

4/80

UNIVERSITE des SCIENCES et de la TECHNOLOGIE d'ALGER

lex

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE



PROJET de FIN d'ETUDES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

METHODE de CALCUL d'une LIGNE AERIENNE
 TRES HAUTE TENSION de TRANSPORT de l'ELECTRICITE
 APPLICATION a l'ETUDE de la LIGNE 220 KV
 M'SILA-BOUIRA

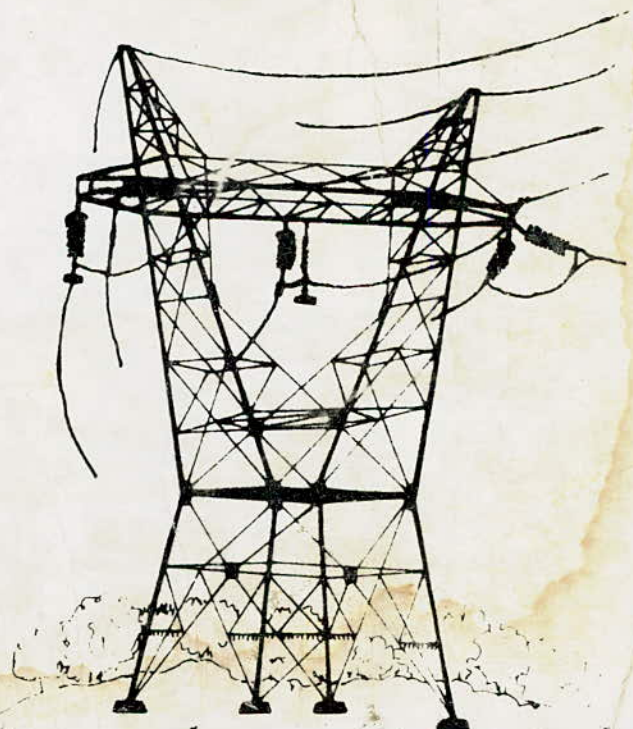
Proposé par :

SONELGAZ Direction de l'Engineering
 Service "Reseau Haute Tension"

Etudié par :

A. BOUAFIR

M.C. BOUMGHAR



A la mémoire de ma mère,
A mon père, mes frères et sœurs,
A mes amis (es).

A. BOUAFIR.

A mes parents,
A mes frères,
A mes amis (es)

M. C. BOUMGHAR

Nous tenons à remercier notre promoteur M^r Deras
qui, par ses conseils, nous a permis de mener à
bien cet ouvrage, ainsi que tout le personnel du service
"Lignes" de la SONELGAZ.

De même nous n'oublions pas tous les enseignants qui
ont contribué à notre formation.

الدراسة لوظيفة
— المكتبة —
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

JAN 80

Sommaire.

1. Partie : Introduction.

2. Partie : Aspects électriques d'une ligne aérienne HT.

Chapitre 1: Fondements théoriques du calcul électrique.

1. Mise en équation d'une ligne à constantes réparties: 3
2. Schéma équivalents: 6
3. Grandeurs caractéristiques de la ligne: 8

Chapitre 2: Problèmes relatifs aux lignes aériennes.

1. Effet couronne et ses perturbations: 13
2. Dispositions relatives des conducteurs entre eux et par rapport aux supports: 15
3. Symétrie électrique de la ligne: 18
4. Influence du parallélisme entre deux lignes: 19
5. Pollution: 19

Chapitre 3: Isolateurs.

1. Différents types d'isolateurs utilisés: 21
2. Caractéristiques des isolateurs utilisés: 22
3. Choix du type et du nombre d'isolateurs: 24
4. Distribution du potentiel le long d'une chaîne d'isolateurs: 24

Chapitre 4: Choix du conducteur.

1. Caractéristiques des câble à étudier: 28
2. Calcul des grandeurs caractéristiques de la ligne: 29
3. Méthode de calcul: 33

3^e Partie: Aspects mécaniques d'une ligne aérienne HT.

Chapitre 5: Fondements théoriques du calcul mécanique.

| | |
|---|----|
| 1. Equation d'équilibre de la chaînette: | 38 |
| 2. Etablissement des formules fondamentales: | 40 |
| 3. Equation de changement d'état d'un conducteur: | 44 |
| 4. Généralisation de l'équation de changement d'état: | 46 |

Chapitre 6: Répartition.

| | |
|---|----|
| 1. Répartition et ses problèmes: | 48 |
| 2. Choix du paramètre de répartition: | 49 |
| 3. Types de pylônes utilisés: | 53 |
| 4. Conclusion: | 56 |

Chapitre 7: Détermination des tensions aux différentes hypothèses.

| | |
|--|----|
| 1. Portées mécaniques: | 57 |
| 2. Tensions unitaires dans les conducteurs: | 58 |
| 3. Tensions de pose: | 60 |
| 4. Tensions unitaires dans les conducteurs aux points d'appui: | 60 |

Chapitre 8: Vérifications de la tenue des pylônes.

| | |
|--|----|
| 1. Définitions: | 62 |
| 2. Principe de la vérification: | 63 |
| 3. Calcul des contre-poids éventuels: | 65 |
| 4. Vérifications de la tenue mécanique des chaînes d'isolateurs: | 67 |

Chapitre 9: Calcul des traversées.

| | |
|-----------------------------|----|
| 1. Généralités: | 69 |
| 2. Méthode de calcul: | 69 |

Chapitre 10: Câble de garde.

1. Utilité et emplacement du câble de garde : 74
2. Choix du paramètre de répartition du câble de garde : 74
3. Caractéristiques du câble de garde utilisé : 75
4. Vérifications des tensions dans le câble de garde : 75

4. Partie: Réflexions sur les lignes aériennes HT

Annexes

Bibliographie.

1^{ere} PARTIE: Introduction

Introduction

Cette étude, proposée par le service "Réseau Haute Tension" de la SONELGAZ, a pour objet :

Méthode de calcul d'une ligne aérienne très haute tension de transport de l'électricité.

Application à l'étude de la ligne 220KV M'vila - Bouira.

Une ligne aérienne très haute tension de transport de l'électricité est un édifice important du réseau de transport de l'électricité d'un pays.

Elle a pour durée de vie administrative d'une quarantaine d'années et fonctionne souvent jusqu'à sa mort technique.

Ces considérations amènent les techniciens à s'entourer du maximum de précautions dans la limite de l'optimum économique de façon à ce que la ligne rende le service attendu dans les meilleures conditions.

Nous nous proposons tout au long de cette étude de passer en revue :

- Dans une première partie les fondements théoriques qui sont à la base de toute étude de calcul de ligne.

Il s'agira des aspects touchant le fonctionnement électrique de la ligne.

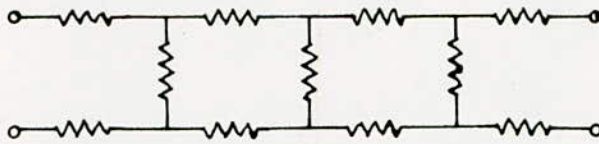
- Dans une dernière partie, les aspects mécaniques qui déterminent les critères nécessaires à la réalisation d'une ligne fiable et sûre.

Fondements théoriques du Calcul électrique.

1. Mise en équations d'une ligne à constantes réparties:

a). Définition:

Une ligne à constantes réparties (ou paramètres distribués) est un circuit électrique de longueur finie dont tout élément, si petit soit-il, donne lieu à la fois à une variation de la tension dans le sens longitudinal et à une dérivation du courant dans le sens transversal (courant de fuite). Une représentation schématique d'un tel circuit serait:



On remarque immédiatement que c'est un quadripôle. Dans le cas réel, tout circuit est à constantes réparties, mais il arrive que l'on soit amené à négliger soit la dérivation des courants transversale par rapport au courant total traversant les éléments longitudinaux, soit les variations de tension longitudinales vis-à-vis de la différence de potentiel entre les conducteurs du circuit. Nous obtenons dans les deux cas des circuits à constantes localisées.

En ce qui concerne une ligne aérienne, de telles approximations ne sont plus justifiées. En effet, la longueur des conducteurs est telle que leurs impédances causent des variations de tensions longitudinales non négligeables (chute de tension). D'autre part, la hauteur des conducteurs par rapport au sol, nous contraint à tenir compte des courants de fuite, vu que l'air constitue un diélectrique.

Nous sommes donc tenus à considérer comme non négligeable la répartition des constantes le long de la ligne. Cependant nous ferons deux approximations:

— Nous considérons que tous les éléments de la ligne ont, par unité de longueur, les mêmes constantes électriques désignées sous le nom de constantes linéiques.

— Pour pouvoir définir une inductance et une capacité linéique il est nécessaire de considérer que la longueur des conducteurs est très grande vis à vis de la dimension de ceux-ci et des distances qui les séparent.

b). Mise en équations et résolution:

Nous raisonnons toujours sur une seule phase (il sera de même pour les autres).

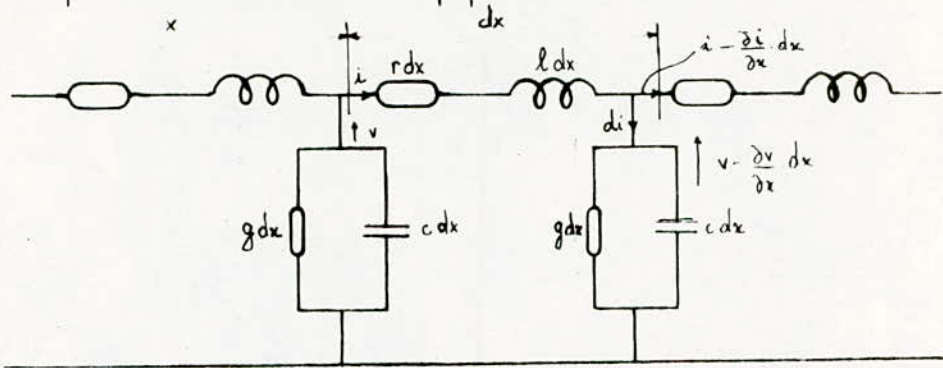
La ligne étant considérée homogène, on peut la caractériser donc par ces grandeurs linéiques:

2^{eme} PARTIE

Aspects Electriques D'une
Ligne Aérienne H T

r, g, l, c qui sont bien définies. Prendre l et c constantes est justifiable puisque la ligne est assez longue pour pouvoir négliger les effets d'extrémités. Par contre, considérer r et g constantes serait plutôt injustifiable vu que ces paramètres dépendent essentiellement des conditions atmosphériques. Cependant l'erreur commise est négligeable compte tenu du fait que les grandeurs essentielles de fonctionnement de sont l et c .

Isolons une portion dx du circuit total et proposons nous de l'étudier



Si nous considérons la maille de longueur dx , d'après la deuxième loi de Kirchhoff on peut écrire :

$$v + r dx i + l \frac{\partial i}{\partial t} dx - v + \frac{\partial v}{\partial x} dx = 0$$

En simplifiant et après la division par dx on obtient :

$$- \frac{\partial v}{\partial x} = r i + l \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

La première loi de Kirchhoff nous permet d'écrire :

$$i = di + i - \frac{\partial i}{\partial x} dx \quad (2)$$

Le courant di est la somme des courants circulant dans la conductance $g dx$ et la capacité $c dx$.

$$d'où : - di = \left(v - \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) g dx + \frac{\partial}{\partial t} \left(v - \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) c dx$$

En négligeant les infiniment petits du second ordre il vient que :

$$- di = g v dx + c dx \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3)$$

En portant la valeur (3) dans l'expression (2) on obtient :

$$- \frac{\partial i}{\partial x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t} \quad (4)$$

Les équations (1) et (4) constituent les équations différentielles fondamentales d'une ligne à constantes réparties. C'est le système d'équations des télégraphistes.

Résolution du système d'équations suivant :

$$- \frac{\partial v}{\partial x} = r i + l \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1)$$

$$- \frac{\partial i}{\partial x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2)$$

Pour résoudre ce système d'équation nous nous plaçons dans le cas où le courant et la tension sont des fonctions sinusoïdales du temps. Posons pour cela :

$$v = V_m \sin(\omega t + \phi_v) = \bar{V} e^{j\omega t}$$

$$\text{avec } \bar{V} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi_v}$$

$$\text{de la même façon } i = I_m \sin(\omega t + \phi_i) = \bar{I} e^{j\omega t} \quad \text{avec } \bar{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi_i}$$

Les grandeurs complexes \bar{V} et \bar{I} sont des fonctions de la distance x mais pas du temps et le facteur $e^{j\omega t}$ dépend du temps mais ne dépend pas de x . Cela nous permettra d'écrire :

$$(1) -\frac{\partial v}{\partial x} = r i + l \frac{\partial i}{\partial t} \quad \text{devient :} \quad -\frac{\partial \bar{V} e^{j\omega t}}{\partial x} = r \bar{I} e^{j\omega t} + l \frac{\partial \bar{I} e^{j\omega t}}{\partial t}$$

$$-e^{j\omega t} \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = r \bar{I} e^{j\omega t} + j\omega l e^{j\omega t} \bar{I}$$

$$\text{d'où} \quad -\frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = (r + j\omega l) \bar{I} = \bar{z} \bar{I}$$

$$\text{De la même façon : (2) } -\frac{\partial i}{\partial x} = g v + c \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{devient :} \quad -\frac{\partial \bar{I} e^{j\omega t}}{\partial x} = g \bar{V} e^{j\omega t} + c \frac{\partial \bar{V} e^{j\omega t}}{\partial t}$$

$$-e^{j\omega t} \frac{\partial \bar{I}}{\partial x} = g \bar{V} e^{j\omega t} + j\omega c \bar{V} e^{j\omega t}$$

$$\text{d'où} \quad -\frac{\partial \bar{I}}{\partial x} = (g + j\omega c) \bar{V} = \bar{y} \bar{V}$$

avec $\bar{z} = r + j\omega l$ l'impédance linéique.

$\bar{y} = g + j\omega c$ l'admittance linéique.

Nous obtenons donc le nouveau système : $-\frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = (r + j\omega l) \bar{I} = \bar{z} \bar{I}$ (1')

$$-\frac{\partial \bar{I}}{\partial x} = (g + j\omega c) \bar{V} = \bar{y} \bar{V} \quad (2')$$

En dérivant (1') par rapport à x il vient : $-\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} = \bar{z} \frac{\partial \bar{I}}{\partial x}$

$$\text{ou} \quad \frac{\partial \bar{I}}{\partial x} = -\bar{y} \bar{V} \quad \text{d'où} \quad -\frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} = -\bar{z} \bar{y} \bar{V} \quad \text{donc} \quad \frac{\partial^2 \bar{V}}{\partial x^2} = \bar{z} \bar{y} \bar{V} \quad (3')$$

On reconnaît une équation différentielle linéaire du second ordre dont la solution est de la forme :

$$\bar{V} = \bar{A}_1 e^{\bar{\gamma} x} + \bar{A}_2 e^{-\bar{\gamma} x} \quad (4') \quad \text{avec} \quad \bar{\gamma} = \sqrt{\bar{z} \bar{y}}$$

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta$$

où α : coefficient d'affaiblissement de l'onde incidente par unité de longueur de la ligne.

β : coefficient de phase ; il caractérise la variation de la phase de l'onde incidente par unité de longueur de la ligne.

$$\text{De même :} \quad -\frac{\partial \bar{V}}{\partial x} = \bar{z} \bar{I}$$

$$\text{d'où} \quad \bar{I} = -\frac{1}{\bar{z}} \frac{d\bar{V}}{dx} \quad \text{ou} \quad \frac{d\bar{V}}{dx} = \bar{y} (\bar{A}_1 e^{\bar{\gamma} x} - \bar{A}_2 e^{-\bar{\gamma} x})$$

$$\text{d'où} \quad \bar{I} = \frac{\bar{y}}{\bar{z}} (\bar{A}_2 e^{-\bar{\gamma} x} - \bar{A}_1 e^{\bar{\gamma} x}) \quad (5')$$

La grandeur $\bar{z}/\bar{y} = \frac{\bar{z}}{\sqrt{\bar{z} \bar{y}}} = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}}$; ayant les dimensions d'une résistance et désignée par Z_c

et s'appelle impédance caractéristique d'onde : $Z_c = \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}} = z_c e^{j\theta_c}$

Déterminons les expressions A_1 et A_2 .

Désignons par x , comme auparavant la distance entre le commencement de la ligne et le point considéré sur cette ligne. Supposons qu'au commencement de la ligne, c'est à dire pour $x=0$, la tension soit égale à \bar{V}_1 et le courant à \bar{I}_1 . Écrivons les équations pour le calcul de A_1 et A_2 en partant de \bar{V}_1 et \bar{I}_1 . Donc en faisant $x=0$ dans les équations (4)' et (5)' on obtient :

$$\bar{V}_1 = \bar{A}_2 + \bar{A}_1 \quad (6)'$$

$$\bar{Z}_c \bar{I}_1 = \bar{A}_2 - \bar{A}_1 \quad (7)'$$

En faisant (6)' - (7)' d'où $\bar{V}_1 - \bar{Z}_c \bar{I}_1 = 2\bar{A}_1$ d'où $\bar{A}_1 = \frac{\bar{V}_1 - \bar{Z}_c \bar{I}_1}{2} = A_1 e^{j\psi_1}$

De la même façon en faisant (6)' + (7)' d'où $\bar{V}_1 + \bar{Z}_c \bar{I}_1 = 2\bar{A}_2$ d'où $\bar{A}_2 = \frac{\bar{V}_1 + \bar{Z}_c \bar{I}_1}{2} = A_2 e^{j\psi_2}$

avec A_1 et A_2 les modules respectifs de \bar{A}_1 et \bar{A}_2 aussi ψ_1 et ψ_2 les arguments respectifs de \bar{A}_1 et \bar{A}_2

En portant ces valeurs dans l'équation (4)' :

$$\bar{V} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{Z}_c \bar{I}_1}{2} e^{\gamma x} + \frac{\bar{V}_1 + \bar{Z}_c \bar{I}_1}{2} e^{-\gamma x} = \bar{V}_1 \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} - \bar{Z}_c \bar{I}_1 \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

ou $\text{ch } \gamma x = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}$ et $\text{sh } \gamma x = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$

Par conséquent il vient que : $\bar{V} = \bar{V}_1 \text{ch } \gamma x - \bar{Z}_c \bar{I}_1 \text{sh } \gamma x$

En substituant ces valeurs \bar{A}_1 et \bar{A}_2 dans l'équation (5)' d'une façon analogue on obtient :

$$\bar{I} = \bar{I}_1 \text{ch } \gamma x - \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_c} \text{sh } \gamma x$$

Soit l la longueur de la ligne. Supposons qu'à l'extrémité de la ligne c'est à dire $x=l$, la tension soit égale à \bar{V}_2 et le courant à \bar{I}_2 . En faisant dans les équations (4)' et (5)' $x=l$ on obtient :

$$\bar{V}_2 = \bar{A}_2 e^{-\gamma l} + \bar{A}_1 e^{\gamma l} \quad (8)'$$

$$\bar{Z}_c \bar{I}_2 = \bar{A}_2 e^{-\gamma l} - \bar{A}_1 e^{\gamma l} \quad (9)'$$

En combinant les équations (8)' et (9)' on obtient : $\bar{A}_1 = \frac{\bar{V}_2 - \bar{Z}_c \bar{I}_2}{2} e^{+\gamma l} = A_1 e^{j\psi_1}$

et $\bar{A}_2 = \frac{\bar{V}_2 + \bar{Z}_c \bar{I}_2}{2} e^{-\gamma l} = A_2 e^{j\psi_2}$

En substituant ces valeurs dans les équations (4)' et (5)' on obtient :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 \text{ch } \gamma l + \bar{Z}_c \bar{I}_2 \text{sh } \gamma l$$

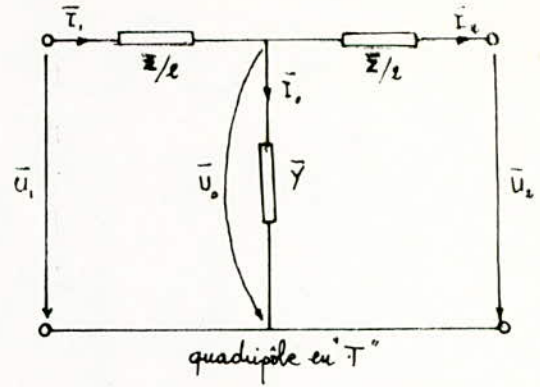
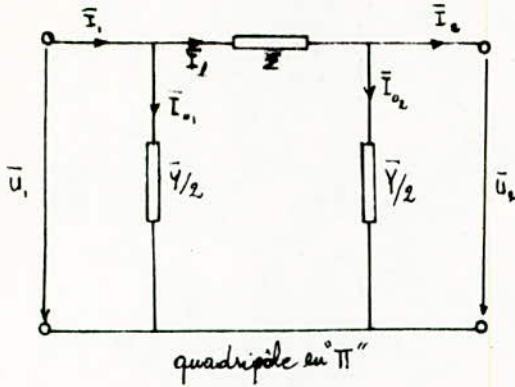
$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}_c} \text{sh } \gamma l + \bar{I}_2 \text{ch } \gamma l$$

Ces équations relient les grandeurs au début de ligne aux grandeurs en fin de ligne.

2° - Schémas équivalents :

Comme la plupart des appareils à courants alternatifs, les lignes à constantes réparties

peuvent être remplacées du point de vue de leurs propriétés électriques par un circuit équivalent fictif plus simple à étudier. On a montré qu'une ligne à constantes réparties peut donner lieu à deux types de circuits équivalents qu'on appelle schéma en "π" ou en "T" ceci par analogie avec la disposition des branches correspondantes.



On a trouvé précédemment que la tension de départ s'exprime en fonction de la tension d'arrivée (c'est à dire tension en début de ligne et tension en fin de ligne). Soit U_1 et U_2 ces deux tensions.

d'après ce qui précède on a :

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{U}_2 \operatorname{ch} \bar{\gamma} l + \bar{Z}_c \bar{I}_2 \operatorname{sh} \bar{\gamma} l \\ \bar{I}_1 &= \frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_c} \operatorname{sh} \bar{\gamma} l + \bar{I}_2 \operatorname{ch} \bar{\gamma} l \end{aligned}$$

Les équations d'un quadrupôle sont de la forme :

$$\bar{U}_1 = A \bar{U}_2 + B \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = C \bar{U}_2 + D \bar{I}_2$$

Il nous alors :

$$\begin{aligned} A &= \operatorname{ch} \bar{\gamma} l & C &= \frac{1}{\bar{Z}_c} \operatorname{sh} \bar{\gamma} l \\ B &= \bar{Z}_c \operatorname{sh} \bar{\gamma} l & D &= \operatorname{ch} \bar{\gamma} l \end{aligned}$$

On a alors :

$$D = A = \operatorname{ch} \bar{\gamma} l = \operatorname{ch} \sqrt{\bar{\gamma} \bar{\gamma}} \cdot l = \operatorname{ch} \sqrt{\bar{\gamma} \cdot l \cdot \bar{\gamma} \cdot l} = \operatorname{ch} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}$$

$$B = \bar{Z}_c \operatorname{sh} \bar{\gamma} l = \bar{Z}_c \operatorname{sh} \sqrt{\bar{\gamma} \bar{\gamma}} \cdot l = \bar{Z}_c \operatorname{sh} \sqrt{\bar{\gamma} \cdot l \cdot \bar{\gamma} \cdot l} = \sqrt{\frac{\bar{Z}_c}{\bar{Y}_c}} \operatorname{sh} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}$$

$$C = \frac{1}{\bar{Z}_c} \operatorname{sh} \bar{\gamma} l = \frac{1}{\bar{Z}_c} \operatorname{sh} \sqrt{\bar{\gamma} \bar{\gamma}} \cdot l = \frac{1}{\bar{Z}_c} \operatorname{sh} \sqrt{\bar{\gamma} \cdot l \cdot \bar{\gamma} \cdot l} = \sqrt{\frac{\bar{Y}_c}{\bar{Z}_c}} \operatorname{sh} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}$$

où Z_c et Y_c sont respectivement l'impédance et l'admittance de la ligne.

En faisant un développement en série de $\operatorname{ch} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}$ et $\operatorname{sh} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}$:

$$\operatorname{ch} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c} = 1 + \frac{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}{2} + \frac{\bar{Z}_c^2 \cdot \bar{Y}_c^2}{24} + \varepsilon \left(\frac{\bar{Z}_c^3 \cdot \bar{Y}_c^3}{24} \right)$$

$$\operatorname{sh} \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c} = \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c} + \frac{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c \sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}}{6} + \varepsilon \left(\frac{\sqrt{\bar{Z}_c \cdot \bar{Y}_c}^3}{6} \right)$$

En ne gardant que les termes du premier ordre de ce développement et en remplaçant dans les expressions de A, B et C on obtient :

$$A = D = 1 + \frac{\bar{Z} \bar{Y}}{2}$$

$$B = \bar{Z} \left(1 + \frac{\bar{Z} \bar{Y}}{6} \right)$$

$$C = \bar{Y} \left(1 + \frac{\bar{Z} \bar{Y}}{6} \right)$$

$$\bar{Z} = \bar{Z}_c = \text{impédance de la ligne.}$$

$$\bar{Y} = \bar{Y}_c = \text{admittance de la ligne.}$$

Établissons les équations des quadripôles précédents:

- Pour le schéma en "Π".

$$\text{On a } \bar{u}_1 = \bar{u}_2 + \bar{z} \bar{I}_2$$

$$\text{ou } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 - \bar{I}_{01} \Rightarrow \bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_{02} = \bar{I}_2 + u_2 \frac{\bar{y}}{2}$$

$$\text{d'où } \bar{u}_1 = \bar{u}_2 + \bar{z} \left(\bar{I}_2 + \bar{u}_2 \frac{\bar{z}}{2} \right)$$

$$\text{d'où } \bar{u}_1 = \bar{u}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{z} \bar{I}_2$$

$$\text{d'autre part on a } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_{01} + \bar{I}_{02}$$

$$\bar{I}_1 = u_2 \frac{\bar{y}}{2} + \bar{I}_2 + \bar{u}_1 \frac{\bar{y}}{2} = \bar{I}_2 + \bar{u}_2 \frac{\bar{y}}{2} + \frac{y}{2} \left[u_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{z} \bar{I}_2 \right]$$

$$\text{d'où } \bar{I}_1 = \bar{u}_2 \frac{\bar{y}}{2} \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right)$$

$$\text{donc } \begin{cases} \bar{u}_1 = \bar{u}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{z} \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{u}_2 \frac{\bar{y}}{2} \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) \bar{I}_2 \end{cases}$$

$$\text{ou a aussi } \begin{cases} \bar{u}_2 = \bar{u}_1 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) - \bar{z} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 = \bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) - \bar{u}_1 \frac{\bar{y}}{2} \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) \end{cases}$$

- Pour le schéma en "T".

$$\text{On a } \bar{u}_1 = \bar{u}_2 + \frac{\bar{z}}{2} \bar{I}_1$$

$$\text{avec } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}_0$$

$$\bar{u}_0 = \bar{u}_2 + \frac{\bar{z}}{2} \bar{I}_2$$

$$\text{en substituant ces valeurs on obtient: } \bar{u}_1 = \bar{u}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{z} \bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{4} \right)$$

$$\text{D'autre part: } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{y} \bar{u}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{y} \bar{u}_2 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \bar{I}_2$$

$$\text{d'où } \bar{I}_1 = \bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{y} \bar{u}_2$$

$$\text{d'où } \begin{cases} \bar{u}_1 = \bar{u}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) + \bar{z} \bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{4} \right) \\ \bar{I}_1 = \bar{y} \bar{u}_2 + \bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) \end{cases}$$

$$\text{ou a aussi: } \begin{cases} \bar{u}_2 = \bar{u}_1 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) - \bar{z} \bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{4} \right) \\ \bar{I}_2 = \bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) - \bar{u}_1 \frac{\bar{y}}{2} \left(1 + \frac{\bar{z}\bar{y}}{2} \right) \end{cases}$$

Il en résulte donc de cette comparaison que les équations ont une forme parfaitement analogue, et qu'elles s'expriment en fonction des mêmes paramètres. Par conséquent on dira que toute ligne homogène à constantes uniformément réparties est équivalente à un quadripôle symétrique et inversement tout quadripôle symétrique peut être remplacé par un tronçon de ligne à paramètres uniformément distribués.

Pour l'étude électrique on assimilera alors la ligne à un quadripôle symétrique.

3°. Grandeurs caractéristiques de la ligne.

a) Résistance de la ligne :

C'est un paramètre du type constructif, du métal constituant le conducteur, de la section et de la température de l'environnement. Elle est donnée par la formule : $R_L = \kappa \rho \frac{l}{S} \cdot 10^{-3} \Omega$

R_L la résistance de la ligne

ρ la résistivité du matériel constituant le conducteur à la température de 20°C en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

l la longueur de la ligne

S la section du conducteur

κ un coefficient de correction donc la valeur moyenne est de 1,03.

En général le constructeur donne la résistance du conducteur en Ω/Km soit r à 20°C :

d'où la résistance de la ligne devient : $R_L = r \cdot l$

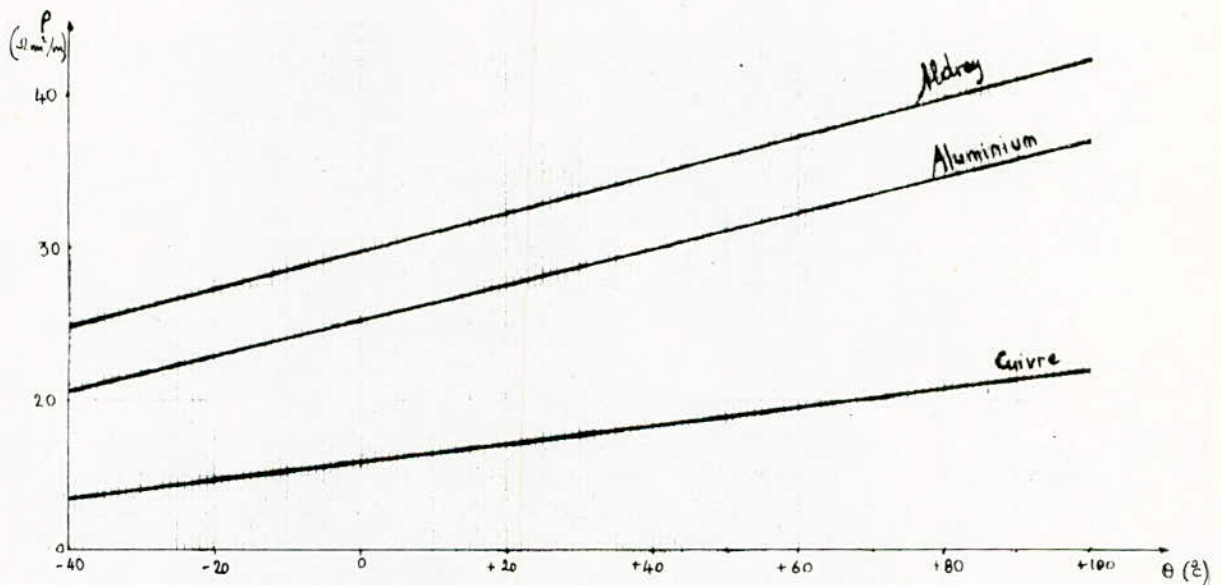
Lorsqu'on étudie le fonctionnement d'une ligne à une température différente de 20°C on aura :

$$R_L = \kappa \rho_\theta \frac{l}{S} \cdot 10^{-3} = \kappa \rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)] \frac{l}{S} \cdot 10^{-3} (\Omega)$$

avec θ la température de calcul

α le coefficient de température en $1/^\circ\text{C}$

ρ_θ se calcule ou bien s'obtient à l'aide des courbes suivantes :



b) Inductance de la ligne :

C'est un paramètre qui dépend du rayon du conducteur, du métal constituant le conducteur (magnétique ou non-magnétique), distance entre phases, le nombre de terres sur le pylône et du type de transposition de phase.

Comme on étudie une ligne, avec un conducteur par phase et non magnétique, simple terre dont la transposition de phase est du type 1 (voir chapitre suivant) l'inductance sera :

$$L_L = \left[4,6 \log \frac{d}{r} + \frac{\mu}{2} \right] \cdot 10^{-4} \quad (\text{H}/\text{Km})$$

L_L l'inductance de ligne et par phase.

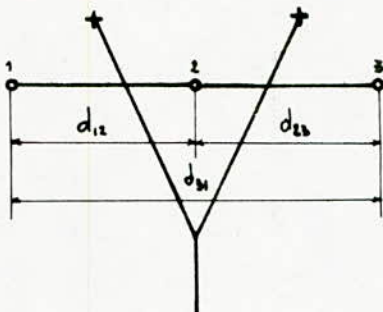
d : la distance moyenne géométrique entre phase (en m)

r : le rayon du conducteur (en m)

μ : la perméabilité magnétique relative du conducteur: $\mu = 1$ pour les non magnétiques.

avec $d = \sqrt{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$

les d_{ij} représentent les distances entre phases comme le montre le schéma suivant dans le cas de la ligne à étudier:



x câbles de garde

o conducteurs de phase

c) Réactance inductive de la ligne:

Elle dépend de l'inductance de la longueur de la ligne et de la fréquence du courant.

Elle est donnée par la formule: $X_L = 2\pi f L \cdot l$ (Ω /phase)

avec f : la fréquence (Hz)

l : la longueur de la ligne (Km).

d) Capacité de la ligne:

Elle dépend du rayon, de la hauteur moyenne des conducteurs par rapport au sol et la distance moyenne entre phase:

En ce qui nous concerne c'est-à-dire pour une ligne simple terre ou aera:

$$C_L = \frac{10^5}{A_{11} - A_{12}} \quad F/Km$$

avec $A_{11} = 4,6 \log \frac{2h}{r} \cdot 9 \cdot 10^9$

$$A_{12} = 2,3 \log \left[\left(\frac{2h}{d} \right)^2 + 1 \right] \cdot 9 \cdot 10^9$$

et avec:

$$h = H - \frac{e}{3}$$

H la hauteur des points d'appui

e la flèche du conducteur à 30°

h la hauteur des conducteurs par rapport au sol.

Nous donnons une seule hauteur h , car nous envisageons l'arrangement en nappe horizontale.

e) Susceptance capacitive de la ligne:

Elle dépend de la capacité de la ligne, de la longueur et enfin de la fréquence du courant

Elle est donnée par l'expression: $B_C = 2\pi f \cdot C_L \cdot l$ (S).

f : la fréquence (Hz)

C_L : la capacité de la ligne (en F/Km).

l : la longueur de celle-ci (en Km).

f). Conductance de la ligne :

C'est un paramètre qui dépend du degré de perfection de l'isolement et de l'effet couronne.
La conductance conditionnée de l'imperfection de l'isolement peut varier entre $0,0002 \mu S / km$ dans des conditions normales et $0,001 \mu S / km$ par temps de pluie. On constate qu'elle est très petite et on peut la négliger. D'après la formule on aura : $G_L = (G_{ic} + G_c) \cdot l \quad (\mu S)$

G_L : la conductance de la ligne ($\mu S / phase$)

G_{ic} : la conductance due à l'imperfection de l'isolement (en $\mu S / km$ et phase).

G_c : la conductance due à l'effet couronne.

En général : $G_{ic} = 0,0002 \div 0,002 \mu S / km$ conditions normales.

$G_{ic} = 0,001 \div 0,01 \mu S / km$ temps de pluie.

Comme on a aussi :

$$G_c = \frac{P_c}{U_n^2} \quad \mu S / km.$$

$$\text{avec } P_c = \frac{241}{8} (f+25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U_n - U_{cr})^2 \cdot 10^{-5} \quad (KW / km)$$

$$\text{et } \delta = \frac{3,92 b}{273+t}$$

δ : la densité relative de l'air (à la température de $25^\circ C$ et une pression de 76 cm de Hg on a $\delta = 1$).

b : la pression barométrique en cm. de Hg.

t : la température de l'air environnant.

f : la fréquence

r : le rayon du conducteur

d : la distance moyenne entre phase.

U_{cr} : la tension critique d'apparition de l'effet couronne en KV. entre phases.

$$U_{cr} = 84 m_1 m_2 \delta \cdot r \cdot \log \frac{d}{r} \quad (\text{voir chapitre suivant})$$

$m_1 = 0,93 \div 0,95$ pour conducteurs multifilaires.

$m_1 = 0,80 \div 0,87$ pour les câbles.

$m_2 = 1$ par beau temps

$m_2 = 0,8$ par mauvais temps.

Les pertes par phase seront : $P_{c;ij} = \frac{241}{8} (f+25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U_f - U_{f;cr;ij})^2 \cdot 10^{-5} \quad KW / km.$

$$U_{f;cr;13} = \frac{U_{2;cr}}{\sqrt{3}} = \frac{1,06 U_{cr}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{f;cr;2} = \frac{U_{2;cr}}{\sqrt{3}} = \frac{0,96 U_{cr}}{\sqrt{3}}$$

Les pertes totales seront pour les lignes jusqu'à 220 KV avec des conducteurs dont le diamètre ne dépasse pas 25 mm : $P_c = 2 P_{c;13} + P_{c;2} \quad (KW / km)$

On arrive ainsi à la conductance de la ligne : $G_c = \frac{P_c}{U_n^2}$

g). Impédance de la ligne :

C'est une grandeur complexe dans laquelle interviennent la résistance et la réactance inductive de la ligne :

$$\bar{Z}_L = R_L + jX_L \quad \Omega$$

h). Admittance de la ligne :

De la même façon c'est une grandeur complexe définie par :

$$\bar{Y}_L = G_L + jB_L \quad S$$

Ainsi nous avons toutes les grandeurs caractérisant une ligne électrique dont dépendent la construction et un bon fonctionnement.

Problèmes relatifs aux lignes aériennes.

i. Effet couronne et ses perturbations:

a). Effet couronne:

L'effet couronne est l'apparition de légers crépitements avec formation d'effluves bleutés et d'aigrettes lumineuses autour d'un fil auquel on a appliqué une tension sinusoidale. Ce phénomène ne peut être examiné que dans l'obscurité et le silence. On a constaté, par ailleurs, que ce phénomène prend de l'ampleur au fur et à mesure que la valeur de la tension devient de plus en plus importante.

Cet effet provient du fait qu'il se produit un champ électrique autour du fil. Quand la tension qui lui est appliquée devient suffisamment grande, l'air se trouve percé par ce champ dépassant alors la valeur correspondante au champ disruptif de l'air ($H_0 = 30 \text{ KV/cm}$). Pendant ainsi sa rigidité électrique l'air constitue une gaine conductrice autour du fil. Ce phénomène se traduit, en fait, une valeur critique du champ H_c supérieure à celle de H_0 afin de se concrétiser. A ce champ critique correspond une valeur de la tension dite critique.

De nombreuses formules ont été données pour le calcul de H_c . Nous citerons celle de Peek.

$$H_c = H_0 \delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right)$$

avec: H_0 : le champ disruptif de l'air.

$$(H_0 = 21,2 \text{ KV eff/cm ou } H_0 = 30 \text{ KV max/cm})$$

$$\delta: \text{ la densité relative de l'air } \quad \delta = \frac{3,92 p}{273 + \theta}$$

r : le rayon du fil conducteur.

De même la tension critique à partir de laquelle ce phénomène est examinable sera:

$$U_{cr} = 84 m_1 m_2 \delta r \log \frac{d}{r}$$

avec: m_1 un coefficient tenant compte de l'état de surface.

m_2 un " " " de l'état atmosphérique

δ la densité relative de l'air.

c: le rayon du fil conducteur.

d: la distance moyenne géométrique entre phase.

Par ailleurs, on constate que, sur une ligne en service, l'effet couronne se manifeste à des tensions souvent inférieures à la tension critique calculée. Il s'agit en la circonstance d'effluves localisées sur les irrégularités les plus saillantes du câble et, des chaînes d'isolateurs (les irrégularités sont dues à la fabrication, aux éraflures, poussières et débris organiques collés au câble et aux chaînes d'isolateurs). Ces effluves n'ont rien de symétriques et correspondent à l'apparition des premières pertes. Les pertes ont été évaluées à l'aide de nombreuses formules empiriques qui, le plus souvent, ne sont applicables qu'au-dessus de la tension critique (car dans le cas contraire les pertes sont négligeables). Parmi ces formules celle de Peek est la plus célèbre.

$$P_c = \frac{241}{8} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U - U_{cr})^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{en KW/Km}]$$

où : f la fréquence (50 Hz).

U la tension simple de la ligne.

U_{cr} la tension critique.

pour le reste, la notation est la même que pour le cas précédent.

Remarques:

1. Lorsque la tension s'élève les pertes par effet couronne augmentent très rapidement. Ainsi, en pratique, on évite toujours de laisser se produire ce phénomène dans les lignes haute tension. Pour cela on emploie des diamètres de câbles et des écartements suffisants (assez grands) pour que la tension de fonctionnement soit toujours inférieure d'au moins 10 à 20% de la tension critique de l'apparition de ce phénomène.

2. Les pertes par effet couronne généralement faibles ou modérées dans les lignes à haute tension par beau temps prennent de l'ampleur sous l'action des intempéries (neige, verglas, surtout fortes pluies) et augmente alors très vite avec la tension. Sous de telles conditions elles deviennent rapidement égales aux pertes joules. (ceci car la tension critique diminue peu à peu et est réduite au tiers de la tension calculée par beau temps).

b). Perturbations causées par l'effet couronne:

Il s'agit des perturbations qui affectent les réceptions radiophoniques. Ces perturbations, lorsqu'elles se produisent sont limitées à une zone de 20 à 30 m de part et d'autre de la ligne 220 KV. Leur importance passe par un maximum au moment de la première mise en service (cela est dû aux irrégularités du diamètre du conducteur). Le maximum s'atténue progressivement au bout d'un certain temps. La zone perturbée devient alors plus étroite et se rapproche de l'axe de la ligne. Aucune perturbation

des récepteurs de télévision ne résulte de l'effet couronne.

Enfin, il en soit, si les pertes et perturbations par effet couronne peuvent faire l'objet de prévisions valables, pour des conditions atmosphériques déterminées, il n'en reste pas moins très délicat de prédéterminer les pertes annuelles, étant donné le rôle prédominant que jouent les divers paramètres dont le caractère aléatoire n'est pas contestable.

2. Dispositions relatives des conducteurs entre eux et par rapport aux supports:

a). Considérations générales:

En vertu de la multitude des dispositions adoptées pour les conducteurs, chaque fois, l'écartement de ces derniers est fixé en tenant compte de certaines considérations électriques et mécaniques.

- Du point de vue électrique:

Les conducteurs doivent être assez écartés pour que les pertes par effluves qui se produisent à haute tension ne soient pas trop élevées, et surtout, n'occasionnent pas l'arçage d'arcs entre phases ou entre un conducteur et le câble de garde.

- Du point de vue mécanique:

Les conducteurs sont soumis, sous l'influence des surcharges brusques, à des balancements qui pourraient les mettre soit en contact si l'on ne prévoyait pas des écartements suffisants, soit au contact de la masse si l'on ne prévoyait pas de bonnes distances.

b). Distance entre phases:

L'écartement minimal entre conducteurs a été, jusqu'ici, exprimé à l'aide d'une formule empirique qui a le mérite de procurer une assez large sécurité dans la plupart des régions à climat tempéré et où les formations de givre sont exceptionnelles.

Cette formule est la suivante:

$$e = K \sqrt{f + l} + \frac{U}{150}$$

avec U : la tension entre phase en KV.

f : la flèche maximale (cas le plus défavorable).

l : la longueur de la chaîne d'isolateur de suspension.

K : un coefficient qui dépend de la nature du conducteur.

En effet:

$$\left. \begin{array}{l} K = 0,65 \text{ pour conducteur en Alu-acier ou Alu-alu-acier} \\ K = 0,7 \div 0,8 \text{ pour " en aluminium allié} \end{array} \right\} \text{Armeement en} \\ \text{rappe horizontale}$$

Il existe d'autres valeurs de K pour l'armement en triangle. Donc l'écartement va

dependre essentiellement de la nature du câble utilisé et du type d'armement.

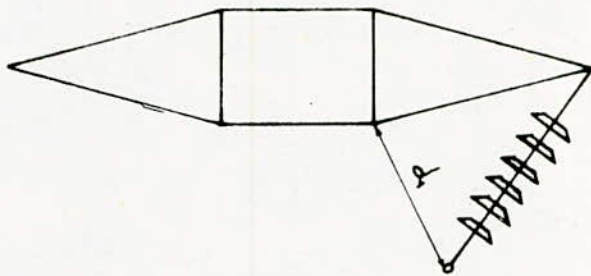
Le cahier des charges SONELGAZ fixe cette distance à 7,1 m minimum.
Nous prenons donc un écartement entre phases de :

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

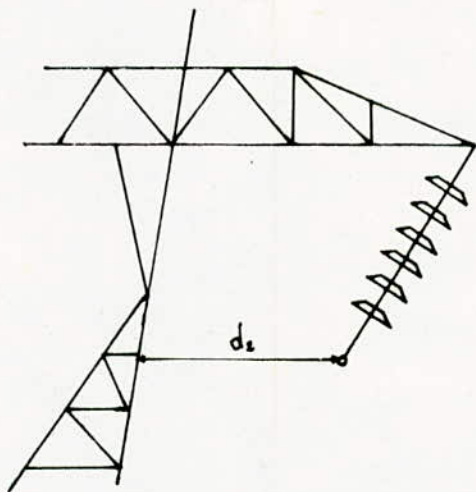
c). Distance à la masse sur les supports :

En général on envisage deux cas qui correspondent aux distances que nous appellerons d_1 et d_2 .

1^{er} cas : La distance d_1 est permanente et n'est pas susceptible de subir des variations appréciables. C'est la distance minimale entre armatures de protection des chaînes (cornes de garde) dont une extrémité est à la terre et l'autre à la tension de la ligne. Schématiquement nous aurons :



2^{es} cas : La distance d_2 est variable en fonction de la rigueur des hypothèses adoptées. C'est la distance minimale due aux rapprochements à la masse consécutifs aux oscillations sous l'influence du vent. De la même façon, schématiquement nous aurons :



Les distances d_1 et d_2 sont en principe fixées par le cahier des charges. A défaut, celui-ci, donne parfaitement des angles minimum à respecter soit par rapport à l'horizontale (cas de la distance d_1), soit par rapport à la verticale (cas de la distance d_2).

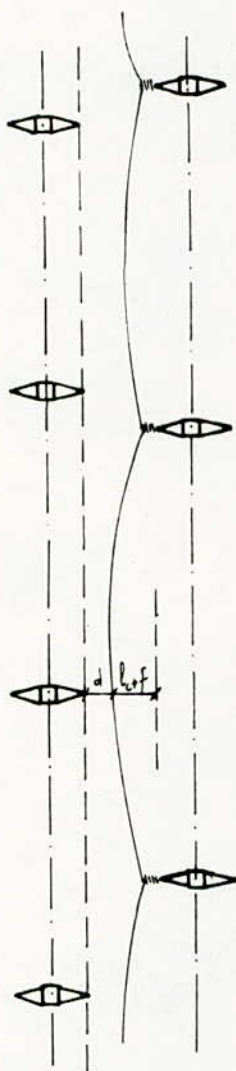
d). Écartement entre une phase et le câble de garde :

La position des câbles de garde et leur distance aux conducteurs représentent des questions d'une importance particulière qui ne devraient pas faire l'objet de solutions empiriques. L'écartement est basé sur la variation des flèches respectives aux différentes hypothèses et la tension. Le problème sur les variations de flèches sera traité dans la troisième partie.

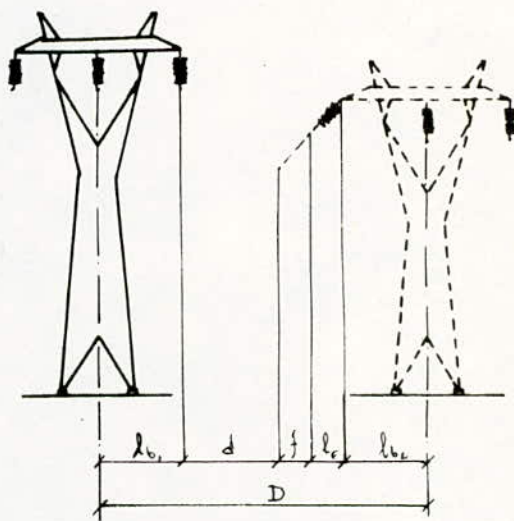
e). Distances entre deux lignes voisines :

C'est la largeur qui compte qui dépend en premier lieu de la possibilité d'emplacement des pylônes des deux lignes voisines sur même niveau. En d'autres termes une réalisation éventuelle de mêmes portées.

Pour déterminer cette distance nous basons notre raisonnement sur le cas le plus défavorable. En effet nous considérons le cas où nous avons un balancement simultané des conducteurs des deux lignes sous l'action du vent. (Le problème ne se pose pas pour les conducteurs de la même ligne). Le raisonnement sera applicable pour deux lignes ne réalisant pas les mêmes portées. En somme il sera valable pour un cas général : Considérons deux lignes voisines schématisées ci-dessous :



(c'est une vue de haut.)



silhouette des deux pylônes voisins.
(vue de face).

- Soit :
- $l_{b_{1,2}}$: les longueurs des bras des deux lignes voisines.
 - d : la distance entre phase imposée par le cahier des charges.
 - f : la flèche du conducteur avec un niveau d'un pylône de la ligne.
 - l_c : la longueur de la chaîne d'isolateurs de suspension.
 - α : l'angle d'inclinaison du conducteur sous l'action du vent. ($\alpha = 40^\circ$).

On désignera par D la distance à assurer entre les deux axes des lignes voisines.
On voit alors d'après le schéma que :

$$D = l_{b_1} + l_{b_2} + d + (l_c + f) \sin \alpha$$

Dans notre cas :

$$\alpha = 40^\circ \quad (\text{fixé par le cahier des charges})$$

$$d = 7,1 \text{ m} \quad (\text{ " " " " " })$$

$$l_{b_1} = l_{b_2} = 7,1 \text{ m}.$$

$$\text{alors :} \quad D_{\text{ens}} = 21,3 + (l_c + f) \sin 40^\circ$$

3°. Symétrie électrique de la ligne :

Bien qu'il existe une multitude des dispositions dans le cas des lignes aériennes, la symétrie complète est irréalisable. Quelque soit la disposition choisie, elle sera toujours de nature à modifier les constantes de la ligne, en particulier l'inductance et la capacité qui dépendent essentiellement de la géométrie formée par les conducteurs.

On peut envisager l'armement en triangle équilatéral qui réalise une symétrie complète entre conducteurs; par contre, celle-ci par rapport au sol est atténuée. D'autre part, on peut également envisager l'armement en nappe horizontale qui assure une symétrie relativement complète par rapport au sol mais par la même occasion, une dissymétrie entre conducteurs.

Par conséquent, sur toutes ces difficultés, on a intérêt, après le choix d'une disposition, à faire une correction afin de réaliser artificiellement la symétrie. Cette correction consiste à imprimer aux conducteurs une permutation circulaire le long de la ligne. Ainsi cette dernière amène les conducteurs à occuper chacune des positions possibles sur une même fraction de longueur. Cette opération est appelée transposition de phase. Il est cependant évident qu'il faut faire respecter la distance entre conducteurs et la terre ainsi que la distance entre conducteurs. Il faut également se conformer aux règlements prescrivant l'établissement de la transposition aux voisinages d'autres lignes aériennes.

D'après K. GIERMANN et E. KONIGSHOFER; la condition à satisfaire lors d'une transposition de phase sera :

$$U_n \cdot L > 5000 \text{ KV.Km.}$$

où U_n : la tension entre phase (220 KV).

L : longueur sur laquelle doit s'effectuer la transposition.

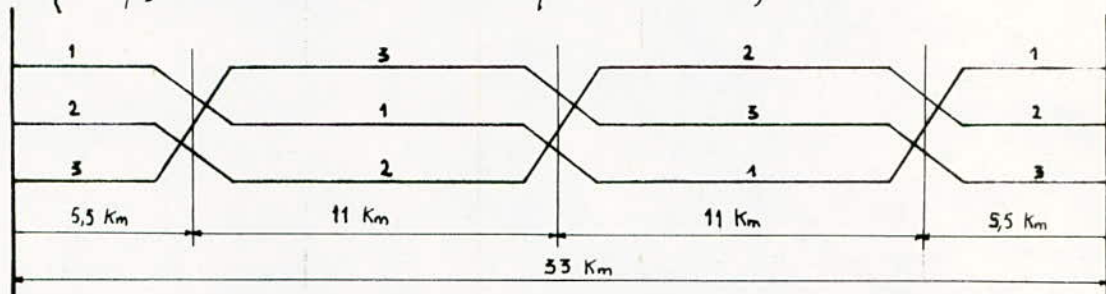
X

Ceci nous amène alors à :

$$220 \cdot L > 5000 \quad \text{d'où} \quad L > \frac{5000}{220} \text{ Km}$$

On doit donc avoir : $L > 22,7 \text{ Km}$

Nous nous proposons de faire une transposition sur une longueur : $L = 33 \text{ Km}$.
(de façon à avoir le même ordre de phase à l'arrivée).



Remarque: Le choix de la longueur qui satisfait à la condition $U_n \cdot L > 5000 \text{ KV.Km}$ dépendra essentiellement de la nature du terrain (sans dénivellations, avec faibles ou fortes dénivellations...). Il faut noter également que l'on n'est pas tenu à faire exactement une transposition tous les 33 Km mais bien entendu sur un pylône très voisin de cette distance.

4°. Influence du parallélisme entre deux lignes:

Un rapprochement d'une ligne avec une autre ligne, différente ou de même type, est appelé parallélisme de deux lignes. Celui-ci est déconseillé sur une longue distance. En effet un rapprochement prolongé provoque, en cas de court-circuit entre phase et terre, des courants et fem induit. Si quelquefois le sol présente une mauvaise conductivité, ces courants et fem dépassent les limites admissibles et constituent une atteinte immédiate à la sécurité de l'exploitation. La valeur maximale de la fem induite ne doit pas dépasser 650 V dans les lignes aériennes. En général, on évite ce parallélisme même à des distances de 2 à 4 Km. Quand on ne peut pas l'éviter on doit prévoir des protections spéciales.

5°. La pollution:

La pollution est un ensemble de poussières, de détritus organiques collés aux craquelures des câbles et des chaînes d'isolateurs. La pollution peut, en se déposant sur les surfaces d'isolateurs, en diminuer les qualités électriques au point de ne pouvoir supporter la tension de service. On distingue la pollution marine (au selin), industrielle (chimique) et désertique.

Le problème qui se pose actuellement est la connaissance de la nature de la pollution d'une part, les conditions atmosphériques et climatiques d'autre part. On a, jusqu'ici, essayé de lutter contre la nocivité de la pollution et cela de différentes manières. (On a pu réduire la nocivité de la pollution sur les chaînes d'isolateurs par exemple en faisant un choix approprié du nombre et du type d'isolateur).

D'une façon générale, ce problème touche de très près la fiabilité d'une ligne et, à cet effet, des recherches sont en cours afin de le résoudre.

Les Isolateurs.

Nous plaçons dans la deuxième partie de cet ouvrage ce chapitre sur les isolateurs quoique l'étude de ceux-ci doit être faite non seulement du point de vue purement électrique mais aussi du point de vue mécanique que nous envisageons dans la troisième partie. Cependant les propriétés électrique des isolateurs sont prédominantes, et justifient, par conséquent, ce classement.

Le rôle des isolateurs des lignes aériennes est de retenir mécaniquement les conducteurs aux structures qui les supportent et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux éléments. Leurs qualités électrique et mécanique ne doivent être déterminées par aucune contraintes de quelque nature qu'elles soient.

1. Différents types d'isolateurs utilisés.

Nous considérons donc deux grands types d'isolateurs qui se différencient par leur nature et leur liaison aux pylônes. En ce qui concerne les matières constitutives les plus utilisées de nos jours sont :

- la porcelaine.
- le verre trempé.

On distingue :

- Les isolateurs rigides.
- Les isolateurs de suspension.

a). Les isolateurs rigides.

D'une façon générale un isolateur est constitué par un bloc de porcelaine ou de verre supportant le conducteur. L'isolateur est fixé à une ferrure métallique de forme appropriée permettant de le relier rigidement au pylône. Ce bloc, en une ou plusieurs pièces, comporte à la partie supérieure une cloche ou plateau recouvert portant une rainure ou gorge latérale dans laquelle le conducteur est fixé au moyen d'une ligature ou par l'intermédiaire d'une pièce fixée à la ferrure.

Les isolateurs peuvent être utilisés en position verticale, horizontale ou oblique. Pour cela on doit alors s'assurer que les caractéristiques (électriques et mécaniques) désirées sont respectées dans la position adoptée.

b). Les isolateurs de suspension.

Ils sont composés d'une cloche de porcelaine ou de verre, avec cornelures circulaires intérieures. L'isolateur de suspension porte à sa partie supérieure un capot scellé (en tôle d'acier ou plus

peuvent en fonte malléable aussi douce que possible) et à l'intérieur, une tige en acier avec caudures également scellée dans la matière. Cette tige porte à son extrémité inférieure une tête arrondie qui pénètre dans l'ouverture du capot de l'élément suivant. Une goupille de sécurité enfilée dans l'ouverture, empêche la tige de sortir de son logement après emballage.

Cette conception d'isolateur est appelée communément isolateur capot-tige et qui est utilisé par SONEGAZ.

D'une façon générale, les isolateurs ontent pour un pourcentage très modeste dans le prix de la ligne à construire. Cependant ils en sont un élément essentiel dont dépendra la sécurité de l'exploitation. L'importance de leur rôle apparaît surtout par le coût, difficilement chiffrable de toute interruption de service dont ils peuvent être la cause. Il est donc nécessaire de les choisir avec discernement ce qui conduit à étudier leurs caractéristiques.

2. Caractéristiques des isolateurs utilisés :

Pour l'étude de l'isolation d'une ligne on doit établir ce que l'on appelle un niveau d'isolement. Celui-ci est un ensemble de caractéristiques électriques d'une chaîne d'isolateurs.

Pour assurer la fiabilité de la ligne cette chaîne d'isolateurs doit tenir à certaines contraintes électriques généralement arrêtées pour chaque tension de service qui sont :

- la tension de fréquence industrielle tenue pendant une minute sous la pluie.
- la tension d'onde de choc tenue pendant une minute.

On doit ajouter à cela une condition qui serait une ligne de fuite suffisamment grande pour chaque zone traversée. (La ligne de fuite d'un isolateur est la plus courte distance, suivant le contour des surfaces extérieures des parties isolantes céramique ou verre, reliant les deux parties qui sont normalement soumises à la tension de service).

Toutes ces conditions, car une trop forte contrainte électrique peut provoquer :

- Soit un contournement.
- Soit une perforation.

Le contournement de l'isolateur, c'est à dire un amorçage dans l'air environnant entre les deux pièces conductrices des extrémités. Seule l'énergie thermique dégagée par l'arc pourra endommager l'isolateur.

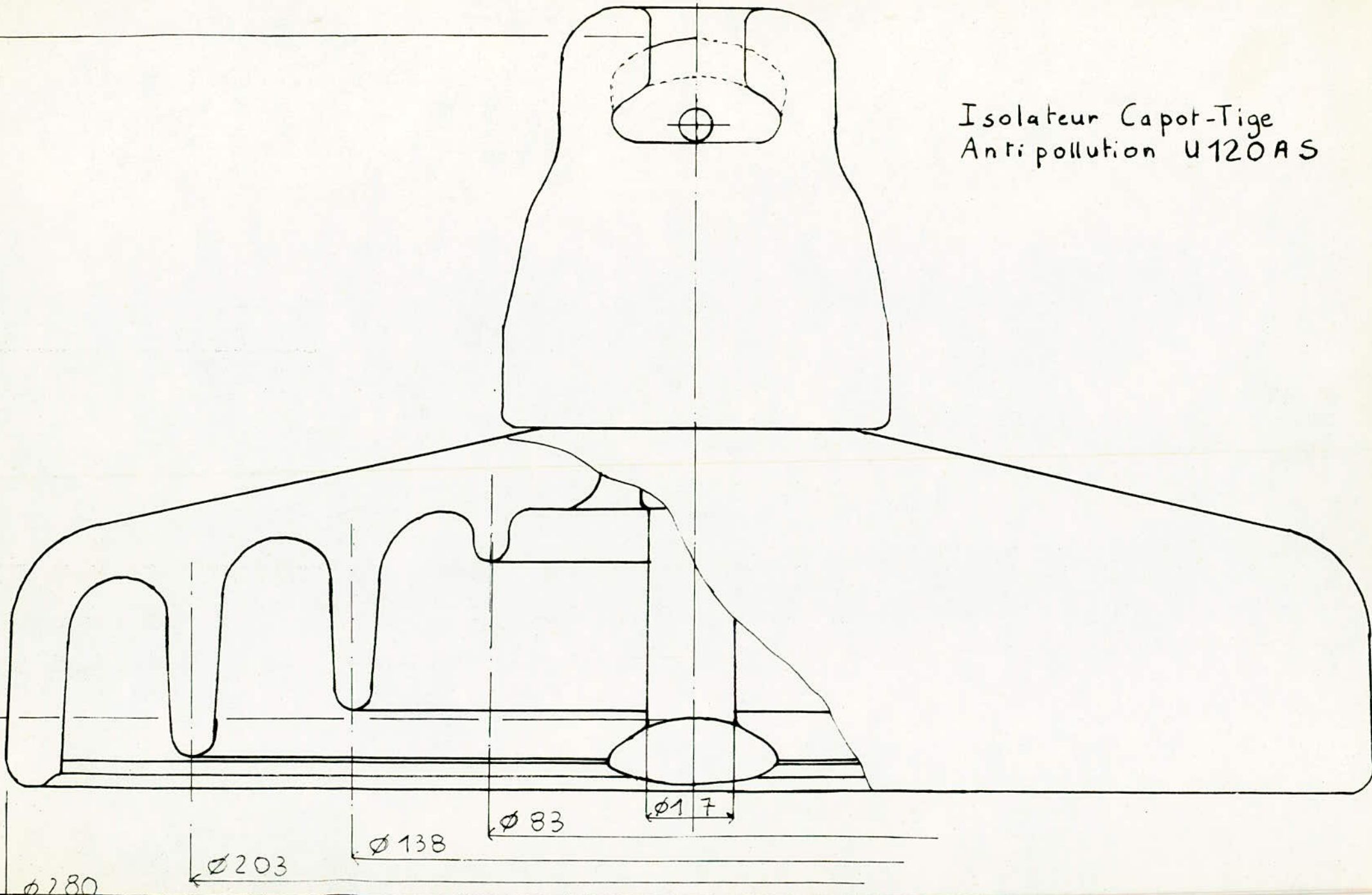
Une perforation de l'isolateur, c'est à dire un amorçage à travers le diélectrique entre les deux pièces conductrices des extrémités. La rigidité électrique sera définitivement compromise, l'énergie dégagée à l'intérieur de la matière par l'arc de fuite pourra même causer l'explosion de l'isolateur et la chute du conducteur.

Les isolateurs utilisés ont pour caractéristiques :

Diamètre : 280 mm.

Isolateur Capot-Tige
Antipollution U120AS

Pas 146



$\phi 280$

$\phi 203$

$\phi 138$

$\phi 83$

$\phi 17$

Pas: 146 mm

Tension tenue sous onde de choc

120 KV

Tension tenue sous fréquence industrielle:

a sec: 80 KV

sous pluie: 45 KV

Longueur de la ligne de fuite: 445 mm.

Effort mécanique garanti: 12 t.

3°. Choix du type et du nombre d'isolateurs.

Une fois les caractéristiques étudiées, le choix du type d'isolateur restera fonction de la région à traverser. On doit avant tout éviter le passage à proximité des sources de pollution telles que: les usines sidérurgiques, de ciment, raffineries de pétrole, industries chimiques..... En général, une distance de 2 à 4 Km sera suffisante sans prendre de précautions spéciales sur l'isolement.

Pour les régions non-désertiques on se trouve la quasi-totalité des lignes et projets actuels, les isolateurs de type normal suffisent pour les zones à pollution moyenne ou pratiquement nulle ou encore à pluies abondantes. Dès que les zones à traverser sont fortement polluées on doit adopter des isolateurs anti-pollution avec différentes lignes de fuite spécifiques suivant l'importance de la dite pollution. (Le minimum sera une ligne de fuite spécifique de 2,5 cm/KV).

Connaissant la ligne de fuite spécifique, on peut calculer le nombre d'isolateurs. Celui-ci est défini comme étant le quotient de la longueur de fuite totale de la chaîne par la longueur de fuite d'un élément de la chaîne.

Pour une ligne de fuite spécifique de 3,2 cm/KV on aura:

la longueur de fuite totale de la chaîne sera:

$$L_{ch} = 3,2 \times 220 = 704 \text{ cm.}$$

la longueur de fuite d'un élément de la chaîne étant: $L_e = 44,5 \text{ cm.}$

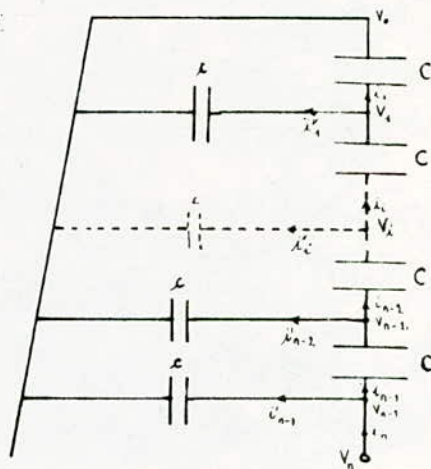
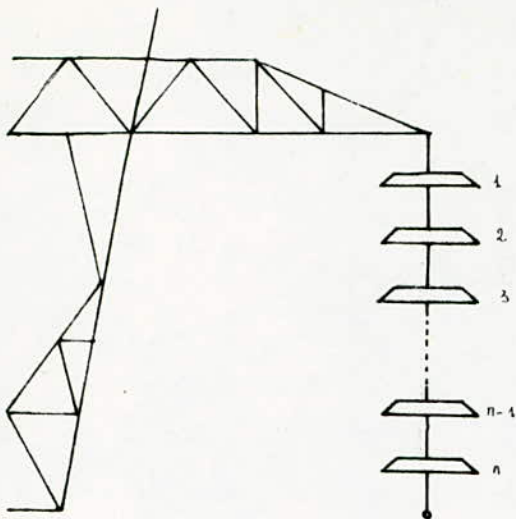
Le nombre d'isolateur sera: $n = \frac{L_{ch}}{L_e}$

$$\text{d'où } n = \frac{704}{44,5} = 15,8 \text{ éléments}$$

Le nombre d'isolateurs que nous choisirons sera alors: $n = 16 \text{ éléments.}$

4°. Distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs:

Cette distribution dépend de diverses capacités en présence. En effet considérons une chaîne d'isolateurs contenant n éléments et appelant C et c respectivement la capacité propre de l'élément ou la capacité entre les deux armatures et la capacité de chaque armature par rapport à la terre, comme l'indique le schéma suivant:



Les capacités que nous avons représenté, suivant cette nomenclature par ordre de grandeur décroissante, ont une valeur relative variable avec le type d'éléments.

En examinant le schéma ci-dessus on constate qu'à différents nœuds: on a

$$i_n = i_{n-1} + i'_{n-1} \quad (1)$$

Pour un potentiel V_n de la ligne et V_{n-1} de l'attache commune aux éléments n et $(n-1)$ la relation (1) devient:

$$\begin{aligned} \int C \omega (V_n - V_{n-1}) &= \int C \omega (V_{n-1} - V_{n-2}) + \int c \omega V_{n-1} \\ \text{d'où} \\ V_n - V_{n-1} &= V_{n-1} - V_{n-2} + \frac{c}{C} V_{n-1} \end{aligned}$$

il vient donc que:

$$V_n = \left(2 + \frac{c}{C}\right) V_{n-1} - V_{n-2} \quad (2)$$

Nous pouvons constater que la tension entre les armatures de chaque élément va en croissant depuis l'élément n° 1 voisin du bras jusqu'à l'élément n° n voisin de la ligne. En effet, chaque élément est parcouru par un courant de capacité qui est augmenté chaque fois du courant dérivé à la terre par la capacité c de chaque armature.

La relation (2) nous permet de calculer la tension d'un élément quelconque. La véritable valeur de V_n c'est à dire la tension simple de la ligne permet de calculer V_1 ainsi que tous les autres potentiels.

Proposons nous de calculer la valeur de la tensions V_1 sachant que:

$$\left. \begin{aligned} V_n &= 127 \text{ KV} \\ C &= 50 \cdot 10^{-5} \mu\text{F} \\ c &= 7 \cdot 10^{-5} \mu\text{F} \\ n &= 16 \text{ éléments} \end{aligned} \right\} \frac{c}{C} = 0,14$$

D'après la relation (2) on aura :

$$V_2 = 2,14 V_1$$

$$V_3 = [(2,14)^2 - 1] V_1 = 3,58 V_1$$

$$V_4 = 2,14 \times 3,58 V_1 - 2,14 V_1 = 5,52 V_1$$

$$V_5 = 2,14 \times 5,52 V_1 - 3,58 V_1 = 8,23 V_1$$

$$V_6 = 2,14 \times 8,23 V_1 - 5,52 V_1 = 12,1 V_1$$

$$V_7 = 2,14 \times 12,1 V_1 - 8,23 V_1 = 17,66 V_1$$

$$V_8 = 2,14 \times 17,66 V_1 - 12,1 V_1 = 25,7 V_1$$

$$V_9 = 2,14 \times 25,7 V_1 - 17,66 V_1 = 37,34 V_1$$

$$V_{10} = 2,14 \times 37,34 V_1 - 25,7 V_1 = 54,2 V_1$$

$$V_{11} = 2,14 \times 54,2 V_1 - 37,34 V_1 = 78,65 V_1$$

$$V_{12} = 2,14 \times 78,65 V_1 - 54,2 V_1 = 114,11 V_1$$

$$V_{13} = 2,14 \times 114,11 V_1 - 78,65 V_1 = 165,54 V_1$$

$$V_{14} = 2,14 \times 165,54 V_1 - 114,11 V_1 = 240,14 V_1$$

$$V_{15} = 2,14 \times 240,14 V_1 - 165,54 V_1 = 348,36 V_1$$

$$V_{16} = 2,14 \times 348,36 V_1 - 240,14 V_1 = 505 V_1$$

Or V_{16} est égale à la tension simple de la ligne : donc $V_{16} = 127 = 505 V_1$

il est donc facile de tirer : $V_1 = \frac{127}{505} = 0,25 \text{ KV}$.

En résumé on aura donc :

$$n = 16 \text{ éléments}$$

$$V_{16} = 127 \text{ KV}$$

$$V_1 = 0,25 \text{ KV}$$

Connaissant les valeurs des tensions de la ligne et du premier élément on peut déduire toutes les autres valeurs des tensions des éléments intermédiaires. On peut alors dresser un tableau résumant les valeurs des différentes tensions.

On aura la tension entre chaque armature qui se calcule à l'aide de la relation (2) ou bien avec directement les relations ci-dessus.

Par exemple : $V_2 = 2,14 \times V_1 = 2,14 \times 0,25 = 0,54 \text{ KV}$.

$$V_3 = 3,58 V_1 = 3,58 \times 0,25 = 0,90 \text{ KV}$$

La tension par élément qui se calcule en faisant la différence entre la valeur du potentiel V_{i+1} et la valeur du potentiel V_i .

Par exemple : la tension de l'élément n° 2 sera :

$$V_2 - V_1 = 0,54 - 0,25 = 0,29 \text{ KV}$$

En la tension par élément en pourcentage par rapport à V_{16} .

| N° de l'él ^t | Tens. entre chaque armature | Tension par élément | Tens./él ^t en % de V_{16} |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|--|
| 1 | | 0,25 | 0,197 |
| 2 | 0,25 | 0,29 | 0,23 |
| 3 | 0,54 | 0,36 | 0,28 |
| 4 | 0,90 | 0,48 | 0,38 |
| 5 | 1,38 | 0,68 | 0,54 |
| 6 | 2,06 | 0,98 | 0,77 |
| 7 | 3,04 | 1,39 | 1,09 |
| 8 | 4,43 | 2,02 | 1,59 |
| 9 | 6,45 | 2,92 | 2,30 |
| 10 | 9,37 | 4,23 | 3,33 |
| 11 | 13,60 | 6,14 | 4,83 |
| 12 | 19,74 | 8,9 | 7,00 |
| 13 | 28,64 | 12,91 | 10,16 |
| 14 | 41,55 | 18,72 | 14,74 |
| 15 | 60,27 | 27,17 | 21,39 |
| 16 | 87,44 | 39,56 | 31,15 |

Remarque :

On voit que l'élément voisin de la traverse ou bras prend 0,2% de la tension totale tandis que l'élément voisin de la ligne prend à lui seul à peu près le tiers de la tension totale. Une inégalité de la répartition du potentiel entraîne comme conséquence principale l'abaissement de la tension d'isolement d'une chaîne d'isolateurs et la difficulté de réaliser l'isolement pour des tensions très élevées par augmentation du nombre d'isolateurs de la chaîne.

En vertu de tout ce qui a été dit dans ce chapitre, un choix adéquat du type et du nombre d'isolateurs en fonction de leur utilisation, ne fera qu'augmenter la sécurité et la fiabilité de la ligne.

Choix du conducteur.

Les métaux conducteurs utilisés dans la construction des lignes de transmission d'énergie doivent posséder trois qualités principales:

- Offrir une résistance électrique aussi faible que possible afin de minimiser les pertes d'énergie lors de la transmission.
- Offrir une résistance mécanique suffisamment grande afin de résister aux efforts mécaniques permanents ou accidentels.
- Présenter un prix de revient raisonnable.

Les métaux satisfaisant à ces conditions sont, hélas, en nombre relativement restreint. Notons que la plupart des lignes aériennes ont été construites soit en un seul métal (Al, Cu ou acier), soit en un alliage de deux métaux (Cu-acier, Al-acier...).

On recherche toujours le ou les métaux les plus avantageux en tenant compte de leurs caractéristiques électriques et mécaniques.

Dans un cadre d'études technico-économiques pour l'ensemble d'un réseau et compte tenu des possibilités de production des normes de câbles de notre pays, la SONELGAZ a normalisé l'utilisation des câbles. Pour ses lignes elle utilise différentes sections de câbles, on trouve le 288 mm², le 411 mm² exceptionnellement le 617 mm² et bien d'autres. Sous ces trois câbles cités sont en Alu-acier.

1°. Caractéristiques des câbles à étudier:

En vertu de ce qui a été dit précédemment et en fonction de la tension de notre ligne à construire, nous avons retenu deux sections de câbles susceptibles de donner de bons résultats. Ces sections seront la 288 mm² et la 411 mm². Les caractéristiques de ces câbles sont alors:

| | câble 288 mm ² Alu-acier | Câble 411 mm ² Alu acier |
|--------------------------|--|--|
| Nature du câble : ----- | Aluminium - acier | Aluminium - acier |
| Section du câble : ----- | 288 mm ² | 411 mm ² |
| Composition : ----- | 30 brins d'Alu. de ϕ 3,15 mm 7 brins d'acier de ϕ 3,15 mm | 32 brins d'Alu de ϕ 3,6 mm 19 brins d'acier de ϕ 2,4 mm |

| | | |
|-------------------------------------|--|--|
| Section d'aluminium: ----- | 234 mm ² | 325 mm ² |
| Section d'acier: ----- | 54,6 mm ² | 86 mm ² |
| Diamètre extérieur: ----- | 22,05 mm | 26,4 mm |
| Poids linéaire: ----- | 1,083 Kg/m | 1,593 Kg/m |
| Poids spécifique: ----- | 3,76 · 10 ⁻³ Kg/m · mm ² | 3,88 · 10 ⁻³ Kg/m · mm ² |
| Résistance électrique à 20°C: ----- | 0,124 Ω / Km | 0,088 Ω / Km |
| Charge de rupture minimale: ----- | 9220 Kg | 16500 Kg |
| Coefficient de dilatation: ----- | 18 · 10 ⁻⁶ | 17,6 · 10 ⁻⁶ |
| Module de Young: ----- | 8000 Kg / mm ² | 8300 Kg / mm ² |

2°. Calcul des grandeurs caractéristiques de la ligne:

Dans ce qui suit, aussi bien pour le câble 288 mm² que pour le câble 411 mm², on prendra des températures moyennes pour le calcul des grandeurs de la ligne BOVIRA - M'SILA longue de 100 Km.

On désignera alors par θ_{env} : la température de l'environnement.

θ_c : la température du conducteur.

On fixera: $\bar{\theta}_{env} = 15^\circ C$.

$\bar{\theta}_c = 20^\circ C$.

a). Grandeurs caractéristiques pour le câble 288 mm²:

- Résistance: la résistance du conducteur étant $r_{20^\circ C} = 0,124 \text{ Km}^{-1} \Omega$

la résistance de la ligne et par phase sera: $R_L = r_{20^\circ C} \cdot l \quad \Omega$

$$R_L = 0,124 \times 100 = 12,4 \Omega$$

d'où $R_L = 12,4 \Omega$

- Inductance: $L_L = \left[4,6 \log \frac{d}{r} + \frac{\mu}{2} \right] \cdot 10^{-4} \text{ H/Km}$.

$$\text{ou } d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

$$d = \sqrt[3]{71 \cdot 71 \cdot 14,2} = 8,95 \text{ m}$$

d_{ij} : les distances entre phases i et j .

$$\mu = 1$$

$$r = \frac{d_c}{2} = \frac{22,05}{2} = 11,025 \text{ mm} \approx 0,011 \text{ m}$$

$$\text{d'où } L_L = \left[4,6 \log \frac{8,95}{0,011} + \frac{1}{2} \right] \cdot 10^{-4} \text{ H/Km}$$

$$\text{d'où } L_L = 1,39 \times 10^{-3} \text{ H/Km}$$

- Réactance inductive: $X_L = 2\pi f \cdot L_L \cdot l \quad \Omega$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$l = 100 \text{ Km}$$

$$X_L = 314 \cdot L_L \cdot 100 \quad \Omega$$

$$\text{d'où } X_L = 43,6 \quad \Omega$$

- Capacité: $C_L = \frac{10^5}{A_{11} - A_{12}} \text{ F/Km}$

Notre étude étant faite pour une ligne simple terre d'où $A_{11} = [4,6 \log \frac{2h}{r}] \cdot 9 \cdot 10^9$
 et $A_{12} = 2,3 \log \left[\left(\frac{2h}{d} \right)^2 + 1 \right] \cdot 9 \cdot 10^9$

avec $h = \sqrt{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}$

L'équipement de la ligne est en vappes horizontale donc $h_1 = h_2 = h_3 = H - \frac{2}{3} f_c$

$$\left. \begin{aligned} H &= 20,2 \text{ m} = (22,8 - 2,6) \\ f_c &= (22,8 - 2,6) - 7 = 13,2 \text{ m} \end{aligned} \right\} \text{ d'où } h = 20,2 - \frac{2}{3} \cdot 13,2 = 11,4 \text{ m}$$

d'où $h = 11,4 \text{ m}$

Calcul de A_{11} : $A_{11} = [4,6 \log \frac{2 \cdot 11,4}{0,011}] \cdot 9 \cdot 10^9 = 137,3 \cdot 10^9$

Calcul de A_{12} : $A_{12} = 2,3 \log \left[\left(\frac{2 \cdot 11,4}{8,95} \right)^2 + 1 \right] \cdot 9 \cdot 10^9 = 18,1 \cdot 10^9$

donc $C_L = \frac{10^5}{(137,3 - 18,1) \cdot 10^9} = 8,39 \cdot 10^{-3} \text{ F/Km}$

d'où $C_L = 8,39 \cdot 10^{-3} \text{ F/Km}$

- Susceptance: $B_L = 2\pi f \cdot C_L \cdot l$

$f = 50 \text{ Hz}$

$l = 100 \text{ Km}$

$B_L = 314 C_L \cdot 100 \text{ S}$

d'où $B_L = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ S}$

- Conductance:

$G_L = (G_{12} + G_c) \cdot l$

Où prend $G_{12} = 0,005 \mu\text{S/Km}$

$G_c = \frac{P_c}{U_n^2}$ Calculons P_c pertes de puissance par effet de couronne en KW/Km et par phase
 Comme on l'a déjà vu au chapitre 2: $P_c = \frac{241}{8} (f+25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U_f - U_{fc})^2$

$U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ la tension simple.

Où a également $U_{cr} = 84 m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot r \cdot \log \frac{d}{r}$

$\delta = \frac{3,92 b}{273 + t}$

$b = 75 \text{ cm de Hg}$
 $t = 15^\circ$

d'où $\delta = 1,02$

$U_{cr} = 0,8 \cdot 0,84 \cdot 84 \cdot 1,02 \cdot 1,1 \cdot \log \frac{8,95}{0,011} = 184 \text{ KV}$

$U_{1,3cr} = 1,06 U_{cr} = 195 \text{ KV}$

d'où $U_{f,3cr} = \frac{U_{1,3cr}}{\sqrt{3}} = 113 \text{ KV}$

$U_{2cr} = 0,96 U_{cr} = 176 \text{ KV}$

$U_{f,2cr} = \frac{U_{2cr}}{\sqrt{3}} = 102 \text{ KV}$

$P_{c,i,j} = \frac{241}{8} (f+25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U_f - U_{f,i,cr})^2 \cdot 10^{-5} \text{ KW/Km et phase}$

donc $P_{c,1,3} = \frac{241}{1,02} (50+25) \sqrt{\frac{0,011}{8,95}} (127 - 113)^2 \cdot 10^{-5} = 1,22 \text{ KW/Km}$

$$\text{et } P_{c2} = \frac{241}{1,02} (50+25) \sqrt{\frac{0,01}{0,95}} (127-102) \cdot 10^{-5} = 3,88 \text{ KW/Km}$$

On aura donc $P_c = 2 P_{c1} + P_{c2} = 2(1,28) + 3,88 = 6,32 \text{ KW/Km}$.

et comme $G_c = \frac{P_c}{U_n^2}$ donc $G_c = \frac{6,32}{(220)^2} = 1,3 \cdot 10^{-4} \mu\text{S/Km}$

d'où $G_L = (G_{ic} + G_c) \cdot l = (0,005 + 1,3 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 \mu\text{S}$.

d'où $G_L = 0,51 \mu\text{S}$

- Impédance de la ligne: $Z_L = R_L + jX_L$

d'où $Z_L = 12,4 + j43,6 \Omega$

$$|Z_L| = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = 45,3 \Omega$$

$$\arg(Z_L) = \arctg \frac{X_L}{R_L} = 74^\circ$$

donc $Z_L = 45,3 \angle 74^\circ \Omega$.

- Admittance de la ligne: $Y_L = G_L + jB_L$

d'où $Y_L = (0,00051 + j0,26) \cdot 10^{-3} \text{ S}$.

$$|Y_L| = \sqrt{G_L^2 + B_L^2} = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$\arg(Y_L) = \arctg \frac{B_L}{G_L} = 89,9^\circ$$

donc $Y_L = 0,26 \cdot 10^{-3} \angle 89,9^\circ \text{ S}$.

(On prendra $Y_L = j0,26 \cdot 10^{-3} \text{ S}$).

b) Grandeurs caractéristiques pour le câble 411 mm²:

- Résistance: la résistance du conducteur étant $r_{20} = 0,088 \Omega/\text{Km}$

la résistance de la ligne sera: $R_L = r_{20} \cdot l \Omega$

$$R_L = 0,088 \times 100 = 8,8 \Omega$$

d'où $R_L = 8,8 \Omega$.

- Inductance: $L_L = \left[4,6 \log \frac{d}{r} + \frac{\mu}{2} \right] \cdot 10^{-4} \text{ H/Km}$

$$\text{ou on } d = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{31}}$$

$$d = \sqrt[3]{7,1 \cdot 7,1 \cdot 14,2} = 8,95 \text{ m}$$

$$\mu = 1$$

$$r = \frac{d_c}{2} = \frac{26,4}{2} = 13,2 \text{ mm} = 0,013 \text{ m}$$

d'où $L_L = \left[4,6 \log \frac{8,95}{0,013} + \frac{1}{2} \right] \cdot 10^{-4} \text{ H/Km}$

d'où $L_L = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ H/Km}$

- Réactance inductive: $X_L = 2\pi f \cdot L_L \cdot l$.

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$l = 100 \text{ km} \quad \text{donc} \quad X_L = 314 \cdot L_L \cdot 100 \Omega$$

$$\text{d'où} \quad X_L = 42,4 \Omega$$

$$\text{— Capacité:} \quad C_L = \frac{10^5}{A_{11} - A_{12}} \text{ F/km.}$$

$$\text{Pour une ligne simple terre:} \quad A_{11} = \left[4,6 \log \frac{2h}{r} \right] \cdot 9 \cdot 10^9$$

et

$$A_{12} = 2,3 \log \left[\left(\frac{2h}{d} \right)^2 + 1 \right] \cdot 9 \cdot 10^9$$

$$\text{avec } h = \sqrt[3]{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3} \quad \text{ou ou ou } h_1 = h_2 = h_3 = H - \frac{2}{3} f_c = h = 11,4 \text{ m}$$

$$\text{d'où} \quad A_{11} = \left[4,6 \log \frac{2 \cdot 11,4}{0,013} \right] \cdot 9 \cdot 10^9 = 134,3 \cdot 10^9$$

$$A_{12} = 2,3 \log \left[\left(\frac{2 \cdot 11,4}{8,95} \right)^2 + 1 \right] \cdot 9 \cdot 10^9 = 18,1 \cdot 10^9$$

$$\text{donc} \quad C_L = \frac{10^5}{(134,3 - 18,1) \cdot 10^9} = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ F/km}$$

$$\text{d'où} \quad C_L = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ F/km}$$

$$\text{— Susceptance:} \quad B_L = 2\pi f C_L \cdot l \text{ s.}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$l = 100 \text{ km}$$

$$B_L = 314 \cdot C_L \cdot 100 \text{ s}$$

$$\text{d'où} \quad B_L = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

— Conductance:

$$G_L = (G_{12} + G_C) \cdot l$$

$$\text{On prend } G_{12} = 0,005 \mu\text{S/km}$$

$$\text{D'une façon analogue au cas précédent on aura:} \quad U_{cr} = 84 \cdot 0,84 \cdot 0,8 \cdot 1,02 \cdot 1,3 \cdot \log \frac{8,95}{0,013}$$

$$U_{cr} = 216 \text{ KV.}$$

$$U_{cr1,5} = 1,06 U_{cr} = 229 \text{ KV.}$$

$$\text{d'où} \quad U_{f1,cr} = \frac{U_{cr1,5}}{\sqrt{3}} = 132 \text{ KV.}$$

$$U_{cr2} = 0,96 U_{cr} = 207 \text{ KV.}$$

$$U_{f2,cr} = \frac{U_{cr2}}{\sqrt{3}} = 120 \text{ KV.}$$

$$P_{c2} = \frac{241}{1,02} (50 + 25) \sqrt{\frac{0,013}{8,95}} (127 - 120)^2 \cdot 10^8 = 0,33 \text{ kW/km}$$

$$\text{On a alors } P_c = P_{c2} \quad \text{d'où} \quad G_C = \frac{P_c}{(U_n)^2} \quad \text{donc} \quad G_C = \frac{0,33}{(220)^2} = 0,07 \cdot 10^{-4} \mu\text{S/km}$$

$$\text{d'où} \quad G_L = (G_{12} + G_C) \cdot l = (0,005 + 0,07 \cdot 10^{-4}) \cdot 100 \mu\text{S}$$

$$\text{d'où} \quad G_L = 0,50 \mu\text{S}$$

$$\text{— Impédance de la ligne:} \quad Z_L = R_L + jX_L$$

$$\text{d'où} \quad Z_L = 8,8 + j42,4 \Omega$$

$$|Z_L| = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = 43,3 \Omega$$

$$\arg(z_L) = \arctg \frac{X_L}{R_L} = 78^\circ$$

$$\text{donc } Z_L = 45,3 \angle 78^\circ \Omega$$

- Admittance de la ligne:

$$Y_L = G_L + jB_L$$

$$\text{d'où } Y_L = (0,0005 + j0,27) \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$|Y_L| = \sqrt{G^2 + B^2} = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$\arg(Y_L) = \arctg \frac{B_L}{G_L} = 89,9^\circ$$

$$\text{donc } Y_L = 0,27 \cdot 10^{-3} \angle 89,9^\circ \text{ s}$$

(On prendra $Y_L = j0,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.)

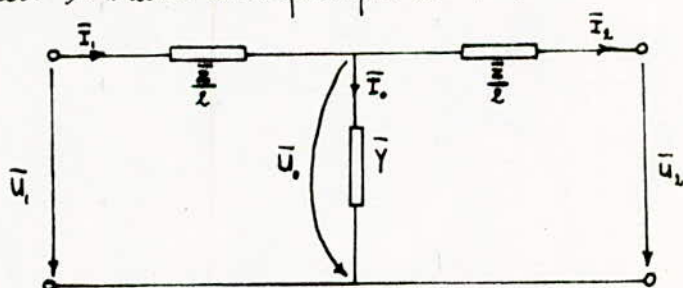
3°. Méthode de Calcul.

Le calcul électrique d'une ligne détermine les paramètres et les valeurs électriques dont dépendent la construction et le meilleur fonctionnement de celle-ci. Pour pouvoir tirer un profit maximum, on va faire une étude comparative de ces valeurs pour deux sections différentes. Le principe de la comparaison est basé sur le fait suivant:

Connaissant les grandeurs électriques au début de ligne, nous pouvons déterminer les grandeurs en fin de ligne afin de calculer chute de tension, chute de puissance et rendement pour chacune des sections proposées. Nous fixerons notre choix sur la section qui permet de transporter une certaine puissance avec un minimum de perte et un bon rendement.

La SONELGAZ se propose de faire transporter une puissance $P_1 = 180 \text{ MW}$ avec un facteur de puissance de $0,9 = \cos \varphi_1$ et une tension nominale $U_1 = 220 \text{ KV}$.

Considérons pour cela le schéma d'un quadripôle en "T":



On a:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2} \right) + \bar{Z}\bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4} \right)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2} \right) + \bar{U}_2 \bar{Y}$$

ou bien:

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2} \right) - \bar{Z}\bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4} \right)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2} \right) - \bar{U}_1 \bar{Y}$$

$$\text{On a } P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$\text{d'où } |\bar{I}_1| = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_1}$$

$$\bar{U}_2 = \bar{U}_1 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right) - \bar{Z}\bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4}\right)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_1 \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right) - \bar{U}_1 \bar{Y}$$

On a de plus $S_2 = 3 \bar{U}_2 \bar{I}_2^* = P_2 + j Q_2$.

$$\text{D'où } |\Delta \bar{U}| = |\bar{U}_1| - |\bar{U}_2|$$

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$\gamma = \frac{P_2}{P_1}$$

a). Calculs concernant le câble 288 mm²:

Pour avoir $Z_L = 12,4 + j 43,6 \ \Omega$ avec $|Z_L| = 45,3 \ \Omega$.

$Y_L = j 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ avec $|Y_L| = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ s}$.

d'autre part: $1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2} = 1 + \frac{(12,4 + j 43,6) \cdot j 0,26 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,994 + j 1,6 \cdot 10^{-5} \approx 0,994$

et: $1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4} = 1 + \frac{(12,4 + j 43,6) \cdot j 0,26 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,997 + j 0,8 \cdot 10^{-5} \approx 0,997$

- Calcul de \bar{I}_1 : $|\bar{I}_1| = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_1} = \frac{180 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 0,9} = 525 \text{ A}$

$\bar{I}_1 = |\bar{I}_1| \cos \varphi_1 - j |\bar{I}_1| \sin \varphi_1$ d'où $\bar{I}_1 = 525 \cdot 0,9 - j 525 \cdot 0,43$ (inductif).

donc $\bar{I}_1 = 472 - j 226 \text{ A}$.

U_1 étant prise comme origine de phase nous avons:

- Calcul de \bar{U}_2 : $\bar{U}_2 = 127 \cdot 10^3 \cdot 0,994 - (12,4 + j 43,6) (472 - j 226) \cdot 0,997$

d'où $\bar{U}_2 = 110,6 - j 17,7 \text{ KV}$

d'où $|\bar{U}_2| = 112 \text{ KV}$.

- Calcul de \bar{I}_2 : $\bar{I}_2 = (472 - j 226) \cdot 0,994 - j 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot 127 \cdot 10^3$

$\bar{I}_2 = 469 - j 258 \text{ A}$

d'où $|\bar{I}_2| = 535 \text{ A}$.

- Calculons \bar{S}_2 : $\bar{S}_2 = 3 \bar{U}_2 \bar{I}_2^*$
 $= 3 (110,6 - j 17,7) (469 + j 258)$

$\bar{S}_2 = 169 + j 61 \text{ MVA}$

$P_2 = 169 \text{ MW}$

$Q_2 = 61 \text{ MVAR}$

} $\varphi_2 = \arctg \frac{Q_2}{P_2} = 20^\circ$ d'où $\cos \varphi_2 = 0,9$

Calcul de la chute de tension:

$|\Delta \bar{U}|_{ph} = |\bar{U}_1|_{ph} - |\bar{U}_2|_{ph} = 127 - 112 = 15 \text{ KV}$.

donc $|\bar{U}| = 15 \text{ kV}$.

d'où $|\Delta\bar{U}| \% = \frac{|\Delta\bar{U}|}{|\bar{U}_1|} = \frac{15}{127} \cdot 100 = 11,8 \%$

d'où $|\Delta\bar{U}| \% = 11,8 \%$

Calcul de la chute de puissance :

$\Delta P = P_1 - P_2 = 180 - 169 = 11 \text{ MW}$

$\Delta P \% = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 = 6,1 \%$

d'où $\Delta P \% = 6,1 \%$

Calcul du rendement :

$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{169}{180} = 0,938$

d'où $\eta \% = 93,8 \%$

b) Calculs concernant le câble 411 mm^2 :

Nous avons $Z_L = 8,8 + j42,4 \ \Omega$ avec $|\bar{Z}_L| = 43,3 \ \Omega$

$Y_L = j0,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ avec $|\bar{Y}_L| = 0,27 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

d'autre part : $1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2} = 1 + \frac{(8,8 + j42,4) \cdot j0,27 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,994$

et : $1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4} = 1 + \frac{(8,8 + j42,4) \cdot j0,27 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,997$

- Calcul de \bar{I}_1 : $|\bar{I}_1| = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_1} = 525 \text{ A}$

$\bar{I}_1 = |\bar{I}_1| \cos \varphi_1 - j |\bar{I}_1| \sin \varphi_1$ d'où $\bar{I}_1 = 525 \cdot 0,9 - j 525 \cdot 0,43$ (inductif)

donc $\bar{I}_1 = 472 - j 226 \text{ A}$

- Calcul de \bar{U}_2 :

$\bar{U}_2 = 127 \cdot 10^3 \cdot 0,994 - (8,8 + j43,6)(472 - j 226) \cdot 0,997$

d'où $\bar{U}_2 = 112,5 - j 18 \text{ kV}$

d'où $|\bar{U}_2| = 114 \text{ kV}$

- Calcul de \bar{I}_2 :

$\bar{I}_2 = (472 - j 226) \cdot 0,994 - j 0,26 \cdot 10^{-3} \cdot 127 \cdot 10^3$

$\bar{I}_2 = 469 - j 259 \text{ A}$

d'où $|\bar{I}_2| = 536 \text{ A}$

- Calculons \bar{S}_2 :

$\bar{S}_2 = 3 \bar{U}_2 \bar{I}_2^*$

$= 3(112,5 - j 18)(469 + j 259)$

$\bar{S}_2 = 172 + j 62 \text{ MVA}$

$P_2 = 172 \text{ MW}$

$Q_2 = 62 \text{ MVAR}$

$\varphi_2 = \arctg \frac{Q_2}{P_2} = 19,8^\circ$

d'où $\cos \varphi_2 = 0,9$

Calcul de la chute de tension :

$$|\Delta \bar{U}|_{ph} = |\bar{U}_{1,ph} - \bar{U}_{2,ph}| = 127 - 114 = 13 \text{ KV}$$

$$\text{donc } |\Delta \bar{U}| = 13 \text{ KV}$$

$$\text{d'où } |\Delta \bar{U}| \% = \frac{|\bar{U}_{1,ph} - \bar{U}_{2,ph}|}{|\bar{U}_{1,ph}|} \cdot 100 = \frac{13}{127} \cdot 100 = 10,2 \%$$

$$\text{d'où } |\Delta \bar{U}| \% = 10,2 \%$$

Calcul de la chute de puissance :

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 180 - 172 = 8 \text{ MW}$$

$$\Delta P \% = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 = 4,4 \%$$

$$\text{d'où } \Delta P \% = 4,4 \%$$

Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{172}{180} = 0,956$$

$$\text{d'où } \eta \% = 95,6 \%$$

4°. Comparaison des résultats trouvés :

Toutes les valeurs entrant dans la comparaison sont consignées dans le tableau ci-dessous :

| Câble 288 mm ² | Câble 411 mm ² |
|----------------------------|---------------------------|
| $P_1 = 180 \text{ MW}$ | |
| $I_{adm} = 525 \text{ A}$ | $I_{adm} = 620 \text{ A}$ |
| $\Delta U = 11,8 \%$ | $\Delta U = 10,2 \%$ |
| $\Delta P = 6,1 \%$ | $\Delta P = 4,4 \%$ |
| $P_{jt} = 10,2 \text{ MW}$ | $P_{jt} = 7,2 \text{ MW}$ |
| $P_{cb} = 632 \text{ KW}$ | $P_{ct} = 33 \text{ KW}$ |
| $\eta = 93,8 \%$ | $\eta = 95,6 \%$ |

D'après les résultats énoncés dans ce tableau, on voit bien que, pour cette puissance que la SONEGAS se propose de transporter, le câble 288 mm² est à sa limite d'utilisation. De plus les pertes d'énergie sont plus élevées dans le cas du câble 288 mm² que dans celui du câble 411 mm².

Par conséquent, et en vertu de tout ce qui a été dit dans les chapitres précédents, il est plus intéressant d'adopter le câble 411 mm² pour la construction de la ligne 220 KV. (Oila - Bouisa).

3^{eme} PARTIE

Aspects Mecaniques D'une
Ligne Aerienne HT

Généralités.

Les divers éléments d'une ligne doivent être calculés pour pouvoir résister, avec les coefficients de sécurité imposés par le cahier des charges, aux efforts mécaniques qui leur sont appliqués sous l'influence des agents extérieurs. Parmi ces derniers nous retiendrons principalement l'effet du vent, du givre et des variations de la température. Chacun de ces trois agents atmosphériques peut devenir dangereux pour une exploitation normale de la ligne.

Il est donc nécessaire de résumer toutes les données pratiques servant de base à notre étude mécanique. Nous entendons par données pratiques : un ensemble de conditions d'environnement pouvant agir, en même temps ou séparément, sur les conducteurs. On les appellera hypothèses d'état imposées par le cahier des charges et énoncées comme suit :

— L'hypothèse EDS 20% :

température $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ sous vent
traction maximale 20% de la charge à la rupture.

— L'hypothèse normale d'été :

température $\theta = 30^{\circ}\text{C}$
pression du vent 48 cpz (48 daN/m^2); coefficient de sécurité 3.

— L'hypothèse normale d'hiver :

température $\theta = -5^{\circ}\text{C}$
pression du vent 10 cpz ; coefficient de sécurité 3.

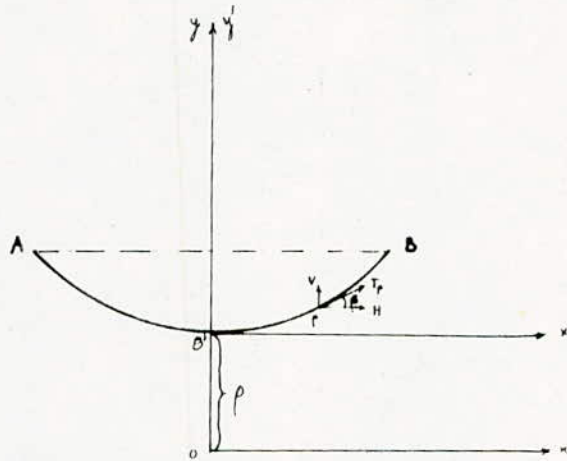
— L'hypothèse exceptionnelle d'hiver :

température $\theta = -5^{\circ}\text{C}$
pression du vent 72 cpz au conducteur nu.
Surcharge de givre : 2, 4 ou 6 Kg/m pour câble de phase
et 1,2 Kg/m pour câble de garde.
Coefficient de sécurité 1,75.

Fondements théoriques du Calcul mécanique.

Dans le calcul relatif aux conducteurs, on doit résoudre deux différents problèmes. Dans un premier temps on doit s'occuper du calcul des formules fondamentales et dans un second temps, s'occuper du calcul de la tension dans une hypothèse déterminée en partant de la tension connue du même conducteur dans une autre hypothèse.

1^{er}. Equation d'équilibre de la chaînette:



Considérons un conducteur suspendu entre deux points d'appui A et B situés à un même niveau, (terrain sans dénivellation). En outre pour des raisons de commodité de calcul on supposera que le conducteur de section constante est homogène (c'est à dire que le poids propre est uniformément réparti sur toute la longueur), inextensible et flexible.

Soit T_p : la tension dans le conducteur au point p quelconque de la courbe. Cette tension comme l'indique le schéma ci-dessus aura deux composantes dont l'une horizontale H et l'autre verticale V. La longueur de l'arc \widehat{OP} sera représentée par l.

Soit enfin μ la charge linéaire du conducteur.

On peut d'après la figure ci-dessus écrire que:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V}{H} \quad (1)$$

d'autre part: $V = \mu \cdot l \quad (2)$ donc $\operatorname{tg} \beta = \frac{\mu \cdot l}{H}$

On voit que, d'après la relation (1), la forme de la courbe reste inchangée en faisant varier proportionnellement V et H en même temps. Par conséquent pour une même longueur d'arc l, on

peut toujours obtenir le même résultat en changeant proportionnellement μ et H . On peut alors écrire que:

$$H = \rho \mu \quad (3) \quad \text{avec } \rho \text{ un facteur de proportionnalité que l'on appellera paramètre de la courbe.}$$

L'expression (1) devient alors $\operatorname{tg} \beta = \frac{\mu \cdot l}{\rho \cdot \mu}$ d'où il vient: $\operatorname{tg} \beta = \frac{l}{\rho} \quad (4)$

La tangente de l'angle β de la courbe par rapport à l'axe Ox est proportionnelle à l'arc considéré. En dérivant l'expression (4) on aura:

$$\frac{d}{dx} (\operatorname{tg} \beta) = \frac{d}{dx} \left(\frac{l}{\rho} \right)$$

par ailleurs, $\operatorname{tg} \beta = \frac{dy}{dx}$ d'où $\frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dl}{dx}$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\rho} \frac{dl}{dx} \quad (5)$$

ou $dl^2 = dx^2 + dy^2$ ce qui donne $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$

$$dl = \sqrt{dx^2 \left(1 + \frac{dy^2}{dx^2} \right)}$$

$$\text{d'où } dl = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}$$

il vient: $\frac{dl}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}$

En substituant cette valeur dans l'expression (5) on obtient une équation différentielle:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{\rho} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \quad (6)$$

Et la solution de cette équation sera: $y = \frac{\rho}{2} \left(e^{\frac{x}{\rho}} + e^{-\frac{x}{\rho}} \right) = \rho \operatorname{ch} \frac{x}{\rho}$

faisons un développement en série de $\operatorname{ch} \frac{x}{\rho}$:

$$\operatorname{ch} \frac{x}{\rho} = 1 + \frac{x^2}{2\rho^2} + \frac{x^4}{24\rho^4} + \varepsilon \left(\frac{x^4}{24\rho^4} \right)$$

$$\text{d'où } y = \rho \operatorname{ch} \frac{x}{\rho} = \rho + \frac{x^2}{2\rho} + \frac{x^4}{24\rho^3} + \varepsilon \left(\frac{x^4}{24\rho^3} \right)$$

En s'arrêtant au deuxième ordre du développement en série: $y = \rho + \frac{x^2}{2\rho}$

Faisons un changement d'origine. Les coordonnées de ρ par rapport à la nouvelle origine O' sont:

$$x' = x$$

$$y' = y - \rho$$

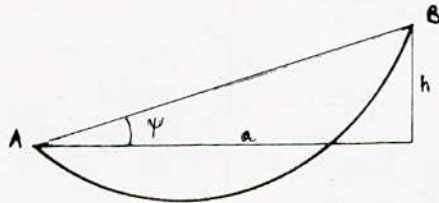
$$\text{d'où } y' = \rho + \frac{x'^2}{2\rho} - \rho$$

$$\text{donc } y' = \frac{x'^2}{2\rho}$$

On reconnaît là l'équation d'une parabole.

De cette façon, pour la pratique d'utilisation des formules de calcul on substituera dans tout ce qui suit, la parabole à la chaînette. Cette approximation est parfaitement justifiée même pour les grandes portées.

b). Equation d'équilibre de la corde prise par un fil tendu entre deux points de niveaux différents:



L'équation $y = \frac{x^2}{2p}$ qu'on a vu dans le paragraphe précédent s'applique même aux conducteurs dont les points d'appui sont légèrement dénivelés.

Lorsque la dénivellation devient importante ou que la portée soit trop grande c'est-à-dire ne dépassant pas 500 m environ, l'équation devient alors:

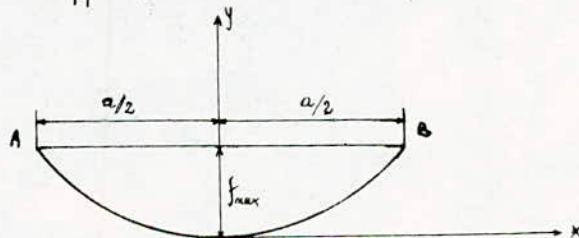
$$y = \frac{x^4}{2p \cos^2 \psi} \quad \text{avec} \quad \psi = \operatorname{arctg} \frac{h}{a}.$$

2°. Etablissement des formules fondamentales:

a). flèche d'un conducteur:

C'est la distance entre la ligne reliant les points d'attache du conducteur et un point quelconque de celui-ci. La flèche aura une valeur maximale au milieu de la distance entre les deux points d'appui. La flèche s'obtient en fonction de la portée. Nous allons considérer deux cas:

1^{er} cas: Les deux points d'appui sont au même niveau:



On a vu dans ce qui précède que l'équation de cette parabole était: $y = \frac{x^2}{2p}$ (1)
La valeur maximale de la flèche sur l'ordonnée y_{\max} qui s'obtient en faisant

(1) $x = \frac{a}{2}$ d'où $y_{\max} = \frac{a^2}{8p}$.

D'où l'expression de la flèche maximale:
Le résultat n'est valable que pour des petites

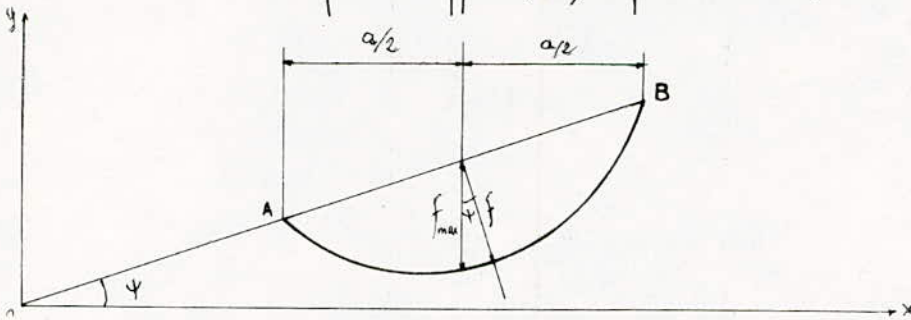
$$f = \frac{a^2}{8p}$$

portées car en faisant le dévelop-

-peuvent en series de $p \text{ ch } \frac{x}{a}$, on a uniquement pris le premier terme de celui-ci. L'erreur qu'on commet n'est pas tellement appreciable. En realite, pour de grandes portees, cette erreur devient importante en ce sens qu'on ne peut plus negliger la deuxieme voire meme le troisieme terme du developpement. D'ou l'expression de la fleche devient dans ce cas:

$$f = \frac{a^2}{8p} + \frac{a^4}{384p^3}$$

2^e cas: Les deux points d'appui ne sont pas aux memes niveaux:



De la meme facon d'apres la figure ci-dessus on a: $f = f_{\max} \cos \psi$

$$\text{d'ou } f_{\max} = \frac{f}{\cos \psi}$$

La aussi, pour de petites portees et faibles demivallations, en remplaçant f par sa valeur $\frac{a^2}{8p}$ alors la fleche maximale devient: $f = \frac{a^2}{8p \cos \psi}$

Par contre dans le cas des grandes portees et fortes demivallations on aura de la meme facon:

$$f_{\max} = \frac{f}{\cos \psi}$$

$$\text{d'ou } f = \left(\frac{a^2}{8p} + \frac{a^4}{384p^3} \right) \cdot \frac{1}{\cos \psi}$$

On a pris uniquement, dans les deux cas, les deux premiers termes du developpement en series cos, en general dans la pratique, on evite les tres grandes portees et les tres fortes demivallations; on recherche toujours les moindres difficultes pour la construction.

b) Longueur du conducteur entre les deux points d'appui:

C'est une grandeur importante surtout dans le cas des tres grandes portees ou le conducteur est speciallement commode. Les jonctions n'etant pas permises il est donc necessaire d'avoir une longueur suffisante. La aussi nous considerons deux cas:

1^{er} cas. Les deux points d'appui sont au meme niveau:

Dans ce cas la longueur de la chaînette s'obtient en integrant un element differentiel de longueur dl . On a deja vu dans ce qui precedait que:

$$dl = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2}$$

comme $y = \rho \frac{dx}{\rho}$ alors $\frac{dy}{dx} = - \frac{h x}{\rho}$

$$\text{donc } dl = dx \sqrt{1 + \frac{h^2 x^2}{\rho^2}} = dx \sqrt{\frac{h^2 x^2}{\rho^2} + 1} = \left| \frac{h x}{\rho} \right| dx$$

$$\text{donc } l = 2 \int_0^{a/2} \left| \frac{h x}{\rho} \right| dx \Rightarrow l = 2 \int_0^{a/2} \frac{h x}{\rho} dx = 2 \rho \frac{h a}{2 \rho}$$

$$\text{donc } l = 2 \rho \frac{h a}{2 \rho}$$

En faisant un développement en séries de $\frac{h a}{2 \rho}$ on obtient:

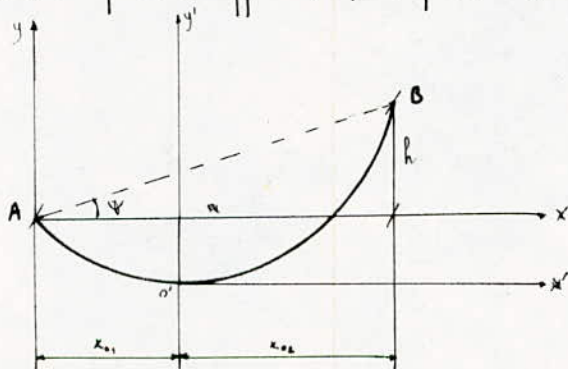
$$\frac{h a}{2 \rho} = \frac{a}{2 \rho} + \frac{a^3}{48 \rho^3} + \varepsilon \left(\frac{a^5}{48 \rho^5} \right)$$

$$\text{alors } l = 2 \rho \left[\frac{a}{2 \rho} + \frac{a^3}{48 \rho^3} + \varepsilon \left(\frac{a^5}{48 \rho^5} \right) \right]$$

d'où on obtient en gardant les 2 premiers termes: $l = a + \frac{a^3}{24 \rho^2}$

Si on exprime la longueur en fonction de la flèche: $l = a + \frac{8 f^3}{3 a}$

2 cas: Les deux points d'appui ne sont pas au même niveau:



En faisant le changement d'axe indiqué sur la figure ci-dessus on arrive à:

$$x = x' + x_0$$

$$y = y' + y_0$$

$$\text{avec } y = \frac{x^2}{2\rho} \quad \text{et } y_0 = \frac{x_0^2}{2\rho}$$

Pour $y = h$ et $x = a$, l'équation obtenue $y = \frac{x^2}{2\rho} - \frac{x_0 x}{\rho}$ doit être vérifiée. Donc pour ces deux coordonnées on aura:

$$h = \frac{a^2}{2\rho} - \frac{x_0 a}{\rho} \quad \text{d'où} \quad x_{01} = \frac{a}{2} - \rho \frac{h}{a}$$

Cette relation nous donne la distance entre le point le plus bas de la courbe et l'appui le plus bas. Par le même raisonnement on aura la distance entre le point le plus bas de la courbe et l'appui le plus haut: $x_{02} = \frac{a}{2} + \rho \frac{h}{a}$

La longueur totale de l'arc dans ce cas sera la somme des deux arcs O'A et O'B.

$$l_t = l_1 + l_2$$

et comme $l = a + \frac{a^3}{24\rho^2}$

par analogie $l_1 = x_{o_1} + \frac{x_{o_1}^3}{24\rho^2}$ et $l_2 = x_{o_2} + \frac{x_{o_2}^3}{24\rho^2}$

En substituant x_{o_1} et x_{o_2} par leurs valeurs on aura:

$$l_1 = \frac{a}{2} - \rho \frac{h}{a} + \frac{1}{24\rho^2} \left(a - \rho \frac{h}{a} \right)^3$$

$$l_2 = \frac{a}{2} + \rho \frac{h}{a} + \frac{1}{24\rho^2} \left(a + \rho \frac{h}{a} \right)^3$$

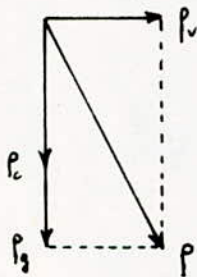
d'où $l_t = l_1 + l_2 = a + \frac{h^2}{2a} + \frac{a^3}{24\rho^2}$

Donc la longueur totale de l'arc sera: $l = a + \frac{h^2}{2a} + \frac{a^3}{24\rho^2}$

c). Coefficient de surcharge:

Mis à part son propre poids, le conducteur est soumis à des charges supplémentaires (dûes éventuellement au vent et au dépôt de givre) qu'on appelle surcharges. En considérant que celles-ci sont uniformément réparties le long du conducteur, on peut déterminer une charge équivalente rapportée au poids propre de ce dernier. Cette charge rapportée au poids propre, sera donc appelée coefficient de surcharge que l'on désignera par: m

En schématisant les forces qui peuvent s'exercer en un point p quelconque du conducteur on aura:



- avec P_v la surcharge unitaire due au vent (Kg/m).
- P_c poids propre unitaire du conducteur (Kg/m).
- P_g poids unitaire dû au givre (Kg/m).
- P le poids total unitaire. (Kg/m).

On a alors $P^2 = P_v^2 + (P_c + P_g)^2$

d'où $P = \sqrt{P_v^2 + (P_c + P_g)^2}$

Le coefficient de surcharge m sera défini comme le rapport du poids total unitaire sur le poids unitaire du conducteur:

$$m = \frac{P}{P_c}$$

d'où $m = \frac{\sqrt{P_v^2 + (P_c + P_g)^2}}{P_c}$

et $P = m P_c$

3: Equation de changement d'état d'un conducteur :

a). Conducteur entre deux points d'appui au même niveau :

Nous définissons l'état initial par :

θ_0 la température.

T_0 la tension totale.

l_0 la longueur du conducteur entre les deux points d'appui.

p_0 le poids propre du conducteur.

m_0 le coefficient de surcharge.

De la même façon l'état final par :

θ la température.

T la tension totale.

l la longueur du conducteur entre les deux points d'appui.

p le poids propre du conducteur.

m le coefficient de surcharge.

Désignons par α le coefficient de dilatation du métal composant le conducteur. Sous l'influence du changement de température $(\theta - \theta_0)$, le conducteur ayant la longueur l_0 à la température θ_0 ; prend donc à la température θ , une longueur égale par définition à :

$$l_0 + l_0 \alpha (\theta - \theta_0) = l$$

On dira alors que le conducteur a subi un allongement thermique.

D'autre part, comme le conducteur est fixé à ses deux extrémités, son allongement modifiera simplement la tension T_0 en une tension T .

Désignons par E le module de Young du métal constituant le conducteur. Sous l'influence d'une variation de la tension $(T - T_0)$, la longueur subira un allongement élastique, par définition égal à :

$$l_0 \frac{(T - T_0)}{E}$$

Il en résulte donc un allongement $(l - l_0)$ dû à l'influence simultanée de la variation de la température et de la variation de la tension, égal à :

$$l - l_0 = l_0 \alpha (\theta - \theta_0) + l_0 \frac{(T - T_0)}{E} \quad (1)$$

Par ailleurs on a exprimé la longueur par : $l = a \left(1 + \frac{a^2}{24 \rho^2} \right)$
 et comme $\rho = \frac{T}{P}$ ($\frac{\text{tension totale}}{\text{poids total}}$)

ou à ceci $\rho = \frac{T}{m p_c}$ d'où $\frac{1}{\rho} = \frac{m p_c}{T}$

$$l = a \left(1 + \frac{a^2}{24 \rho^2} \right) \quad \text{d'où} \quad \frac{l}{a} = 1 + \frac{a^2 m^2 p_c^2}{24 T^2}$$

$$l_0 = a \left(1 + \frac{a^2}{24 \rho^2} \right) \quad \text{d'où} \quad \frac{l_0}{a} = 1 + \frac{a^2 m_0^2 \rho_0^2}{24 T_0^2}$$

l'allongement s'exprimera alors suivant l'équation :

$$\frac{l}{a} - \frac{l_0}{a} = \left(1 + \frac{a^2 m^2 \rho^2}{24 T^2} \right) - \left(1 + \frac{a^2 m_0^2 \rho_0^2}{24 T_0^2} \right) = \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right) \quad (2)$$

En divisant l'équation (1) par a et en l'égalisant avec la (2) on obtient :

$$\frac{l_0}{a} \alpha (\theta - \theta_0) + \frac{l_0}{a} \cdot \left(\frac{T - T_0}{E} \right) = \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right) \quad (3)$$

En considérant que l'allongement relatif est négligeable on aura donc : $\frac{l_0}{a} \approx 1$. Cette approximation faite on obtient :

$$\alpha (\theta - \theta_0) + \frac{(T - T_0)}{E} = \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right) \quad (3')$$

En développant l'expression (3') on obtient l'équation donnant la tension totale à l'état finale connaissant la tension à l'état initial.

$$T^3 + T^2 \left[\alpha E (\theta - \theta_0) + \frac{a^2 m_0^2 \rho_0^2}{24 T_0^2} E - T_0 \right] = \frac{a^2 m^2 \rho^2}{24} E \quad (4)$$

b). Conducteur entre deux points d'appui de niveaux différents :

Nous garderons les mêmes notations que dans le cas précédent et proposons-nous d'établir l'équation de changement d'état dans ce cas. Notons par ailleurs que la tension n'est plus ce qu'elle était dans le cas précédent, en réalité cette valeur T est augmentée du produit py . (p le poids total et y l'ordonnée.). Il est donc plus raisonnable de parler de tension moyenne :

$$T_m \approx \frac{I}{\cos \psi} = T + T \frac{h^2}{2a^2} + \frac{a^2}{2\rho} p \quad (1)$$

On a vu également que dans un tel cas : $l = a \left(1 + \frac{h^2}{2a^2} + \frac{a^2}{24\rho^2} \right)$ et $l_0 = a \left(1 + \frac{h^2}{2a^2} + \frac{a^2}{24\rho_0^2} \right)$

$$\text{d'où} \quad l - l_0 = a \cdot \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right) \quad (2)$$

D'autre part comme $a = a_0 \cos \psi$:

$$l - l_0 = a_0 \cos \psi \cdot \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right)$$

$$\text{d'où} \quad \frac{l}{a_0} - \frac{l_0}{a_0} = \cos \psi \cdot \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right) = \frac{l_0}{a_0} \alpha (\theta - \theta_0) + \frac{l_0}{a_0} \left(\frac{T_m - T_{m_0}}{E} \right)$$

ou comme $\frac{l_0}{a_0} \approx 1$ et que $T_m = \left(1 + \frac{h^2}{2a^2} \right) T$

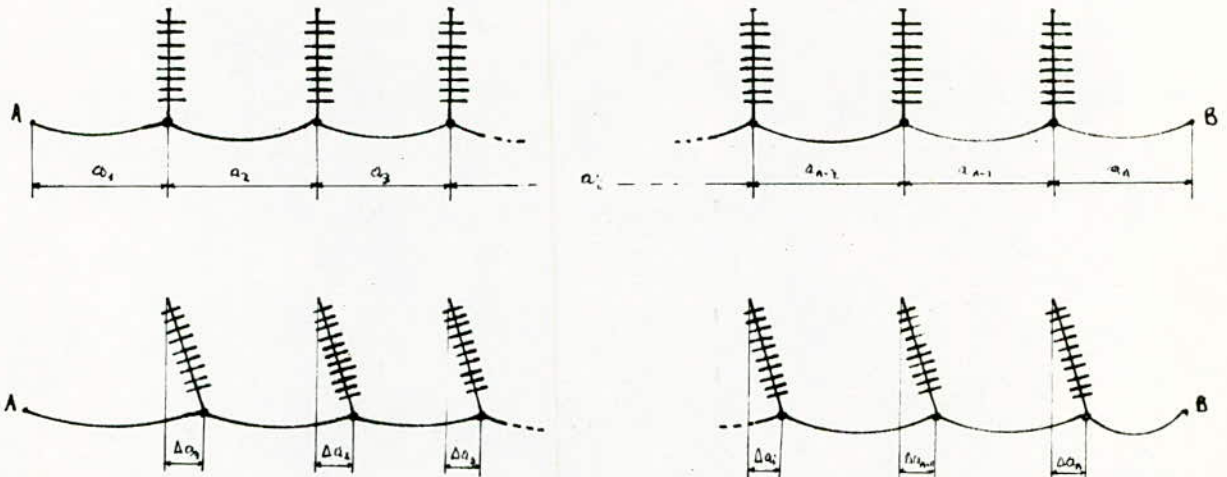
$$\text{on aura :} \quad \cos \psi \cdot \frac{a^2}{24} \left(\frac{m^2 \rho^2}{T^2} - \frac{m_0^2 \rho_0^2}{T_0^2} \right) = \alpha (\theta - \theta_0) + \left(1 + \frac{h^2}{2a^2} \right) \cdot \frac{(T - T_0)}{E} \quad (3)$$

donc en développant cette équation on obtient celle de changement d'état :

$$\left(1 + \frac{h^2}{2a^2}\right) T^3 + T^2 \left[\alpha E (\theta - \theta_0) + \frac{\alpha^2 m^2 p_0^2}{24 T_0^2} \omega \psi \right] - \left(1 + \frac{h^2}{2a^2}\right) T_0 = \frac{\alpha^2 m^2 p_0^2}{24} E \omega \psi$$

4. Généralisation de l'équation de changement d'état d'un conducteur.

Jusqu'ici nous avons exprimé l'équation de changement d'état pour une seule portée entre deux points d'appui rigoureusement fixes. En réalité nous avons plusieurs portées entre deux ouvrages. Entre ces deux ouvrages la ligne est équipée en alignement avec des pylônes munis de chaînes de suspension. L'extrémité inférieure des chaînes de suspension sera donc libre de se mouvoir à la suite d'une différence de tension des portées adjacentes.



Considérons comme l'indique le schéma ci-dessus une suite de n portées entre deux ouvrages A et B. Nous garderons les mêmes notations que dans les cas particuliers d'une seule portée simple.

a). Cas des portées de niveau:

Désignons par $a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n$ cette suite de portées inégales et par $\sum_{i=1}^n a_i^3$ la somme des cubes des portées ainsi que $\sum_{i=1}^n a_i$ la somme des portées.

Le principe de calcul reste le même sauf que: au lieu de l on aura $\sum_{i=1}^n a_i$

L'allongement élastique s'écrira: $\sum_{i=1}^n a_i \frac{(T - T_0)}{E}$

L'allongement thermique s'écrira: $\sum_{i=1}^n a_i \alpha (\theta - \theta_0)$

Soit l'équation d'état:

$$\sum_{i=1}^n a_i^3 \left(\frac{m^2 p_0^2}{24 T^2} - \frac{m^2 p_0^2}{24 T_0^2} \right) = \sum_{i=1}^n a_i \alpha (\theta - \theta_0) + \sum_{i=1}^n a_i \frac{(T - T_0)}{E}$$

On obtient alors:
$$T^3 + T^2 \left[\alpha E (\theta - \theta_0) + \frac{m^2 p_0^2}{24 T_0^2} E \frac{\sum a_i^3}{\sum a_i} - T_0 \right] = \frac{m^2 p_0^2}{24} E \frac{\sum a_i^3}{\sum a_i}$$

b). Cas des portées dénivelées:

Par analogie au cas d'une portée simple on peut résumer l'équation de changement d'état à:

$$\frac{\sum a_i^3 \omega \psi}{\sum a_i} \left[\frac{m^2 p_0^2}{24 T^2} - \frac{m^2 p_0^2}{24 T_0^2} \right] = \alpha (\theta - \theta_0) + \frac{(T - T_0)}{E} \frac{\sum a_i (1 + h^2 / 2a_i^2)}{\sum a_i}$$

On arrive à l'équation finale en posant $a_{im}^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i}$

$$\text{et } \mu_i = \frac{\sum a_i \left(1 + \frac{h^2}{2a_i}\right)}{\sum a_i}$$

$$\text{d'où : } \mu_i T^3 + T^2 \left[2E(\theta - \theta_0) + \frac{m_0^2 g^2}{24 T_0} E a_{im}^2 - \mu_i T_0 \right] = \frac{m_0^2 g^2 E a_{im}^2}{24}$$

Remarque :

Dans toutes ces formules exprimant la tension totale dans un état quelconque en partant de l'état initial, il est nécessaire de noter qu'elles peuvent se mettre sous la forme $T^2(T+A) = B$. Cette dernière expression se prête assez facilement à la résolution par itération pour trouver la valeur de T.

La répartition.

1. La répartition et ses problèmes:

Pour pouvoir faire la répartition des pylônes le long de la ligne, il faut d'abord disposer du profil topographique de la ligne. Les profils doivent comporter les renseignements suivants:

- Echelles: 1: 2000 pour les longueurs.
1: 500 pour les hauteurs.

- Détails de planimétrie: ils seront portés au moins sur 50 m de part et d'autre de l'axe de la ligne. La planimétrie doit aussi indiquer les ouvrages traversés et les nommer avec leur P.H. et P.K. (entrepôts, voies ferrées, routes nationales, bâtiments à usage divers et...).

- Détails d'altimétrie: l'altimétrie doit indiquer de manière précise la hauteur de tous les ouvrages croisés (lignes HT, MT, BT, lignes PTT et...).

Le profil topographique est le résultat d'une procédure assez longue qui est la suivante:

a). Étude topographique:

Pendant que se déroule l'enquête sur le tracé de la ligne dont l'aboutissement demande plusieurs mois, l'étude topographique commence dès qu'est obtenu l'arrêté de pénétration dans les propriétés, délivré par l'administration. Il est préférable de faire faire cette étude par un géomètre connaissant les problèmes liés à la construction d'une ligne électrique sérieuse.

b). Balisage sommaire:

Le premier balisage est effectué par le géomètre de manière à matérialiser sur le terrain le tracé de principe de la ligne figurant sur la carte qui lui a été remise.

Le balisage sommaire permet de s'assurer que ce tracé satisfait à certaines exigences à savoir:

- une distance minimale de 150 m par rapport aux agglomérations et de 40 m par rapport aux habitations isolées.

c). Balisage définitif:

Une fois le balisage sommaire accepté (après avoir subi ou non des modifications proposées par le géomètre), on passe au balisage définitif de la ligne. Il s'agira alors de la matérialisation effective du tracé sur le terrain et non d'une ébauche. On doit à ce moment là respecter certaines règles très importantes concernant:

- les traversées.

- Le parallélisme avec les lignes téléphoniques.
- Le parallélisme avec des canalisations.
- Les propriétés d'axes...
- L'emplacement des pylônes d'angle.
- Les traversées des vallées et cours d'eau.

2°. Choix du paramètre de répartition :

Dès que l'on dispose du profil topographique contenant tous les renseignements que l'on vient de citer, on procède à la répartition des pylônes le long du tracé de la ligne.

Le choix du paramètre de répartition se fait à partir des différentes hypothèses d'état dont on a déjà fait mention.

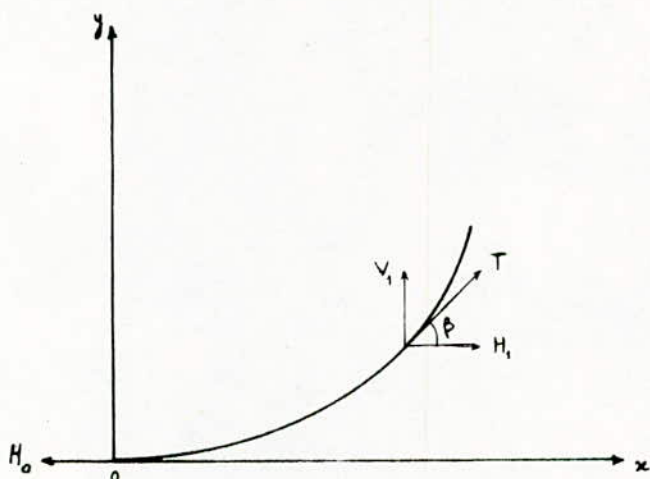
a). Définition mathématique du paramètre de répartition :

Soit p_c le poids propre unitaire du conducteur (Kg/m).

s_c la section du conducteur (mm^2).

w_0 le poids spécifique unitaire ($\text{Kg/m} \cdot \text{mm}^2$).

t_0 la tension unitaire horizontale dans le conducteur (Kg/mm^2) et l la longueur en (m).



$$H_1 = H_0 = s_c t_0$$

$$V_1 - V_0 = p_c l$$

$$t_0 \beta = \frac{l}{\rho} = \frac{V_1}{H_1} = \frac{p_c l}{s_c t_0}$$

$$\text{ou } p_c = w_0 s_c$$

donc on arrive à $\frac{1}{\rho} = \frac{p_c}{s_c t_0} = \frac{w_0 s_c}{s_c t_0}$ d'où $\rho = \frac{t_0}{w_0}$

On voit immédiatement que ρ est fonction de la tension car w_0 étant constant.

b). Étude des courbes des variations des portées limites en fonction du paramètre de répartition.

Ces variations se font pour des tensions ne dépassant pas les tensions maximales.

Le paramètre de répartition représente le conducteur à un état considéré initial ($\theta = 50^\circ \text{C}$, sans vent ni glace), quand les flèches ont les grandes valeurs avec des gardes au sol les plus petites.

(ces dernières sont imposées par le cahier des charges à 7m).

En effet il s'agit de trouver les portées maximales pour lesquelles on atteint les tensions

maximales admissibles le paramètre de répartition étant variable.

Nous faisons donc ce calcul pour le conducteur choisi c'est à dire 411 mm² Alu. acier dans chaque hypothèse d'état et nous obtenons un ensemble de courbes que l'on appelle : courbes d'utilisation du conducteur.

D'après les équations de changement d'état données dans le chapitre précédent on peut exprimer la tension totale en fonction de la tension unitaire horizontale t ainsi l'équation de changement d'état devient :

$$t^3 + t^2 \left[\alpha E (\theta - \theta_0) + \frac{\alpha^2 m_0^2 \omega_0^2 E}{24 t_0^2} - t_0 \right] = \frac{\alpha^2 m_0^2 \omega_0^2 E}{24} \quad (1)$$

avec t la tension horizontale unitaire à l'état final

t_0 " " " " " " initial

En développant donc l'expression (1) et en séparant les valeurs de α^2 on obtient :

$$\alpha^2 \omega_0^2 E (t^2 m_0^2 - t_0^2 m_0^2) = 24 t_0^2 t^2 [t_0 - \alpha E (\theta - \theta_0) - t]$$

d'autre part comme : $\rho = \frac{t_0}{\omega_0}$ d'où $t_0 = \rho \omega_0$

d'où $\alpha^2 \omega_0^2 E (t^2 m_0^2 - \rho^2 \omega_0^2 m^2) = 24 \rho^2 \omega_0^2 t^2 [\rho \omega_0 - \alpha E (\theta - \theta_0) - t]$

d'où la valeur de : $\alpha^2 = \frac{24 \rho^2 t^2 [\rho \omega_0 - \alpha E (\theta - \theta_0) - t]}{E (t^2 m_0^2 - \rho^2 \omega_0^2 m^2)}$

d'où : $a = \rho t \sqrt{\frac{24}{E}} \cdot \sqrt{\frac{\rho \omega_0 - \alpha E (\theta - \theta_0) - t}{m_0^2 t^2 - \rho^2 \omega_0^2 m^2}} \quad (2)$

posons alors

$$A = \rho t \sqrt{\frac{24}{E}}$$

$$B = \rho \omega_0 - \alpha E (\theta - \theta_0) - t$$

$$C = m_0^2 t^2 - \rho^2 \omega_0^2 m^2$$

On peut cependant écrire que $a = A \sqrt{\frac{B}{C}}$

Delà on peut alors a en fonction du paramètre aux différentes hypothèses :

- hypothèse EDS 20% : avec coefficient de sécurité 3.

l'état initial sera défini par $\theta_0 = 50^\circ \text{C}$

$$m_0 = 1$$

$$t_0 = \rho \omega_0$$

l'état final par : $\theta = 30^\circ \text{C}$

$$m = 1$$

$$t_{\max} = \frac{16500 \times 0,2}{411} = 8,03 \text{ Kg/mm}^2$$

comme on a exprimé :

$$t = 0,95 t_{\max} = 7,63 \text{ Kg/mm}^2.$$

Remarque:

On a pris $t = 0,95 t_{max}$ pour tenir compte du fait que la tension unitaire horizontale est inférieure à la tension aux points d'appui.

On a alors pour $\alpha = 0$ $B = 0$

$$\text{d'où } \rho w_0 - \alpha E(\theta - \theta_0)t = 0 \quad \text{alors } \rho_0 = \frac{\alpha E(\theta - \theta_0)}{w_0}$$

Le calcul donne $\rho_0 = 1294 \text{ m}$

De la même façon on dira que $\alpha \rightarrow +\infty$ qd $C \rightarrow 0$

$$\text{d'où } t^2 - \rho^2 w_0^2 = 0 \quad \text{alors } \rho_\infty = \frac{t}{w_0}$$

ce qui nous donne $\rho_\infty = 1967 \text{ m}$

Maintenant on peut trouver α pour les différentes valeurs de ρ tel que $1294 \text{ m} \leq \rho \leq 1967 \text{ m}$.

Nous résumons donc ces valeurs en un tableau donnant α en fonction de ρ .

| | | | | | | | |
|----------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| $\rho \text{ (m)}$ | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 |
| $\alpha \text{ (m)}$ | 53,3 | 91 | 139,4 | 180,6 | 243,3 | 362,1 | 646 |

— L'hypothèse normale d'été: coefficient de sécurité 3.

L'état initial sera défini par: $\theta_0 = 50^\circ\text{C}$

$$m = 1$$

$$t_0 = \rho w_0$$

L'état final sera: $\theta = 30^\circ\text{C}$

$$m = \frac{\sqrt{t_0^2 + t^2}}{t} = 1,29$$

$$t_{max} = \frac{16500}{3 \times 411} = 13,38 \text{ Kg/mm}^2$$

$$t = 0,95 t_{max} = 12,79 \text{ Kg/mm}^2$$

Pour $\alpha = 0$ $B = 0$

D'où par un calcul analogue au cas précédent on en déduit que $\rho_0 = 2523 \text{ m}$

De même $\alpha \rightarrow +\infty$ quand $C \rightarrow 0$ d'où $\rho_\infty = 2545 \text{ m}$

D'où le tableau donnant α en fonction de ρ tel que $2523 \text{ m} \leq \rho \leq 2545 \text{ m}$.

| | | | | |
|----------------------|------|-------|-------|----------|
| $\rho \text{ (m)}$ | 2523 | 2530 | 2540 | 2545 |
| $\alpha \text{ (m)}$ | 0 | 204,4 | 560,6 | ∞ |

— L'hypothèse normale d'hiver: coefficient de sécurité 3.

L'état initial défini par: $\theta = 50^\circ\text{C}$

$$m = 1$$

$$t_0 = \rho w_0$$

L'état final sera défini par:

$$\theta = -5^{\circ}$$

$$m = \frac{\sqrt{p_c^2 + p_c^2}}{p_c} = 1,05$$

$$t_{max} = \frac{16500}{3 \cdot 411} = 13,38 \text{ Kg/mm}^2$$

$$t = 12,79 \text{ Kg/mm}^2$$

pour $a=0$ $B=0$ d'où $p_0 = 1206 \text{ m}$

pour $a \rightarrow \infty$ $C \rightarrow 0$ d'où $p_{\infty} = 3137 \text{ m}$

Tableau donnant a en fonction de p tel que $1206 \text{ m} \leq p \leq 3137 \text{ m}$

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| p (m) | 1206 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 | 2200 | 2300 | 2400 | 2500 |
| a (m) | 0 | 46,1 | 72,8 | 98,1 | 123,7 | 150,7 | 179,2 | 210,6 | 245 | 283,7 | 326 | 374,8 | 431,5 | 498,8 |

- Hypothèse exceptionnelle d'hiver: coefficient de sécurité 1,75.

L'état initial est défini par: $\theta_0 = 50^{\circ}$

$$m_0 = 1$$

$$t_0 = p w_0$$

L'état final est défini par:

$$\theta = -5^{\circ}$$

$$m = \frac{\sqrt{(p_c + p_0)^2 + p_c^2}}{p_c} = 2,56$$

$$t_{max} = \frac{16500}{1,75 \cdot 411} = 22,94 \text{ Kg/mm}^2$$

$$t = 21,79 \text{ Kg/mm}^2$$

surcharge de 2 kg de glace.

pour $a=0$ $B=0$ d'où $p_0 = 3546 \text{ m}$

pour $a \rightarrow +\infty$ $C \rightarrow 0$ d'où $p_{\infty} = 2192 \text{ m}$

D'où le tableau donnant a en fonction de p tel que $3546 \text{ m} \geq p \geq 2192 \text{ m}$

| | | | | | | | |
|---------|----------|-------|-------|------|------|------|--|
| p (m) | 2192 | 2200 | 2300 | 2400 | 2500 | 2600 | |
| a (m) | ∞ | 326,3 | 858,2 | | | | |

- Hypothèse exceptionnelle d'hiver: coefficient de sécurité 1,75.

L'état initial est défini par: $\theta_0 = 50^{\circ}$

$$m_0 = 1$$

$$t_0 = p w_0$$

L'état final par:

$$\theta = -5^{\circ}$$

$$m = \frac{\sqrt{(p_c + p_c)^2 + p_c^2}}{p_c} = 3,72$$

$$t = 12,19 \text{ Kg/mm}^2$$

surcharge de 4 kg de glace

Pour $a=0$ $B=0$ d'où $p_0 = 3546$ m

Pour $a \rightarrow +\infty$ $C \rightarrow 0$ d'où $p_\infty = 1511$ m

Le tableau suivant résume les valeurs de a tel que $1511 \text{ m} \leq p \leq 3546 \text{ m}$.

| | | | | | | | | | | | |
|---------|----------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|------|
| p (m) | 1511 | 1550 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 | 2200 | 2300 | 2400 |
| a (m) | ∞ | 1028 | 682,9 | 475,9 | 340 | 309 | 304,2 | 277,6 | 256 | 237,3 | 221 |

Ainsi tous les tableaux que nous avons dressé ci-dessus donnant a en fonction de p , vont nous permettre de tracer toutes les courbes d'utilisation du conducteur Al-cuivre 411 mm^2 .

A partir de ces courbes et sachant qu'il faut tenir compte de l'hypothèse EDS 20% et d'une surcharge de glace de 2 Kg pour l'hypothèse exceptionnelle d'hiver; le paramètre que nous devons choisir doit se trouver à gauche de la courbe EDS 20% et à gauche de la courbe correspondant à l'hypothèse exceptionnelle d'hiver. D'autre part, en considérant que, les pylônes les moins sollicités (pylônes du type A) supportent une portée maximale de 540 m et qu'ils sont utilisés à 80% ou 85% de leurs possibilités, la portée maximale que l'on peut choisir sera telle que $432 \text{ m} \leq a \leq 459 \text{ m}$.

En prenant la valeur $a = 459 \text{ m}$ l'hypothèse la plus sévère EDS 20% nous permet, d'après la courbe correspondante, de prendre $p = 1940 \text{ m}$. Ne disposant pas au maximum que du matériel $p = 1800 \text{ m}$ on a alors adopté comme paramètre de répartition: $p = 1800 \text{ m}$.

3°. Types de pylônes utilisés:

Le long de la ligne BOUIRA - M'SILA nous avons fait la répartition avec le paramètre $p = 1800 \text{ m}$ et avons utilisé les pylônes de trois types différents que nous énumérons dans le tableau ci-dessous.

Dans ce tableau on désignera par:

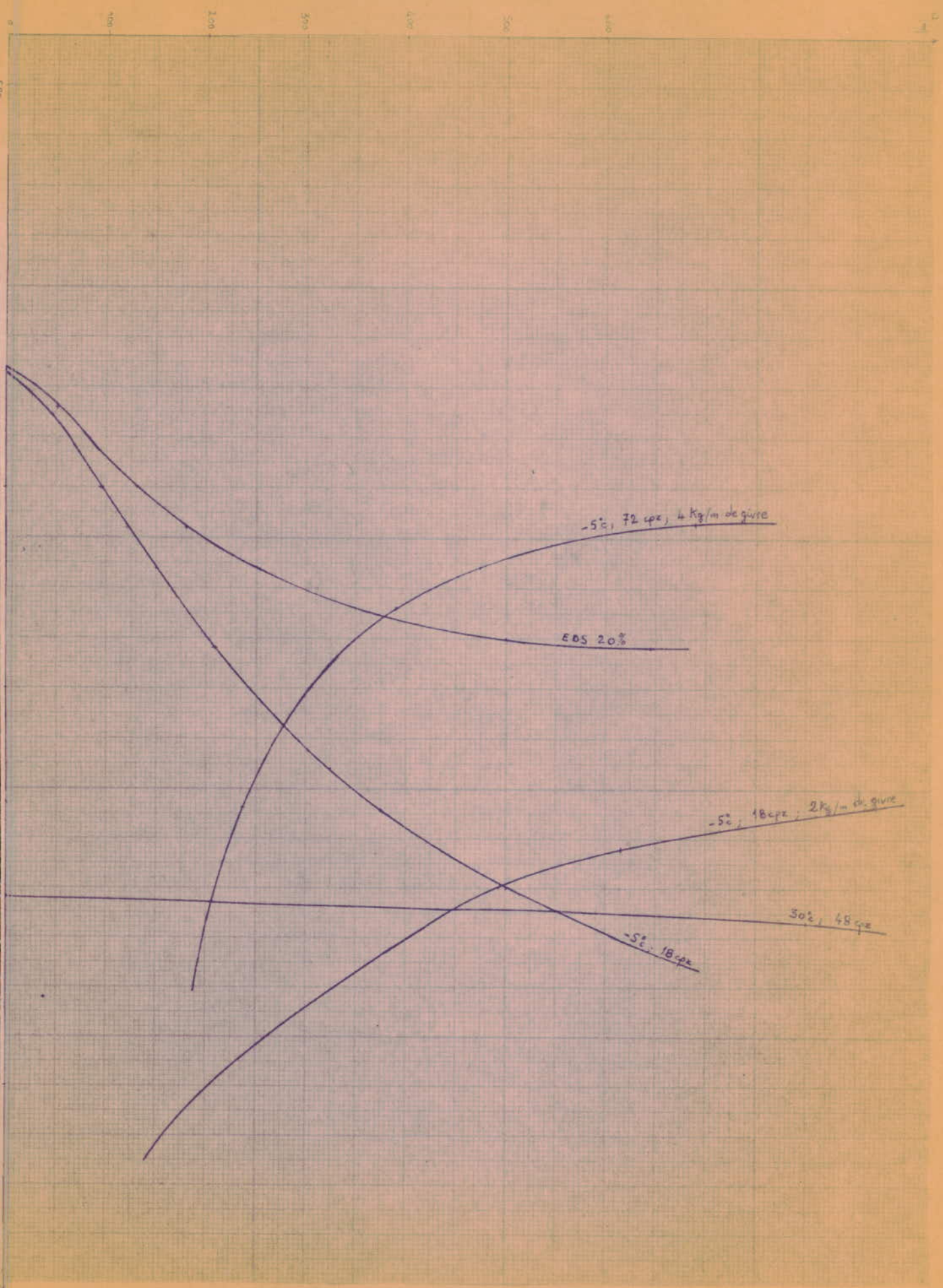
- A les pylônes d'alignement.
- B les pylônes d'angles faibles $\leq 20^\circ$
- C les pylônes d'ouvrage et angles $\geq 20^\circ$

Chaque de ces trois types a une longueur standard X_0 , une longueur raccourcie notée XR_y et une longueur surlevée notée par XS_y avec X désignant le type (A, B ou C) et y désignant la longueur en mètre qu'on a ajoutée ou retranchée au type X_0 ($y = 4, 8$ ou 12)

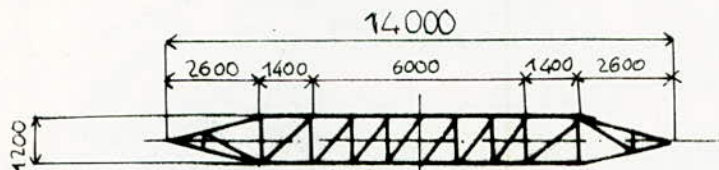
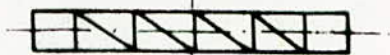
Par exemple: A_0, B_0, C_0
 $AR_4, BS_4, CR_4 \dots$

Remarque:

Nous avons quelquefois utilisé des pylônes du type B en ouvrage pour cela nous les avons surlevé de la hauteur des chaînes d'isolateurs car la hauteur donnée dans le tableau est comptée sans chaînes. A chaque fois que l'on atteint trente (30) portées dans un canton, on a placé un pylône d'arrêt type C.

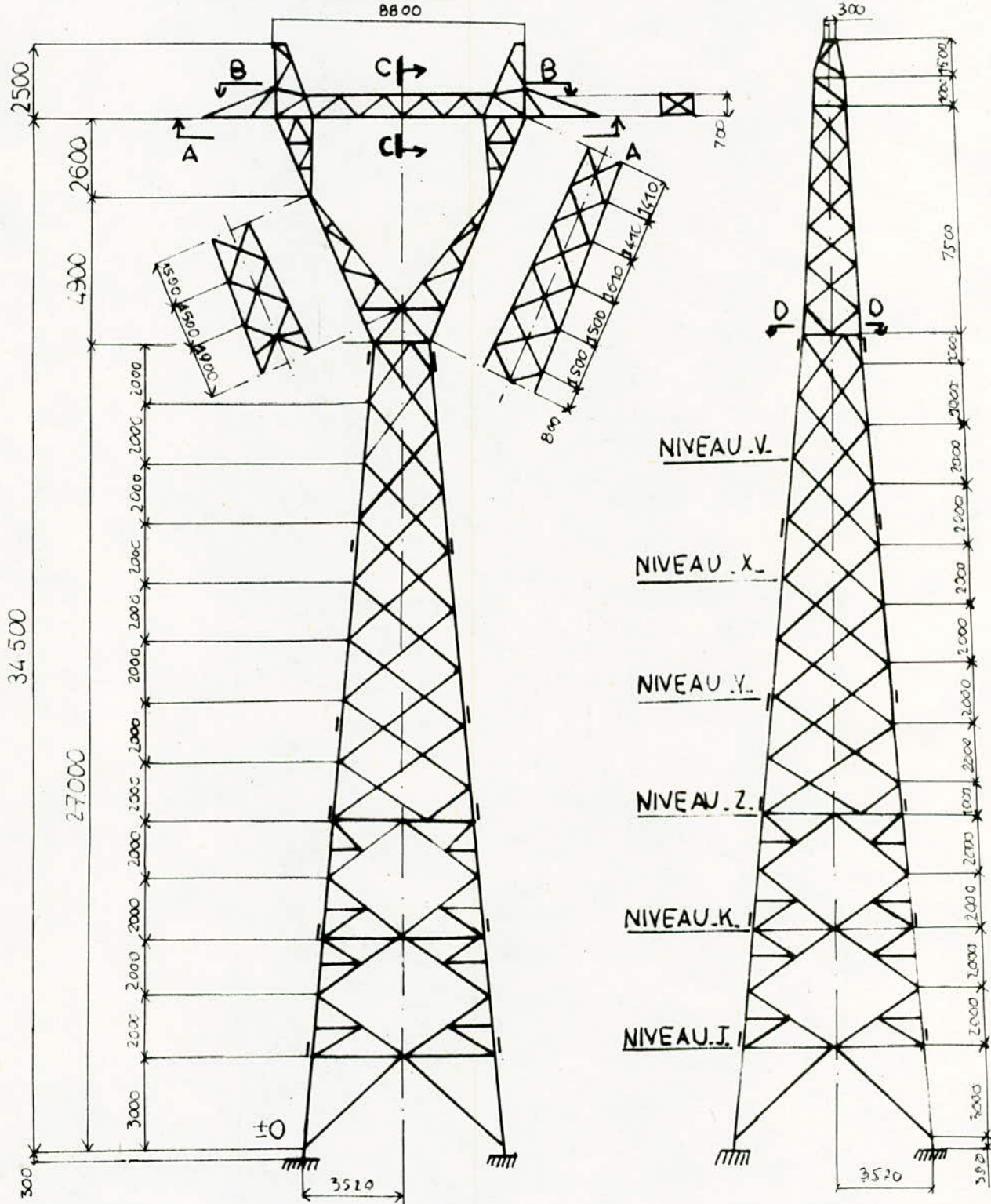
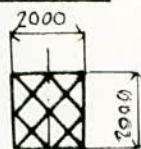


Section BB



Section AA

Section DD



Pylône d'alignement type A 220 Kv (Silhouette)

| TYPES | | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|------------|----------------|-------------------------|------------|----------------|-------------------------|------------|
| A | | | B | | | C | | |
| Niveaux | Hauteur sous chaîne (m) | Poids (kg) | Niveaux | Hauteur sous chaîne (m) | Poids (kg) | Niveaux | Hauteur sous chaîne (m) | Poids (kg) |
| AR8 | 12,50 | 3069 | BR8 | 9,96 | 4314 | CR8 | 12,20 | 7800 |
| AR4 | 16,50 | 3467 | BR4 | 13,96 | 5001 | CR4 | 16,20 | 9031 |
| A ₀ | 20,50 | 3998 | B ₀ | 17,96 | 5848 | C ₀ | 20,20 | 10518 |
| AS4 | 24,50 | 4544 | BS4 | 21,96 | 6537 | CS4 | 24,20 | 12056 |
| AS8 | 28,50 | 5357 | BS8 | 25,96 | 7817 | CS8 | 28,20 | 13989 |
| AS12 | 32,50 | 6410 | BS12 | 29,96 | 9117 | CS12 | 32,20 | 16287 |
| e = 7m | | | e = 7,25 m | | | e = 7,80m | | |

4°. Conclusion :

Sachant qu'un cañon est limité par deux pylônes d'arrêts (pylône du type C généralement ou du type B en ouvrage rarement). Nous avons donc compté lors de la répartition 28 cañons de pose. Le relief étant accidenté dans le cañon n° 24 nous avons pris un paramètre $p = 15,71$ m pour la répartition.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------|--------|------|--------|--------|------|------|------|------|--------|--------|------|------|------|
| N° Cañon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Longueur (m) | 471,6 | 1278,6 | 5989 | 3576,7 | 3032,7 | 4061 | 7512 | 8632 | 800 | 1162 | 5491 | 6042 | 1416 | 559 |
| N° Cañon | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
| Longueur (m) | 307 | 1666 | 844 | 6167 | 8150 | 3632 | 3057 | 916 | 2833 | 2814,5 | 2744,5 | 4255 | 6342 | 7229 |

Le nombre de pylônes utilisés est de 236. (Un peu de tous les types).

En ce qui concerne l'exécution pratique, nous avons effectué une répartition en partant de BOUIRA vers M'SILA puis une autre de M'SILA vers BOUIRA. La répartition finale que nous avons retenue fut un compromis entre ces deux essais. D'où émanent un nombre minimum de pylônes avec autant que possible les hauteurs standards, meilleurs emplacements de ces derniers et des charges réparties uniformément.

Notons cependant, que même à ce stade, notre répartition n'est pas figée. Il existe toujours des possibilités d'amélioration d'autant plus que lors de la vérification de la tenue mécanique, on peut être amené à faire des modifications en cas de défauts.

Détermination des tensions aux différentes hypothèses.

Dans ce chapitre, on doit faire un calcul des différentes tensions pour chacune des hypothèses envisagées selon le paramètre de répartition choisi. On se doit par conséquent, de respecter les valeurs des tensions maximales imposées par le cahier des charges et cela dans chaque canton.

1°. Portée moyenne mécanique:

Dans un conducteur tendu entre deux pylônes d'arrêt, suspendu sur plusieurs pylônes par l'intermédiaire des chaînes de suspension comme on l'a vu précédemment, on considère que les tensions horizontales unitaires égales dans toutes les portées au moment de la pose. En cas de changement d'état les nouvelles tensions se maintiennent toujours égales entre elles de telle sorte que les éventuelles différences sont compensées par l'inclinaison des chaînes. Comme la longueur de chaque canton ne change pas on considère un canton composé du même nombre de portées (qui étaient inégales lors du changement d'état) égales et uniformément dénivelées. Cette nouvelle portée est alors appelée portée moyenne mécanique. Pour la dénivellation on fait introduire un coefficient de dénivellation moyenne.

D'où comme on l'a montré précédemment la portée moyenne sera :

$$a_m^2 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i^3 \cos^2 \gamma_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (1)$$

et le coefficient de dénivellation moyenne sera :

$$k_m = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \left(1 + \frac{h_i^2}{2a_i}\right)}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (2)$$

Remarque :

On considère qu'un terrain est fortement dénivelé si le rapport $\frac{h_i}{a_i} > 0,25$, de moyenne dénivellation si $0,05 < \frac{h_i}{a_i} \leq 0,25$ et enfin sans dénivellation si $\frac{h_i}{a_i} \leq 0,05$.

Dans notre répartition, tous les cantons ou presque sont de moyenne dénivellation par conséquent

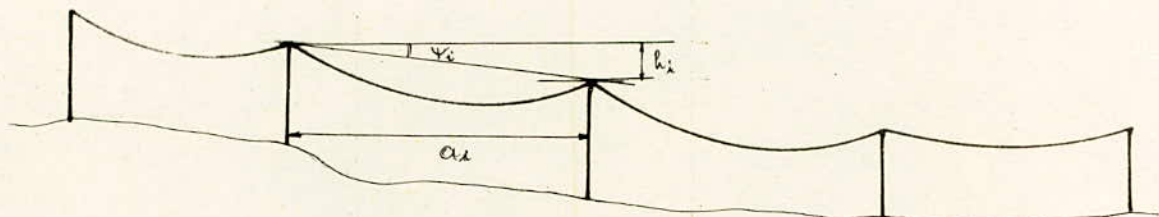
CALCUL DES PORTEES MOYENNE MECANIQUES

| PORTEE a [m] | DENIV. h [m] | $\cos \psi$ | a^3 [$\cdot 10^{-9}$] | $a^3 \cos \psi$ | PYLONE no. | PORTEE a [m] | DENIV. h [m] | $\cos \psi$ | a^3 [$\cdot 10^{-9}$] | $a^3 \cos \psi$ |
|---|----------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------|------------------------------|-----------------|
| 471,6 | 8,5 | 0,999 | 104,887 | 104,782 | 5 | 460 | 27 | 0,998 | 97,336 | 97,141 |
| | | | | | 6 | 442 | 7 | 0,999 | 86,350 | 86,264 |
| <u>canton n°1</u> | | | | | 7 | 452 | 7,5 | 0,999 | 92,345 | 92,253 |
| | | | | | 8 | 459 | 7 | 0,999 | 96,702 | 96,606 |
| | | | | | 9 | 484 | 8 | 0,999 | 113,380 | 113,266 |
| $a_m^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i} =$ | | 22,240 ($\cdot 10^{-4}$) | | | 10 | 457 | 2,5 | 0,999 | 95,444 | 95,348 |
| $a_m =$ | | 471,6 [m] | | | 11 | 446 | 14,5 | 0,999 | 88,716 | 88,628 |
| 457 | 6 | 0,999 | 95,443 | 95,348 | 12 | 361 | 5,5 | 0,999 | 47,046 | 46,999 |
| 446 | 8 | 0,999 | 88,716 | 88,628 | 13 | 535 | 17 | 0,999 | 153,130 | 152,977 |
| 375,6 | 10,5 | 0,999 | 52,988 | 52,935 | 14 | 290 | 9 | 0,999 | 24,389 | 24,365 |
| <u>canton no2</u> | | | | | 15 | 448 | 4 | 0,999 | 89,915 | 89,825 |
| | | | | | 16 | 419 | 0,5 | 0,999 | 73,560 | 73,486 |
| $a_m^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i} =$ | | 18,556 ($\cdot 10^{-4}$) | | | 17 | 362 | 7,5 | 0,999 | 47,438 | 47,390 |
| $a_m =$ | | 430,75 [m] | | | 18 | 374 | 6,5 | 0,999 | 52,312 | 52,261 |
| | | | | | 19 | | | | | |
| <u>canton n°3</u> | | | | | | | | | | |
| $a_m^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i} =$ | | 19,336 ($\cdot 10^{-4}$) | | | | | | | | |
| $a_m =$ | | 439,7 [m] | | | | | | | | |

CALCUL DES PORTÉES MOYENNE MECANIKUES

| PORTÉE a [m] | DENIV. h [m] | $\cos \psi$ | a^3 [$\times 10^{-9}$] | $a^2 \cos \psi$ | PYLONE no. | PORTÉE a [m] | DENIV. h [m] | $\cos \psi$ | a^3 [$\times 10^{-9}$] | $a^2 \cos \psi$ |
|---|----------------------|-------------|-------------------------------|-----------------|---|----------------------|----------------------|-------------|-------------------------------|-----------------|
| 473 | 37,5 | 0,997 | 105,824 | 105,506 | 32 | | | | | |
| | | | | | 33 | 340 | 12,5 | 0,999 | 39,304 | 39,264 |
| 378 | 1 | 0,999 | 54,010 | 53,956 | 34 | 465 | 9,5 | 0,999 | 100,545 | 100,444 |
| 476 | 18,5 | 0,999 | 107,850 | 107,742 | 35 | 378 | 16,5 | 0,999 | 54,010 | 53,956 |
| 483 | 22,5 | 0,999 | 112,678 | 112,566 | 36 | 385 | 16,5 | 0,999 | 57,067 | 57,009 |
| 365 | 3 | 0,999 | 48,627 | 48,578 | 37 | 434 | 15 | 0,999 | 81,746 | 81,665 |
| 401,7 | 36 | 0,996 | 64,819 | 64,560 | 38 | 581 | 11,5 | 0,999 | 196,123 | 195,927 |
| | | | | | 39 | 434 | 15,5 | 0,999 | 81,746 | 81,665 |
| canton n° 4 | | | | | 40 | 459 | 4,5 | 0,999 | 96,702 | 96,606 |
| $a_m^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i} = 19,138 (\times 10^{-4})$ | | | | | 41 | 585 | 3,5 | 0,999 | 200,202 | 200,001 |
| $a_m = 437,5 \text{ [m]}$ | | | | | canton n° 6 | | | | | |
| | | | | | $a_m^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i} = 22,345 (\times 10^{-4})$ | | | | | |
| | | | | | $a_m = 472,7$ | | | | | |
| 491 | 18 | 0,999 | 118,371 | 118,252 | | | | | | |
| 456 | 13 | 0,999 | 94,819 | 94,724 | | | | | | |
| 498 | 11,5 | 0,999 | 123,506 | 123,382 | | | | | | |
| 440 | 3,5 | 0,999 | 85,184 | 85,099 | | | | | | |
| 394 | 18 | 0,999 | 61,163 | 61,102 | | | | | | |
| 344 | 19,5 | 0,999 | 40,707 | 40,626 | | | | | | |
| 409,7 | 2,5 | 0,999 | 68,770 | 68,701 | | | | | | |
| canton n° 5 | | | | | | | | | | |
| $a_m^2 = \frac{\sum a_i^3 \cos \psi}{\sum a_i} = 19,538 (\times 10^{-4})$ | | | | | | | | | | |
| $a_m = 442 \text{ [m]}$ | | | | | | | | | | |

Sans tous nos calculs nous utilisons la formule (1) pour la détermination de la portée moyenne mécanique. Voici maintenant la figure ci dessous explicitant les termes de nos formules:



a_m : la portée moyenne mécanique. (en m).

k_m : le coefficient de déviation moyenne.

a_i : une des portées du cañon.

h_i : la déviation de cette portée.

ψ_i : l'angle formé par la ligne reliant les points d'appui et l'horizontale.

$$\psi_i = \text{arctg} \frac{h_i}{a_i}$$

2°. Tensions unitaires dans les conducteurs.

Après l'exécution de la répartition et ayant calculé les portées moyennes mécaniques de chaque cañon on doit vérifier en détail les tensions unitaires effectives pour chaque hypothèse. Celles-ci doivent être inférieures aux tensions maximales admises par le cahier des charges. Nous ferons une vérification analytique en utilisant les équations de changement d'état.

Le coefficient de déviation ne dépassant pas 0,25 on utilisera la formule de changement d'état suivante:

$$t^3 + t^2 \left[\alpha E (\theta - \theta_0) + \frac{\alpha^2 \omega_0^2 m_0^2}{24 t_0^2} E - t_0 \right] = \frac{\alpha^2 \omega_0^2 m^2}{24} E$$

Nous avons gardé les mêmes notations que précédemment.

L'état initial sera défini par $\theta_0 = +50^\circ$

$$m_0 = 1$$

$$t_0 = \rho \omega_0 \quad (\omega_0: \text{le poids spécifique})$$

L'état final sera défini par t, θ, m . (t sera la tension unitaire cherché pour chaque hypothèse).

Pour concilier davantage cette écriture nous posons:

$$C = \frac{100^2 \omega_0^2 E}{24}$$

$$J_1 = \frac{C}{t_0^2}, \quad J_2 = \alpha E (\theta - \theta_0) \quad \text{et} \quad J_3 = C m^2$$

Par ailleurs l'équation de changement d'état peut se mettre sous la forme :

$$t^2(t+A) = B.$$

Avec ces nouvelles écritures l'équation s'écrit : $t^2(t + a_m^2 J_1 \cdot 10^{-4} + J_2 - t_0) = a_m^2 J_3 \cdot 10^{-4}$
il vient alors que :

$$A = a_m^2 J_1 \cdot 10^{-4} + J_2 - t_0$$

$$\text{et } B = a_m^2 J_3 \cdot 10^{-4}$$

Rappelons les divers états possibles pour les différentes hypothèses considérées avec les tensions unitaires maximales admissibles.

— Hypothèse EDS 20% : coefficient de sécurité 3.

$$\theta = 30^\circ$$

$$m = 1 \quad (\text{sans vent})$$

$$T_{\max} = \frac{16500 \times 20}{100} = 3300 \text{ Kg} = \frac{\text{Charge de rupture} \times 20}{100}$$

$$t_{\max} = \frac{T_{\max}}{S_c} = \frac{3300}{411} = 8,03 \text{ Kg/mm}^2$$

Dans cette hypothèse la tension unitaire trouvée ne doit pas dépasser $8,03 \text{ Kg/mm}^2$.

— Hypothèse normale d'été : coefficient de sécurité 3.

$$\theta = 30^\circ \quad (\text{sans givre})$$

$$m = 1,29 \quad (\text{vent 48 cps})$$

$$t_{\max} = \frac{16500}{3 \times 411} = 13,38 \text{ Kg/mm}^2$$

Dans cette hypothèse la tension unitaire trouvée ne doit pas dépasser $13,38 \text{ Kg/mm}^2$.

— Hypothèse normale d'hiver : coefficient de sécurité 3

$$\theta = -5^\circ \quad (\text{sans givre})$$

$$m = 1,05 \quad (\text{vent 18 cps})$$

$$t_{\max} = \frac{16500}{3 \times 411} = 13,38 \text{ Kg/mm}^2$$

Dans cette hypothèse la tension unitaire trouvée ne doit pas également dépasser $13,38 \text{ Kg/mm}^2$.

— Hypothèse exceptionnelle d'hiver : coefficient de sécurité 1,75

$$\theta = -5^\circ \quad (\text{avec 2 Kg de givre})$$

$$m = 2,56 \quad (\text{vent 72 cps})$$

$$t_{\max} = \frac{16500}{1,75 \times 411} = 22,94 \text{ Kg/mm}^2$$

Dans cette hypothèse la tension calculée ne doit pas dépasser $22,94 \text{ Kg/mm}^2$.

Nous avons, à la fin de ce chapitre, résumé toutes les valeurs trouvées aux différentes hypothèses envisagées dans un tableau pour chaque caisson.

Cette vérification faite, nous passons au calcul des tensions de pose.

3°. Tensions de pose :

Les tensions dites de pose sont les tensions à assurer dans les conducteurs à une température donnée, sans vent, pour obtenir les tensions calculées aux différentes hypothèses d'état.

En pratique, il est très difficile d'assurer ces tensions de pose, par contre, il sera plus facile de mesurer les flèches correspondantes dans chaque canton. Ainsi on calculera canton par canton, les flèches correspondantes à différentes températures. Nous avons vu dans un canton formé de plusieurs portées que les tensions unitaires horizontales s'uniformisent grâce aux inclinaisons des chaînes de suspension. Donc il suffit d'assurer la flèche voulue dans une seule portée afin d'avoir dans toutes les portées la tension calculée. La ou les portées choisies sont appelées portées témoins.

En général on choisit comme portées témoins : les plus grandes portées et les portées des traversées. On considère pour la pose des conducteurs des températures variables de 10°C ou de 5°C à partir de la température maximale ($+50^{\circ}\text{C}$) jusqu'à la température minimale sans vent.

Connaissant l'état initial $\theta_0 = +50^{\circ}\text{C}$

$$m_0 = 1 = m$$

$$t_0 = p w_0$$

La seule variable sera donc la température de l'état cherché appelée température de réglage. Pour chaque canton et température on aura une tension unitaire t_0 et pour la portée moyenne mécanique on aura une flèche :

$$f_{m0} = \frac{a_m^2 w_0}{8 t_0} \quad (1)$$

A partir de cette valeur on calcule les flèches pour les portées témoins à chaque température d'où :

$$f_{a_i0} = f_{m0} \frac{a_i^2}{a_m^2 \cos \varphi_i} \quad (2)$$

où a_i est la portée témoin. En portant la valeur f_{m0} dans l'expression (2) on obtient la flèche des portées témoins :

$$f_{a_i0} = \frac{a_i^2 w_0}{8 t_0 \cos \varphi_i} \quad (3)$$

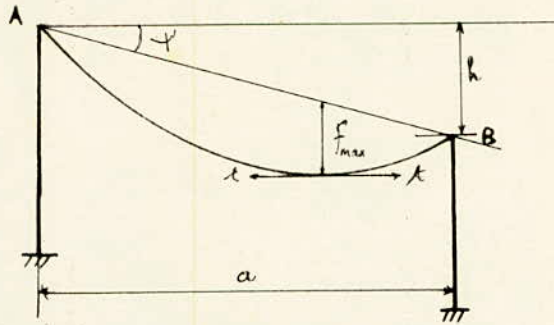
Nous avons, à la fin de ce chapitre, résumé dans un tableau toutes les flèches à assurer aux différentes températures dans chaque canton considéré.

4°. Tensions unitaires dans les conducteurs aux points d'appui :

Étant qu'il s'agit de portées inférieures à 500 m et dans un terrain où la dénivellation était nulle ou presque, la tension unitaire dans le conducteur aux points d'attache les plus hauts

était considéré comme sensiblement égale à la tension unitaire horizontale dans le conducteur.

Cette approximation n'est plus justifiable pour les grandes portées (supérieures à 500 m) et pour des dénivellations notables. On doit, par conséquent, calculer les tensions aux points d'appui aux différentes hypothèses, dans chaque canton, à chaque fois qu'on relève dans celui-ci de grandes portées et d'appréciables dénivellations.



Les tensions aux points d'appui A et B sont :

$$t_A = \frac{t}{\cos \psi} + w_0 \left(f_{\max} + \frac{h}{2} \right)$$

$$t_B = \frac{t}{\cos \psi} + w_0 \left(f_{\max} - \frac{h}{2} \right)$$

avec f_{\max} : la flèche maximale.

w_0 : le poids spécifique

h , la dénivellation

t : la tension unitaire horizontale dans le conducteur.

Nous avons, dans ces trois cas, vérifié que toutes les tensions (que ce soient les tensions horizontales dans le conducteur, tensions de pose ou tensions aux points d'appui) aux différentes hypothèses dans chaque canton, ne dépassent pas les tensions maximales admissibles.

Tous les résultats sont présentés sous forme de tableaux titrés.

Ces différentes tensions présentent un intérêt particulier pour la sécurité et la fiabilité de la ligne.

Cable 4.11 mm² - Alu Acier

Equation de changement d'etat

$$t^3 + t^2 \left[\frac{a^2 \omega^2 E}{24 t^2} \times m^2 + \alpha E (\theta' - \theta) - t \right] = \frac{a^2 \omega^2 E}{24} \times m'^2$$

$$t^2 \left(\underbrace{t + \frac{a^2 J_1 + J_2}{24}}_A - t \right) = \underbrace{\frac{a^2 J_3}{24}}_B$$

amètres 1800 $\omega = 3,88 \times 10^{-3}$ $t = \omega \rho = 6,984$ $t^2 = 48,78$

$\frac{C_1}{t^2} = 1,07$ $C_1 = \frac{100 \omega^2 E}{24} = 52,06$ $\alpha E = 0,146$

| POTHESE | +30° vent 48cpz | +30° E.D.S. | -5° vent 18cpz | -5° vent 72cpz 2kgg |
|---------------------|-----------------|-------------|----------------|---------------------|
| a | | 472 | | |
| $a^2 \cdot 10^{-4}$ | | 22,27 | | |
| m' | 1,287 | 1 | 1,045 | 2,563 |
| m'^2 | 1,656 | 1 | 1,092 | 6,569 |
| J_3 | 86,21 | 52,06 | 56,85 | 341,98 |
| $a^2 J_1$ | 24,29 | 24,29 | 24,29 | 24,29 |
| J_2 | -2,92 | -2,92 | -8,03 | -8,03 |
| $-t$ | -6,984 | -6,984 | -6,984 | -6,984 |
| A | 14,39 | 14,39 | 9,28 | 9,28 |
| $a^2 J_3$ | 1919,9 | 1159,38 | 1266 | 7615,9 |
| t | 9,05 | 7,31 | 8,45 | 17,02 |
| as unit max | 13,38 | 8,03 | 13,38 | 22,94 |

Cable 411 mm² Alu Alu

Equation de changement d'état

$$t^3 + t^2 \left[\frac{a^2 \omega^2 E}{24 t^2} \times m^2 + \alpha E (\theta' - \theta) - t \right] = \frac{a^2 \omega^2 E}{24} \times m^2$$

$$t^2 (t + \underbrace{a^2 J_1 + J_2 - t}_A) = \underbrace{a^2 J_3}_B$$

rayon r = 1500 $\omega = 3,88 \times 10^{-3}$ $t = \omega p = 5,82$ $t^2 = 33,87$

$\frac{C_1}{t^2} = 1,537$ $C_1 = \frac{100^2 \omega^2 E}{24} = 52,06$ $\alpha E = 0,146$

| POTHESE | +30° vent 48 cpz | +30° E.D.S. | -5° vent 18 cpz | -5° vent 72 cpz 2 kg.g. |
|---------------------------------|------------------|-------------|-----------------|-------------------------|
| a | 451,5 | | | |
| a ² 10 ⁻⁴ | 20,39 | | | |
| m' | 1,287 | 1 | 1,045 | 2,563 |
| m' ² | 1,656 | 1 | 1,092 | 6,569 |
| J ₃ | 86,21 | 52,06 | 56,85 | 341,98 |
| a ² J ₁ | 31,34 | 31,34 | 31,34 | 31,34 |
| J ₂ | -2,92 | -2,92 | -8,03 | -8,03 |
| -t | -5,82 | -5,82 | -5,82 | -5,82 |
| A | 22,6 | 22,6 | 17,49 | 17,49 |
| a ² J ₃ | 1757,82 | 1061,5 | 1159,17 | 6972,97 |
| t | 7,641 | 6,08 | 6,90 | 14,73 |
| s. unit max | 13,38 | 8,03 | 13,38 | 22,94 |

TENSIONS DE POSE

TABLE 411 mm² Alu. Acier

ANTON 1

portee moyenne $a_m = 472$ m

parametre $p = 1800$ m

$$\omega = 3,88 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^2$$

$$\alpha = 17,6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$E = 8300 \text{ kg/mm}^2$$

$$t = \omega p = 6,984 \text{ kg/mm}^2$$

$$f^3 + f^2 \left[\frac{\sigma^2 \omega^2 E}{24 t^2} m + 4E(\theta' - \theta) - t \right] = \frac{\sigma^2 \omega E}{24} m^2$$

$$f \cdot \left(t + \frac{\sigma^2 J_1}{A} + \frac{J_2}{B} - t \right) = \frac{\sigma^2 J_3}{B}$$

coefficient de surcharge $m = m' = 10$

$$\alpha E = 0,146$$

$\theta = 50^\circ\text{C}$

$\theta = 50^\circ\text{C}$

$$J_2 = \alpha E(\theta' - \theta)$$

$$J_3 = C_1 m^2 = 52,06$$

$$C_1 = \frac{100 \omega^2 E}{24} = 52,06$$

$$J_1 = \frac{C_1}{t} = 1,07$$

| G | +50° | +40° | +30° | +20° | +10° | 0° | -5° |
|------------------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|
| $\sigma^2 J_1 \cdot 10^{-4}$ | 23,829 | | | | | | |
| J_2 | 0 | -1,46 | -2,92 | -4,38 | -5,84 | -7,30 | -8,03 |
| -t | -6,984 | | | | | | |
| A | 16,851 | 15,391 | 13,931 | 12,471 | 11,011 | 9,551 | 8,815 |
| $\sigma^2 J_3 \cdot 10^{-4}$ | 1159,38 | | | | | | |
| t | 6,98 | 7,17 | 7,38 | 7,6 | 7,84 | 8,10 | 8,24 |
| T | 2867,14 | 2946,46 | 3031,54 | 3123,6 | 3223,1 | 3330,74 | 3447,47 |
| max (m) | | | | | | | |
| portee (m) | Deniv (m) | | | | | | |
| 471,6 | 8,5 | 15,45 | 15,03 | 14,61 | 14,18 | 13,74 | 13,30 |

TENSIONS DE POSE

TABLE 411 mm² Alu Acier

$w = 3,80 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^2$

ANTON 2 4

$\alpha = 17,6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

portee moyenne $a_m = 451,5 \text{ m}$

$E = 8300 \text{ kg/mm}^2$

parametre $p = 1500 \text{ m}$

$t = wp = 5,82 \text{ kg/mm}^2$

$$f + f' \left[\frac{\alpha w E}{24 l^2} m + \alpha E (\theta - \theta') - 1 \right] = \frac{\alpha w E}{24} m^2$$

$$f' \left(1 + \frac{\alpha^2 J_1 + J_2 - f}{A} \right) = \frac{\alpha^2 J_2}{B}$$

coefficient de surcharge $m = m' = 10$

$\alpha E = 0,146$

$\theta = 0 \pm 50^\circ$

$\theta = 50^\circ \text{ C}$

$J_2 = \alpha E (\theta - \theta')$

$J_3 = C_1 m^2 = 52,06$

$C_1 = \frac{100^2 w^2 E}{24} = 52,06$

$J_1 = \frac{C_1}{l^2} = 1,537$

| G | +50° | +40° | +30° | +20° | +10° | 0° | -5° |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\alpha^2 J_1 \cdot 10^{-4}$ | 31,34 | | | | | | |
| J_2 | 0 | -1,46 | -2,92 | -4,38 | -5,87 | -7,30 | -8,03 |
| J_3 | -5,82 | | | | | | |
| A | 25,52 | 24,06 | 22,60 | 21,14 | 19,65 | 18,22 | 17,49 |
| $\alpha^2 J_2 \cdot 10^{-4}$ | 1061,50 | | | | | | |
| t | 5,82 | 5,95 | 6,08 | 6,23 | 6,38 | 6,55 | 6,82 |
| T | 2392,02 | 2444,63 | 2500,52 | 2563,82 | 2623,41 | 2690,82 | 2801,79 |
| max (m) | | | | | | | |
| portee (m) | | | | | | | |
| Deniv (m) | | | | | | | |
| 600 9 | 29,97 | 29,33 | 28,67 | 28,01 | 27,33 | 26,64 | |

Tensions aux points d'appui

E D S 20%

| canton | Pylô | Portée | Demi | cos ψ | $f = \frac{t'}{m'w_0}$ | t' | w_0 ($\times 10^{-4}$) | $\frac{t'}{\cos \psi}$ | $\frac{a^2}{8pl \cos \psi}$ | $\left(\frac{a^2}{8pl \cos \psi} \pm \frac{h}{2}\right) m'w_0$ | | $\frac{t'}{\cos \psi} \pm m'w_0 \left(f \pm \frac{h}{2}\right)$ | |
|--------|------|--------|------|------------|------------------------|------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|--|-------------|---|------|
| | | | | | | | | | | +h/2 | -h/2 | +h/2 | -h/2 |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 471,6 | 8,5 | 0,999 | 1884 | 7,31 | 3,88 | 7,32 | 14,77 | 0,07 | 0,04 | 7,39 | 7,36 |
| 2 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 375,6 | 10,5 | 0,999 | 1920 | 7,45 | 3,88 | 7,46 | 9,19 | 0,06 | 0,02 | 7,52 | 7,48 |
| 3 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | 460 | 27 | 0,998 | 1915 | 7,43 | 3,88 | 7,45 | 13,84 | 0,10 | ≈ 0 | 7,55 | 7,45 |
| | 13 | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 535 | 17 | 0,999 | 1915 | 7,43 | 3,88 | 7,44 | 10,7 | 0,10 | 0,04 | 7,54 | 7,48 |
| 4 | 19 | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | 473 | 37,5 | 0,997 | 1917,5 | 7,44 | 3,88 | 7,46 | 14,63 | 0,13 | -0,01 | 7,59 | 7,45 |
| | 24 | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | 401,7 | 36 | 0,996 | 1917,5 | 7,44 | 3,88 | 7,47 | 10,56 | 0,11 | -0,03 | 7,58 | 7,44 |
| 5 | 25 | | | | | | | | | | | | |
| | 26 | 491 | 18 | 0,999 | 1915 | 7,43 | 3,88 | 7,43 | 15,75 | 0,10 | 0,03 | 7,53 | 7,46 |
| | 30 | | | | | | | | | | | | |
| | 31 | 344 | 19,5 | 0,998 | 1915 | 7,43 | 3,88 | 7,44 | 7,74 | 0,07 | -0,01 | 7,51 | 7,43 |
| 6 | 35 | | | | | | | | | | | | |
| | 36 | 386 | 16,5 | 0,999 | 1902 | 7,38 | 3,88 | 7,39 | 9,75 | 0,07 | ≈ 0 | 7,46 | 7,39 |
| | 37 | | | | | | | | | | | | |
| | 38 | 581 | 11,5 | 0,999 | 1902 | 7,38 | 3,88 | 7,39 | 22,21 | 0,11 | 0,06 | 7,5 | 7,45 |
| 7 | 46 | | | | | | | | | | | | |
| | 47 | 414 | 19,5 | 0,999 | 1917,5 | 7,44 | 3,88 | 7,45 | 11,18 | 0,08 | ≈ 0 | 7,53 | 7,45 |

Tensions aux points d'appui

30°; 48 C P Z

| Canton | pylô | Portée | Déni | $\cos \psi$ | $\rho = \frac{t'}{m'w_0}$ | t' | w_0 (x10 ⁻³) | $\frac{t'}{\cos \psi}$ | $\frac{a^2}{8\rho \cos \psi}$ | $\left(\frac{a^2}{8\rho \cos \psi} + \frac{h}{2}\right) m'w_0$ | | $\frac{t'}{\cos \psi} + m'w_0 \left(\rho \pm \frac{h}{2}\right)$ | |
|--------|------|--------|------|-------------|---------------------------|------|-------------------------------|------------------------|-------------------------------|--|-------|--|------|
| | | | | | | | | | | +h/2 | -h/2 | +h/2 | -h/2 |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 471,6 | 8,5 | 0,999 | 1812,3 | 9,05 | 3,88 | 9,06 | 15,35 | 0,1 | 0,05 | 9,16 | 9,11 |
| 2 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 375,6 | 10,5 | 0,999 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,16 | 9,63 | 0,07 | 0,02 | 9,23 | 9,18 |
| 3 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | 460 | 2,7 | 0,998 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,17 | 14,46 | 0,14 | ±0 | 9,31 | 9,17 |
| | 13 | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 535 | 1,7 | 0,999 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,16 | 19,54 | 0,14 | 0,06 | 9,30 | 9,22 |
| 4 | 19 | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | 473 | 37,5 | 0,997 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,18 | 15,31 | 0,17 | -0,02 | 9,35 | 9,16 |
| | 24 | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | 401,7 | 3,6 | 0,996 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,19 | 11,05 | 0,15 | -0,03 | 9,34 | 9,16 |
| 5 | 25 | | | | | | | | | | | | |
| | 26 | 491 | 1,8 | 0,999 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,16 | 16,46 | 0,13 | 0,04 | 9,29 | 9,2 |
| | 30 | | | | | | | | | | | | |
| | 31 | 344 | 19,5 | 0,998 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,17 | 8,09 | 0,09 | ±0 | 9,26 | 9,17 |
| 6 | 35 | | | | | | | | | | | | |
| | 36 | 385 | 16,5 | 0,999 | 1828,4 | 9,13 | 3,88 | 9,14 | 10,14 | 0,09 | 0,01 | 9,23 | 9,15 |
| | 37 | | | | | | | | | | | | |
| | 38 | 581 | 11,5 | 0,999 | 1828,4 | 9,13 | 3,88 | 9,14 | 23,10 | 0,14 | 0,09 | 9,28 | 9,23 |
| 7 | 46 | | | | | | | | | | | | |
| | 47 | 414 | 19,5 | 0,999 | 1832,4 | 9,15 | 3,88 | 9,16 | 11,7 | 0,11 | 0,01 | 9,27 | 9,17 |

Coursions aux points d'appui

- 5° ; 18 CPZ ;

| Canton | pylô | Portée | Déni | $\cos \gamma$ | $p = \frac{t'}{m'w_0}$ | t' | w_0 ($\times 10^{-3}$) | $\frac{t'}{w_0 \gamma}$ | $\frac{a^2}{8 p \cos \gamma}$ | $\left(\frac{a^2}{8 p \cos \gamma} \pm \frac{h}{2}\right) m'w_0$ | | $\frac{t'}{w_0 \gamma} + m'w_0 \left(f \pm \frac{h}{2}\right)$ | |
|--------|------|--------|------|---------------|------------------------|------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|-------------|--|---------|
| | | | | | | | | | | + $h/2$ | - $h/2$ | + $h/2$ | - $h/2$ |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 471,6 | 8,5 | 0,999 | 2084 | 8,45 | 3,88 | 8,46 | 13,35 | 0,07 | 0,04 | 8,53 | 8,50 |
| 2 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 375,6 | 10,5 | 0,999 | 2168 | 8,79 | 3,88 | 8,80 | 8,1 | 0,05 | 0,01 | 8,85 | 8,81 |
| 3 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | 460 | 27 | 0,998 | 2153 | 8,73 | 3,88 | 8,75 | 12,31 | 0,10 | ≈ 0 | 8,85 | 8,75 |
| | 13 | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 535 | 17 | 0,999 | 2153 | 8,73 | 3,88 | 8,74 | 16,63 | 0,10 | 0,03 | 8,84 | 8,77 |
| 4 | 19 | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | 473 | 37,5 | 0,997 | 2170 | 8,8 | 3,88 | 8,83 | 12,93 | 0,13 | -0,02 | 8,96 | 8,81 |
| | 24 | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | 401,7 | 36 | 0,996 | 2170 | 8,8 | 3,88 | 8,83 | 9,33 | 0,11 | -0,03 | 8,94 | 8,80 |
| 5 | 25 | | | | | | | | | | | | |
| | 26 | 491 | 18 | 0,999 | 2150,6 | 8,72 | 3,88 | 8,73 | 14,03 | 0,09 | 0,02 | 8,82 | 8,75 |
| | 30 | | | | | | | | | | | | |
| | 31 | 344 | 19,5 | 0,998 | 2150,6 | 8,72 | 3,88 | 8,74 | 6,89 | 0,07 | -0,01 | 8,81 | 8,73 |
| 6 | 35 | | | | | | | | | | | | |
| | 36 | 385 | 16,5 | 0,999 | 2106 | 8,54 | 3,88 | 8,55 | 8,81 | 0,07 | ≈ 0 | 8,62 | 8,55 |
| | 37 | | | | | | | | | | | | |
| | 38 | 581 | 11,5 | 0,999 | 2106 | 8,54 | 3,88 | 8,55 | 20,05 | 0,10 | 0,06 | 8,65 | 8,61 |
| 7 | 46 | | | | | | | | | | | | |
| | 47 | 414 | 19,5 | 0,999 | 2165 | 8,78 | 3,88 | 8,79 | 9,90 | 0,08 | ≈ 0 | 8,87 | 8,79 |

Excursions aux points d'appui

-5°; 720PZ; 2 kg9

| canton | fylô | Poutre | Déni | cos γ | $\rho = \frac{t'}{m'w_0}$ | t' | w_0 (10 ⁻³) | $\frac{t'}{\cos \gamma}$ | $\frac{a^2}{8\rho \cos \gamma}$ | $(\frac{a^2}{8\rho \cos \gamma} + \frac{h}{2})m'w_0$ | | $\frac{t'}{\cos \gamma} + m'w_0(\frac{h}{2})$ | |
|--------|------|--------|------|--------------|---------------------------|-------|------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--|-------|---|-------|
| | | | | | | | | | | +h/2 | -h/2 | +h/2 | -h/2 |
| 1 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 471,6 | 8,5 | 0,999 | 1711,5 | 17,02 | 3,88 | 17,03 | 16,26 | 0,21 | 0,12 | 17,24 | 17,15 |
| 2 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 375,6 | 10,5 | 0,999 | 1722,6 | 17,13 | 3,88 | 17,15 | 10,25 | 0,15 | 0,05 | 17,30 | 17,20 |
| 3 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| | 6 | 460 | 27 | 0,998 | 1714,5 | 17,05 | 3,88 | 17,08 | 15,46 | 0,29 | 0,02 | 17,37 | 17,10 |
| | 13 | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | 535 | 17 | 0,999 | 1714,5 | 17,05 | 3,88 | 17,07 | 20,89 | 0,29 | 0,12 | 17,36 | 17,19 |
| 4 | 19 | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | 473 | 37,5 | 0,997 | 1714,5 | 17,05 | 3,88 | 17,07 | 16,36 | 0,35 | -0,02 | 17,42 | 17,05 |
| | 24 | | | | | | | | | | | | |
| | 25 | 401,7 | 36 | 0,996 | 1714,5 | 17,05 | 3,88 | 17,07 | 11,81 | 0,30 | -0,06 | 17,37 | 17,01 |
| 5 | 25 | | | | | | | | | | | | |
| | 26 | 491 | 18 | 0,999 | 1715,5 | 17,06 | 3,88 | 17,08 | 17,58 | 0,26 | 0,09 | 17,34 | 17,17 |
| | 30 | | | | | | | | | | | | |
| | 31 | 344 | 19,5 | 0,998 | 1715,5 | 17,06 | 3,88 | 17,08 | 8,64 | 0,18 | -0,01 | 17,26 | 17,07 |
| 6 | 35 | | | | | | | | | | | | |
| | 36 | 385 | 16,5 | 0,999 | 1722,6 | 17,13 | 3,88 | 17,15 | 10,77 | 0,19 | 0,03 | 17,34 | 17,18 |
| | 37 | | | | | | | | | | | | |
| | 38 | 581 | 11,5 | 0,999 | 1722,6 | 17,13 | 3,88 | 17,15 | 24,52 | 0,30 | 0,19 | 17,45 | 17,34 |
| 7 | 46 | | | | | | | | | | | | |
| | 47 | 414 | 19,5 | 0,999 | 1713,5 | 17,04 | 3,88 | 17,06 | 12,45 | 0,22 | 0,03 | 17,28 | 17,09 |

Vérification de la tenue des pylônes

1. Définitions :

Les pylônes sont des constructions métalliques spécifiques aux lignes aériennes de moyenne et haute tension. Les derniers ont été calculés en admettant certains efforts permanents : charges normales, et, d'autres accidentels (dûs soit à la rupture de certains conducteurs, soit au dépôt de givre).

a). Charges normales :

On appelle charges normales, les charges qui apparaissent dans le fonctionnement normal et permanent d'une ligne (pour lesquelles on admet un coefficient de sécurité 3 dans les barres).

On distingue parmi elles-ci :

- Les charges horizontales transversales : dues à la pression du vent sur les conducteurs, les câbles de garde et sur le pylône même, (à la traction des conducteurs et câbles de garde pour les pylônes d'angle).

- Les charges horizontales longitudinales : dues à la traction dans les conducteurs et câbles de garde pour les pylônes d'arrêt.

- Les charges verticales : dues au poids des conducteurs, câbles de garde, l'équipement et du pylône même.

b). Charges accidentelles :

On appelle charges accidentelles, les charges qui apparaissent accidentellement dans le fonctionnement d'une ligne (pour lesquelles on admet un coefficient de sécurité 1,75 dans les barres).

On distingue parmi celles-ci :

- Les charges horizontales transversales : dues à la pression du vent sur les conducteurs et câbles de garde nus quand ceux-ci sont surchargés de givre (et à la traction dans les conducteurs et câbles de garde surchargés de givre pour les pylônes d'angle).

- Les charges horizontales longitudinales : dues à la traction dans les conducteurs et câbles de garde pour les pylônes d'arrêt.

- Les charges verticales : dues au poids des conducteurs et des câbles de garde surchargés de givre et du pylône même.

Une fois ces charges arrêtées, on doit les vérifier pour les conducteurs et câbles de garde.

2°. Principe de la vérification:

Il s'agit de calculer les efforts effectifs agissant sur les pylônes utilisés lors de la répartition et de les comparer avec les efforts maximum que peuvent supporter, ces derniers.

(en général, les contraintes maximales sont garanties par le constructeur pour chaque type)

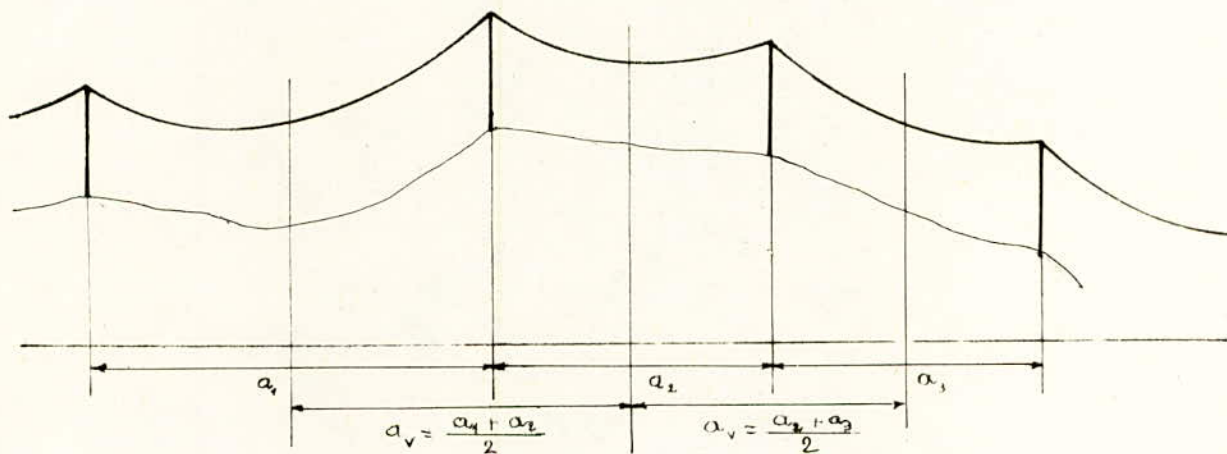
On dira que cette comparaison est positive si l'effort calculé est inférieur à l'effort garanti.

La comparaison se fait pour les charges dues à la pression du vent sur les conducteurs, câbles de garde avec éventuellement le givre et tractions dans ces derniers. Cette vérification portera alors sur le calcul des portées au vent ou portées moyennes ainsi que sur les portées fictives verticales.

Tout ceci se fera dans le cas où apparaissent les efforts les plus importants, ce qui nous amène à considérer deux différentes hypothèses: la normale d'été et l'exceptionnelle d'hiver.

a). Portées au vent:

C'est la charge horizontale transversale due au vent sur les conducteurs et câbles de garde. Elle dépend du diamètre de ceux-ci et de la pression du vent ainsi que de la dimension des portées adjacentes au pylône à vérifier.



Soit, comme l'indique la figure ci-dessus: a_i et a_{i+1} ces deux portées adjacentes. La demi-somme qu'on appelle couramment portée moyenne ou portée au vent sera:

$$a_v = \frac{a_i + a_{i+1}}{2}$$

Les charges dues au vent sur les conducteurs et câbles de garde sont de la forme:

$$F_v = 1,019 p_v d_c a_v \cdot 10^{-5} \text{ (Kg)}$$

où:

p_v la pression dynamique du vent (en cpx)

d_c le diamètre du conducteur (mm)

a_v la portée au vent. (m)

Dans cette formule on prendra p_v = 48 cpx pour l'hypothèse normale d'été et p_v = 72 cpx pour

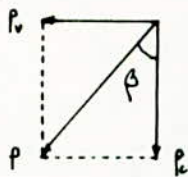
l'hypothèse exceptionnelle d'hiver. Une fois toutes ces valeurs fixées tout revient à vérifier la portée au vent uniquement car elle reste la seule variable.

b). Portée fictive verticale:

C'est la charge verticale due au poids propre du conducteur avec une éventuelle surcharge de givre. Dans ce cas on distinguera la vérification des pylônes du type A ou B où les tensions dans les câbles sont les mêmes, de celle des pylônes du type C où les tensions dans les câbles diffèrent suivant qu'elles soient calculées à droite ou à gauche du pylône à vérifier.

Sous l'influence du vent et de son poids propre (avec givre s'il y a lieu) le conducteur dévie d'un angle β par rapport au plan vertical. Cet angle sera calculé pour les deux hypothèses considérées:

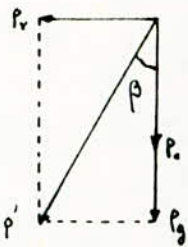
— Hypothèse normale d'été: $\theta = 30^\circ$, vent 48 cps, coefficient de sécurité 3.



$$\text{On a } \cos \beta = \frac{P_c}{P} = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + P_v^2}} = \frac{1}{m}$$

D'après ce qui a été fait précédemment: $m = 1,29$

— Hypothèse exceptionnelle d'hiver: $\theta = -5^\circ$, vent 72 cps, 2 kg de givre, coefficient de sécurité 1,75.

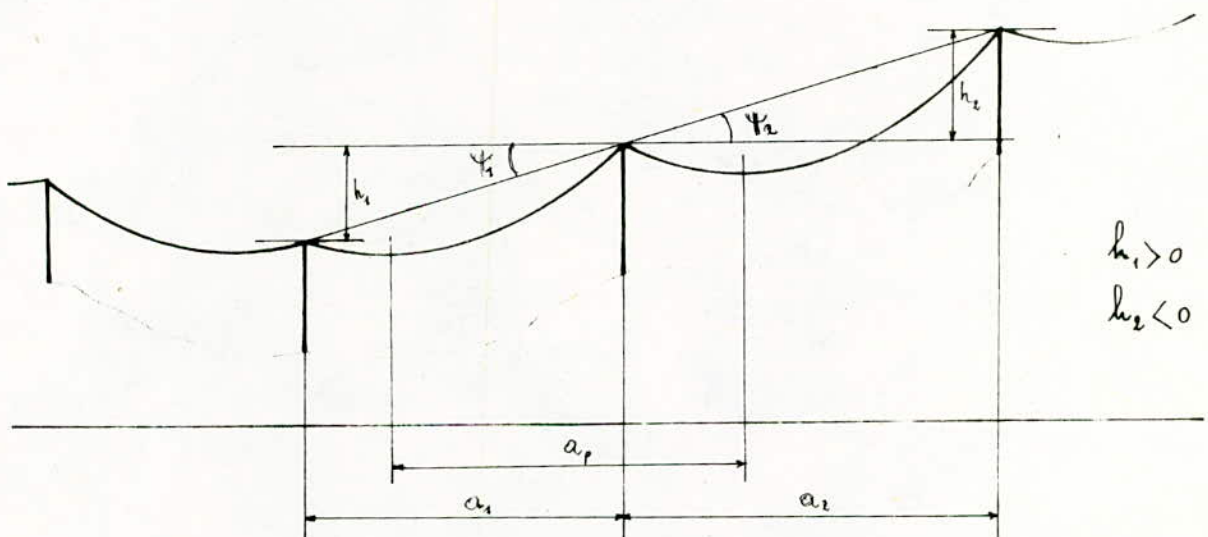


$$\text{On a } \cos \beta = \frac{P_c + P_g}{P'} = \frac{P_c + P_g}{\sqrt{P_v^2 + (P_c + P_g)^2}} = \frac{1 + P_g/P_c}{m'}$$

D'après les calculs faits auparavant: $m' = 2,56$

(m et m' étant les coefficients de surcharge).

Considérons maintenant les deux cas de vérification:



$h_1 > 0$
 $h_2 < 0$

avec: a_1, a_2 les portées adjacentes au pylône à vérifier (m)

h_1, h_2 les dénivellations des portées adjacentes (en m).

a_p : une portée fictive verticale.

1^{er} cas : portée verticale fictive pour les pylônes de suspension :

- Pour l'hypothèse normale d'été on aura :

La charge verticale dans le plan dévié sera : $P = m_p a_v + s_c t \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right)$ (en kg)

Sa composante verticale :

$$P_v = P \cos \beta = p_c a_v + \frac{s_c t}{m} \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right) \quad (\text{en kg})$$

D'où la portée fictive verticale par rapport au poids unitaire total : $a_p = \frac{P_v}{P}$ (en kg).

il vient alors :

$$a_p = \left[a_v + \frac{s_c t}{m p_c} \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right) \right] \cdot \frac{1}{m}$$

- Pour l'hypothèse exceptionnelle d'hiver on aura :

Par un raisonnement analogue : $P' = p'_c a_v + s_c t \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right)$ (en kg).

Sa composante verticale :

$$P'_v = P' \cos \beta = \left[p'_c a_v + s_c t \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right) \right] \cdot \cos \beta$$

comme $a_p = \frac{P'_v}{P'}$ (en kg)

il vient alors :

$$a_p = \left[a_v + \frac{s_c t}{m' p'_c} \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right) \right] \cdot \frac{1 + P'_s / p'_c}{m'}$$

2^e cas : portée fictive pour les pylônes d'ancrage :

- Pour l'hypothèse normale d'été :

Étant donné que les tensions ne sont pas égales (à droite et à gauche), on est amené à les prendre en considération. Soit t_d : la tension à droite et t_g : la tension à gauche.

Par analogie au 1^{er} cas on aura :

$$a_p = \left[\left(\frac{a_1}{2} \pm \frac{s_c t_g}{m_p} \cdot \frac{h_1}{a_1} \right) + \left(\frac{a_2}{2} \pm \frac{s_c t_d}{m_p} \cdot \frac{h_2}{a_2} \right) \right] \cdot \frac{1}{m}$$

- Pour l'hypothèse exceptionnelle d'hiver on aura également :

par analogie avec le 1^{er} cas :

$$a_p = \left[\left(\frac{a_1}{2} \pm \frac{s_c t_g}{m' p'_c} \cdot \frac{h_1}{a_1} \right) + \left(\frac{a_2}{2} \pm \frac{s_c t_d}{m' p'_c} \cdot \frac{h_2}{a_2} \right) \right] \cdot \frac{1 + P'_s / p'_c}{m'}$$

Dans toutes ces formules, t représente la tension unitaire horizontale à l'état considéré et s_c la section du conducteur.

Toutes les vérifications faites sont résumées sur un tableau titré dans ce qui suit.

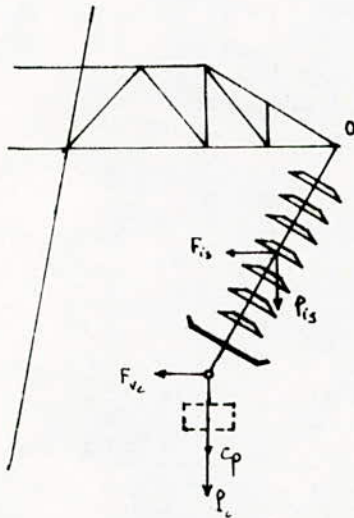
3^e. Calcul des contre-poids éventuels :

Ce calcul permet de compenser la charge verticale relativement faible des conducteurs par

un contrepoids pour maintenir l'inclinaison des chaînes dans les limites admises. Cette compensation se fait uniquement pour les pylônes de suspension situés en contrebas par rapport aux pylônes adjacents. L'inclinaison α est limitée à 40° par le cahier des charges. Cette faiblesse de charge verticale par conséquent une grande inclinaison par rapport à la verticale ($\alpha > 40^\circ$), peut entraîner de graves problèmes "en sèches nous vérifions le dimensionnement des chaînes comme au dimensionnement d'une chaîne d'isolateurs, distance à la masse.....

On doit donc calculer l'angle d'inclinaison des chaînes à chaque fois qu'un cas douteux se présente. Si cet angle est inférieur à 40° ce sera bon sinon, c'est-à-dire, s'il est supérieur à 40° on doit faire un calcul de contrepoids pour le ramener à l'angle limite.

La figure ci-dessous illustre ce cas :



- P_{13} : poids de la chaîne d'isolateur.
- F_{13} : charge due au vent sur l'isolateur.
- P_c : poids du conducteur.
- F_c : charge due au vent sur le conducteur.
- C_p : contrepoids éventuel.
- l_{13} : la longueur de la chaîne d'isolateur.
- d_m : distance minimale à la masse.
- β : inclinaison du conducteur sous le vent.
($\beta \geq \alpha$ en général).

L'inclinaison d'une chaîne d'isolateurs de suspension se détermine en faisant le calcul des moments de toutes les forces agissant sur celle-ci par rapport au point O. Comme l'indique la figure ci-dessous.

$$P_c \cdot l \sin \alpha + P_{13} \cdot \frac{l}{2} \sin \alpha = F_{13} \cdot l \cos \alpha + F_c \cdot \frac{l}{2} \cos \alpha$$

$$\text{d'où} \quad (P_c + \frac{P_{13}}{2}) \operatorname{tg} \alpha = F_{13} + \frac{F_c}{2}$$

$$\text{d'où} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{F_{13} + F_c/2}{P_c + P_{13}/2}$$

et il vient que l'inclinaison sera :

$$\alpha = \arctg \frac{F_{13} + F_c/2}{P_c + P_{13}/2}$$

$$\text{En exprimant : } F_c = 1,019 \cdot p_v \cdot d_c \cdot a_v \cdot 10^{-3} \text{ Kg.} \\ = a_v \cdot V$$

$$F_{13} = 1,019 \cdot p_v \cdot d_{13} \cdot l_{13} \cdot 10^{-3} \text{ Kg.}$$

$$V_{13} = 1,019 \cdot p_v \cdot d_{13} \cdot l_{13} \cdot 10^{-3} \text{ Kg.}$$

$$P_c = P_v = p_c a_v + \frac{sct}{m} \left(\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} \right) \quad (\text{cf paragraphe 2}).$$

Potons $\pm \frac{h_1}{a_1} \pm \frac{h_2}{a_2} = \Sigma \pm \frac{h}{a}$. L'angle d'inclinaison devient dans ce cas :

$$\alpha = \arctg \frac{a_v \cdot V + V_{is}/2}{p_c a_v + \frac{sct}{m} \cdot \Sigma \pm \frac{h}{a} + P_{is}/2}$$

Si, cet angle est supérieur à 40° :

On doit ajouter un contre poids C_p de manière à le ramener à 40° donc on aura :

$$\text{tg } 40^\circ = \frac{a_v \cdot V + V_{is}/2}{p_c a_v + \frac{sct}{m} \cdot \Sigma \pm \frac{h}{a} + \frac{P_{is}}{2} + C_p}$$

$$\text{d'où} \quad C_p = \frac{a_v \cdot V + V_{is}/2}{\text{tg } 40^\circ} - \left[p_c a_v + \frac{sct}{m} \left(\Sigma \pm \frac{h}{a} \right) + \frac{P_{is}}{2} \right]$$

Esous calculs faits on obtient $V_{is} = 22,8 \text{ Kg}$
 $P_{is} = 68,8 \text{ Kg}$
 $V = 0,81 \text{ Kg}$ } ce sont les valeurs constantes

Ces calculs ont été faits pour une pression de vent, sur les conducteurs et la chaîne d'isolateurs, égale à 30 cpz . La tension dans les conducteurs est calculée dans le cas le plus défavorable, soit à l'hypothèse -5°c , sous vent.

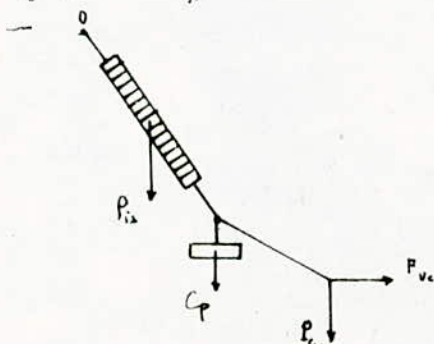
On trouvera un tableau résumant le calcul des contre poids à la fin de ce qui suit.

4. Vérification de la tenue mécanique des chaînes d'isolateurs.

Les chaînes d'isolateurs de suspension ont une charge de rupture variant de $10t$ pour les simples à $20t$ pour les doubles (ce sont là des valeurs utilisées en Algérie par SONELGAS).

En pratique ces charges sont rarement atteintes. Les pylônes du type A (les plus défavorisés) sont calculés pour supporter une portée au vent de 540 m et une portée verticale de 600 m .

Nous allons faire le calcul dans deux hypothèses différentes et les plus défavorables pour cela nous négligerons l'effet du vent sur la chaîne d'isolateurs.



P_{is} : poids de la chaîne d'isolateur.

C_p : contre poids.

P_c : charge due au conducteur.

F_v : charge du vent sur le conducteur.

— Pour l'hypothèse normale d'été: $\theta = 30^\circ\text{C}$, vent 48 cpz, coefficient de sécurité 3.
La charge maximale admissible sera:

$$Z = \frac{12000}{3} = 4000 \text{ Kg.}$$

On a $p_c = 1,593 \text{ Kg/m}$

$$v = 1,019 \cdot p_v \cdot d_c \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m} = 1,019 \cdot 48 \cdot 26,4 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}$$

$$v = 1,292 \text{ Kg/m} \text{ pour l'hypothèse considérée.}$$

La charge effective maximale sera:

$$R = \sqrt{(a_v \cdot v)^2 + (a_p \cdot p_c)^2} + P_{is} + C_p$$

$$\text{d'où } R = \sqrt{(540 \cdot 1,292)^2 + (600 \cdot 1,593)^2} + 68,8 + 240 = 1492 \text{ Kg.}$$

Avec le plus lourd contre-poids que nous avons calculé nous voyons bien que la charge effective maximale R reste inférieure à la charge maximale admise Z .

— Pour l'hypothèse exceptionnelle d'hiver: $\theta = -5^\circ\text{C}$, vent 72 cpz, surcharge de neige 2 Kg, coefficient de sécurité 1,75.

On a alors $p_c = 1,593 \text{ Kg/m}$

$$p_g = 2 \text{ Kg/m.}$$

$$v = 1,019 \cdot 72 \cdot 26,4 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}$$

$$v = 1,938 \text{ Kg/m.}$$

La charge admissible sera:

$$Z = \frac{12000}{1,75} = 6857 \text{ Kg.}$$

La charge effective maximale sera:

$$R = \sqrt{(540 \cdot 1,938)^2 + (600 \cdot (1,593 + 2))^2} + P_{is} + C_p = 2705 \text{ Kg}$$

Dans cette hypothèse la charge maximale effective reste inférieure à la charge maximale admissible. D'une façon générale tous les isolateurs tiennent sous problème.

Nous mentionnons ci-dessous tous les tableaux utilisés pour les vérifications désignées ci-dessus.

Toutes ces vérifications s'imposent afin de garder une bonne marge de sécurité sur l'emploi des différents ouvrages utilisés dans les hypothèses les plus défavorables. Ce qui nous permet par la même occasion d'augmenter la fiabilité de la construction de la ligne.

Vérification de la tenue des pylônes

| Pylône | Type | Dénivelé | | Portées | | Portée vent | | Portée fixe verticale | | | Notes |
|--------|------|----------|-------|---------|-------|-------------|--------|-----------------------|--------------|--------|----------------|
| | | h_1 | h_2 | a_1 | a_2 | a_v | calcul | ETE | Except Hiver | calcul | |
| 29 | AR4 | 3,5 | -18 | 440 | 394 | 417 | 540 | 267,8 | 306,7 | 600 | |
| 30 | AR4 | 18 | -19,5 | 394 | 344 | 369 | " | 273,5 | 309,6 | " | |
| 31 | AR4 | 19,5 | -2,5 | 344 | 409,7 | 376,9 | " | 365,8 | 407 | " | |
| 33 | A0 | -12,5 | 9,5 | 340 | 465 | 402,5 | " | 292,5 | 331,4 | " | |
| 34 | A0 | -9,5 | -16,5 | 465 | 378 | 421,5 | " | 242,8 | 280 | " | |
| 35 | A0 | 16,5 | 16,5 | 378 | 385 | 381,5 | " | 426,5 | 472,2 | " | |
| 36 | A0 | -16,5 | -15 | 385 | 434 | 409,5 | " | 219,1 | 254,2 | " | contre poids ? |
| 37 | A0 | 15 | 11,5 | 434 | 581 | 507,5 | " | 467,5 | 522,4 | " | |
| 38 | A0 | 11,5 | 15,5 | 581 | 434 | 507,5 | " | 424,5 | 477 | " | |
| 39 | ASB | -15,5 | -4,5 | 434 | 459 | 446,5 | " | 291 | 332,2 | " | |
| 40 | A0 | 4,5 | -3,5 | 459 | 585 | 522 | " | 428,6 | 482,1 | " | |
| 42 | A0 | -13 | -11 | 339 | 375 | 357 | " | 178 | 208,7 | " | contre poids ! |
| 43 | A0 | 11 | 14,5 | 375 | 360 | 367,5 | " | 387,2 | 428,9 | " | |
| 44 | AS4 | -14,5 | -1,5 | 360 | 518 | 439 | " | 285 | 326 | " | |
| 45 | A0 | 1,5 | 13,5 | 518 | 514 | 516 | " | 445,6 | 499,3 | " | |
| 46 | AS4 | -13,5 | -19,5 | 514 | 414 | 464 | " | 261,4 | 302,8 | " | contre poids ! |
| 47 | AR4 | 19,5 | -2 | 414 | 445 | 429,5 | " | 392,5 | 438,2 | " | |
| 48 | AS4 | 2 | 2,5 | 445 | 288 | 366,5 | " | 300,2 | 337,6 | " | |
| 49 | A0 | -2,5 | 3 | 288 | 461 | 374,5 | " | 292 | 329,6 | " | |
| 50 | A0 | -3 | 12 | 461 | 486 | 473,5 | " | 398,1 | 446,8 | " | |
| 51 | A0 | -12 | -14 | 486 | 348 | 417 | " | 233,2 | 269 | " | |
| 52 | A0 | 14 | 4,5 | 348 | 447 | 397,5 | " | 382 | 425,1 | " | |
| 53 | ARB | -4,5 | 4 | 447 | 397 | 422 | " | 329,2 | 371,4 | " | |

Vérification de la tenue des pylônes

| pylône | Type | Niveaux | | Portées | | Portée vent | | Tensions unitaires horizontales | | Portée Fictive verticale | | |
|--------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------|--------|
| | | h ₁ | h ₂ | a ₁ | a ₂ | a _v | calcul | E ₆ E _D | t ₆ t _D | Eté | Excep Hiver | calcul |
| 1 | CS4 | - | -8,5 | - | 471,6 | 235,8 | 600 | - | - | 158,3 | 180,4 | 800 |
| 2 | CS4 | 8,5 | 6 | 471,6 | 457 | 464,3 | " | 9,05 9,15 | 17,02 17,19 | 406,6 | 455,7 | " |
| 5 | BR4 | 10,5 | 27 | 375,4 | 460 | 478 | " | 9,15 9,15 | 17,02 17,05 | 450,3 | 498,5 | " |
| 19 | C0 | 6,5 | 37,5 | 374 | 473 | 423,5 | " | 9,15 9,15 | 17,05 17,05 | 469,2 | 518,4 | " |
| 25 | CS8 | 36 | 18 | 407,7 | 491 | 446,5 | " | 9,15 9,15 | 17,05 17,06 | 529,5 | 583,7 | " |
| 32 | CR4 | 2,5 | 12,5 | 409,7 | 340 | 375 | " | 9,15 9,15 | 17,06 17,13 | 553,8 | 394,7 | " |
| 41 | BR4 | 3,5 | 13 | 585 | 339 | 462 | " | 9,15 9,15 | 17,13 17,04 | 424 | 480 | " |
| 59 | BR4 | 26,5 | 14 | 400 | 431,5 | 415,8 | " | 9,15 9,15 | 17,06 17,06 | 466 | 514,6 | " |
| 79 | B0 | 13,5 | 27,5 | 359 | 454 | 406,5 | " | 9,15 9,16 | 17,04 16,98 | 458,2 | 504,6 | " |
| 81 | C0 | -11,5 | -10 | 354 | 451 | 402,5 | " | 9,16 9,17 | 16,98 17,06 | 235,3 | 273,5 | " |
| 84 | C0 | -4 | -3 | 420 | 378 | 399 | " | 9,17 9,14 | 17,06 17,06 | 286,1 | 324 | " |
| 97 | C0 | -27 | -16,5 | 370 | 391 | 380,5 | " | 9,14 9,13 | 17,06 17,09 | 139 | 168,7 | " |
| 111 | C0 | 44,5 | 34,5 | 558 | 269 | 413,5 | " | 9,13 9,1 | 17,1 17,2 | 620,5 | 680,3 | " |
| 114 | CS4 | -2 | -18 | 575 | 559 | 567 | " | 9,1 9,09 | 17,2 17,3 | 391 | 451,2 | " |
| 115 | CS4 | 18 | 9 | 559 | 307 | 433 | " | 9,09 9,27 | 17,3 16,6 | 426,4 | 473 | " |
| 116 | BR8 | -9 | 10,5 | 307 | 474 | 390,5 | " | 9,27 9,15 | 16,6 17,05 | 293,8 | 333,9 | " |
| 120 | CS4 | -4 | 13,5 | 510 | 489 | 498,5 | " | 9,15 9,15 | 17,05 17,05 | 418 | 469,3 | " |
| 122 | 12C0 | 19 | 10,5 | 355 | 472 | 413,5 | " | 9,15 9,13 | 17,05 17,1 | 431,4 | 478,3 | " |
| 136 | C0 | -9,5 | 8 | 298 | 347 | 322,5 | " | 9,13 9,15 | 17,1 17,02 | 245,5 | 270,4 | " |
| 155 | BR4 | -3,5 | -2,5 | 326 | 400 | 363 | " | 9,15 9,13 | 17,02 17,1 | 259 | 293,8 | " |
| 163 | BR4 | 29 | 13 | 497 | 450 | 433,5 | " | 9,13 9,14 | 17,1 17,06 | 494,4 | 548,7 | " |
| 170 | C0 | 7,5 | 37,5 | 358 | 654 | 506 | " | 9,14 9,08 | 17,06 17,3 | 504,3 | 564,7 | " |
| 172 | CR4 | 16,5 | 9,5 | 262 | 299 | 280,5 | " | 9,08 9,14 | 17,3 17,05 | 354,3 | 391,3 | " |

Vérification de la tenue des pylônes.

| Pylône | Type | Niveaux | | Portées | | Portée vent | | Pensions unitaires horizontales | | Portée Fictive verticale | | |
|--------|------|---------|-------|---------|-------|-------------|--------|---------------------------------|-------|--------------------------|--------------|--------|
| | | h_1 | h_2 | a_1 | a_2 | a_v | calcul | e_a | e_b | Eté | Except Hiver | calcul |
| 179 | C0 | 33,5 | 9 | 304 | 600 | 452 | 600 | 9,14 | 12,05 | 520,8 | 582,1 | 800 |
| | | | | | | | | 7,66 | 14,7 | | | |
| 186 | C0 | -8,5 | 26,5 | 459,5 | 301 | 376,3 | " | 7,64 | 14,7 | 390,6 | 439 | " |
| | | | | | | | | 8,21 | 16,81 | | | |
| 194 | C0 | -13,5 | -0,5 | 310 | 406 | 358 | " | 9,29 | 16,81 | 214,3 | 247,7 | " |
| | | | | | | | | 8,16 | 16,99 | | | |
| 204 | CS4 | 3 | 18,5 | 449 | 443 | 446 | " | 9,16 | 16,99 | 417,5 | 465 | " |
| | | | | | | | | 9,15 | 17,03 | | | |
| 219 | BR4 | 2,5 | 26,5 | 382 | 494 | 438 | " | 9,15 | 17,03 | 428 | 476,2 | " |
| | | | | | | | | 9,14 | 17,08 | | | |
| 236 | CR0 | -4 | - | 626 | - | 313 | " | 9,14 | 17,08 | 235 | 265,8 | " |
| | | | | | | | | - | - | | | |

Tableau du Calcul des Contrepoids

$$\alpha = \arctg \frac{a_m v + V_{is}/2}{a_m p_c + \frac{s t}{m} \left(\Sigma z = \frac{h}{a} \right) + P_{is}/2}$$

$$C_p = \frac{a_m v + V_{is}/2}{\lg 40^\circ} - a_m p_c - \frac{s t}{m} \left(\Sigma z = \frac{h}{a} \right) - P_{is}/2$$

| N° du Pylône | $T = \frac{s t}{m}$ (Kg) | a_m (m) | p_c (Kg/m) | $\Sigma z = \frac{h}{a}$ | $P_{is}/2$ (Kg) | $V_{is}/2$ (Kg) | v (Kg/m) | α (°) | C_p (Kg) |
|--------------|--------------------------|-----------|--------------|--------------------------|-----------------|-----------------|------------|--------------|--------------|
| 20 | 3477,06 | 425,5 | 1,593 | -0,077 | 34,4 | 11,4 | 0,81 | 38,7 | Pas de C_p |
| 24 | 3477,06 | 383,4 | " | -0,081 | " | " | " | 41,5 | 22,80 |
| 36 | 3386,10 | 409,5 | " | -0,077 | " | " | " | 39,1 | Pas de C_p |
| 42 | 3488,63 | 357 | " | -0,068 | " | " | " | 39,6 | Pas de C_p |
| 46 | 3488,63 | 464 | " | -0,076 | " | " | " | 37,5 | Pas de C_p |
| 62 | 3472,9 | 472 | " | -0,092 | " | " | " | 40,1 | 5,10 |
| 64 | 3472,9 | 444 | 1,593 | -0,106 | 34,4 | 11,4 | 0,81 | 44,8 | 71,30 |
| 102 | 3423,6 | 368 | " | -0,125 | " | " | " | 51,8 | 178,80 |
| 109 | 3423,6 | 386 | " | -0,133 | " | " | " | 54,6 | 195 |
| 117 | 3473,13 | 421,5 | " | -0,150 | " | " | " | 63 | 238,87 |
| 146 | 3505,8 | 407,5 | " | -0,120 | " | " | " | 52,4 | 182,30 |
| 183 | 2724,9 | 432,5 | " | -0,160 | " | " | " | 51,5 | 177,30 |
| 208 | 3501,72 | 351,5 | 1,593 | -0,080 | 34,4 | 11,4 | 0,81 | 43,3 | 68,20 |

Calcul des traversées.

1°. Généralités :

Une traversée est un croisement des voies principales de communications (routes nationales, routes de vilaya et voies ferrées) avec les lignes aériennes (H.T., M.T., B.T., et lignes de P.T.T.) d'une part et de celles-ci entre elles d'autre part.

Pour le croisement des lignes aériennes entre elles il faut d'abord retenir le principe que toute ligne ayant une haute tension nominale passera par dessus toutes autres dont la tension nominale sera plus basse. Par ailleurs, il n'existe pas de règles quant au croisement des lignes de même tension entre elles. Dans ce cas on retient toujours celui qui se fait avec les moindres difficultés.

Pour le croisement des voies de communications on essaye d'obtenir un angle de croisement très proche de l'angle droit. D'une façon générale, le croisement se fait sous un angle supérieur à 30° . Et, pour plus de sécurité, on exige une hauteur accrue des conducteurs par rapport au sol ainsi qu'une certaine distance entre la voie et le pylône de traversée.

Par conséquent, afin d'éviter tous problèmes s'y rapportant on se doit de respecter d'une façon générale, certaines distances de croisement. A cet effet un calcul de traversée s'impose.

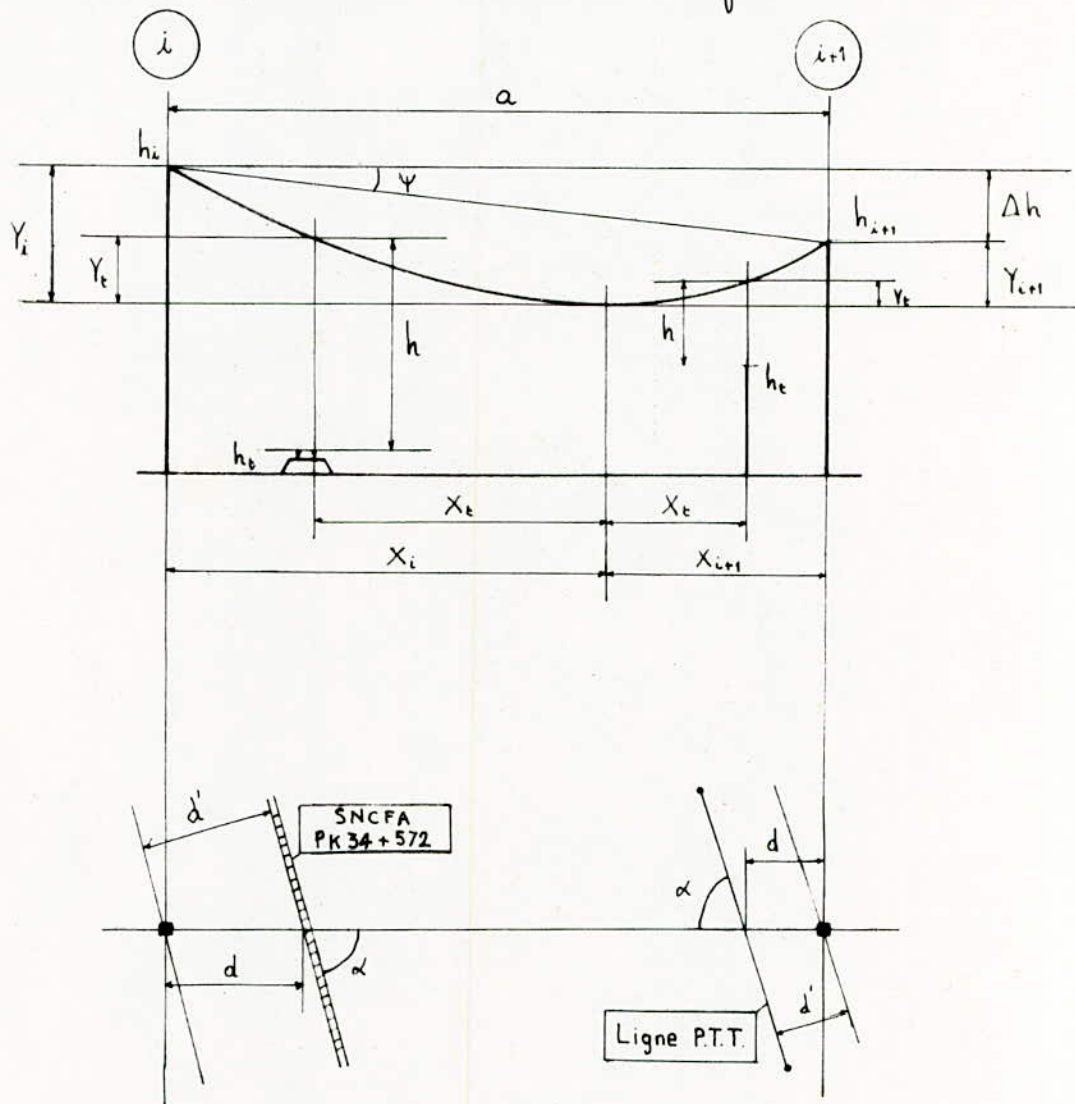
2°. Méthode de Calcul :

Il s'agit dans ce calcul, de vérifier les distances horizontales et verticales, d'une part entre le pylône le plus proche et l'ouvrage traversé; d'autre part entre ce dernier et le point le plus bas du conducteur.

Notons que les ouvrages dont on doit tenir compte sont :

- Chemins de fer (SNCF).
- Routes nationales (RN)
- Routes de vilaya (R.W.)
- Lignes de distribution d'énergie (M.T. et B.T.)
- Lignes P.T.T.

Considérons le schéma suivant résumant tous les cas déjà énoncés :



Dans ce schéma on trouve :

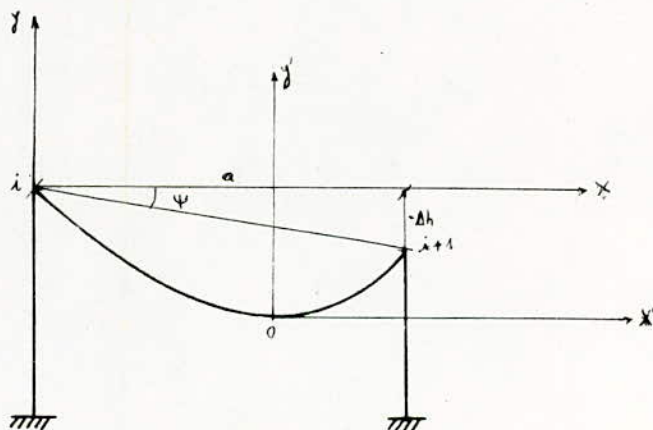
h_i et h_{i+1} représente la cote du terrain le plus haut sous la chaîne d'isolateurs.

a : la portée

$\Delta h = h_i - h_{i+1}$ représente la dénivellation.

ψ : l'angle de dénivellation.

On a vu précédemment que la chaînette est décrite par son équation $y = \frac{p}{2p} \text{ch} \frac{x}{p}$ et que l'on peut l'approximer dans le cas d'une dénivellation, avec un changement d'axes appropriés, à la fonction $y = \frac{x^2}{2p \cos \psi}$.



Faisons un changement d'axes comme l'indique la figure ci-dessus.

Soit (x_i, y_i) les coordonnées de la nouvelle origine i par rapport à l'ancienne 0 .

Soit (x, y) les coordonnées d'un pt M dans le nouveau repère (i, x, y) .

Enfin soit (x', y') les coordonnées dans l'ancien repère $(0, x', y')$.

Déjà on peut donc écrire comme l'indique la figure ci-dessus :

$$x = x' + x_i \quad (1)$$

$$y = y' + y_i \quad (2)$$

Or d'après l'équation de la courbe $y_i = \frac{x_i^2}{2\rho \cos \psi}$ et $y' = \frac{x'^2}{2\rho \cos \psi} = \frac{(x-x_i)^2}{2\rho \cos \psi}$ d'après (1)

d'où l'expression (2) devient :

$$y = \frac{(x-x_i)^2}{2\rho \cos \psi} - \frac{x_i^2}{2\rho \cos \psi}$$

En effectuant le calcul on obtient :

$$y = \frac{x^2}{2\rho \cos \psi} - \frac{2x x_i}{2\rho \cos \psi} \quad (3)$$

D'autre part comme la courbe passe par le pt $(i+1)$, les coordonnées de celui-ci dans le nouveau repère vérifient donc l'expression (3).

Le point $(i+1)$ a pour coordonnées $(a, -\Delta h)$. (ou aura pris $+\Delta h$ si l'origine n'est pas au pt i). On a alors :

$$-\Delta h = \frac{a^2}{2\rho \cos \psi} - \frac{2a x_i}{2\rho \cos \psi}$$

d'où $x_i = \frac{a}{2} + \frac{\rho \Delta h \cos \psi}{a}$

On fait exactement le même raisonnement et en prenant comme origine le point $(i+1)$ au lieu du point i . On aura alors :

$$+\Delta h = \frac{a^2}{2\rho \cos \psi} - \frac{2a x_{i+1}}{2\rho \cos \psi}$$

d'où $x_{i+1} = \frac{a}{2} - \frac{\rho \Delta h \cos \psi}{a}$

Les formules de calcul seront donc :

$$x_{i,i+1} = \frac{a}{2} + \frac{\rho \Delta h \cos \psi}{a}$$

$$y_{i,i+1} = \frac{x_{i,i+1}^2}{2\rho \cos \psi}$$

$$X_t = x_{i,i+1} - a$$

$$Y_t = \frac{X_t^2}{2\rho \cos \psi}$$

$$h = y_{i,i+1} - h_t - (y_{i,i+1} - y_t)$$

Avec x_i ou x_{i+1} l'abscisse du point le plus bas du conducteur par rapport au pylône i ou $(i+1)$. On prendra la distance x_i ou x_{i+1} suivant que l'ouvrage à traverser se trouvera du côté du pylône i ou $(i+1)$. Dans leurs formules respectives on prendra le signe (+) pour x_i et le signe (-) pour x_{i+1} .

De même y_i ou y_{i+1} l'ordonnée du point le plus bas du conducteur par rapport au pylône (ou origine) i ou $(i+1)$. Là aussi on prendra la valeur de y_i ou y_{i+1} suivant que l'ouvrage à traverser se trouvera du côté du pylône i ou $(i+1)$.

d : représente la distance horizontale depuis l'ouvrage à traverser jusqu'au pylône le plus proche et d' : la distance mesurée perpendiculairement à celui-ci à l'axe de l'ouvrage à traverser.

x_t : représente la distance du point le plus bas du conducteur à l'ouvrage traversé. On prendra également $x_t = x_i - d$ ou $x_t = x_{i+1} - d$ suivant que l'ouvrage à traverser se trouvera du côté du pylône i ou $(i+1)$.

Brefin on arrive à la hauteur h qu'il faut respecter ; hauteur entre l'ouvrage à traverser et le conducteur.

Nous arrivons aux conditions qu'il faut satisfaire pour une bonne traversée :

- Pour les lignes aériennes : il faut que $h \geq D$

avec : $D = 1 + \frac{ld}{a} (0,5\sqrt{f} - 1) + t_3$ [en m]

où f : est la flèche à 50°

d : la distance du pylône le plus proche à l'endroit de croisement.

a : la portée

t_3 est une distance donnée par le tableau ci-dessous.

- Pour les routes nationales et SNCF : il faut que $h \geq 10$ m
 $d' \geq H$

avec H la hauteur du pylône le plus proche à l'ouvrage à traverser.

Tableau donnant la valeur de t_3 (en m).

| $U_1 \backslash U_2$ | ligne de 1 ^{er} et 2 ^o catég. et ligne P.T.T. | 63 | 90 | 150 | 225 | 400 | 750 |
|----------------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 63 | 0,5 | 0,6 | | | | | |
| 90 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | | | | |
| 150 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,3 | | | |
| 225 | 1,7 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,1 | | |
| 400 | 3 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 3,8 | |
| 750 | 5,5 | 5,7 | 5,7 | 5,9 | 6,7 | 6,7 | 6,8 |

Après tous les calculs on doit vérifier systématiquement tous les cas de traversée.
On doit veiller à ce que les conditions de croisement soient satisfaites; dans le cas contraire la répartition serait à revoir. On doit alors changer de place au pylône le plus proche ou quelquefois sur une certaine distance de part et d'autre de l'ouvrage à traverser afin d'obtenir la hauteur minimale désirée.

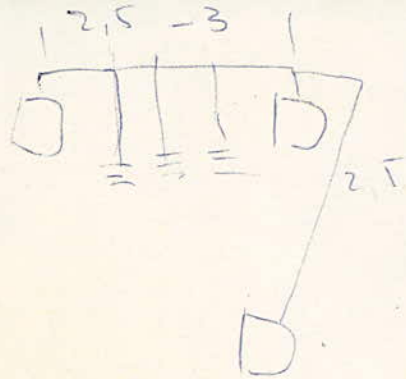
Nous avons donné, à la page suivante, un tableau résumant tous les cas rencontrés le long de la répartition.

Le calcul des traversées doit être exécuté avec le plus grand soin afin d'augmenter la sécurité et la fiabilité des lignes aériennes.

Fiche Des Traversées :

Lignes $h \geq D$
Sncfa $h \geq 10m$

| Nature des Ouvrages Traversés | Entre Pylônes i et $i+1$ | Type de i et $i+1$ | f_{soi} | a_i | h_i | h_{im} | Δh | $\cos \psi$ | X_i | X_{im} | Y_i | Y_{im} | d | X_c | Y_c | h_t | d' | h | D |
|--------------------------------------|----------------------------|----------------------|-----------|-------|--------|----------|------------|-------------|--------|----------|-------|----------|-------|--------|-------------|--------|-------|-------|------|
| Voie SNCFA PK 131 + 107,30 | 1 - 2 | CS4 - CS4 | 15,4 | 471,6 | 570,07 | 578,6 | 8,5 | 0,999 | 268,2 | 203,4 | 20 | 11,5 | 58,5 | 144,9 | 5,84 | 553,4 | 35 | 19,54 | 10 |
| Ligne P.T.T. 6 fils. | 1 - 2 | CS4 - CS4 | 15,4 | 471,6 | 570,07 | 578,6 | 8,5 | " | 268,2 | 203,4 | 20 | 11,5 | 46,6 | 156,8 | 6,8 | 557,7 | 32 | 16,20 | 2,89 |
| Ligne Moyenne tension 60KV | 14 - 15 | AS4 - A. | 5,8 | 290 | 536,5 | 527,5 | 9 | " | 200,8 | 89,2 | 11,2 | 2,2 | 74,8 | 126 | 4,4 | 524,74 | 30 | 4,96 | 3,89 |
| Ligne P.T.T. 6 fils. | 22 - 23 | A. - A. | 16,2 | 483 | 489 | 467 | 22,5 | " | 325,3 | 157,7 | 29,4 | 6,9 | 32,5 | 292,8 | 23,8 | 462,54 | 31 | 20,86 | 2,84 |
| Voie SNCFA PK 139 + 809,75 | 22 - 23 | A. - A. | 16,2 | 483 | 489 | 466,5 | 22,5 | " | 325,3 | 157,7 | 29,4 | 6,9 | 52,5 | 272,8 | 20,7 | 456,94 | 53 | 23,36 | 10 |
| Ligne P.T.T. 6 fils | 23 - 24 | A. - A. | 9,3 | 366 | 456,75 | 459,5 | 3 | " | 197,7 | 168,26 | 10,97 | 0,05 | 178 | -9,74 | 0,03 | 460,12 | 148 | 19,36 | 1,8 |
| Ligne Moyenne tension 30 KV | 23 - 24 | A. - A. | 9,3 | 366 | 456,75 | 459,5 | 3 | " | 197,7 | 168,26 | 10,97 | 0,05 | 162 | 6,26 | 0,01 | 444,12 | 134 | 15,34 | 1,89 |
| Route Nationale n° 5 | 23 - 24 | A. - A. | 9,3 | 366 | 456,75 | 459,5 | 3 | 0,999 | 197,7 | 168,26 | 10,97 | 0,05 | 168 | 0,26 | ≈ 0 | 453,83 | 138 | 23,6 | 1,86 |
| Ligne P.T.T. 4 fils. | 109 - 110 | ARB - ARB | 13,1 | 435 | 528,5 | 525 | 3,5 | -1 | 221,6 | 213,4 | 13,6 | 12,65 | 169,5 | 52,1 | 0,75 | 503,80 | 168 | 11,85 | 3,33 |
| Route nationale n° 5 | 114 - 115 | CS4 - CS4 | 21,7 | 559 | 487,35 | 504,92 | 18 | 0,999 | 337,4 | 221,6 | 31,65 | 13,65 | 240 | -18,4 | 0,09 | 449,93 | > 200 | 41,4 | 10 |
| Voie SNCFA PK 188 + 405,96 | 114 - 115 | CS4 - CS4 | 21,7 | 559 | 487,35 | 504,92 | 18 | " | 337,4 | 221,6 | 31,65 | 13,65 | 264 | 73,4 | 1,5 | 446,85 | > 200 | 10,35 | 10 |
| Ligne P.T.T. 6 fils | 114 - 115 | CS4 - CS4 | 21,7 | 559 | 487,35 | 504,92 | 18 | " | 337,4 | 221,6 | 31,65 | 13,65 | 272 | 65,4 | 1,19 | 452,39 | > 200 | 4,5 | 3,99 |
| Ligne Moyenne tension 30 KV | 115 - 116 | CS4 - BRB | 6,5 | 307 | 504,92 | 494,61 | 9 | " | 206,2 | 100,8 | 11,8 | 2,83 | 134 | -33,2 | 0,31 | 480,87 | 48,9 | 11,22 | 2,94 |
| Route Nationale n° 5 PK 183 + 577,35 | 116 - 117 | BRB - AS4 | 15,6 | 474 | 494,61 | 485,5 | 10,5 | " | 276,8 | 197,2 | 21,3 | 0,05 | 105 | 171,8 | 8,21 | 455,09 | 52 | 26,43 | 10 |
| Ligne P.T.T. 4 fils | 135 - 136 | A. - C. | 6,16 | 298 | 557,5 | 567,78 | 9,5 | " | 206,3 | 91,67 | 11,8 | 2,34 | 90 | 1,67 | ≈ 0 | 568,02 | 50 | 3,42 | 2,85 |
| Voie SNCFA PK 197 + 588,9 | 135 - 136 | A. - C. | 6,16 | 298 | 557,5 | 567,78 | 9,5 | 0,999 | 206,3 | 91,67 | 11,8 | 2,34 | 63 | 28,67 | 0,23 | 550,61 | 35 | 15,06 | 10 |
| Ligne Moyenne tension 30KV | 137 - 138 | A. - A. | 12,2 | 419 | 559,63 | 560,93 | 1,5 | 1 | 215,9 | 203,05 | 12,95 | 11,45 | 66 | 137,05 | 5,2 | 545,21 | 58 | 6,67 | 2,93 |
| Route Nationale n° 5 PK 194 + 732,50 | 138 - 139 | A. - ASB | 13,3 | 437 | 560,93 | 557,43 | 3,5 | 1 | 232,9 | 204,1 | 15,07 | 0,06 | 158 | 74,9 | 1,56 | 536,44 | 60 | 10,68 | 10 |
| Ligne P.T.T. 2 fils. | 140 - 141 | A. - A. | 17,5 | 502 | 549 | 581,5 | 25,5 | 0,999 | 342,3 | 159,7 | 32,6 | 0,04 | 118 | 41,7 | 0,48 | 544,69 | 86 | 37,25 | 3,21 |
| Ligne P.T.T. 2 fils. | 141 - 142 | A. - AS4 | 8,7 | 353 | 581,5 | 581 | 2 | 1 | 186,7 | 166,3 | 9,68 | 7,68 | 82 | 84,3 | 1,97 | 568,10 | 46 | 7,19 | 2,92 |
| Ligne P.T.T. 2 fils. | 144 - 145 | AS4 - A. | 17,4 | 501 | 633,5 | 664,5 | 31 | 0,998 | 361,65 | 139,35 | 36,4 | 5,4 | 60 | 79,35 | 1,75 | 647,93 | 27 | 12,92 | 2,96 |
| Ligne Moyenne tension 30KV | 193 - 194 | A. - C. | 6,7 | 310 | 880,5 | 866,39 | 13,5 | 0,999 | 233,3 | 76,7 | 15,1 | 1,64 | 113 | 120,3 | 4,02 | 862,89 | 30 | 6,53 | 10 |
| Ligne P.T.T. 2 fils. | 193 - 194 | A. - C. | 6,7 | 310 | 880,5 | 866,39 | 13,5 | " | 233,3 | 76,7 | 15,1 | 1,64 | 62 | 14,7 | 0,06 | 851,08 | 52 | 13,73 | 2,82 |
| Ligne P.T.T. 2 fils. | 224 - 225 | AS4 - A. | 7,7 | 332 | 703,5 | 692,73 | 11 | " | 225,6 | 106,4 | 14,15 | 3,15 | 63 | 156,6 | 6,82 | 688,11 | 32 | 8,06 | 2,86 |
| Route Nationale n° 5 PK 195 + 783,70 | 116 - 117 | BRB - AS4 | 15,6 | 474 | 494,61 | 485,5 | 10,5 | 0,999 | 276,8 | 197,2 | 21,3 | 0,05 | 34 | 163,2 | 7,41 | 457,16 | 30 | 35,7 | 10 |



Le câble de garde.

1: Utilité et emplacement du câble de garde.

Nous avons équipé la ligne de BOUIRA-M'SILA d'un câble de garde de $116,2 \text{ mm}^2$ de section. Les câbles de garde sont placés immédiatement à la sortie du pote et mis en général sur une distance de 2,5 à 3 km après chaque pote. De même ils sont également mis à la terre à chaque pylône. En ce qui nous concerne, nous avons mis les câbles de garde sur une longueur de 7,9 km après le pote de BOUIRA (ceci pour des raisons économiques, pour l'arrêter sur une longueur de 3 km, il aurait fallu placer un pylône C; nous avons alors préféré l'amener sur un pylône déjà existant). Par ailleurs les pylônes utilisés par la SONEGAZ sont dimensionnés de façon à pouvoir supporter deux câbles de garde. Son rôle essentiel est d'assurer la protection de la ligne en cas de surtensions d'origine atmosphérique.

2: Choix du paramètre de répartition du câble de garde:

La flèche que prend un conducteur suspendu par ses deux extrémités est inversement proportionnelle à la section de celui-ci. Afin d'éviter les surcharges intempêtes, on choisit un paramètre pour la répartition du câble de garde, plus grand que celui des conducteurs de phase. Le câble de garde ayant une section inférieure à celle du conducteur de phase pour converger on s'arrange de manière à ce qu'il y ait une différence de 10% entre la flèche du câble de garde et celle du conducteur de phase:

$$\text{donc } f_{cg} = 0,9 f_{cph}$$

$$\text{or comme } f_{cph} = \frac{a^2}{8 \rho_{cph}} \quad \text{et} \quad f_{cg} = \frac{a^2}{8 \rho_{cg}}$$

$$\text{d'où } \frac{a^2}{8 \rho_{cg}} = 0,9 \frac{a^2}{8 \rho_{cph}} \quad \text{donc } \frac{1}{\rho_{cg}} = 0,9 \cdot \frac{1}{\rho_{cph}}$$

$$\text{d'où } \rho_{cg} = \frac{\rho_{cph}}{0,9}$$

$$\text{comme } \rho_{cph} = 1800 \text{ m} \quad \text{donc } \rho_{cg} = 2000 \text{ m}$$

Le conducteur de phase est moins tendu que le câble de garde.

3°. Caractéristiques du câble de garde utilisé :

| | |
|--------------------------------|--|
| Section : | 116,2 mm ² . |
| Composition : | 18 brins d'Alu de 2mm de ϕ . 19 brins d'acier de 2mm de ϕ . |
| Section d'Alu : | 56,2 mm ² . |
| Section d'acier : | 59,7 mm ² . |
| Diamètre extérieur : | 14 mm. |
| Poids linéaire : | 0,634 Kg/m. |
| Poids spécifique : | $5,46 \cdot 10^{-3}$ Kg/m.mm ² . |
| Charge de rupture minimale : | 7300 Kg. |
| Module de Young : | 12200 Kg/mm ² . |
| Coefficient d'élasticité : | $14 \cdot 10^{-6}$ °C ⁻¹ . |
| Résistance électrique à 20°C : | 0,512 Ω /Km. |

4°. Vérification des tensions dans le câble de garde :

Nous avons mené le câble de garde sur trois cantons (n° 1, 2 et 3). La longueur totale porte sur 7,9 Km. Nous allons donc, comme dans le cas du conducteur de phase, envisager toutes les hypothèses, calculer les tensions maximales admissibles dans le conducteur et les différents coefficients de surcharges, puis procéder à la vérification canton par canton.

— Hypothèse normale d'été : coefficient de sécurité 3.

$$\theta = 30^\circ \text{c} \quad (\text{sans givre}).$$

$$m = 1,47 \quad (\text{vent 48 cps}).$$

$$t_{\max} = \frac{7300}{3 \cdot 116,2} = 20,94 \text{ Kg/mm}^2$$

— Hypothèse EDS 20% : coefficient de sécurité 3

$$\theta = 30^\circ \text{c} \quad (\text{sans givre}).$$

$$m = 1 \quad (\text{sans vent}).$$

$$t_{\max} = \frac{7300 \cdot 0,8}{116,2} = 12,56 \text{ Kg/mm}^2$$

— Hypothèse normale d'hiver : coefficient de sécurité 3

$$\theta = -5^\circ \text{c} \quad (\text{sans givre}).$$

$$m = 1,08 \quad (\text{vent 18 cps}).$$

$$t_{\max} = \frac{7300}{3 \cdot 116,2} = 20,94 \text{ Kg/mm}^2$$

On ne doit pas dépasser cette valeur.

- Hypothèse exceptionnelle d'hiver: coefficient de sécurité 1,75
 $\theta = -5^{\circ}\text{C}$ (avec $1,2\text{ kg/m}$ de glace)
 $m = 3,32$
 $t_{\text{max}} = \frac{7300}{1,75 \times 116,2} = 35,89\text{ kg/mm}^2$

Le principe de calcul pour la vérification est le même que dans le cas du conducteur de phase. Les tensions calculées ne doivent pas dépasser les tensions maximales admises. Les résultats de cette vérification sont consignés dans un tableau à la fin de ce chapitre.

Cable de Ferre 116,2 mm² Alu Acier

Equation de changement d'etat

$$t'^3 + t'^2 \left[\frac{\alpha^2 \omega^2 E}{24 t^2} \times m^2 + \alpha E (\theta' - \theta) - t \right] = \frac{\alpha^2 \omega^2 E}{24} \times m'^2$$

$$t'^2 (t' + \underbrace{\alpha^2 J_1 + J_2 - t}_A) = \underbrace{\alpha^2 J_3}_B$$

diametre g 2000 $\omega = 5,46 \times 10^{-3}$ $t = \omega p = 10,92$ $t^2 = 119,25$

$\frac{C_1}{t^2} = 1,27$ $C_1 = \frac{100 \omega^2 E}{24} = 151,54$ $\alpha E = 0,171$

| POTHESE | +30° vent 48 cpz | +30° E.D.S. | -5° vent 18 cpz | -5° vent 72 cpz 1,2 kg g. |
|-----------------------|------------------|-------------|-----------------|---------------------------|
| α | 472 | | | |
| $\alpha^2 \cdot 10^9$ | 22,27 | | | |
| m' | 1,472 | 1 | 1,079 | 3,316 |
| m^2 | 2,17 | 1 | 1,16 | 10,99 |
| J_3 | 328,84 | 151,54 | 175,78 | 1665,42 |
| $\alpha^2 J_1$ | 28,28 | 28,28 | 28,28 | 28,28 |
| J_2 | -3,42 | -3,42 | -9,405 | -9,405 |
| $-t$ | -10,92 | -10,92 | -10,92 | -10,92 |
| A | 13,94 | 13,94 | 7,96 | 7,96 |
| $\alpha^2 J_3$ | 7323,27 | 3374,79 | 3914,62 | 37088,9 |
| t' | 15,72 | 11,52 | 13,51 | 30,89 |
| $s_{vent max}$ | 20,94 | 12,56 | 20,94 | 35,89 |

Cable de terre 116,2 mm² Alu acier

Equation de changement d'etat

$$t'^3 + t'^2 \left[\frac{a^2 \omega^2 E}{24 t^2} \times m^2 + \alpha E (\theta' - \theta) - t \right] = \frac{a^2 \omega^2 E}{24} \times m'^2$$

$$t'^2 (t' + \underbrace{a^2 J_1 + J_2 - t}_A) = \underbrace{a^2 J_3}_B$$

rayon r: 2000 $\omega = 5,46 \times 10^{-3}$ $t = \omega r = 10,92$ $t' = 119,25$

$\frac{C_1}{t^2} = 1,27$ $C_1 = \frac{100 \omega^2 E}{24} = 151,54$ $\alpha E = 0,171$

| HYPOTHESE | +30° vent 48cpz | +30° E.D.S. | -5° vent 18cpz | -5° vent 72cpz 1,2kg.g. |
|------------------|-----------------|-------------|----------------|-------------------------|
| a | 430,75 | | | |
| $a^2 \cdot 10^4$ | 18,55 | | | |
| m' | 1,472 | 1 | 1,079 | 3,316 |
| m'^2 | 2,17 | 1 | 1,16 | 10,99 |
| J_3 | 328,84 | 151,54 | 175,78 | 1665,42 |
| $a^2 J_1$ | 23,56 | 23,56 | 23,56 | 23,56 |
| J_2 | -3,42 | -3,42 | -9,405 | -9,405 |
| $-t$ | -10,92 | -10,92 | -10,92 | -10,92 |
| A | 9,22 | 9,22 | 3,235 | 3,235 |
| $a^2 J_3$ | 6099,98 | 2811,07 | 3260,72 | 30893,54 |
| t' | 15,66 | 11,62 | 13,82 | 30,33 |
| vent max | 20,94 | 12,56 | 20,94 | 35,89 |

4^{eme} PARTIE

Reflexions Sur Les Lignes
Aeriennes HT

X

Dans tout ce qui précède, nous nous étions uniquement occupés des aspects théoriques du calcul de la ligne haute tension. La partie électrique nous avait permis de prévoir la puissance à transporter par la ligne et donc le choix de la section du conducteur à utiliser. Quant au calcul mécanique, il permettrait de vérifier la sûreté de tous les éléments de la ligne (conducteurs de phases, câbles de garde, pylônes, isolateurs etc...).

Il est cependant évident que ces préoccupations ne constituent qu'une première phase du travail à effectuer.

La deuxième phase, non moins importante, consiste en l'exécution pratique de la ligne. Cette exécution se fait sur la base de données techniques à fournir au chantier, résumant tous les résultats issus du calcul.

Ces données techniques sont constituées des pièces suivantes:

- Mémoire descriptif
- Carte et tracé
- Profil en long
- Profil des traversées
- Calcul des traversées
- Carnet de piquetage.
- Calcul des câbles
- Silhouette des pylônes
- Dessins des massifs

L'exécution en elle-même est conditionnée par une bonne organisation du chantier (approvisionnement en temps voulu, contrôle de qualité des matériaux utilisés, sécurité du travail etc....)

Ceci nous permet de conclure que la phase des travaux est aussi importante, sinon plus importante que la phase du calcul. Elle nécessite des hommes possédant une longue expérience des chantiers de ligne et connaissant parfaitement les problèmes qui y sont liés.

ANNEXES

Extraits du cahier des charges.

Chapitre 1 : Indications générales et désignations des ouvrages :

Article 1 : Objet de l'entreprise :

Le présent cahier des charges a pour objet la construction des lignes aériennes à 225 KV, 150 KV, 90 KV, 63 KV en Algérie.

Article 2 : Caractéristiques générales des lignes :

Les caractéristiques générales des lignes sont les suivantes :

- Tension de service entre phases 225 KV, 150 KV, 90 KV, 63 KV.
- Choix des conducteurs : déterminé par l'étude.
- Supports métalliques ou exceptionnellement en béton ; ces supports seront des types suivants.
 - * Type A pour alignements.
 - * Type B pour angles inférieurs ou égaux à 20° .
 - * Type C pour arrêt permanent ou accidentel (R) et angles supérieurs à 20° .
 - * Types spéciaux pouvant être nécessaires.

L'intervalle entre deux supports du type C ne devra pas comprendre plus de 30 portées.

- Nombre d'isolateurs
- Isolateurs de suspension en verre trempé CTV 254 ou équivalents. Nombre de 10 tranches sauf dérogations spéciales.

(R). L'arrêt accidentel est celui que réalise une chaîne spécial de suspension lorsque le conducteur se rompt.

Le nombre d'isolateurs sera conforme au tableau ci-après :

| tensions | alignement | arrêt |
|----------|------------|-------|
| 63 KV | 4 | 5 |
| 90 KV | 6 | 7 |
| 150 KV | 10 | 11 |
| 225 KV | 16 | 16 |

L'armement sera en nappe, quinconce, diapreau ou double diapreau avec ou sans câble de terre.

Les câbles de terre seront placés à une distance verticale au-dessus des conducteurs suffisante pour que ceux-ci soient compris dans un dièdre ayant pour arête un des câbles de terre et pour angle au sommet 60° ou exceptionnellement par dérogation 90° . Ceci étant déterminé dans une hypothèse sous vent ni givre sur les conducteurs.

- Distances minimales entre conducteurs de phase :

Les distances minimales entre conducteurs de phase sont déterminées dans le tableau ci-après :

| | | | | |
|-------------------|----|----|------|-----|
| Tensions (KV) | 63 | 90 | 150 | 225 |
| distances min (m) | 3 | 4 | 5,50 | 7 |

Il sera en outre vérifié que l'écartement des conducteurs répond aux exigences de la formule suivante :

$$D \geq K \sqrt{f + l} + \frac{U}{150}$$

Dans laquelle : D = distance entre phase exprimée en m.

K : coefficient variant avec la nature du câble utilisé ; on prend généralement :

$K = 0,8$ pour les câbles alu-acier.

$K = 0,9$ pour les câbles Aluélec.

f = flèche déterminée par l'hypothèse la plus défavorable en m.

l = la longueur de la chaîne d'isolateurs en m.

U = tension entre phase de la ligne en KV.

- Distances minimales entre conducteurs et la masse précisées dans le tableau ci-après :

| | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Tensions (en KV) | 63 | 90 | 150 | 225 |
| dist. min. sans vent (m) | 0,60 | 0,90 | 1,30 | 1,65 |
| dist. min. avec vent, $p_s = 30 \text{ kg/m}$ | 0,50 | 0,70 | 1,00 | 1,30 |

Les distances d'isolement sont mauvaises au-dessus de 1000 m de 1,25 pour 100 m de dénivellation.

Chapitre 2 : Provenance, qualité et essais des matériaux :

Article 6 : Conducteurs et câble de terre :

Les câbles fournis pour EGA sont en principe en Alu-acier et ont les caractéristiques suivantes :
Les caractéristiques des câbles en Aluélec seront précisées suivant les cas :

| Natures | Section (mm ²) | Charge de rupture (kg) | COMPOSITION | |
|--------------------|----------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| | | | Nbre de Brins en Alu | Nbre de Brins en Acier |
| Câbles conducteurs | 147,1 | 4820 | 30 x 2,25 | 7 x 2,25 |
| | 228 | 7360 | 30 x 2,8 | 7 x 2,8 |
| | 288 | 9220 | 30 x 3,15 | 7 x 3,15 |
| | 411 | 16500 | 32 x 3,6 | 19 x 2,4 |
| | 617 | 21800 | 42 x 2,61 | 19 x 2,65 |
| Câbles de Garde. | 68,6 | 3700 | 13 x 2 | 7 x 2,25 |
| | 94 | 7500 | 15 x 2,1 | 19 x 1,68 |

Article 8: Chaines d'isolateurs et matériels accessoires, constitution; prise en charge des isolateurs:
Les chaines des conducteurs de phases seront des types suivants:

| Type de support | CONSTITUTION des CHAINES | |
|---------------------------------|---|--|
| | 60 KV et 90 KV | 150 KV et 225 KV |
| Support d'alignement ordinaire. | chaines de suspension double cornes en haut et en bas | simples cornes en haut et raquettes en bas. |
| Support d'angle et d'arrêt. | chaines munies de cornes doubles ou simples en haut et en bas. | Chaines munies de cornes en haut et de raquettes en bas. |
| | Les chaines seront simples ou multiples suivant les efforts exercés et les isolateurs utilisés. Les chaines seront en suspension pour les angles inférieurs à 40° et les arrêts accidentels et en arrêt pour les arrêts permanents et les angles supérieurs à 40°. | |
| Support pour transportation. | Chaines simples ou multiples suivant les efforts exercés et les isolateurs utilisés. | |

Des bretelles anti-vibrations seront placées là où elles s'avèrent nécessaires.

A. Caractéristiques des chaines d'isolateurs.

Les conducteurs seront supportés à l'aide de chaines d'isolateurs formées d'éléments en verre humpé capot et tige ou équivalent dont le type sera précisé dans le devis particulier.

Dans les zones exposées à l'air marin, il sera fait emploi d'isolateurs spéciaux.

L'emploi des isolateurs sera déterminé en fonction de l'effort mécanique que peut supporter indéfiniment l'isolateur sous tension électrique sans se perforer et sans se rompre. Le coefficient de

sécurité par rapport à la charge de rupture mécanique minimum garanti sera de :

- 3 pour les isolateurs en alignement, en angle ou en arrêt sous les charges normales avec vent maximum.
- 1,75 pour les hypothèses accidentelles.

Chapitre 3: Calcul des ouvrages.

Article 13: Hypothèses:

Les ouvrages seront calculés conformément aux prescriptions de l'arrêté gubernatorial du 10 février 1952, paru au J.O.A du 22 avril 1952, déterminant les conditions techniques auxquelles doivent satisfaire les distributions d'énergie électrique.

Les températures des trois hypothèses sont fixées à :

- Été : température maximale : $+50^{\circ}\text{C}$.
- Régime moyen : $+30^{\circ}\text{C}$ vent 48 cpz.
- Hiver : température minimale : -5°C vent 18 cpz.
 -5°C vent 72 cpz, givre éventuel.

En outre, afin d'assurer une sécurité suffisante malgré les conditions climatiques variées des régions traversées, il est défini une zone givrée dont la surcharge varie de 2 à 6 kg/m.

Article 14: Portées:

Les portées normales seront définies par les abaques d'utilisation de supports. Toutefois il est conseillé d'utiliser des supports d'arrêt pour des portées exceptionnelles.

Article 15: Conducteurs et câbles de terre:

La hauteur des supports sera déterminée de telle sorte que le point le plus bas des conducteurs se trouve à une hauteur minimale de 7 m au-dessus du sol, et par une température de $+50^{\circ}\text{C}$ sous vent. En aucun point, les isolateurs ne devront se trouver à une hauteur inférieure à 10 m au-dessus du sol. Lorsque la ligne surplombera des terrains plantés d'arbres fruitiers, et dans le but de limiter les élagages, le point le plus bas des conducteurs devra être à une hauteur de 10 m au-dessus du sol au lieu de 7 m, prévu en terrain ordinaire, aux traversées de routes, la distance du sol au point le plus bas du conducteur devra être de 9 m.

Les calculs des conducteurs et des câbles de terre seront conduits de façon à respecter les coefficients de sécurité prévus dans la plus défavorable des hypothèses de l'arrêté ministériel.

- Cas normal : Hypothèses A et B de l'arrêté technique.
Coefficient 3 sur la rupture.

La flèche du câble de garde sera toujours inférieure de 10% à celle des conducteurs à 50°C sv.

- Cas exceptionnel du givre: le coefficient de sécurité sera de 1,75 sur la rupture.
La surcharge de givre est appliquée à une température de -5°C et la pression du vent est de 72 cpz sur le conducteur nu.

- E.D.S.: Every Day Stress.

À la température moyenne de 50°C sous vent la tension du conducteur ne devra pas dépasser les 20% de sa charge de rupture.

Article 17: Coefficient de sécurité des supports:

La ligne sera établie à l'aide de 3 types de supports normaux et des supports spéciaux pouvant être nécessaires dans les cas particuliers. L'équipement en chaînes de ses supports est défini à l'article 8.

A. Conditions relatives aux supports d'alignement (type A):

1. Hypothèse normale:

Dans l'hypothèse du vent maximum de l'arrêté ministériel et de la portée d'utilisation du support, les calculs devront faire ressortir un coefficient de sécurité de: $K = 3$ sur la charge de rupture de l'acier.

2. Hypothèse accidentelle:

Aux hypothèses précédentes qui sont celles du régime ou ajoutera "l'hypothèse accidentelle" la plus défavorable soit:

- de la rupture d'un conducteur: (celui qui produit le couple de torsion maximum).

Les supports seront vérifiés d'une part en supposant appliquée, au bout de bras et avant déformation, la traction déformant l'échisse; d'autre part en supposant appliquée, au bout de bras mais après déformation complète, la traction correspondant à la tension maximum autorisée du conducteur.

- de la surcharge de givre appliquée avec un vent de 72 cpz sur les conducteurs nus.

Les calculs devront faire ressortir un coefficient de sécurité de: $K = 1,75$ sur la charge de rupture de l'acier.

B. Conditions relatives aux supports d'angle inférieur à 20° (type B):

1. Hypothèse normale:

Dans l'hypothèse du vent maximum de l'arrêté ministériel de la portée d'utilisation du support et d'un angle de 20° les calculs devront faire ressortir un coefficient de sécurité de: $K = 3$ sur la charge de rupture de l'acier.

2. Hypothèse accidentelle:

Aux hypothèses précédentes on ajoutera "l'hypothèse accidentelle" la plus défavorable soit:

- de la rupture d'un conducteur tendu à la tension maximale autorisée.

- de la surcharge de givre appliquée avec vent de 72 cpz sur conducteurs nus.

Alors le coefficient de sécurité est réduit à: $K = 1,75$ sur la charge de rupture de l'acier.

C. Conditions relatives aux supports d'angle supérieur à 20° et d'arrêt (type C):

1. Hypothèse normale :

Dans l'hypothèse du vent maximum de l'arrêté ministériel de la portée d'utilisation du support et d'un angle, de 40° les calculs devront faire ressortir un coefficient de sécurité de : $K=3$ sur la charge de rupture de l'acier.

2. Hypothèse accidentelle :

Aux hypothèses précédentes on ajoutera "l'hypothèse accidentelle" la plus défavorable soit :

- de la rupture simultanée de tous les conducteurs (câbles de phase et de terre), d'un côté du support, ceux non rompus étant tendus à la tension maximale autorisée.

- de la surcharge de glace appliquée avec un vent de 72 cm/s sur les conducteurs nus. Alors le coefficient de sécurité est réduit à : $K=2$ sur la charge de rupture de l'acier.

D. Supports de traversées de voies ferrées d'intérêt général :

Les supports des traversées de voies ferrées d'intérêt général et engageant le gabarit de la voie doivent être des supports d'arrêts.

E. Tableau récapitulatif des coefficients de sécurité :

| Types de supports. | Cas normal vent maximum de l'arrêté technique. | Cas exceptionnel condition la plus défavorable entre : - Rupture des conducteurs - Surcharge glace + vent 72 cm/s . |
|---|---|---|
| Alignement. Angles $\leq 20^\circ$. | $K=3$ sur la charge de rupture $K=3$ " " " " | $K=1,75$ sur la charge de rupture $K=1,75$ " " " " |
| Angles $\geq 20^\circ$ Arrêts. | $K=3$ sur la charge de rupture $K=3$ " " " " | $K=2$ sur la charge de rupture $K=2$ " " " " |

Matériel et accessoires de la ligne.

Dans ce chapitre, on désigne le matériel autre que les isolateurs qui entre dans la construction des chaînes d'isolateurs, le matériel de suspension et d'ancrage du câble de terre, le matériel de jonction et divers autres éléments.

1°. Chaîne de suspension simple :

On appelle chaîne de suspension simple un ensemble formé par plusieurs éléments d'isolateurs. Ceci n'est valable que pour les isolateurs capot-tige utilisés par SONEGAL, cependant il y a des isolateurs qui font exception ; on cite les isolateurs à fût plein.

2°. Chaîne de suspension double :

C'est un système constitué par deux chaînes élémentaires réunies par un palonnier à l'étrier ou à la chape tourillon fixée au bras de l'armement. On distingue plusieurs systèmes qui se différencient les uns des autres que par le mode de réalisation :

1° mode de réalisation : les deux chaînes simples restent parallèles fixées séparément au conducteur.

2° mode de réalisation : les deux chaînes simples ne sont pas parallèles, on fixe les pièces au câble avec un écartement qui correspond à une inclinaison de 10 à 15% par rapport à la verticale.

3° mode de réalisation : les deux chaînes simples sont réunies à leur partie supérieure par un second palonnier et unies simplement d'une seule pièce.

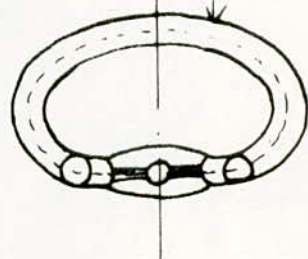
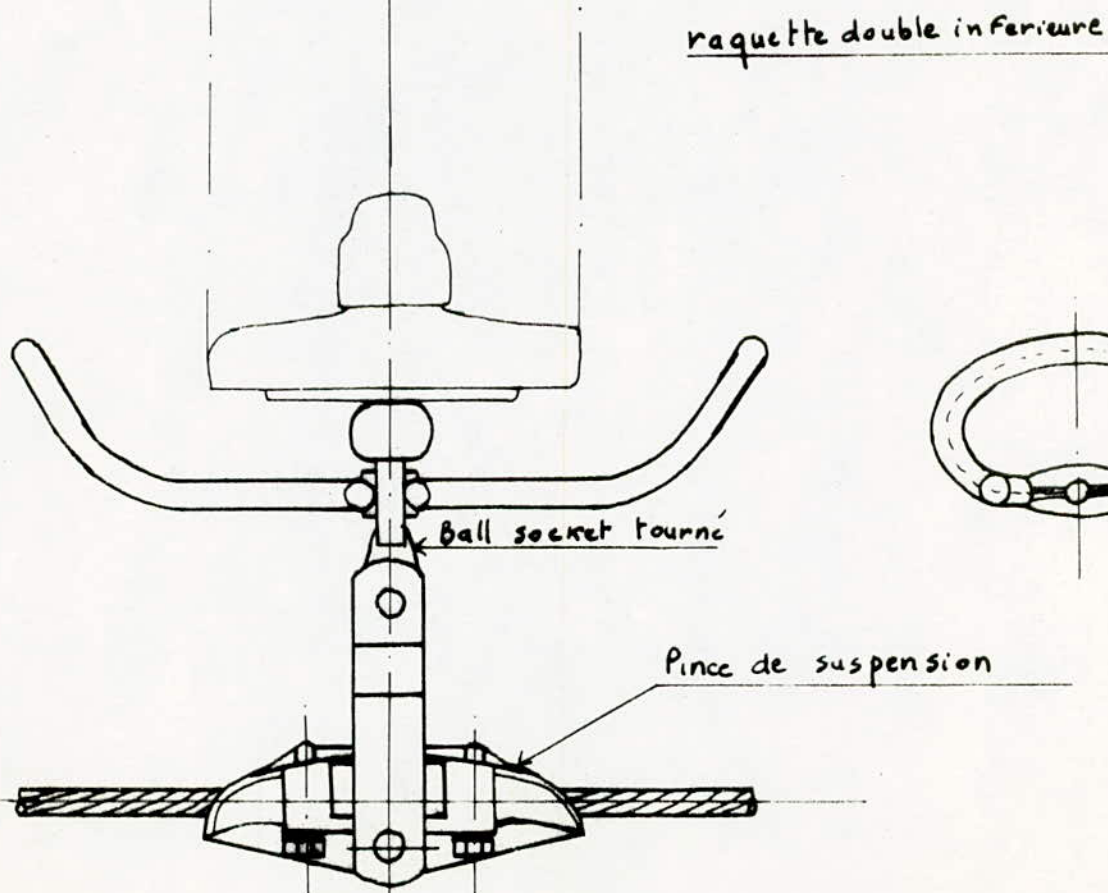
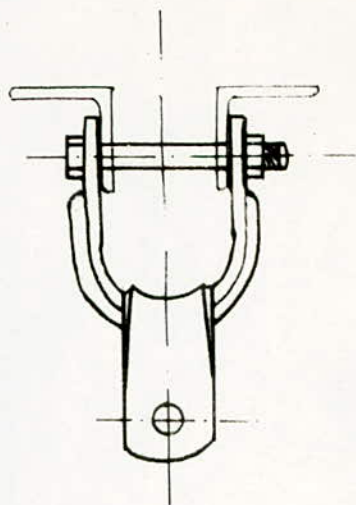
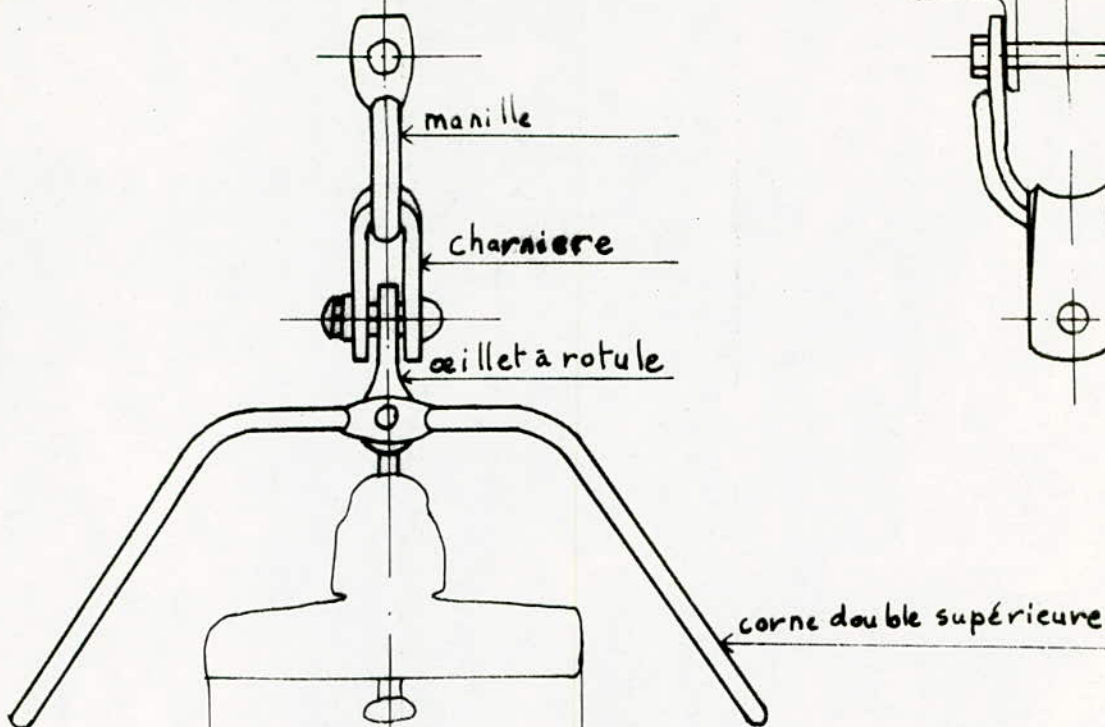
Il existe également une variété particulière qui rentre dans la catégorie des chaînes doubles : les chaînes en V, trouvant leur utilisation sur les lignes 400 KV et plus que nous n'envisageons pas.

3°. Accessoires de suspension.

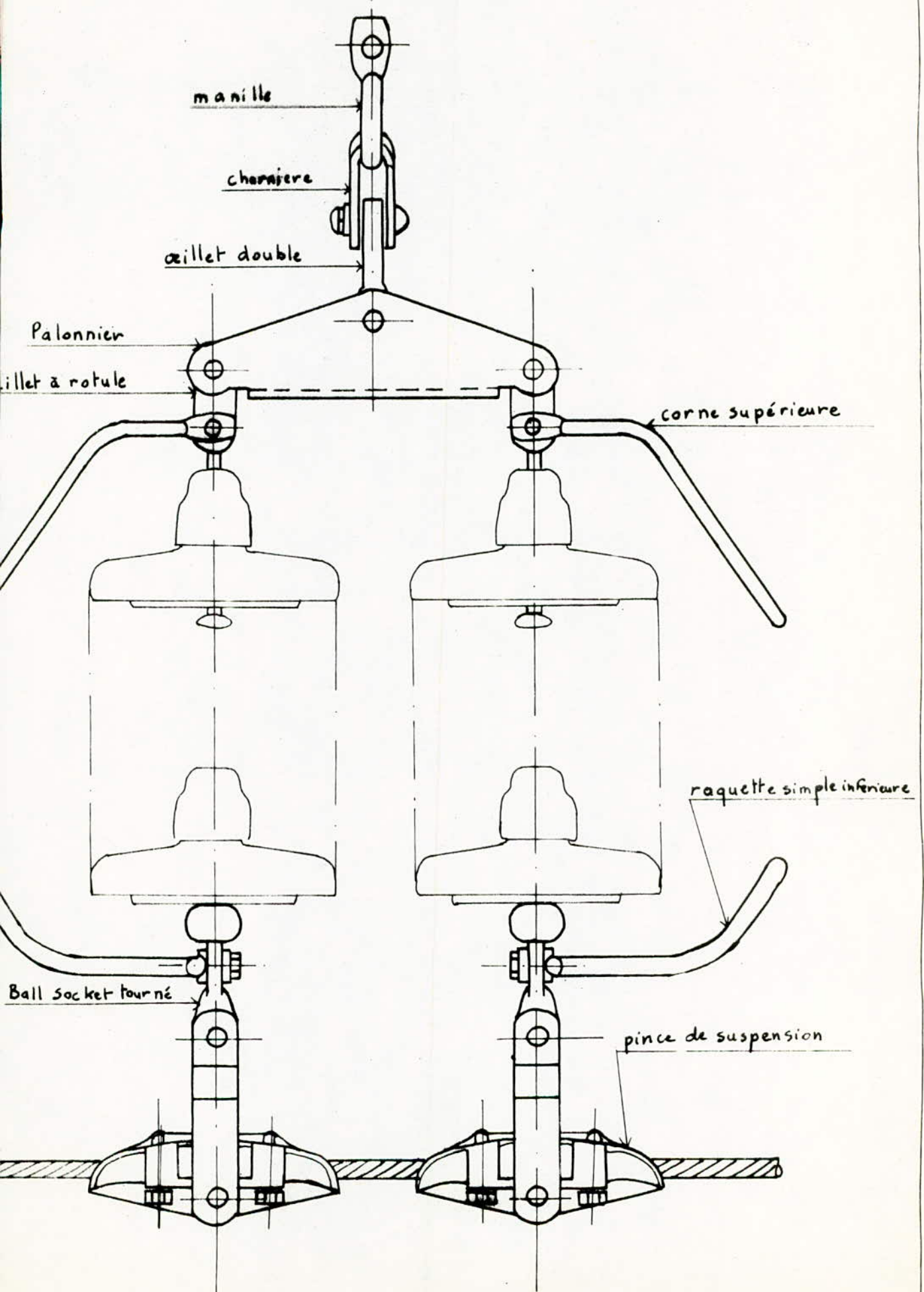
a). Ils constituent les organes de liaison entre les isolateurs et la charpente du pylône. Ils comprennent :

— L'étrier de suspension qui peut être remplacé par une chape tourillon.

Équipement Pour chaîne De Suspension Simple (220 kv)



Équipement Pour chaîne De Suspension Double (220kv)



Il doit comprendre au sens transversal de la ligne. Cette disposition permet à la chaîne d'isolateurs d'osciller autour d'un axe O de l'étrier et d'éviter, en cas de vent transversal, de porter toujours au même endroit.

La chape tourillon (ou palier tourillon) a été conçue pour éviter, avec sa double articulation, les flexions qui apparaissent dans l'étrier en cas d'effort longitudinal.

— L'oeillet de suspension: il réalise la liaison entre l'étrier (ou chape tourillon) et le premier élément isolateur.

b). Pince porte conducteur:

Comme son nom l'indique, cette pince est destinée à tenir le câble et à le porter.

c). Armement de protection:

On associe toujours à la chaîne de suspension des armements de protection qui ont pour rôle:

- d'éloigner l'arc de la chaîne en cas de contournement.
- d'empêcher la fixation de l'arc sur le conducteur lui-même.
- d'assurer une répartition plus favorable de la tension entre les isolateurs et de s'opposer à la formation d'effluves sur la chaîne ou tout au moins d'en diminuer l'importance.

Pour les lignes 225 KV les chaînes sont équipées par des cornes à la partie supérieure et des raquettes à la partie inférieure.

4°. Chaîne d'ancrage simple:

C'est une chaîne d'isolateurs qu'on utilise couramment avec tous les conducteurs et les raccordements aux postes avec un paramètre réduit. Elle comprend:

- Une manille en acier forgé.
- un tendeur d'ancrage éventuel.
- Un oeillet à teton avec carré ou un octogone pour la fixation de la corne supérieure.
- Un ball-socket à œil avec fixation de la corne inférieure ou de la raquette.
- Un manchon d'ancrage avec plage de dérivation ou une pince d'ancrage.

La conception d'une chaîne d'ancrage simple n'appelle aucune remarque particulière.

5°. Chaîne d'ancrage double:

D'une façon générale la chaîne d'ancrage double est utilisée en ligne dans les angles importants du tracé et aux amarrages devant les postes. En ce qui concerne le matériel constitutif, il sera le même que celui des chaînes de suspension doubles avec cependant les particularités suivantes:

La liaison à la charpente doit être de préférence effectuée par la chape tourillon.
On intercale un tendeur d'ancrage (dont la course est de 25 à 30 cm environ) entre la manille et le palonnier d'ancrage. Les mêmes dispositions sont réalisées à l'extrémité côté ligne de la chape d'ancrage: le manchon d'ancrage est terminé par une chape dans laquelle s'engage l'ocillet chantourné du palonnier.

6°. Matériel de suspension et d'ancrage du câble de garde :

a). Suspension du câble de garde :

Elle comprend :

- un étier de suspension.
- une manille.
- une pince de suspension.

On lui ajoute souvent une connexion souple destinée à réaliser directement à la terre, le câble de garde en supprimant les articulations de la chaîne et les mauvais contacts qui en résultent. Il est nécessaire d'ajouter à cela une bretelle anti-vibratoire.

b). Ancrage du câble de garde :

Il peut être réalisé comme dans le cas de la suspension par :

- des étriers avec leurs branches dans le sens de la ligne.
- des chapes tourillons.

La chape du manchon d'ancrage est prolongée par un connecteur relié à une manille à l'étrier d'ancrage ou à la chape tourillon.

7°. Pièces diverses :

a). Bretelle de jonction :

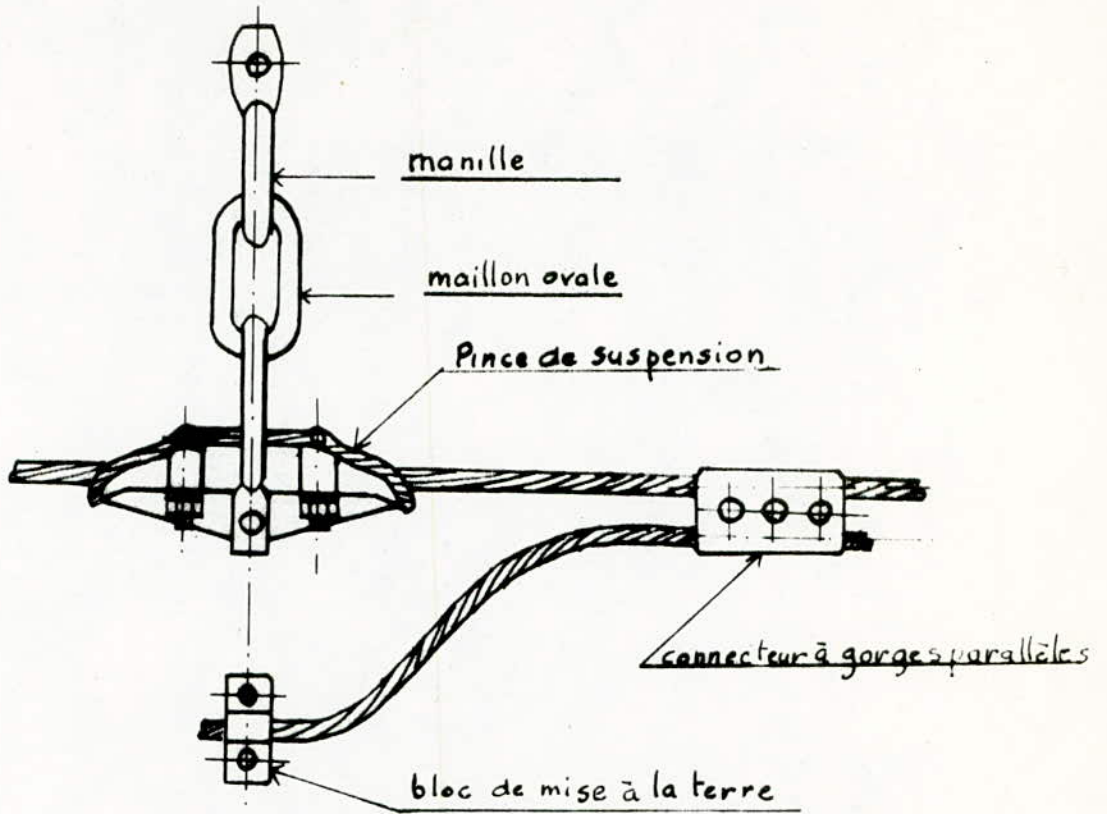
C'est un morceau de câble de même nature que le conducteur de la ligne, destiné à établir la continuité électrique au droit des ancrages. En général, les bretelles de jonction sont assez rigides pour ne pas nécessiter la pose de contre-poids.

b). Bretelle anti-vibratoire :

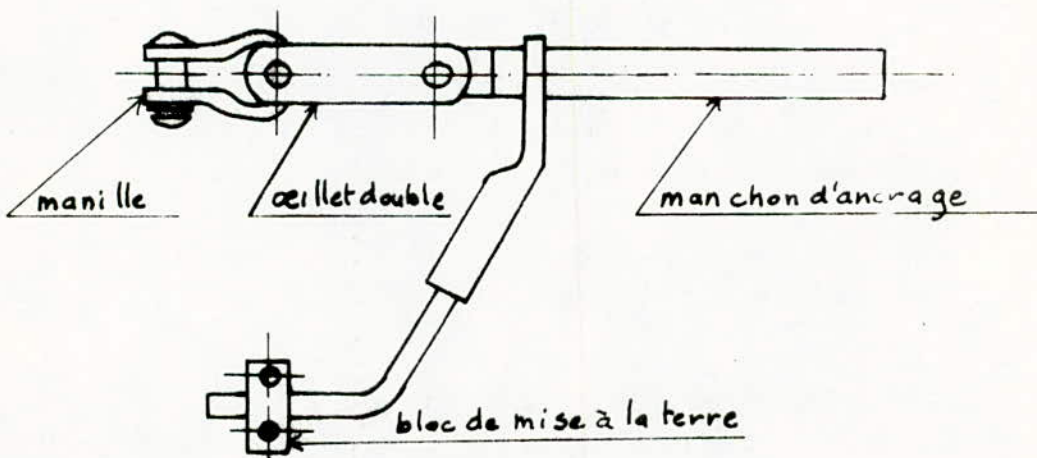
De la même façon, elle est constituée par un bout de conducteur de même type que celui de la ligne, fixé à deux extrémités par des pinces ou manchons avec deux blocs de serrages. C'est un dispositif qui sert à amortir les vibrations dont l'apparition peut avoir de graves conséquences sur la fiabilité des conducteurs. (fatigue au niveau des pinces et manchons d'ancrage, cassure des brins d'aluminium). On distingue deux types de bretelles anti-vibratoire :

- bretelle du type I : (très souvent utilisées dans le cas de suspension).
- bretelle du type II : (utilisées dès qu'il y a un problème de distance à la masse).

Équipement Pour Suspension Du Câble De Garde (220Kv)



Équipement Pour Ancrage Du Câble De Garde (220Kv)



La distance entre les deux points d'attache est égale à la demi-longueur d'onde de vibration que l'on appelle longueur de bretelle.

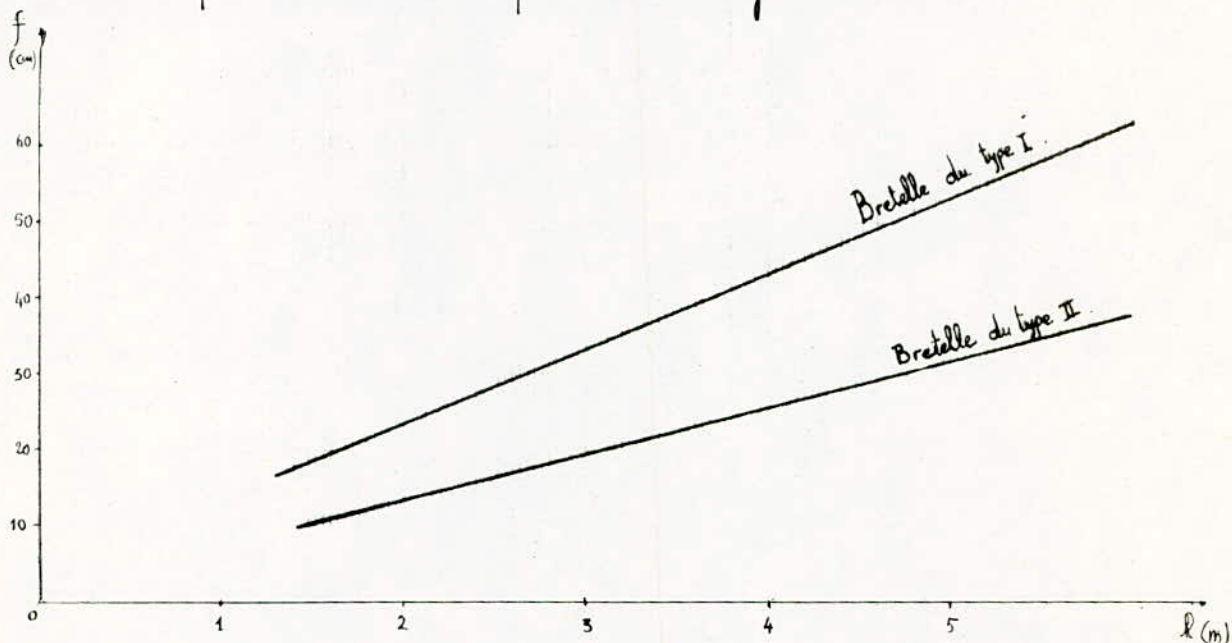
$$l = d_c \sqrt{g \rho}$$

avec : d_c le diamètre du conducteur.

g l'accélération de la pesanteur

ρ le paramètre de répartition à la température moyenne sans vent (EDS).

On donne les flèches des bretelles en fonction de la longueur de celles-ci :



c). Vés de suspension:

C'est une pièce en forme de V en rond d'acier de diamètre 20 à 30 mm articulée à sa partie supérieure qui oscille librement dans le sens de la ligne en maintenant les chaînes de suspension à une distance suffisante du bras d'armement en cas d'importantes oscillations.

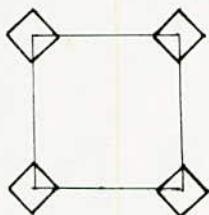
d). Contrepoids:

Ce sont des galettes de fonte ou de plomb qui sont suspendues par l'étrier à la partie inférieure de la chaîne afin de limiter l'inclinaison des chaînes d'isolateurs de suspension, sous l'effet du vent, à un angle fixé par le cahier des charges (40°).

Note sur les fondations.

Les fondations des pylônes, au même titre que les autres éléments de la ligne, sont importantes. Des fondations bien exécutées et de bonne qualité assurent la pérennité et la fiabilité de la ligne.

Pour ce qui concerne les lignes THT, les fondations des pylônes sont disposées en quatre supports indépendants. Ce sont donc des fondations tétrapodes.



Deux pieds sont soumis à la compression et deux autres à l'arrachement sous l'effet des forces transversales. Les efforts s'inversent quand les forces s'inversent.

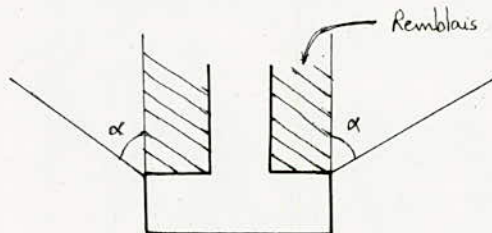
Pour la compression, il n'y a pas trop de problèmes et on peut toujours adapter le type de fondation à la nature du sol. (roches, terre meuble, ferme, marais...).

Pour l'arrachement, le problème est beaucoup plus complexe et il n'est plus possible de négliger le milieu environnant à savoir :

- Mobilisation maximum de la résistance du sol au soulèvement.
- Connaissance la plus approfondie possible de la nature du sol.

Le critère d'arrachement est de loin le plus défavorable.

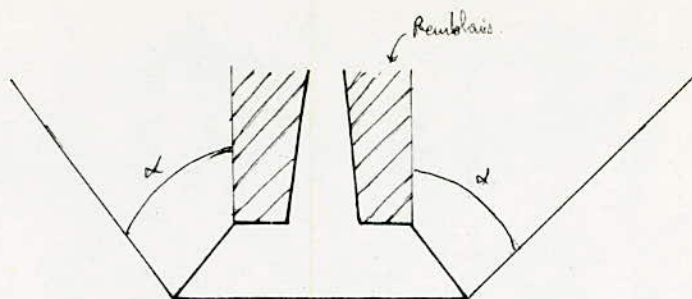
Les terres intéressées par l'arrachement sont en général situées dans un cône dont les génératrices font un angle de 20° à 60° avec la verticale (d'où le nom de cône de soulèvement).



$$20^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$$

On s'aperçoit alors de la nécessité des fondations bétonnées à pleine fouille et du prolongement en sous œuvre de la dalle de fondation pour obtenir un redau (qui est un véritable encastrement).

La tenue à l'arrachement est alors nettement améliorée.



Les types de fondations utilisés par SONELGAZ tiennent compte de la nature du sol (résistance à la compression en bar/cm^2) et du type de pylône utilisé.

Bibliographie

A. MAUDUIT : " Installations électriques à haute et basse tension "

Ch. AVRIL : " Constructions des lignes aériennes à haute tension "

