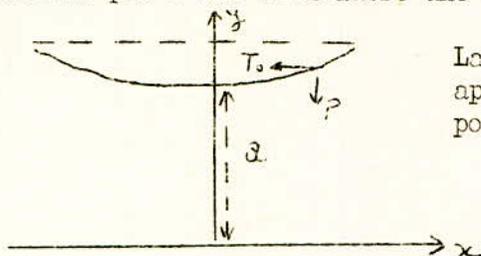
Répartition des supports :

Compte tenu du balisage de la ligne sur le terrain le profil en long permet d'effectuer la répartition des supports et devient l'élément de base du calcul.

Lorsque nous déterminerons le paramètre à la température maximum sans vent, nous procéderons à la répartition des supports sur le profil en long en traçant à l'aide d'une chaînette la position du conducteur le plus bas. Le paramètre adopté est indiqué sur le plan.

CALCUL MECANIQUE

Le calcul mécanique des conducteurs consiste à déterminer la tension de pose des fils, à une température donnée, pour que dans le cas le plus défavorable imposé par les règlements administratifs, la tension et la flèche ne dépassent pas l'une et l'autre une valeur maximum limite admise.



La figure d'équilibre du conducteur entre deux appuis est une chaînette dont l'équation, rapportée à deux axes rectangulaires, est :

$$Y = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right)$$

$$Y = a \operatorname{ch} \frac{x}{a}$$

a est un paramètre tel que $a = \frac{t_0}{p}$

T_0 étant la composante horizontale de la tension et p l'effort résultant : poids et surcharge, appliqué au conducteur par unité de longueur et par unité de section.

Dans cette équation x est l'abscisse d'un point quelconque de la courbe.

La longueur l du conducteur entre deux appuis, supposés au même niveau, distant de P , est donnée par la formule approchée :

$$l = P \left(1 + \frac{p^2 P^2}{24 T_0^2} \right)$$

P étant la portée.

Cette longueur correspond à une température θ . Pour une nouvelle température $\theta' > \theta$, l'effort résultant devient p' et la tension T' .

Désignons par α le coefficient de dilatation du métal, par E son module d'élasticité et par S la section du conducteur. La nouvelle longueur l' du conducteur est telle que :

$$l' - l = l \alpha (\theta - \theta') + l \frac{T' - T}{E}$$

En rapportant cette expression de celle de l et en supposant, dans une première approximation $l = P$, et T et T' très voisines de leurs composantes horizontales T_0 et T'_0 , il vient :

$$\alpha (\theta - \theta') = \frac{P^2}{24} \left(\frac{p'^2}{T'^2} - \frac{p^2}{T^2} \right) - \frac{T' - T}{E}$$

$$\alpha \theta' + \frac{P^2}{24} \frac{p'^2}{T_0'^2} - \frac{T_0' \alpha}{E} = - \alpha \theta + \frac{P^2}{24} \frac{p^2}{T_0^2} - \frac{T_0 \alpha}{E}$$

Résolution de l'équation par rapport à T_0'

On multiplie les 2 membres par T_0' . Il vient :

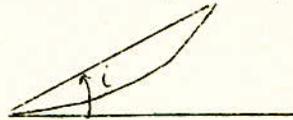
$$T_{c_2}^3 + \left\{ \underbrace{E (\theta - \theta')}_{B} - \underbrace{T_{c_1}}_{C} + \underbrace{\frac{E P n^2}{24 T_{c_1}^2}}_{A} \right\} T_{c_2}^2 - \frac{E P n'^2}{24} = 0$$

n étant le coefficient de surcharge

$$n = \frac{\text{poids fictif}}{\text{poids réel}}$$

Pour les portées dénivellées, il faut remplacer la portée réelle par sa projection horizontale. Le coefficient de majoration n du poids spécifique sous l'influence du vent doit avoir la valeur

$$n' = n \sqrt{\frac{1 - \frac{\Delta \sin^2 i}{m^2}}{\cos i}}$$



Nous devons prendre les contraintes moyennes correspondant à l'élément tangent à la droite joignant les appuis.

$$T_n = \frac{T}{\cos i}$$

Détermination des flèches :

Régime sans vent :

$$f = \frac{P^2 p_0}{8 T_n \cos i}$$

Régime avec vent :

$$f' = \frac{P^2 p_0 n'}{8 T'_n \cos i}$$

Calcul du coefficient de surcharge dans le régime le plus dur (tempête) et pour la première portée dénivellée.

Poids du conducteur par mètre et pour toute la section :

$$p = 0,0027 \times 93,3 = 0,26 \text{ kg}$$

Effet du vent :

$$v = 49 \times 10,9 \cdot 10 = 0,525 \text{ kg}$$

Poids réel :

$$F = \sqrt{p + v} = \sqrt{0,068 + 0,275} = \sqrt{0,343}$$

$$F = 0,59 \text{ kg}$$

$$n = \frac{0,59}{0,26} = 2,26$$

Pour la première portée $\cos i = 0,999$

$$\sin^2 \alpha = 0,05$$

$$\sin \alpha = 0,0025$$

$$n' = 2,26 \sqrt{1 - \frac{0,0025}{\frac{5,1}{0,999}}}$$
$$n' = 2,26 \times 0,999 \neq 2,26$$

Nous pouvons donc, sans grande erreur, négliger le terme sous le radical et écrire $n' = n$.

Pour les portées voisines, l'angle de dénivellation est aussi faible : 0,989 0,995 1 0,995 0,994 1 0,997 1 0,999 0,998 1 0,995 1 etc...

ARRETE TECHNIQUE

Hypothèse A :

A la température moyenne, avec un vent de 48 Cpz, la tension des conducteurs ne doit pas dépasser le tiers de leur charge de rupture.

Hypothèse B :

A la température minimum, pour un vent de 18 Cpz, la tension des conducteurs ne doit pas dépasser le tiers de leur charge de rupture.

Vibration :

A la température moyenne, sans vent, la tension des conducteurs ne doit pas dépasser le cinquième de leur charge de rupture.

Pour établir l'équation de changement d'état, nous sommes partis d'un état initial. Il est bien évident que pour utiliser cette équation il faut calculer les valeurs initiales de la température, du coefficient de surcharge et de la tension.

Les tensions étant limitées, pour un conducteur, par les hypothèses administratives.

ZONE ET PARAMETRE

ZONE :

Notre ligne est située en zone littoral dont les caractéristiques sont :

Température maximum : + 45° C

Température moyenne : + 20°C

Température minimum : - 5°C

Cette zone est caractérisée par l'inexistence de givre.

PARAMETRE :

La valeur du paramètre définissant géométriquement l'équilibre d'un conducteur est :

$$a = \frac{T}{\bar{\omega}}$$

T = tension mécanique unitaire
 $\bar{\omega}$ = poids spécifique du conducteur.

Ce paramètre de la chaînette, à température maximum, sans vent, est limité par les différentes hypothèses, imposant les coefficients de sécurité à adopter pour les conducteurs.

Pratiquement, ces hypothèses imposent l'adoption, pour chaque section de conducteur, des paramètres maxima.

Pour la zone littoral et pour une section de 93,3 mm les hypothèses nous donnent $a = 1300$.

Abaques des surcharges

Pour un conducteur donné, le choix d'un paramètre impose la tension du conducteur à la température maximum, sans vent, de la zone considérée. Ces grandeurs déterminent l'état initial de l'équation de changement d'état.

A partir de cet état initial nous pouvons calculer les abaques de tension, répandant aux différentes hypothèses administratives et aux conditions de vibration en fonction de la portée.

Hypothèses administratives :

Hypothèse A :

Par application de l'équation de changement d'état en fonction de la portée, nous tracerons la courbe des tensions répandant à l'état final.

Hypothèse B :

De même nous déterminerons la courbe des tensions répandant à l'état final.

Nous constatons que cette courbe est décroissante alors que celle relative à l'hypothèse A est légèrement croissante.

Vibrations :

Afin de répondre aux conditions imposées, en vue d'éliminer les vibrations dangereuses, il est nécessaire de déterminer, pour le même paramètre, la courbe de tension en fonction de la portée.

Cette courbe est décroissante comme dans le cas de l'hypothèse B.

Résolution d'après l'hypothèse de tempête.

Par anètre $a = 1\ 300$

Section $s = 93,3\ \text{mm}^2$ $d = 10,9\ \text{mm}$

Tension initiale :

$$T_i = a \varpi = 1\ 300 \times 0,0027 = 3,5\ \text{kg/mm}$$

Température initiale $\theta_i = 45^\circ\text{c}$

Température finale $\theta_f = 20^\circ\text{c}$

Coefficient de dilitation $\alpha = 23 \cdot 10^{-6}$

Module d'élasticité $E = 6\ 000\ \text{kg/mm}^2$

Equation de changement d'état :

$$T_f^2 + \left\{ 0,00192 \frac{P \cdot n^2}{T_i^2} + 0,138 (\theta_f - \theta_i) - T_i \right\} T_f = 0,00192 P \cdot n^2$$

$$T_f + A T_f = B$$

$$\theta_f - \theta_i = 20 - 45 = -25^\circ\text{c}$$

$$0,138 \times (-25) = -3,5$$

$$v = 49 \times 10,9 \cdot 10 = 0,525\ \text{kg}$$

$$p = 0,0027 \times 93,3 = 0,26 \text{ kg}$$

$$F = \sqrt{v + p} = \sqrt{0,275 + 0,068} = 0,59 \text{ kg}$$

$$nf = \frac{0,59^2}{0,26} = 2,26 \quad nf^2 = 5,2$$

$$Tf^3 - 5,43 Tf^2 - 100 = 0$$

$$Tf^3 - 3,46 Tf^2 - 225 = 0$$

$$Tf^3 - 0,7 Tf^2 - 400 = 0$$

$$Tf^3 + 3 Tf^2 - 625 = 0$$

$$Tf^3 + 77,1 Tf^2 - 900 = 0$$

- Tf = 7,3 kg
- Tf = 7,5 kg
- Tf = 7,61 kg
- Tf = 7,7 kg
- Tf = 8 kg

Résolution d'après l'hypothèse : tempête

Portée	P^2	$E \times (\theta' - \theta)$	nf	nf^2	A	B	Tf (kg)
100	10	-3,5	2,26	5,2	-5,43	100	7,3
150	225	" "	"	"	-3,46	225	7,5
200	400	" "	"	"	-0,7	400	7,61
250	625	" "	"	"	3	625	7,7
300	900	" "	"	"	7,1	900	8

Résolution d'après l'hypothèse : Hiver

Portées	P^2	$E \times (\theta - \theta')$	\sum mf	A	B	Tf
100	10	- 6,9	1,6	- 8,83	31	9,3
150	225	"	"	- 6,86	69	8
200	4 10	"	"	- 4,1	123	6,8
250	625	"	"	- 0,4	193	5,75
300	9 10	"	"	+ 3,7	277	5,5

$$\left\{ \begin{array}{l} T_i = 3,5 \text{ kg/mm} \\ \theta_i = 45^\circ\text{c} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \theta_f = - 5^\circ\text{c} \\ \nu_f = 18 \text{cpz} \end{array} \right.$$

$$\theta_f - \theta_i = - 50^\circ\text{c}$$

$$\nu = 18 \times 10,9 \text{ 10} = 0,197$$

$$F = \sqrt{\nu + p} = \sqrt{0,039 + 0,068} = 0,327$$

$$\text{mf} = \frac{0,327}{0,26} = 1,26 \quad \sum \text{mf} = 1,6$$

Résolution d'après l'hypothèse aux vibrations

P	P^2	$E \alpha (\theta - \theta')$	$\frac{2}{nf}$	Δ	B	Tf
100	10	- 3,5	1	- 5,43	19,2	6,1
150	225	"	"	- 3,46	43,3	4,5
200	400	"	"	- 0,7	78	4,2
250	625	"	"	3	120	4,1
300	900	"	"	7,1	173	4

Pour l'hypothèse aux vibrations, on prend la température de tempête avec un vent nul.

La tension mécanique ne doit pas dépasser le $\frac{1}{5}$ de leur charge de rupture

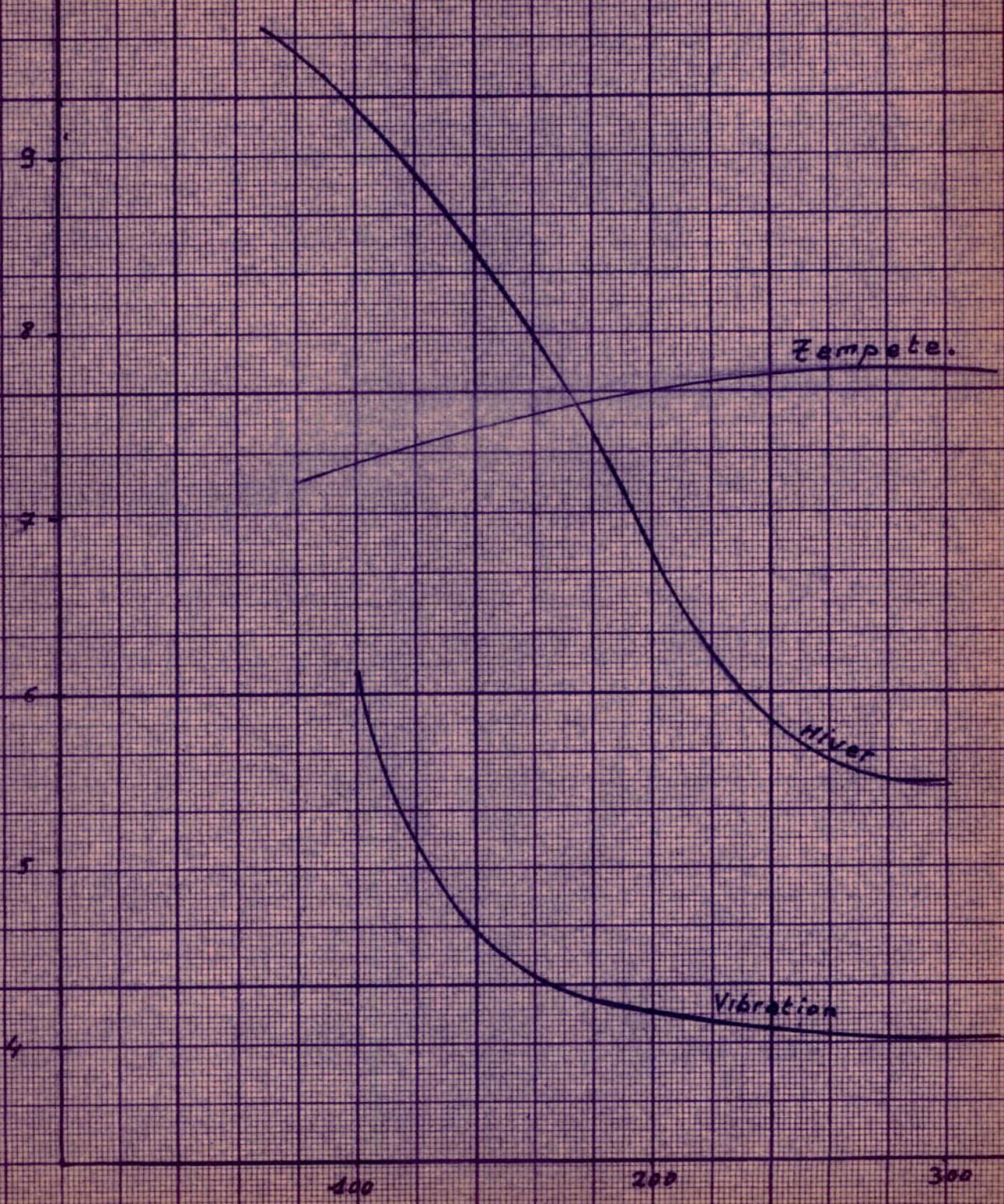
$$T_i = 3,5 \text{ kg/mm}$$

$$\theta_i = 45^\circ\text{c}$$

$$vf = 0$$

$$\theta_f = 20^\circ\text{c}$$

T_1 (kg)



Abagues de surcharge.

CALCUL DE LA PORTEE CRITIQUE

C'est la valeur de la portée pour laquelle le régime de tempête et le régime d'hiver donnent la même tension.

- Si la portée réelle est plus grande que la portée critique c'est le régime de tempête qui est le plus dur.

- Si $P_r < P_c$ le régime le plus dur est l'hiver.

$$\frac{P_c}{24 T_0^2} \frac{F_2^2}{E} - \frac{T_c}{E} \propto \frac{\theta_2}{E} \quad \frac{P_c}{24 T_0^2} \frac{F_1^2}{E} - \frac{T_c}{E} \propto \theta_1$$

$$\frac{P_c}{24 T_0^2} (F_2^2 - F_1^2) = \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

$$P_c = \frac{24 T_0^2 \alpha (\theta_2 - \theta_1)}{F_2^2 - F_1^2}$$

$$F_2^2 - F_1^2 = v_2^2 - v_1^2 = 0,275^2 - 0,039^2 = 0,136$$

$$\theta_2 = 20^\circ\text{c} \quad (\text{Tempête})$$

$$\theta_2 - \theta_1 = 25^\circ\text{c}$$

$$\theta_1 = -5^\circ\text{c} \quad (\text{hiver})$$

$$\alpha = 23 \cdot 10^{-6}$$

$$P_c = \frac{24 \times (9,9 \times 93,3) \times 23 \cdot 10^{-6} \times 25}{0,136}$$

$P_c = 245 \text{ M}$

Tableau de pose

Le problème consiste à déterminer la tension T, appelée tension de pose, qui dans les conditions atmosphériques normales les circonstances devenant aussi dé favorables que possibles, cette tension ne dépasse pas la tension maximum à laquelle on obtient la rupture du conducteur.
 Pour la détermination des portées, il faut éviter de juxtaposer des petites avec des grandes portées.

Lorsque nous avons, comme c'est le cas de notre ligne, une portée inférieure à Pc et une autre supérieure à Pc, le pylone commun à ces deux portées, sera tiré vers la portée la plus grande au régime de tempête et vers la portée la plus petite au régime d'hiver.

- Calcul de la portée moyenne : Pn

$$P_n = \sqrt{\frac{\sum P^3 \cos^4 i}{\sum P}}$$

Ensuite au lieu de comparer chaque portée réelle avec la portée critique, nous allons faire la comparaison de Pc avec Pn ainsi calculée. De cette comparaison, nous choisirons le régime le plus dur à appliquer.

$$P_n = \sqrt{\frac{557,1 \cdot 10^6}{910^3}} = \sqrt{6,110} = 248m$$

La portée moyenne est supérieure à la portée critique.

Nous prendrons comme régime le plus dur, le régime de tempête pour le calcul des tensions de pose.

$$T_0^2 + T^2 \left(\underbrace{0,00192 \frac{P_n^2}{T_0^2}}_A + \underbrace{0,138 (\theta - \theta')}_B - \underbrace{T_0}_C \right) = \underbrace{0,00192 P_n^2}_D$$

TABLEAU DE POSE POUR $\theta = +10^\circ\text{C}$

P (m)	P ²	A	A+B-C	D	EQUATIONS	TENSIONS	FLECHES (m)
140	196 10 ²	2	-9,28	37,6	T ³ -9,28T ² -37,6=0	9,65	0,695
160	256 10 ²	2,6	-8,68	49	T ³ -8,68T ² -49=0	9,3	0,93
180	324 10 ²	3,3	-7,98	62	T ³ -7,98T ² -62=0	8,85	1,24
200	400 10 ²	4,1	-7,18	77	T ³ -7,18T ² -77=0	8,3 x	1,62
220	484 10 ²	4,95	-6,33	93	T ³ -6,33T ² -93=0	7,85	2,1
240	576 10 ²	5,85	-5,43	110	T ³ -5,43T ² -110=0	7,45	2,6
260	676 10 ²	6,9	-4,38	130	T ³ -4,38T ² -130=0	7	3,26
280	784 10 ²	8	-3,28	151	T ³ -3,28T ² -151=0	6,65	4
300	900 10 ²	9,2	-2,08	173	T ³ -2,08T ² -173=0	6,55	4,65
320	1 020 10 ²	10,4	-0,88	196	T ³ -0,88T ² -196=0	6,5	5,3

$\theta' = 20^\circ\text{C}$
 $\theta = 10^\circ\text{C}$
 $\theta - \theta' = -10^\circ\text{C}$

$B = 0,138 \times (-10) = 1,38$
 $C = 9,9$

TABLEAU DE POSE POUR $\theta = 20^\circ$

P P	A - C	EQUATIONS	TENSIONS (kg/mm ²)	FLECHES (m)
140	- 7,9	$T^3 - 7,9 T^2 - 37,6 = 0$	8,35	0,79
160	- 7,3	$T^3 - 7,3 T^2 - 49 = 0$	8,05	1,07
180	- 6,6	$T^3 - 6,6 T^2 - 62 = 0$	7,75	1,41
200	- 5,8	$T^3 - 5,8 T^2 - 77 = 0$	7,3	1,85
220	- 4,95	$T^3 - 4,95 T^2 - 93 = 0$	6,9	2,38
240	- 4	$T^3 - 4 T^2 - 110 = 0$	6,55	2,96
260	- 3	$T^3 - 3 T^2 - 130 = 0$	6,3	3,6
280	- 1,9	$T^3 - 1,9 T^2 - 151 = 0$	6,1	4,3
300	- 0,9	$T^3 - 0,9 T^2 - 173 = 0$	5,8	5,2
320	+ 0,5	$T^3 + 0,5 T^2 - 196 = 0$	5,65	6,1

$$\left. \begin{array}{l} \theta' = 20^\circ \\ \theta = 20^\circ \end{array} \right\} \theta - \theta' = 0 \implies \underline{B} = 0$$

A, C, et D gardant les mêmes valeurs, car ces grandeurs ne dépendent pas de la température.

Tableau de pose $\theta = 30^\circ$

P_m	$A+B-C$	Equations	Tensions kg/mm^2	flexions (m)
140	-6,52	$T^3 - 6,52T^2 - 37,6 = 0$	7,3	0,88
160	-5,92	$T^3 - 5,92T^2 - 49 = 0$	6,95	1,25
180	-5,22	$T^3 - 5,22T^2 - 62 = 0$	6,7	1,65
200	-4,42	$T^3 - 4,42T^2 - 77 = 0$	6,3	2,14
220	-3,57	$T^3 - 3,57T^2 - 93 = 0$	6,05	2,72
240	-2,67	$T^3 - 2,67T^2 - 110 = 0$	5,85	3,3
260	-1,62	$T^3 - 1,62T^2 - 130 = 0$	5,55	4,1
280	-0,52	$T^3 - 0,52T^2 - 151 = 0$	5,4	4,95
300	+0,68	$T^3 + 0,68T^2 - 173 = 0$	5,3	5,7
320	+1,88	$T^3 + 1,88T^2 - 196 = 0$	5,2	6,6

$$\begin{cases} \theta' = 20^\circ \\ \theta = 30^\circ \end{cases} \quad \theta - \theta' = 10^\circ$$

$$B = 0,138 \times 10 = 1,38$$

Tableau de pose $\theta = 45^\circ\text{C}$

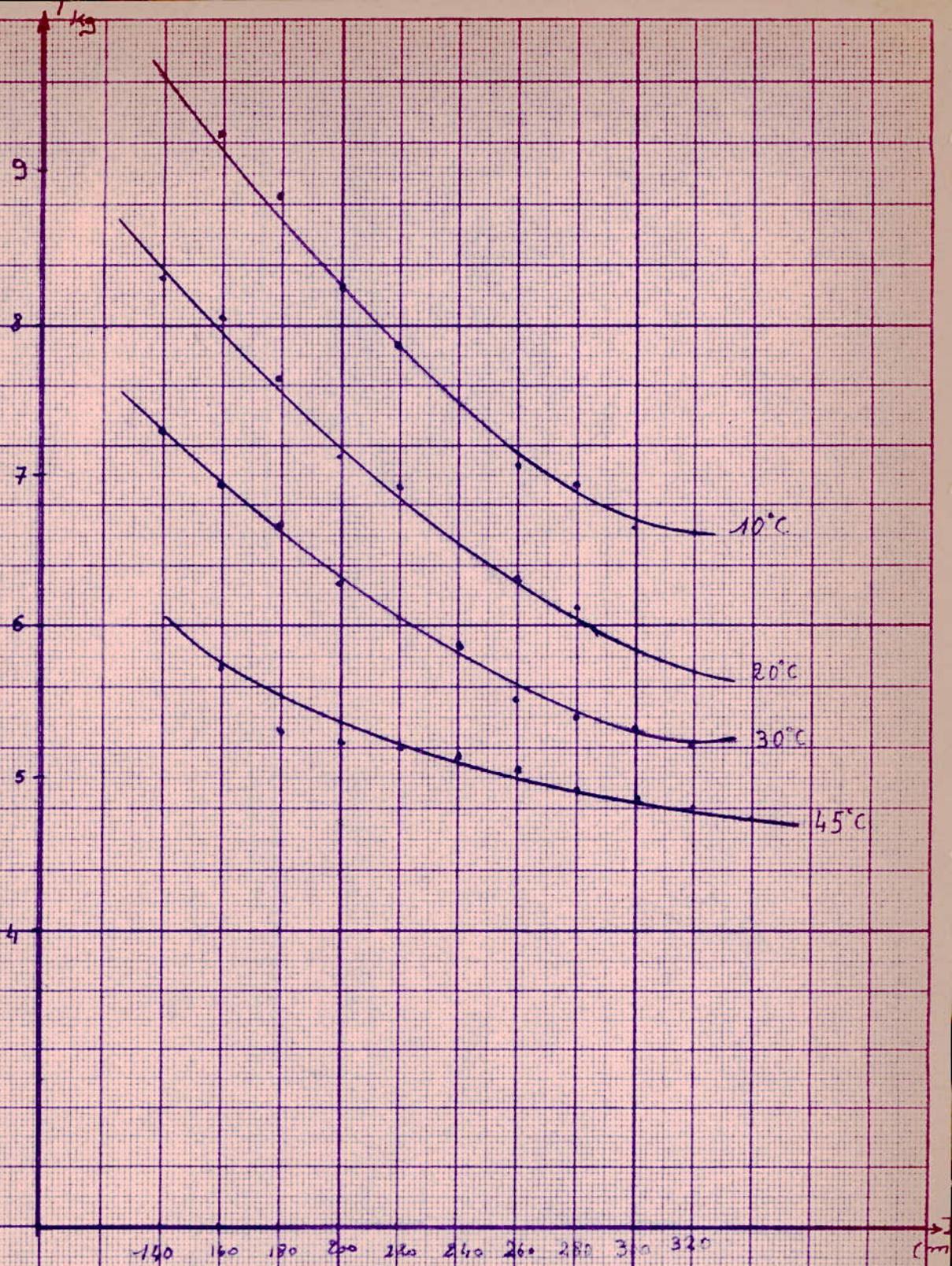
P (m)	A+B-C	Equations	Tensions kg/mm^2	Flèches (m)
140	-4,46	$T^3 - 4,46T^2 - 376 = 0$	5,75	1,15
160	-3,86	$T^3 - 3,86T^2 - 49 = 0$	5,3	1,63
180	-3,16	$T^3 - 3,16T^2 - 62 = 0$	5,2	2,08
200	-2,36	$T^3 - 2,36T^2 - 77 = 0$	5,15	2,6
220	-1,51	$T^3 - 1,51T^2 - 93 = 0$	5,05	3,2
240	-0,71	$T^3 - 0,71T^2 - 110 = 0$	4,9	3,84
260	+0,44	$T^3 + 0,44T^2 - 130 = 0$	4,85	4,65
280	+1,54	$T^3 + 1,54T^2 - 151 = 0$	4,82	5,45
300	+2,74	$T^3 + 2,74T^2 - 173 = 0$	4,8	6,3
320	+3,96	$T^3 + 3,96T^2 - 193 = 0$	4,75	7,25

$$\theta' = 20^\circ\text{C}$$

$$\theta - \theta' = 25^\circ\text{C}$$

$$\theta = 45^\circ\text{C}$$

$$B = 0,138 \times 45 = 3,44$$



Tensions de pose en fonction de la portée
pour différentes températures

Calcul de la flèche maximum dans la plus grand portée :

$$P = 320 \text{ m}$$

$$f_m = \frac{1020 \cdot 10^2}{8 \times 1300} = 9,8 \text{ m}$$

Cette flèche maximum va nous permettre de calculer l'écartement des conducteurs.

-Distance entre conducteurs.

Nous allons employer la formule empirique :

$$d = 0,72 \left\{ \sqrt{f_m + l} + \frac{V}{150} \right\}$$

$$d = 0,72 \left[\sqrt{9,8 + 9,60} + \frac{30}{150} \right]$$

$$\underline{d = 2,45}$$

Cette distance entre conducteurs est fixé par des considérations électriques et mécaniques.

Du point de vue électrique, les conducteurs doivent être assez écartés pour que les pertes par effluve n'occasionnent pas l'amorçage d'arc entre conducteurs et le support lui même.

Du point de vue mécanique l'écartement des conducteurs doit prévoir l'influence des surcharges brusques et des balancements qui pourraient les amener au contact.

EFFORTS TRANSMIS AUX SUPPORTS

Les conducteurs exercent sur les supports des efforts qui proviennent d'une part de leur propre poids et de leur tension initiale, d'autre part des efforts non permanents tels que l'effet du vent ou des surcharges.

Nous allons calculer les efforts transmis aux deux pylônes d'arrêt et aux pylônes d'angle.

1) Pylône d'arrêt n° 39 :

a) Poids propre du conducteur

$$P = \frac{L.S. \cdot \mu}{2} = \frac{0,160 \times 2,7 \times 93,3 \times 3}{2} = 61 \text{ kg}$$

b) Tension mécanique initiale

$$T_i = T_h.S \times 3 = 9,9 \times 93,3 \times 3 = 2\,770 \text{ kg}$$

Le poids du conducteur est négligeable devant la tension mécanique initiale.

c) Effet du vent

$$R_v = \frac{P.V.d \times 3}{2} = \frac{150 \times 48,96 \times 10,9 \times 10^3 \times 3}{2} = 254 \text{ kg}$$

d) Effort résultant

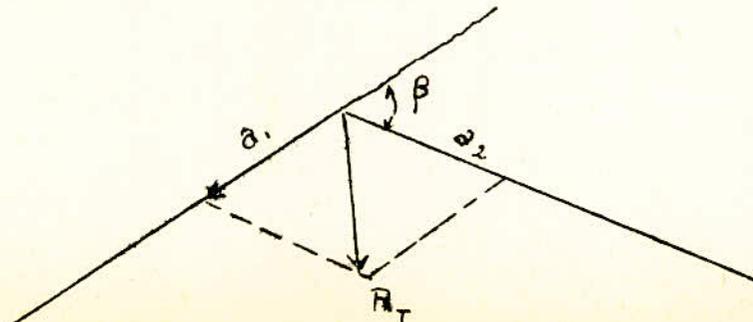
$$F = \sqrt{(2\,770)^2 + (254)^2} = 2\,780 \text{ kg}$$

L'effort que doit supporter le pylône n° 39 est de 2780 kg.
Ce support est du type :

2) Pylône d'angle n° 51

Si deux portées voisines font un angle β , il est nécessaire de composer géométriquement les efforts horizontaux pour obtenir la résultante.

a) Tension mécanique initiale



30

$$R_t = 2 F \sin \frac{\beta}{2}$$

$$F = TS$$

$$F = 9,9 \times 93,3 \times 3 = 2\,770 \text{ kg}$$

$$\frac{\beta}{2} = 9,3 \text{ gr} \quad \cos \frac{\beta}{2} = 0,99 \quad \cos \beta = 0,96 \quad \sin \frac{\beta}{2} = 0,145$$

$$R_t = 2 \times 2\,770 \times 0,145 = 800 \text{ kg}$$

b) Effort dû au vent

On suppose que le vent agit normalement et simultanément sur chacune des 2 portées.

Nous avons la formule :

$$R_v = 3 \times \frac{1}{2} d v \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2P_1 P_2 \cos \beta}$$

$$R_v = 3 \times 0,5 \times 10,9 \times 48,9 \times 450 \cdot 10^{-3} = 360 \text{ kg}$$

c) Résultante

$$R = 800 \text{ kg} + 360 \text{ kg} = 1\,160 \text{ kg}$$

3) Pylône d'angle N° 58

$$\beta = 21 \text{ gr} \quad \sin \frac{\beta}{2} = 0,16 \quad \cos \frac{\beta}{2} = 0,988$$

a) Tension mécanique initiale

$$R_t = 2 F \sin \frac{\beta}{2} = 2 \times 2\,770 \times 0,16 = 896 \text{ kg}$$

b) Effort dû au vent

$$R_v = 3 \times 0,5 \times 10,9 \times 48,9 \cdot 10^{-3} \times 470 = 376 \text{ kg}$$

c) Effort résultant

$$R = 896 + 376 = 1\,272 \text{ kg}$$

4) Pylône d'angle N° 65

$$\beta = 21,38 \text{ gr} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{\beta}{2} = 0,172 \\ \cos \frac{\beta}{2} = 0,985 \end{array} \right.$$

a) Tension mécanique initiale

$$R_t = 2 \times 2\,770 \times 0,172 = 950 \text{ kg}$$

b) Effort dû au vent

Lorsque les portées adjacentes ne sont pas tellement différentes on peut considérer une portée moyenne.

$$P_m = \frac{P_1 + P_2}{2}$$

La formule devient $R_v = P_m \times v \times \cos$

$$P_m = \frac{191 + 140}{2} = 165,5 \text{ n}$$

$$R_v = 3 \times 10,9 \cdot 10^{-3} \times 48,9 \times 165,5 \times 0,985 = 254 \text{ kg}$$

c) Effort résultant

$$R = 950 + 254 = 1204 \text{ kg}$$

5) Pylône d'angle n° 70

$$\beta = 7,84 \text{ gr}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{\beta}{2} = 0,063 \\ \cos \frac{\beta}{2} = 0,998 \end{array} \right.$$

a) Tension mécanique initiale

$$R_t = 2 \times 2\,770 \times 0,063 = 330 \text{ kg}$$

b) Effort dû au vent

$$P_m = \frac{175,5 + 190}{2} = 183 \text{ n}$$

$$R_v = 3 \times 10,9 \cdot 10^{-3} \times 48,9 \times 183 \times 0,998 = 286 \text{ kg}$$

c) Effort résultant

$$R = 330 + 286 = 616 \text{ kg}$$

6) Pylône d'angle n° 75

$$\beta = 1,32 \text{ gr}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{\beta}{2} = 0,012 \\ \cos \frac{\beta}{2} = 1 \end{array} \right.$$

a) Tension mécanique initiale

$$R_t = 2 \times 2\,770 \times 0,012 = 66,5 \text{ Kg}$$

b) Effort dû au vent

$$P_m = \frac{240,5 + 259,5}{2} = 250 \text{ n}$$

$$R_v = 3 \times 10,9 \cdot 10^{-3} \times 48,96 \times 250 \times 1 = 375 \text{ kg}$$

c) Effort résultant

$$R = 66,5 + 375 = 441 \text{ kg}$$

7) Pylône d'arrêt n° 79a) Tension mécanique initiale

$$R_t = 2\,770 \text{ kg}$$

b) Effort dû vent

$$R_v = 254 \text{ kg}$$

c) Effort résultant

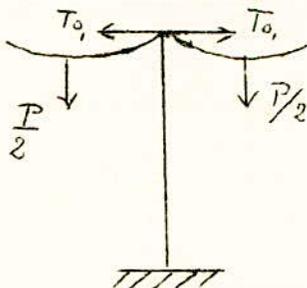
$$R = 780 \text{ kg}$$

En pratique l'effort ainsi déterminé ne doit pas être appliqué en tête du support, mais au point de fixation de chaque conducteur, de sorte que l'effort résultant en tête est un peu inférieur à celui qui résulte de nos calculs.

Nous pouvons tout de même nous baser sur ces résultats qui réservent une certaine marge de sécurité.

8) Pylônes d'alignement :

Comme les portées successives sont alignées, on ne considère que les efforts horizontaux et parallèles à la ligne, s'équilibrent et s'annulent deux à deux. Seuls les efforts résultants du poids propre du conducteur et du vent sont à considérer.



En réalité les contraintes T_{01} dans les deux portées ne s'équilibrent pas totalement, et en admettant que le support est rigide, nous devons faire intervenir un effort résultant parallèle à la ligne qui est d'autant plus important que les portées adjacentes sont plus différentes.

Dans la pratique nous devons éviter de réaliser des portées adjacentes trop inégales.

Les différences de portées donnent des contraintes différentes.

Prenons comme exemple le pylône N° 42

Poids des conducteurs :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{3 \times 0,155 \times 2,7 \times 93,3}{2} = 58,5 \text{ kg pour la denie portée à droite.} \\ \frac{3 \times 0,164 \times 2,7 \times 93,3}{2} = 62 \text{ kg pour la denie portée à gauche.} \end{array} \right.$$

Poids total supporté par le support :

$$58,5 + 62 = 120,5 \text{ kg}$$

Effort dû au vent

$$155 \times 48,96 \times 10,9 \cdot 10^{-3} \times 3 = 248 \text{ kg}$$

Poids des isolateurs :

$$(4 \times 3) \times 6 = 72 \text{ kg}$$

Effort en tête :

$$\sqrt{(120,5 + 72)^2 + (248)^2} = 312 \text{ KG}$$

Effort transmis aux supports d'alignement

N° DES SUPPORTS : TENSION

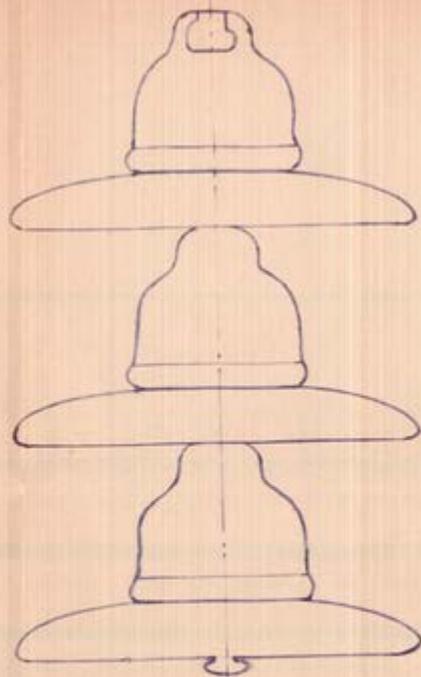
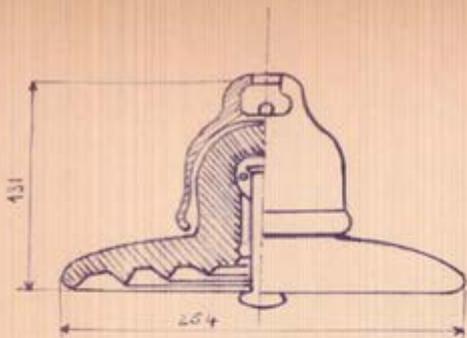
40	:	254
41	:	326
42	:	312
43	:	248
44	:	285
45	:	505
46	:	440
47	:	505
48	:	457
49	:	225
50	:	310

52	:	510
53	:	350
54	:	269
55	:	260
56	:	306
57	:	285

59	:	475
60	:	360
61	:	490
62	:	370
63	:	430
64	:	284

66	:	224
67	:	510
68	:	425
69	:	445

71	:	300
72	:	455
73	:	415
74	:	380
76	:	410
77	:	440
78	:	315



CHAINE D'ISOLATEURS

Les Isolateurs

Dans la ligne BAGHLIA-TAKDEMPT, nous emploierons des isolateurs suspendus.

L'isolateur est formé par une chaîne constituée par trois éléments. Ce nombre dépend de la tension de service. Chaque élément a une forme de cloche et comporte un mode de fixation à chacun des deux éléments entre lesquels il est placé dans la chaîne.

Caractéristiques :

Les caractéristiques qui définissent un isolateur pour ligne électrique suspendu sont : la tension de contournement à sec, la tension de contournement sous pluie, la tension de perforation, l'effort de destruction par contrainte électrique et mécanique, et l'effort de rupture par contrainte mécanique.

Ces caractéristiques sont données par le constructeur.

Prenons comme type d'isolateur Abb 87/ b

Tension de contournement en supposant que nous avons un seul élément.

$$U_c = (14 + 3,16a) = (14 + 3,16 \times 26,2) = 96 \text{ kVeff.}$$

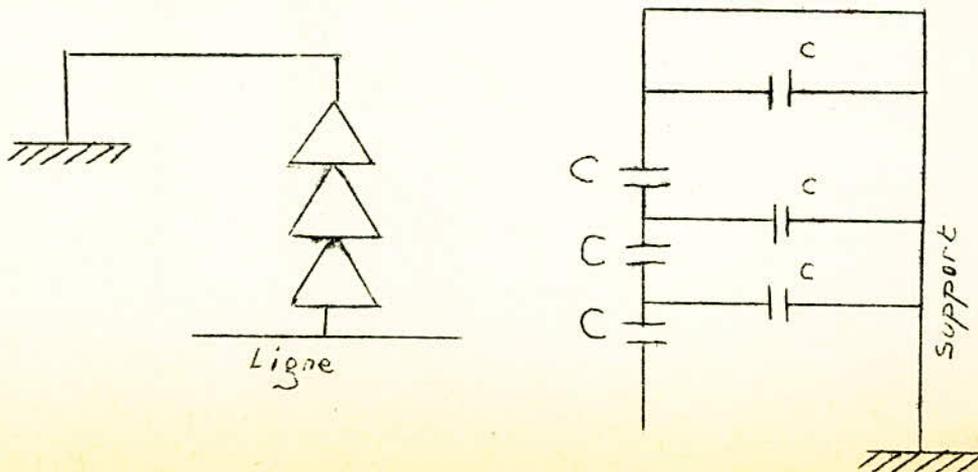
Tension aux impulsions :

Le coefficient d'impulsion k_i doit être supérieur à 1. Soit $k_i = 1,8$

$$U_{ei} = 96\sqrt{2} \times 1,8 = 240 \text{ kVeff}$$

Répartition inégale du potentiel sur les éléments d'une chaîne d'isolateur

Les éléments d'une chaîne ne supportent pas tous la même tension. La différence de potentiel entre deux faces d'un élément de rang p est plus grande pour les éléments voisins du conducteur que pour ceux voisins du support.



Au point de vue électrique, la chaîne d'isolateur peut être représentée par le schéma équivalent ci-dessus.

Désignons par :

C la capacité de chaque élément,

c la capacité d'une armature par rapport au support (sol). Les capacités c sont supposées toutes égales.

α nombre d'isolateurs de la chaîne,

x le numéro d'ordre d'un des éléments,

U_x la tension supportée par les x premiers éléments,

$$n = \sqrt{\frac{c}{C}}$$

Nous pouvons assimiler le circuit équivalent à une ligne à constante répartie, en court-circuit, alimentée à la tension U.

Dans cette hypothèse U_x a pour expression :

$$U_x = U \frac{\operatorname{sh} nx}{\operatorname{sh} n}$$

Les capacités C et c sont en général données par le constructeur. Prenons dans notre cas les valeurs :

$$C = 50 \cdot 10^{-6} \mu\text{F} \quad \text{et} \quad c = 7 \cdot 10^{-6} \mu\text{F}$$

$$n = \sqrt{\frac{7}{50}} = 0,37$$

Tension de contournement pour toute la chaîne :

$$U_c = (14 + 3,16 \times 52) = 178 \text{ KVe}_{\text{eff}}$$

Tension aux impulsions

$$U_{ei} = 178 \times \sqrt{2} \times 1,8 = 450 \text{ KVe}_{\text{eff}}$$

Calcul de U_x :

$$U_1 = 178 \frac{\operatorname{sh} 0,37}{\operatorname{sh} (0,37 \times 3)} \cdot \frac{\operatorname{sh} 0,37}{\operatorname{sh} 1,1}$$

$$\operatorname{sh} = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

$$\operatorname{sh} 0,37 = \frac{e^{0,37} - e^{-0,37}}{2} = \frac{1,44 - 0,69}{2} = \frac{0,75}{2} = 0,375$$

$$\operatorname{sh} 1,1 = \frac{3 - 0,33}{2} = 1,335$$

$$U_1 = 178 \times \frac{0,375}{1,335} = 49,5 \text{ KVe}_{\text{eff}}$$

Tension supportée par 2 éléments :

$$U_2 = 178 \frac{s. 0,74}{sh1,1}$$

$$sh0,74 = \frac{2,2 - 0,45}{2} = 0,82$$

$$U_2 = 178 \frac{0,82}{1,35} = 108,5 \text{ KVe}ff$$

Tension supportée par le 2e élément :

$$U_2 - U_1 = 108,5 - 49,5 = 57 \text{ KVe}ff$$

Tension supportée par le 3e élément (en contact avec la ligne)

$$U_3 - U_2 = 178 - 108,5 = 69,5 \text{ KVe}ff$$

N° de l'élément	tension supportée KVe}ff
1	69,5
2	57
3	49,5

Nous voyons ainsi qu'il n'y a pas la même tension entre les différents éléments de la chaîne et que l'isolateur qui est en contact de la ligne supporte plus du tiers de la tension totale et que cette tension va en décroissant.

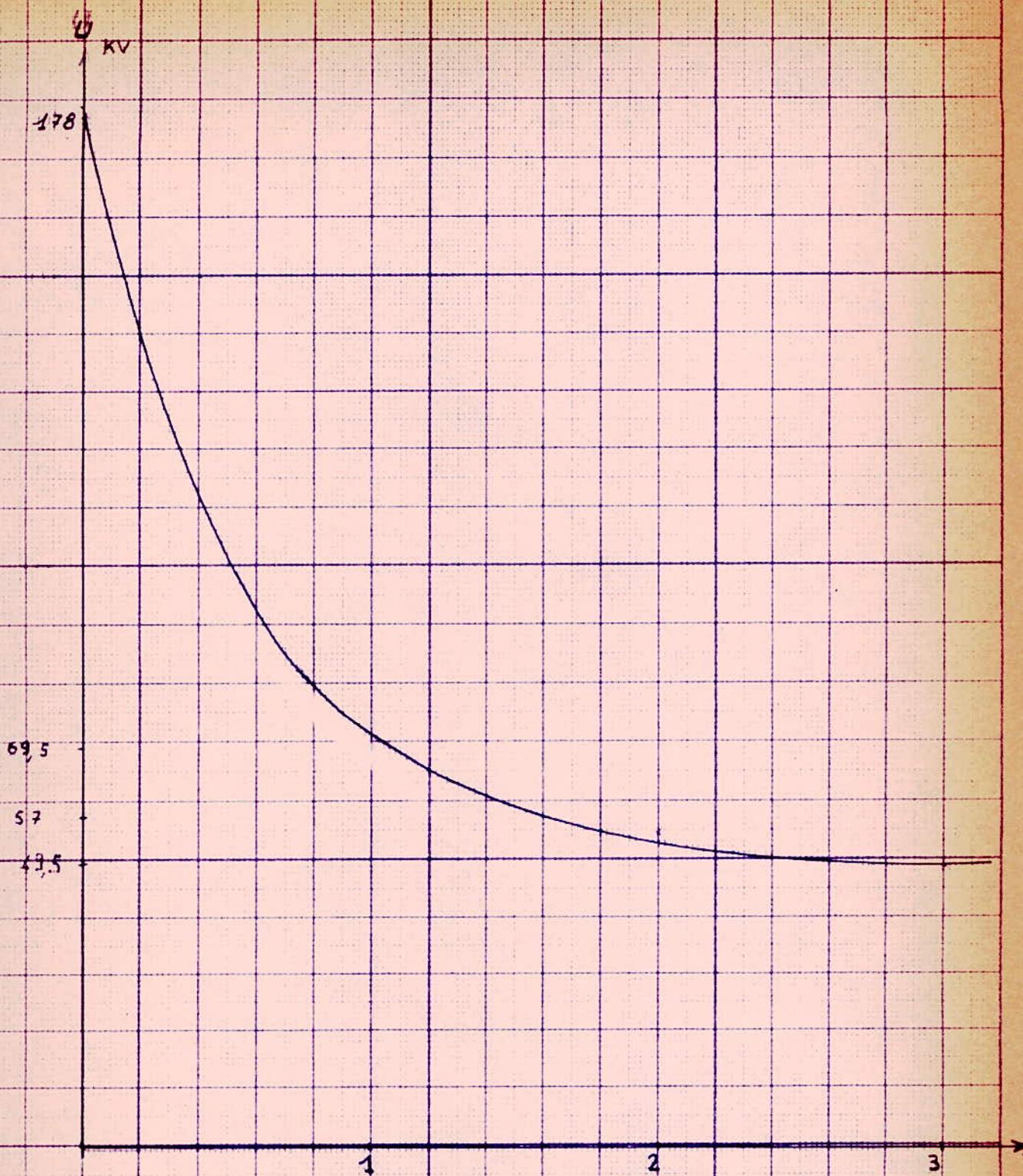
La conséquence pratique est l'abaissement de la tension d'amorçage de la chaîne.

Théoriquement, l'amorçage se produira pour la tension totale qui amènera l'isolateur de la ligne à sa tension de contournement à l'état isolé.

Rendement de la chaîne :

C'est le rapport entre la tension réellement supportée par la chaîne et celle qui paraît lui être appliquée si la répartition du potentiel était uniforme et égale, pour chaque élément à celle que supporte l'isolateur le plus voisin de l'isolateur

$$\gamma = \frac{U}{aU_a} = \frac{178}{3 \times 69,5} = \frac{178}{210} = 0,89$$



répartition des tensions dans une chaîne de 3 isolateurs

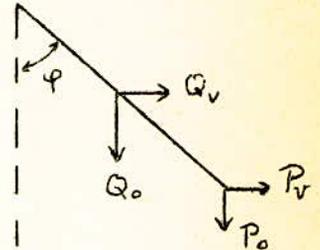
INCLINAISON DES CHAINES D'ISOLATEURS

La chaîne d'isolation prend sous l'influence du vent une certaine inclinaison qu'il est nécessaire de connaître.

1) Chaîne placée en alignement :

Désignons par :

- Pv effort du vent sur le conducteur
- Qo " " " sur la chaîne
- Po poids du câble
- Q " " de la chaîne
- λ la longueur de la chaîne



La position d'équilibre, en supposant que la chaîne est absolument rigide est donnée par l'équation :

$$\left(P_v + \frac{Q_v}{2} \right) \lambda \cos \varphi = \left(P_o + \frac{Q_o}{2} \right) \lambda \sin \varphi$$

$$\text{ou } \operatorname{tg} \varphi = \frac{P_o + \frac{Q_o}{2}}{P_v + \frac{Q_v}{2}}$$

Calcul de $\operatorname{tg} \varphi$:

$$P_v = 160 \times 48,96 \times 10,9 \cdot 10^{-3} = 84 \text{ kg}$$

$$P_o = 160 \times 2,70 \cdot 10^{-3} \times 93,3 = 40 \text{ kg}$$

$$Q_o = 12 \text{ kg}$$

$$Q_v = 72 \times S$$

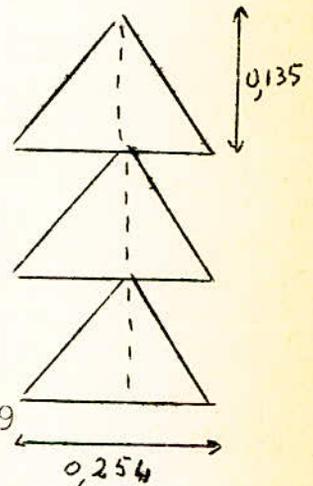
$$= \frac{0,135 \times 0,254}{2} = 0,034 \text{ m}^2$$

$$S = 3s = 0,1 \text{ m}^2$$

$$Q_v = 72 \times 0,1 = 7,2 \text{ kg}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{84 + 3,6}{40 + 6} = \frac{87,6}{46} = 1,9$$

$$\varphi = 62^\circ$$



2) Cas d'une chaîne placée en angle.

soit F l'effort exercé sur la chaîne par le conducteur

$$F = 2 T S \sin \frac{\beta}{2} + P_v \cos \frac{\beta}{2}$$

β étant l'angle de la ligne.

L'équation d'équilibre devient, en remarquant que l'action du vent peut s'exercer, soit dans le même sens, soit en sens inverse de la traction.

$$\left(2 T S \sin \frac{\beta}{2} + \left(P_v \cos \frac{\beta}{2} + \frac{Q_v}{2} \right) \right)$$

$$\text{ou } \operatorname{tg} \varphi = \frac{\quad}{P_o + \frac{Q_o}{2}}$$

Calcul de l'angle φ :

a) Pylone n° 51

$$2 T S \sin \frac{\beta}{2} = 2 \times 9,9 \times 93,3 \times 0,145 = 267 \text{ kg}$$

$$P_v \cos \frac{\beta}{2} = \frac{1}{2} 10,9 \cdot 10^{-3} \times 48,96 \times 450 = 120 \text{ kg}$$

$$P_o = 0,320 \times 2,7 \times 93,3 = 81 \text{ kg}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{267 + (120 + 3,6)}{81 + 6}$$

$$\text{tg } \varphi = 4,5$$

$$\varphi = 77^\circ$$

$$\text{tg } \varphi = 1,6$$

$$\varphi = 58^\circ$$

b) Pylone n° 58

$$2 T S \sin \frac{\beta}{2} = 300 \text{ kg}$$

$$P_v = 125 \text{ kg}$$

$$P_o = 0,298 \times 2,7 \times 93,3 = 75 \text{ kg}$$

$$= \frac{300 + (125 + 3,6)}{75 + 6}$$

$$\text{tg } \varphi = 4,3$$

$$\varphi = 77^\circ$$

$$\text{tg } \varphi = 2,1$$

$$\varphi = 64^\circ$$

c) Pylone n° 65

$$2 T S \sin \frac{\beta}{2} = 310 \text{ kg}$$

$$P_v = 85 \text{ kg}$$

$$P_o = 75 \text{ kg}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{310 + (85 + 3,6)}{75 + 6}$$

$$\text{tg } \varphi = 4,9$$

$$\varphi = 78^\circ$$

$$\text{tg } \varphi = 2,$$

$$\varphi = 70^\circ$$

d) Pylone n° 70

$$2 T S \sin \frac{\beta}{2} = 110 \text{ kg}$$

$$P_v = 95 \text{ kg}$$

$$P_o = 0,190 \times 2,7 \times 93 = 48 \text{ kg}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{110 + (93 + 3,6)}{48 + 6} \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{tg } \varphi_1 = 3,9 \\ \text{tg } \varphi_2 = 0,185 \end{array} \right\}$$

$$\varphi_1 = 75^\circ$$

$$\varphi_2 = 10^\circ$$

e) Pylone n° 75

$$2 \text{ TS} \sin \frac{\beta}{2} = 22 \text{ kg}$$

$$P_v = 125 \text{ kg}$$

$$P_o = 48 \text{ kg}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{22 + (125 + 3,6)}{48 + 6}$$

$$\begin{array}{l} \text{tg } \varphi_1 = 2,8 \\ \text{tg } \varphi_2 = -2 \end{array} \quad \begin{array}{l} \varphi_1 = 71^\circ \\ \varphi_2 = \end{array}$$

L'angle étant grand, il est nécessaire de prévoir des contre-poids sur chaque isolateur afin de réduire l'angle.

Détermination du contre-poids :

Nous constatons que l'angle que fait la chaîne par rapport à la verticale dans les sens transversal de la ligne est très grand. Pour y remédier à cela nous avons prévu un contre-poids sur l'isolateur. Ce contre-poids doit être calculer de manière à réduire l'angle.

La formule pour le calcul de contre-poids donnée par l'EGA est :

$$C = \frac{V + \frac{Q_v}{2}}{\text{tg } \varphi} - \sqrt{L^2 + P^2} \cdot \frac{Q}{2}$$

Q_v = effort du vent sur la chaîne en kg

Q poids de la chaîne

$$V = v \frac{a_{o_1} + a_{o_2}}{2}$$

v effort du vent par unité de longueur du conducteur
 a_{o_1} et a_{o_2} portée adjacentes au support considéré.

$$P = p \frac{a_{o_1} + a_{o_2}}{2} + \text{TS} \left[\frac{d_1}{a'_1} + \frac{d_2}{a'_2} \right]$$

p : poids unitaire du conducteur (kg/m)

a_1, a_2 : projection horizontale des portées réelles
 dénivellation des points d'attache des conducteurs

d_1, d_2 des portées adjacentes au support considéré .

a'_1, a'_2 nouvelles projections des portées réelles sous le vent

$$\begin{array}{l} a_1'^2 = a_1^2 + d_1 \sin^2 \varphi \\ a_2'^2 = a_2^2 + d_2 \sin^2 \varphi \end{array}$$

$$(L) = \pm \text{TS} \left\{ \frac{a'_1}{a'_1} - \frac{a'_2}{a'_2} \right\}$$

Calcul du contrepoids :

support n° 51

$$\begin{array}{lll}
 a_{o1} & = 230 \text{ m} & a_1 = 230 \text{ m} & d_1 = 0,21 \text{ m} \\
 a_{o2} & = 320 \text{ m} & a_2 = 318 \text{ m} & d_2 = 18,52 \text{ m} \\
 a_1 & = 230 \text{ m} & v = 0,525 \text{ kg/m} & \\
 a_2 & = 320 \text{ m} & p = 0,25 \text{ kg/m} &
 \end{array}$$

$$V = 0,525 \frac{230 + 320}{2} = 144 \text{ kg}$$

$$P = 0,25 \frac{230 + 320}{2} = 93,3 \times 9,9 \cdot 10^{-3} \left\{ \frac{0,21}{230} + \frac{18,52}{322} \right\}$$

$$P = 69 \text{ kg}$$

$$L = 93,3 \times 9,9 \cdot 10^{-3} (1 - 0,99) = 0,916$$

$$C = - \frac{144 + 3,6}{4,5} + \sqrt{(0,915)^2 + (69)^2} - 6$$

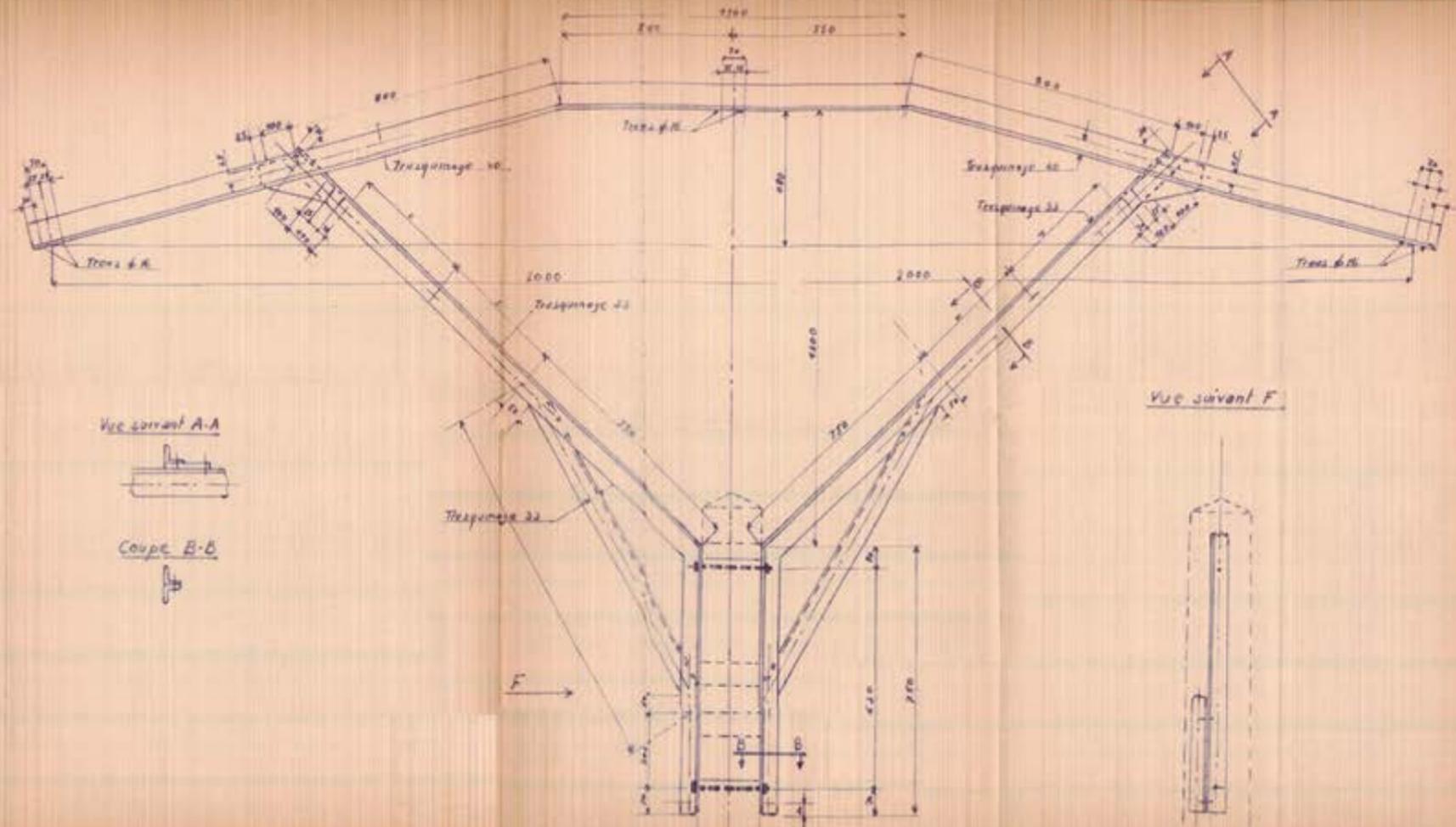
$$C = 42 \text{ kg}$$

Sur le support n° 51 il nous faudrait mettre un poids de 42 kg. ^{les}
 Pour les autres supports, le calcul se fait exactement de la même manière.

n° des supports	:	contrepoids (en kg)
58	:	24 kg
65	::	29 kg
70	:	26 kg
70	:	20 kg

C'est la valeur du poids à installer pour se trouver dans les mêmes conditions que pour les portées de niveau.

ARMEMENT N° 200
 POUR LIGNE M.T. 30KV
 POIDS TOTAL : 100 KG



Vue suivant A-A



Coupe B-B



Vue suivant F



ARMEMENTS

Le type d'armement employé est l'armement nappe voûte. Les ferrures de fixation des isolateurs sur les supports sont toujours en fer. Elles sont constituées, pour les isolateurs suspendus, par des anneaux.

Quand l'écartement des conducteurs ne peut être obtenu par les ferrures ellees-mêmes, on a recours à des pièces métalliques en forme de bras appelées armements.

Le choix des armements est fixé par les considérations électriques et mécaniques :

a) du point de vue électrique les conducteurs doivent être assez écartés pour que les pertes par effluve ne soient pas assez élevées. Il faut aussi que les armements éliminent tout risque d'amorçage entre conducteur et support.

b) du point de vue mécanique les conducteurs doivent être soumis à des surcharges et décharges accidentelles ainsi qu'à des balancements dissymétriques par vent fort.

Type d'armements :

Comme nous l'avons dit l'armement utilisé pour les supports normaux en ligne est d'une façon général l'armement nappe voûte.

Pour les supports d'arrêt ou d'angle, nous utiliserons de préférence l'armement triangle ou l'armement nappe.

Avantage de l'armement nappe voûte:

La surélévation des points d'attache des conducteurs permet de réduire la hauteur des supports.

En outre il est léger donc plus économique et plus facile à mettre en oeuvre ; il est élastique donc, dans le cas de rupture accidentelle des conducteurs, il se déforme et peut réduire la tension mécanique du conducteur non rompu, et le bras de levier du moment de torsion appliqué au support.

CALCUL D'UN SUPPORT EN BETON ARME

(Support n° 42)

Ces poteaux se trouvent à bon marché. Leur entretien est pratiquement inexistant. Ils n'exigent que des frais d'entretien extrêmement faibles, limités à un simple repiquage des points où se produirait à la longue un léger fendillement du béton.

Nous les emploierons dans ce cas car la tension en tête n'est pas assez élevée.

L'inconvénient est qu'ils ont un poids élevé ce qui rend difficile leur transport et leur montage.

Ces poteaux sont construits pour résister à des efforts au sommet compris entre 150 et 500 kg. Ils sont avantageux dans les lignes à grande étendue, mais ne sont employés que comme supports normaux.

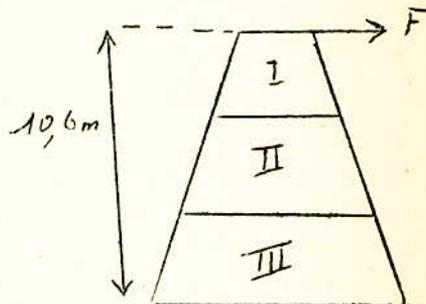
Pour les supports d'angle, nous emploierons des pylones métalliques car l'effort en tête est plus important.

Composition du béton employé :

400 kg de super béton
400 l. de sable
400 l. de gravier

Caractéristiques du support n° 42 :

Effort en tête 312 kg
Coefficient de sécurité : 3
Hauteur hors sol : 10,6 m
Profondeur d'implantation : $\frac{10,6}{10} + 0,6 = 1,12$ m



Divisons la partie hors sol en trois parties :

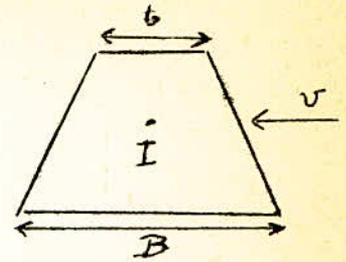
Section I : 1,5 m
Section II : 4,4 m
Section III : 4,7 m

Calcul des moments fléchissants :

Le moment fléchissant à la base de chaque section est égal à la somme des moments fléchissants dû à l'effort utile appliqué en tête et à l'effort du vent sur le poteau appliqué en son centre de gravité.

1) Section I :

$$M_f = F \times l + v.s. \times l \times \frac{1}{3} \times \frac{B + 2b}{B + b}$$



Nous supposons que l'effort du vent est appliqué au centre de gravité.

$$M_f = 312 \times 1,5 + 120 \times \frac{0,12}{2} \times \frac{0,146}{2} \times 1,5 \times 0,72$$

$$M_f = 470 + 16,9 = \underline{486,9 \text{ m.kg}}$$

2) Section II

$$M_f = 312 \times 4,4 + 120 \times \frac{0,12}{2} \times \frac{0,196}{2} \times 4,4 \times 2,02$$

$$M_f = 1370 + 165 = \underline{1\ 535 \text{ m.kg}}$$

3) Section III :

$$M_f = 312 \times 4,7 + 120 \times \frac{0,12}{2} \times \frac{0,293}{2} \times 4,7 \times 4,38$$

$$M_f = 1\ 470 + 510 = \underline{1\ 980 \text{ m. kg}}$$

Le béton résiste très bien aux efforts de compression, mais ne peut résister aux efforts de traction et de cisaillement. Pour cela nous emploierons un métal, qui généralement est l'acier.

En fonction du moment fléchissant nous allons calculer la section des armatures à employer avec béton.

La distance Y du centre de gravité de la section fictive à l'arête comprimée est :

$$by + 2 m \omega = \frac{b}{2} + m \omega a$$

$$Y = - 2 m \omega + \sqrt{\frac{4 m^2 \omega}{b^2} + \frac{2 m \omega a}{b}}$$

- m étant le rapport des modules
- a hauteur de la section
- ω la section des barres
- d distance de l'axe des armatures au bord
- b largeur de la section

Le moment de l'inertie I de la section fictive par rapport à l'axe neutre fictif s'obtient en calculant les moments d'inertie du béton I_b et des aciers $m I_a$.

$$I_b = \frac{b Y^3}{3}$$

$$m I_a = m (Y - d)^2 + m \omega (a' - Y)^2$$

$$I = I_b + m I_a = \frac{b Y^3}{3} + m (Y - d)^2 + m \omega (a' - Y)^2$$

$$\text{avec } a' = a - d$$

Calcul des armatures :

Prenons $\bar{d} = 2,6$ cm.

La contrainte du béton est donnée par des essais faits au laboratoire pendant 28 jours.

$$\sigma_{28} = 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_b = 0,3 \sigma_{28} = 0,3 \times 300 = 90 \text{ kg/cm}^2$$

Contrainte de l'acier $\sigma_{AK}' = 2700 \text{ kg/cm}^2$

$$\sigma_a' = \frac{2}{3} \sigma_{AK}' = 1800 \text{ kg/cm}^2$$

La section des armatures est donnée par les formules :

$$A' = \frac{M^t}{Bh \sigma_a'}$$

h hauteur utile = a - d

$$\beta' = 1 - \frac{\alpha}{3} \text{ et } \alpha = \frac{m \sigma_b}{m \sigma_b + \sigma_a'}$$

Section I :

Prenons $m = 15$

$$\alpha = \frac{15 \times 90}{15 \times 90 + 1800} = \frac{1350}{3150} = 0,43$$

$$\beta = 1 - \frac{0,43}{3} = 1 - 0,144 = 0,856$$

$$A' = \frac{48690}{0,856 \times 1800 \times 14,8} = 210 \text{ mm}^2$$

2 barres de 12 mm de diamètre.

Calcul de vérification :

Soit :

$$\omega = 2,1 \text{ cm}^2$$

$$d = 2,6 \text{ cm}$$

$$a = 20 \text{ cm}$$

$$b = 14,6 \text{ cm}$$

$$m = 15$$

$$Y = \frac{-2 \times 15 \times 2,1 + \sqrt{(2 \times 15 \times 2,1)^2 + 2 \times 15 \times 2,1 \times 14,6 \times 20}}{14,6}$$

$$Y = \frac{-63 + \sqrt{950 + 18\,400}}{14,6} = \frac{-63 + 149}{14,6} = \frac{86}{14,6}$$

$$Y = 5,9 \text{ cm}$$

Module d'inertie de la section fictive :

$$I = \frac{14,6 \times (5,9)^3}{3} + 15 \times 2,1 (5,9 - 2,6)^2 + 15 \times 2,1 (20 - 2,6 - 5,9)^2$$

$$I = \frac{3\,000}{3} + 31,6 (11 + 132) = 1\,000 + 4\,500$$

$$I = 5\,500 \text{ cm}^4$$

Contrainte maximum du béton :

$$R_b = \frac{48\,690}{5\,500} \times 5,9 = 52 \text{ kg/cm}^2$$

Ceci est bien vérifiée car nous avons $R_b < \sigma_b$

Contrainte maximum des aciers tendus :

$$R'_a = 15 \frac{48\,690}{5\,500} \times (20 - 2,6 - 5,9) = 1\,530 \text{ kg/cm}^2$$

Dans ce cas nous avons aussi $R'_a < \sigma'_a$

Section II :

Pour la section II j'ai prévu une partie évidée.
Prenons comme épaisseur de béton $\varepsilon = 7 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} d &= 2,6 \text{ cm} \\ a &= 29,6 \text{ cm} \\ b &= 19,5 \text{ cm} \\ \alpha &= 0,43 \\ \beta &= 0,856 \end{aligned}$$

La section étant évidée on a :

$$a - \varepsilon = 29,6 - 7 = 22,6 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{hauteur utile} \\ 22,6 - 2,6 &= 20 \text{ cm} \end{aligned}$$

Calcul de la section des armatures :

$$A' = \frac{153\,500}{0,856 \times 1\,800 \times 20} = 500 \text{ mm}^2 \quad A' = 5 \text{ cm}^2$$

4 barres de 12 mm et 1 de 8 mm

- 47 -

Calcul de vérification :

$$Y = \frac{1}{2} \cdot \frac{b \xi^2 + 2 m \omega a}{b \xi + 2 m \omega}$$

$$Y = \frac{1}{2} \frac{19,5^2 + 49 + 2 \times 15 \times 5 \times 29,6}{19,5 \times 7 + 2 \times 15 \times 5}$$

$$Y = \frac{1}{2} \frac{955 + 3750}{136 + 120} \quad \boxed{Y = 8,9 \text{ cm}}$$

Module d'inertie de la section fictive :

$$I = \frac{b}{3} \left[Y^3 - (Y - \xi)^3 \right] + m \omega (Y - d)^2 + m \omega (a - d - Y)^2$$

$$I = \frac{19,5}{3} \left[(8,9)^3 - (8,9 - 7)^3 \right] + 15 \times 5 (8,9 - 2,6)^2 + 15 \times 5 (29,6 - 2,6 - 8,9)^2$$

$$I = \frac{19,5}{3} \times 693,2 + 60 \times 365$$

$$I = 22\,000 + 4500 = 26\,500 \quad I = 26\,500 \text{ cm}^4$$

Contrainte maximum du béton :

$$R'_b = \frac{153\,500}{26\,500} \times 8,9 = 52 \text{ kg/cm}^2$$

Nous avons bien $R_b < \sigma_b$

Contrainte maximum des aciers tendus :

$$R'_a = 15 \times \frac{153\,500}{26\,500} (27 - 8,9)$$

$$R'_a = 1\,570 \text{ kg/cm}^2 \quad R'_a < \sigma'_a$$

Section III :

C'est une section pleine. Le calcul se fait comme pour le calcul de la section I.

$$\begin{aligned} d &= 2,8 \text{ cm} \\ a &= 48,8 \text{ cm} \\ b &= 29,3 \text{ cm} \\ h &= 43,2 \text{ cm} \\ \alpha &= 0,43 \\ \beta &= 0,856 \end{aligned}$$

Section des armatures :

$$A' = \frac{198\,000}{0,856 \times 1\,800 \times 43,2} = 3 \text{ cm}^2$$

2 barres de 12 mm de diamètre et 2 de 8 mm

Calcul de vérification :

$$Y = \frac{-2 \times 15 \times 3 + \sqrt{(2 \times 15 \times 3)^2 + 2 \times 15 \times 3 \times 29,3 \times 48,8}}{29,3}$$

$$Y = 9,6 \text{ cm}$$

Moment d'inertie :

$$I = \frac{29,3 (9,6)^2}{3} + 15 \times 3 (9,6 - 2,8)^2 + 15 \times 3 (48,8 - 2,8 - 9,6)^2$$

$$I = 62\,900 \text{ cm}^4$$

Contrainte maximum du béton :

$$R_b = \frac{198\,000}{62\,900} \times 9,6 = 30 \text{ kg/cm}^2 \quad R_b < \sigma_b$$

Contrainte maximum des aciers tendus :

$$R_a = 15 \times \frac{198\,000}{62\,900} (48,8 - 2,8 - 9,6) = 1\,720 \text{ kg/cm}^2$$

$$R'_a < \sigma_a$$

FONDATEIONS

Les supports des lignes électriques sont implantés dans le sol et doivent être maintenus dans la position d'équilibre pour des efforts qui sont susceptibles de leur être appliqués. Pour cela nous devons faire apparaître un coefficient de stabilité qui est défini comme le rapport du moment de stabilité au moment de renversement. Pour les poteaux en béton, les massifs ont généralement des dimensions très restreintes, de sorte que la stabilité propre est négligeable. La stabilité est, par conséquent toute entière due à la réaction des terres qui se traduit par une poussée ou par une pression.

Effort du vent sur le support :

$$F_v = 120 \times S = 120 \times \frac{B + b}{2} \times L$$

$$F_v = 120 \times \frac{0,12 \times 0,293}{2} \times 10,6$$

$$F_v = 264 \text{ kg}$$

Moment de renversement dû au vent :

$$m_v^t = 264 \times \frac{10,6}{3} \times \frac{0,293 + 2 \times 0,12}{0,293 + 0,12}$$

$$m_v^t = 1\ 220 \text{ M} \cdot \text{kg};$$

Moment de renversement dû à F.

$$m_F^t = 312 \times (10,6 + 1,12) = 3\ 700 \text{ M} \cdot \text{kg}$$

Moment de renversement total

$$3\ 700 + 1\ 220 = 4\ 920 \text{ m} \cdot \text{kg}$$

Calcul des dimensions du massif.

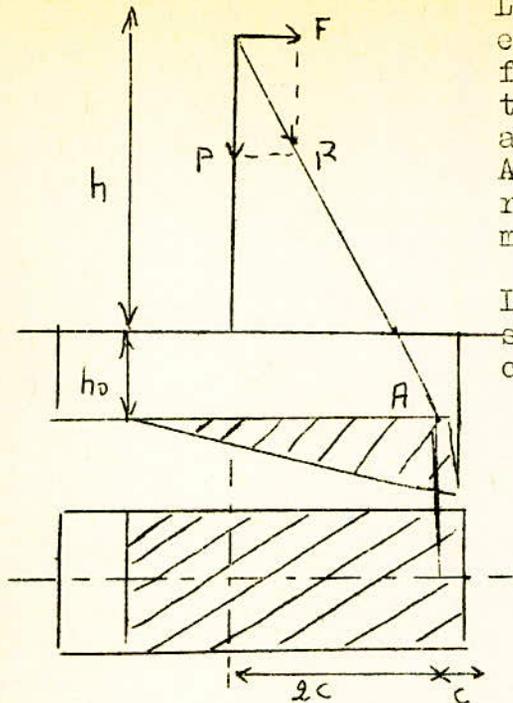
soit a le coté du massif, à base carré et par S_b la densité du béton en kg/m^3 .

Le moment de stabilité par rapport à l'arête comprimée a pour expression

$$M_s = \frac{a}{2} (P + a^2 h_0 \gamma)$$

h_0 étant la profondeur d'implantation
supposons que notre massif sur une tasse dont la pression est

$$P_3 = 25\ 000 \text{ kg}/\text{m}^2$$



La composante horizontale F est équilibrée en A par le frottement de la face inférieure du massif. La composante verticale doit être équilibrée par la réaction des terres comprimées. Admettons que la pression sur le sol se répartit sur une partie de la base du massif ayant pour côté b et $\frac{2}{3}c$.

La somme des réactions verticales du sol doit être égale et opposée à la charge verticale P :

$$P = \frac{2}{3} bc \frac{P_3}{2}$$

b après la figure nous avons :

$$\frac{\frac{a}{2} - c}{h + h_0} = \frac{F}{P}$$

En éliminant c entre ces équations il vient :

$$P_3 = \frac{2}{3} \frac{P}{b} \frac{1}{\frac{a}{2} - \frac{M}{P}} \quad M = F (h + h_0)$$

$$\text{ou } M = P \frac{a}{2} - \frac{2}{3} \frac{P}{b} P_3$$

Supposons que le poids P soit constitué uniquement par le massif. Ce poids P aura ainsi pour expression

$$P = \delta_b h_0 a^3 \quad \text{en prenant } (a = b)$$

Portons ceci dans la valeur de P_3 , il vient :

$$P_3 = \frac{4}{3} \frac{\delta_b^2 h_0^2 a^3}{\delta_b h_0 a^3 - 2M}$$

Connaissant P_3 d'après la nature du sol, on peut calculer a

$$a^3 = \frac{2MP_3}{\sum h_c (P_3 - \frac{4}{3} \delta_h h_c)}$$

So étant la densité du béton = 2 200 kg/m³
 ho = 1,12

$$a^3 = \frac{2 \times 4\,920 \times 25\,000}{2\,200 \times 1,12 (25\,000 - \frac{4}{3} \times 2\,200 \times 1,12)}$$

$$a^3 = \frac{2 \times 4\,920 \times 25\,000}{2\,470 \times 22\,700} = 4,4 \text{ m}^3$$

a = 1,64 m } adoptons a = 1,7 m

volume du massif.

$$1,7 \times 1,7 \times 1,112 = 3,25 \text{ m}^3$$

Poids du massif

$$2\,200 \times 3,25 = 7\,150 \text{ kg.}$$

Calculons le poids du pylone.

volume de la section I

$$\left(\frac{0,12 + 0,146}{2} \right)^2 \times 1,5 = 0,028 \text{ m}^3$$

volume de la section II

$$0,07 \times \frac{0,195 + 0,146}{2} \times 4,4 \times 4 = 0,021 \text{ m}^3$$

volume de la section III

$$\left(\frac{0,293 + 0,195}{2} \right) \times 4,7 = 0,24 \text{ m}^3$$

volume total du support.

$$0,24 + 0,0021 + 0,028 = 0,289 \text{ m}^3 \neq 0,29 \text{ m}^3$$

Poids du support :

$$2\,200 \times 0,29 = \underline{530} \text{ kg}$$

Poids des isolateurs : 36 kg.

Poids des conducteurs : 120 kg.

Poids P en tenant des isolateurs et des conducteurs :
 530 + 120 + 36 = 686 kg.

Poids total

$$686 + 7\,150 = 7836 \text{ kg.}$$

Moment de stabilité propre.

$$M_{A_2} = P \times \frac{a}{2} = 7\,836 \times \frac{1,7}{2} = 6\,650 \text{ m. kg}$$

Moment de stabilité négatif dû à la réaction des terres

$$M_A = M_{A_1} + M_{S_1} = \frac{2}{3} \times \frac{(7836)^2}{1,2 \times 2500} = -960 \text{ m. kg.}$$

D'Où le rapport :

$$\gamma_2 = \frac{5\ 690}{4\ 920} = 1,15$$

Ce coefficient étant légèrement supérieur à 1, il convient à la fondation d'un support en ligne normale.

En principe ce coefficient est fixé à 1 quelque soit la zone considérée, et ceci afin d'assurer une stabilité convenable dans le cas d'une rupture accidentelle de conducteurs, des supports travaillant au coefficient de sécurité correspondant à leur limite d'élasticité.

BIBLIOGRAPHIE

Installation Electrique

MAUDUIT

Calcul des lignes electriques

LAVANCHY

Brousse E N S E E H T

Cours de M^r WADJIH