

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ALGER

12/82

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE ET D'ELECTROTECHNIQUE

FILIERE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE

lea

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكينة  
**PROJET DE FIN D'ETUDES**  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

SUJET :

ETUDE D'UNE LIGNE HAUTE TENSION  
CALCUL PAR ORDINATEUR DES TENISONS  
MECANIQUES DES CONDUCTEURS

PROPOSE PAR :

A. HAFFAF

Chef de Service, Réseau Haute Tension de la SONELGAZ

REALISE PAR :

M.A. HADID

H. HAMANI

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكينة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

PROMOTION JANVIER 1982

## R E M E R C I E M E N T S .

Nous tenons à remercier notre promoteur M. A. HAFFAF pour ses conseils et son aide précieuse et à exprimer notre profonde reconnaissance à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions également notre ami HAMID pour l'aide qu'il nous a apportée en Informatique ainsi que le personnel de Service - Réseau haute tension de la SONELGAZ .

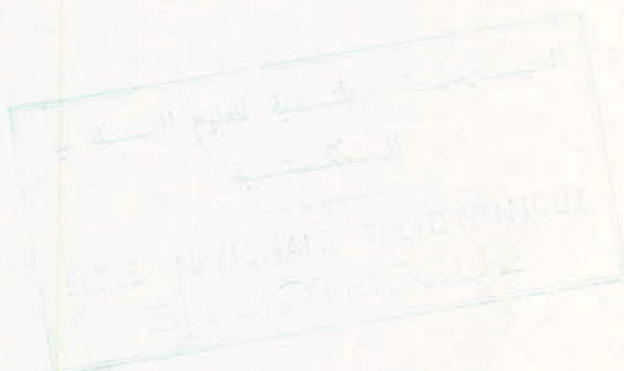
D E D I C A C E S .

A la mémoire de ma mère  
A mon père  
A mon frère et à toute ma famille

Abderahmane

A la mémoire de mon père  
A ma mère  
A mes soeurs Saliha et Zahra  
A mon frère Bachir, à sa femme et ses enfants  
A mon cousin Amokrane et sa famille  
A ma future femme et toute sa famille  
A tous mes amis en particulier le Docteur Ouzani Madjid

Hocine





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

Notre projet consiste en l'étude d'une ligne 220 Kv devant permettre l'évacuation d'une partie de la puissance produite à partir de la centrale à turbines à gaz de M'SILA sur BISKRA ,destinée à alimenter la wilaya de BISKRA d'une part et la future usine de câbles de SONEEEEC d'autre part. Le point de <sup>de départ</sup> la ligne étant le poste de M'SILA ,l'arrivée étant le poste de BISKRA .

La puissance maximale à transiter par cette ligne est de l'ordre de 150 MW .

Notre étude se divise en trois parties. La première partie est relative au choix et définition du tracé .

La deuxième partie est réservée à l'étude mécanique de la ligne .

~~Dan~~ Dans celle-ci nous nous intéresserons plus particulièrement à l'équation de changement d'état ,à son établissement et à sa résolution. Ainsi nous avons réalisé un programme qui permettra le calcul par ordinateur des tensions mécaniques des conducteurs pour les différentes hypothèses d'états définies par le cahier de charge de SONELGAZ et des tensions de pose .

Dans la troisième partie nous ferons l'étude des isolateurs et les calculs électriques. pour différentes valeurs du courant de charge et du facteur de puissance.



1ere **P**ARTIE :

CHOIX ET DEFINITION DU TRACE .

## 1ere P A R T I E

### CHOIX ET DEFINITION DU TRACE

#### 1- ETUDE PREALABLE SUR CARTE :

L'étude du tracé de la ligne est à effectuer avec un grand soin. Les principaux soucis de l'Ingénieur d'études devraient être la facilité d'exécution pour l'entreprise et la facilité de l'exploitation pour le service devant assurer la maintenance et l'entretien. L'étude du tracé se fait sur des cartes d'état major recueillies pour les régions allant de M'SILA à BISKRA. Les cartes utilisées seront à l'échelle 1/50.000<sup>e</sup> et éventuellement si elles existent au 1/25.000<sup>e</sup>. Ces cartes nous permettent de situer les différents obstacles à éviter (agglomérations,...), le relief du terrain (massifs, vallées, cours d'eau..) et les routes et pistes qui nous permettront d'accéder à ce tracé. Le tracé auquel pensera l'Ingénieur d'études est la ligne droite. Celle-ci n'est généralement pas retenue. Ainsi on établit plusieurs variantes de tracés sur cartes. Pour compléter cette étude préalable on procède à une reconnaissance sur site. Celle-ci permettra le choix définitif du tracé qui devrait être autant que possible:

- économique (présentant le moins d'angles possible)
- facile à exécuter et à exploiter (à proximité des routes et pistes).

Parallèlement à cette recherche du tracé définitif une prise de contact avec les responsables des différents services publics est établie pour connaître :

- la consistance actuelle de leurs ouvrages existants ou projetés.
- leur premières observations de principe sur la présence d'une ligne à haute tension dans la zone du tracé choisi.
- éventuellement leur expérience propre sur la zone traversée (glissements de terrains, givre, pollution...)

#### 2- ETUDE TOPOGRAPHIQUE

Le tracé définitif choisi est matérialisé sur le terrain par le topographe chargé du relevé auquel il est remis le tracé sur carte. Celui-ci procède d'abord à un balisage sommaire (ou provisoire) qui

consiste une vérification et complémentation du tracé, puis à un balisage définitif. Le topographe établit son levé topographique avec son équipe et son matériel, qui consiste à relever la forme du terrain suivant l'axe de la ligne projetée.

### 3 - PROFIL EN LONG :

Une fois tous les éléments topographiques rassemblés le levé du terrain est reporté sur un profil en long aux échelles suivantes:

-en longueur 1/2000<sup>e</sup>

-en hauteur 1/500<sup>e</sup>

Ce profil en long est un document très important car il permet de situer l'ouvrage en fonction de la nature du terrain. Au bas du profil, une bande planimétrique de 50 mètres de part et d'autre de l'axe de la ligne est relevée. Tous les obstacles se trouvant à moins de 50 mètres de l'axe de la ligne sont signalés sur cette bande.

Les noms des propriétaires des terrains traversés, les noms des communes traversées et la nature du terrain sont signalés sur le profil. L'altitude des obstacles rencontrés (lignes électriques, lignes téléphoniques, maisons...) est précisée à leurs endroits.

Ce profil en long est remis au bureau d'études qui se charge de faire l'étude de répartition des pylônes de la manière économique en respectant les normes et impositions techniques.





VALEURS DES PORTEES ET DENIVELLATIONS DE LA LIGNE .

- Canton N° 1 : 405-471-494-462-483-473,6-
- Canton N° 2 : 269-333-339-331-
- Canton N° 3 : 325-347-472-347-600-530,5-
- Canton N° 4 : 494-509-451-482-480-463-514-470-440-395-469-388-499,1-
- Canton N° 5 : 426-121-163-432-462-413-430-425-436-496-478-491-491-480-  
-483-456-
- Canton N° 6 : 446-465-452-480-483-479-462,2-422-447-485-447-479-459-  
-453-454-421,7-
- Canton N° 7 : 457-462-464-415-491-479-499-535-505-498-498-513-482-527-  
-550-484-479-485-496-464,1-
- Canton N° 8 : 446-443-463-482-510-439-425-374,6-464-443-399-488-487-571,5
- Canton N° 9 : 569-476-425-468-470-478-435-471-477-479-465-461-426-434-  
-421-424-
- Canton N° 10 : 445-510-483-477-476-477-477-436-464-486-477-476-470-476-  
-485-485-476,7-
- Canton N° 11 : 4434-480-498-478-480-495-485-481-4834468-4966 492-492-  
-468-469-477-480-490-478-449,4-
- Canton N° 12 : 466-486-484-484-485-480-476-490-487-476-479-479-490-457-
- Canton N° 13 : 450-462-481-476-478-486-494-446-494-460-516-437-
- Canton N° 14 : 398-383-416-420-420-415-423-420-427-424,8-
- Canton N° 15 : 466-425-425-406-457-451-425-454-476-479-455-423-425-424-  
-432-405-402-424-416,2-
- Canton N° 16 : 423-410-423-463-466-486-492-469-453-428-420-418-416-410-  
-419-425-421-417-431-426,7-
- Canton N° 17 : 413-458-498-429-413-414-414-410-413-440-487-435-437-675,3
- Canton N° 18 : 668(56)-420(6,5)-408(17)-440(48)-493(76,5)-
- Canton N° 19 : 686(176,7)-
- Canton N° 20 : 437(7)-472(13)-467-422(7)-410(1)-418-400-395-416(1)-  
-411(1,5)-420(2,5)-501(16,5)- 319(25)-
- Canton N° 21 : 249(14)-188(21)-
- Canton N° 22 : 430(41,5)-430(6,5)-432(27)-558(18)-390,3(10)-
- Canton N° 23 : 414(3)-401(3)-486(1,5)-473(4,5)-462(8)-402(10,5)-382-  
-437(7)-315(4,5)-246,7(2,5)-

Canton N° 24 : 408(5)-371,7(1,5)-  
Canton N° 25 : 463(18)-329(8,5)-375,5(0,5)-  
Canton N° 26 : 423(1,5)-374(15,5)-373(9)-397(2,5)-404,7(39,14)-  
Canton N° 27: 443,3(8,27)-288(3,5)-339(17,5)-321(6)-378(15)-313(4,5)-  
-321(5,5)-399(21,5)-526,3(11,5)-220(6,5)-334(23)-410(3)-362(5)-  
-436(1,5)-389(10,5)-579(69)-427(5)-205,9(12,5)-  
Canton N° 28 : 539(92)-  
Canton N° 29 : 423(22,5)-355(4)-428(12)-482(5)-466-474(3)-453(4)-450-  
-459(6)-423(3,5)-428(1,5)-426(2)-429(2,5)-434(4)-402,8(2)-  
Canton N° 30 : 461-448-452-443-417-450-461-429-450-483-484-427-427-415  
Canton N° 31 : 421,8-422-428-418-418-425-425-427-423-423-424-438-480,4  
-247,3-

Ces valeurs sont relevées dans le dossier de construction de la ligne  
M<sup>1</sup> SILA-BISKRA.

Les valeurs mises entre parenthèses correspondent aux dénivellations  
quand celles-ci ne sont pas nulles.

2eme  ARTIE :

ETUDE MECANIQUE .



## Chapitre 1 : GENERALITES .

### 1- SUPPORTS :

#### 1 -1 Rôle des supports :

Leur rôle est de maintenir les conducteurs à une hauteur suffisante au-dessus du sol compte tenu de leurs flèches. La hauteur minimum admise ( appelée garde au sol ) est de 7 mètres pour les lignes à 220 Kv .

#### 1-2 - Classification des supports :

Les supports (ou pylônes ) sont classés d'après :

- la disposition de leur armement (triangle, drapeau, double drapeau, nappe horizontale, nappe voûte, ...)
- le type de fondation (monopode ou monobloc, bipode, tetrapode) .
- leur aptitude à résister aux efforts longitudinaux (souple, semi-rigide, rigide).

#### 1- 3- Types de pylônes :

##### a)- Pylônes d'alignement (type A ) :

Ils sont utilisés dans le cas des portées adjacentes dans le prolongement l'une de l'autre. Pratiquement ils ne supportent que les efforts \* verticaux (poids des conducteurs).

##### b)- Pylônes d'angle (type B ) :

On les utilise pour les angles inférieurs à  $20^{\circ}$  .

L'effort transversal existe dans ce cas et il est d'autant plus important que l'angle est grand. Ils sont plus rigides que les pylônes d'alignement .

##### c)- Pylônes d'ancrage (type C) :

Ils sont utilisés pour les arrêts et les angles supérieurs à  $20^{\circ}$  et de même pour les alignements assez longs (limiter les cantons).

Ils sont conçus de façon à résister à la tension mécanique de tous les conducteurs. Ils ont un rôle important lors de la construction de la ligne .

#### 1- 4 - Efforts transmis aux pylônes par les conducteurs :

##### a)- Cas des supports d'alignement :

Ceux ci sont soumis aux charges verticales dues au poids propre des

conducteurs et éventuellement au poids du givre, aux charges horizontales dues à l'action du vent et aux efforts longitudinaux qui résultent des différences des tensions entre portées adjacentes de longueurs inégales.

b)- Cas des supports d'angle et d'arrêt :

Ils doivent supporter des efforts permanents importants : les charges verticales, les charges horizontales transversales et longitudinales ainsi que les efforts qui leur sont appliqués au cours du montage des conducteurs.

## 2- ECARTEMENT DES CONDUCTEURS :

L'écartement des conducteurs doit tenir compte de la tension et des mouvements des conducteurs (balancement, vibration, ...) qui dépendent de la température, des surcharges éventuelles et de la poussée du vent. Ceci est dans le but d'assurer l'isolement des conducteurs entre eux et par rapport à la masse.

Pour calculer l'écartement minimum on applique la formule suivante:

$$e \geq k \sqrt{f + l} + U/150$$

e = écartement

k = coefficient dépendant de la nature du conducteur

f = flèche maximale

l = longueur de la chaîne d'isolateur

U = tension composée en Kv .

$l = n.p$       n: nombre d'isolateurs et p : pas d'isolateur

$l = 16 \cdot 0,146 = 2,336 \text{ m}$       soit environ 2,5m (voir chp isolateurs)

$f_{\max} = 28,44 \text{ m}$  (voir résultats des tensions de pose )

K = 0,75 pour l'aluminium acier

U = 1,05  $U_n = 231 \text{ Kv}$

Soit un écartement minimal de 5,7 m

La SONEGAS adopte un écartement de 7 m pour les lignes de 220 Kv.



### 3 - HYPOTHESES D'ETUDE :

#### 1- Caractéristiques du conducteur:

Le conducteur utilisé pour cette ligne est un câble mixte en Aluminium-Acier de  $411\text{mm}^2$  de section .

- composition: 32 brins Al de 3,6 mm de diamètre  
19 brins d'acier de 2,4 mm " "
- section d'acier:  $86\text{mm}^2$
- section d'aluminium :  $325\text{mm}^2$
- diamètre extérieure : 26,4 mm
- poids linéique : 1,593 kg/m
- poids spécifique :  $3,88 \cdot 10^{-3}\text{ kg/m}\cdot\text{mm}^2$
- résistance électrique à  $20^\circ\text{C}$  :  $0,089\ \Omega/\text{km}$
- charge de rupture minimale : 16500 kg
- coefficient de dilatation linéaire :  $17,6 \cdot 10^{-6}$
- module de YOUNG :  $8300\text{ kg/mm}^2$

#### 2- Calcul des coefficients de surcharge:

##### 2-1 Hypothèses d'état:

En Algérie on utilise les hypothèses suivantes:

- $30^\circ\text{C}$  E.D.S (every day strass ): c'est la tension de tous les jours.  
*- hypothèse d'été*
- avec vent :  $30^\circ\text{C}$  , 48 cpz
- hypothèse normale d'hiver :  $-5^\circ\text{C}$  , 18 cpz .
- hypothèses givre :  $-5^\circ\text{C}$  , 72 cpz , 2 ou 4 ou 6kg de givre.

##### 2-2 Calcul de la force du vent pour un mètre de conducteur:

$$V = P \times d \times 1\text{m} \quad P = \text{pression du vent en cpz} \quad 1\text{cpz} = 1,02\text{kg/m}^2$$
$$d = \text{diamètre du conducteur en m}$$

$$\text{Pour : } 48 \text{ cpz : } V = 1,02 \times 48 \times 0,0264 = 1,292 \text{ kg/m}$$

$$18 \text{ cpz : } V = 1,02 \times 18 \times 0,0264 = 0,484 \text{ kg/m}$$

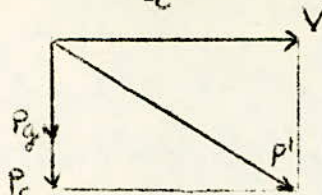
$$72 \text{ cpz : } V = 1,02 \times 72 \times 0,0264 = 1,938 \text{ kg/m}$$

##### 2-3 Calcul du coefficient de surcharge:

Les surcharges qui s'exercent sur le conducteur sont dues au vent , au givre ...



$$m = \frac{\sqrt{(P_c + P_g)^2 + V^2}}{P_c}$$



$P_c$  = poids propre du conducteur

$P_g$  = " du givre

$V$  = effort du vent

a) Hypothèse d'été avec vent:

$$m = \frac{\sqrt{1,593^2 + 1,292^2}}{1,593} = 1,287$$

b) Hypothèse normale d'hiver:

$$m = \frac{\sqrt{1,593^2 + 0,484^2}}{1,593} = 1,044$$

c) Hypothèse givre : - 5° C , 72 cpz , 2 kg de givre

$$m = \frac{\sqrt{(1,593 + 2)^2 + 1,938^2}}{1,593} = 2,562$$

Les hypothèses 4 et 6 kg de givre sont à exclure pour le cas de cette ligne.

tensions

### 3- CALCUL DES MAXIMUMS ADMISSIBLES:

a) Hypothèses normales (coefficient de sécurité = 3 )

-tension totale :  $T = 16500/3 = 5500 \text{ Kg}$

-tension unitaire:  $t = 5500/411 = 13,38 \text{ Kg/mm}^2$

b) Hypothèse givre (coefficient de sécurité = 1,75 )

$T = 16500/1,75 = 9429 \text{ Kg}$

$t = 9429/411 = 22,94 \text{ Kg/mm}^2$

c) Hypothèse E.D.S (coefficient de sécurité = 5 )

$T = 16500/5 = 3300 \text{ Kg}$

$t = 3300/411 = 8,03 \text{ Kg/mm}^2$

Chapitre 2 :  
EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT .

1- Définition:

L'équation de changement d'état permet de calculer la tension d'un conducteur dans une hypothèse quelconque en partant de la tension connue du même conducteur dans une hypothèse bien déterminée.

2- RAPPELS :

2-1- Forme de la courbe d'équilibre d'un fil suspendu:

La courbe d'équilibre d'un fil pesant, homogène, inextensible et flexible suspendu entre deux points fixes est une chaînette. Comme les conducteurs des lignes électriques sont extensibles et souvent hétérogènes (aluminium-acier, almelec-acier...), la forme de leur courbe d'équilibre n'est pas une chaînette ; cependant elle lui est très voisine.

Pour des raisons de commodité de calcul on assimile cette courbe à une parabole qui est obtenue en conservant seulement les deux premiers termes du développement en série de l'équation de la chaînette.

-Equation de la chaînette:

$$y = P \operatorname{ch} \frac{x}{P} \quad (1)$$

$$P = \frac{T}{p}$$

$p$  = poids linéique du conducteur

$T$  = projection horizontale de la tension du conducteur

$P$  = paramètre du conducteur

-Développement en série de (1):

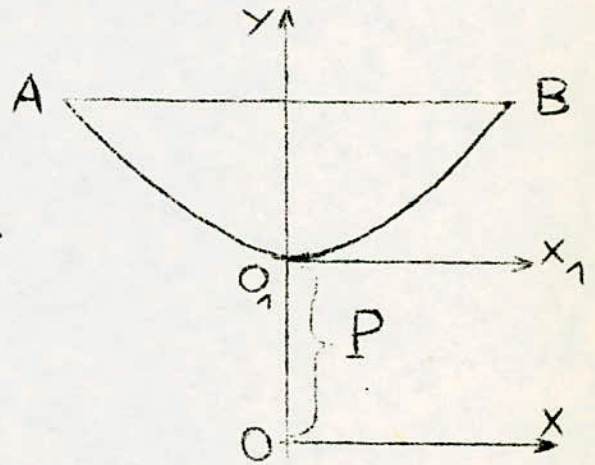
$$\operatorname{ch} z = 1 + \frac{1}{2} z^2 + (1/24) z^4 + \dots$$

$$y = P \operatorname{ch} (x/p) = P ( 1 + x^2/2P^2 + x^4/24P^4 + \dots )$$

$$y = P + x^2/2P + \dots$$

⚡ Dans le repère  $(x_1 \text{ o}_1 y)$  l'équation (1) devient:

$$y = \frac{x_1^2}{2P} \quad (2) \quad \text{c'est l'équation de la parabole.}$$



2- 2- Longueur d'arc :

L'arc de la chaîne s'obtient en intégrant l'élément différentiel de longueur d'arc ds :

$$ds = \sqrt{1 + y'^2} dx \quad ; \quad y' = \text{sh}(x/P)$$

$$ds = \sqrt{1 + \text{sh}^2(x/P)} dx = \sqrt{\text{ch}^2(x/P)} dx$$

$$s = 2 \int_0^{a/2} \text{ch}(x/P) dx = 2P \text{sh}(a/2P)$$

a: portée du conducteur entre les appuis A et B

Faisons le développement en série du sinus hyperbolique :

$$\text{sh}(a/2P) = a/2P + a^3/48P^3 + a^5/3840P^5 + \dots$$

d'où :  $s = a + a^3/24P^2 + a^5/1920P^4 + \dots$

On retient les deux premiers termes, soit:  $s = a + a^3/24P^2$  (3)

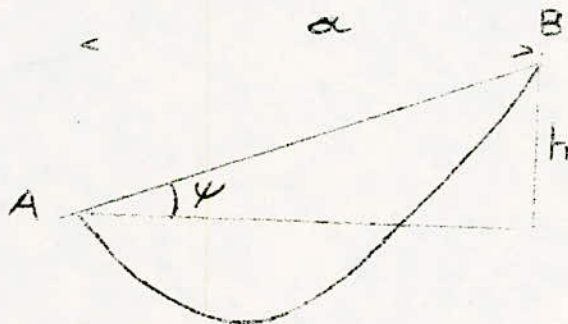
L'erreur commise en négligeant le troisième terme est très faible même pour les grandes portées.

\*\*Dans le cas où les deux points d'appui sont ~~de~~ à des niveaux différents

l'équation (3) devient :  $s = a + a^3/24P^2 + h^2/2a$  (3')

h: dénivellation.

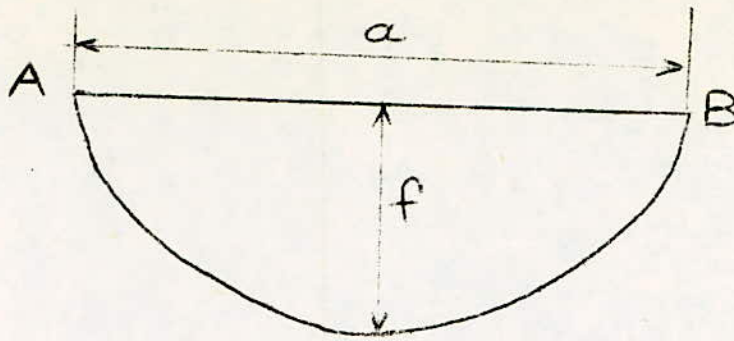
(voir Charles Avril)



2- 3- Formules de la flèche :

La flèche mesure la distance verticale entre le point le plus bas de la courbe et la droite joignant les points d'attache des conducteurs.





$$y = x^2/2P$$

Au milieu de la portée  $x = a/2 \rightarrow$   $f = a^2/8P$  (4)

En partant de l'équation  $y = P \operatorname{ch}(x/P)$  on obtient:

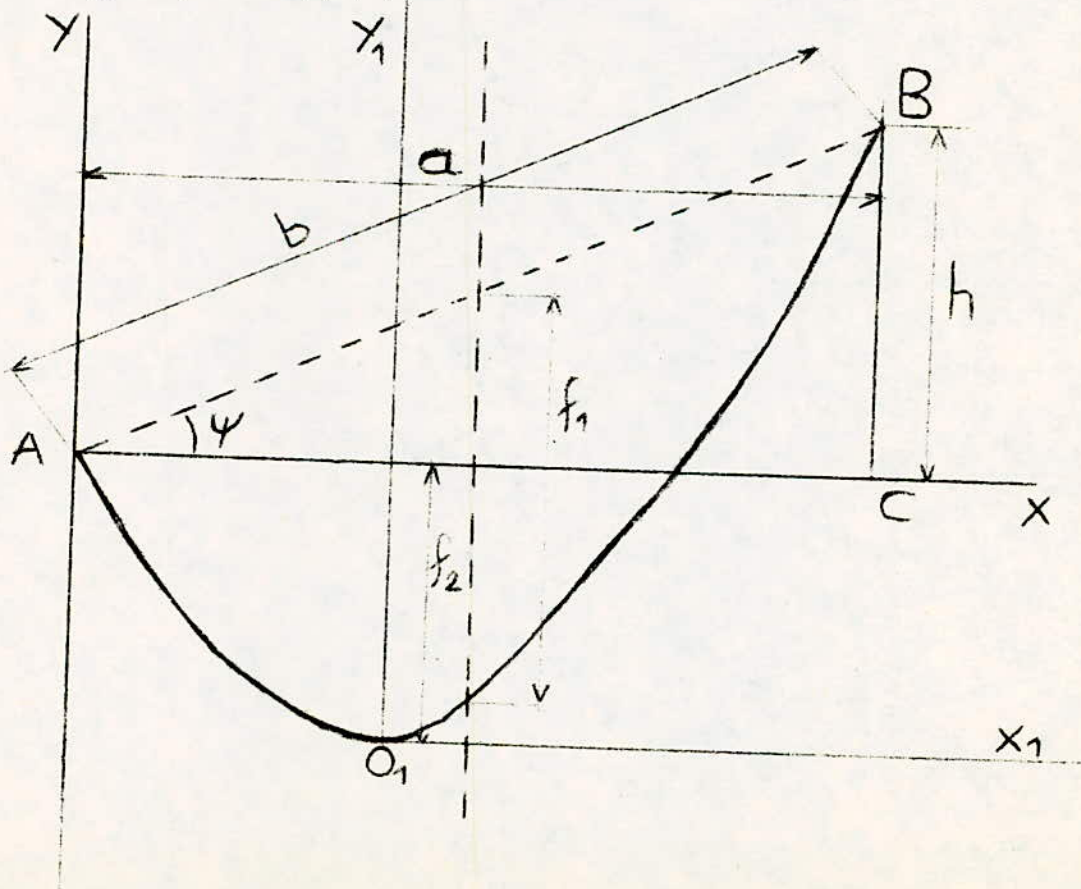
$f = a^2/8P (1 + a^2/48P^2)$

\*\* Cas de dénivellation :

$$f_1 = a^2/8P \quad \text{ou} \quad f_1 = (a^2/8P)(1 + a^2/48P^2)$$

$$f_2 = (1/2P) (\frac{1}{2}a - Ph/a)^2$$

$$f_2 = f_1 (1 - h/4f_1)^2$$



Pour avoir une meilleure approximation des flèches  $f_1$  et  $f_2$ , on applique le poids linéique  $p$  du câble à la distance réelle "b" entre les appuis A et B.

$$AB = b = a / \cos \psi \quad \text{avec} \quad \psi = \arctg (h/a)$$

$Pb = Pa / \cos \psi$  : poids du câble sur l'ensemble de la portée AB .

Le poids linéique du câble rapporté à la portée horizontale AC devient :  $p / \cos \psi$ . Donc le paramètre  $P$  est remplacé par  $P \cos \psi$  ( $P = T/p$ ).

Les formules de  $f_1$  et  $f_2$  deviennent alors :

$$f_1 = a^2 / 8P \cos \psi = ab / 8P \quad \text{ou} \quad f_1 = (ab / 8P) (1 + b^2 / 48P^2)$$

$$\text{et } f_2 = ab / 8P + Ph^2 / 2ab - h/2$$

Mais on a toujours :  $f_2 = f_1 (1 - h / 4f_1)^2$

### 3 - ETABLISSEMENT DE L'EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT :

#### -Caractéristiques du conducteur :

##### • Nature

|   |          |
|---|----------|
| -section totale .....                             | S        |
| -section d'aluminium (ou d'almelec) .....         | S1       |
| -section d'acier .....                            | S2       |
| -diamètre .....                                   | d        |
| -coefficient d'élasticité (Module de YOUNG) ..... | E        |
| - " de dilatation linéaire .....                  | $\alpha$ |
| -poids linéique .....                             | P        |

#### -Hypothèse de base (état 1) :

|  |            |
|--|------------|
| -la température du conducteur .....                | $\theta_1$ |
| -coefficient de surchage .....                     | $m_1$      |
| -projection horizontale de la tension totale ..... | T1         |
| -la portée .....                                   | a          |

#### -Autres hypothèses (état 2) :

|  |            |
|--|------------|
| -la température du conducteur .....          | $\theta_2$ |
| -coefficient de surchage .....               | $m_2$      |
| -la tension du conducteur (à calculer) ..... | T2         |



La différence de longueur d'arc  $s_2 - s_1$  entre l'état (2) et l'état (1) correspond à la somme algébrique :

-de l'allongement élastique :  $s_1 (T_2 - T_1) / ES$   
 -et de l'allongement thermique :  $s_1 \alpha (\theta_2 - \theta_1)$

$$s_2 - s_1 = s_1 (T_2 - T_1) / ES + s_1 \alpha (\theta_2 - \theta_1) \quad P_2 = T_2 / m_2 p$$

$$s_2 - s_1 = a + a^3 / 24P_2^2 - (a + a^3 / 24P_1^2)$$

$$s_2 - s_1 = a^3 / 24P_2^2 - a^3 / 24P_1^2 = a^3 m_2^2 p^2 / 24T_2^2 - a^3 m_1^2 p^2 / 24T_1^2$$

$$a^3 m_2^2 p^2 / 24T_2^2 - a^3 m_1^2 p^2 / 24T_1^2 = s_1 (T_2 - T_1) / ES + s_1 \alpha (\theta_2 - \theta_1) \quad (1)$$

Divisons (1) par  $s_1$  et faisons l'approximation  $a/s_1 = 1$  nous obtenons :

$$a^3 m_2^2 p^2 / 24T_2^2 - a^3 m_1^2 p^2 / 24T_1^2 = (T_2 - T_1) / ES + \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

$$\alpha (\theta_2 - \theta_1) = \left( a^3 m_2^2 p^2 / 24T_2^2 - T_2 / ES \right) - \left( a^3 m_1^2 p^2 / 24T_1^2 - T_1 / ES \right) \quad (2)$$

Multiplications les deux membres de l'équation (2) par  $EST_2^2$  :

$$\alpha (\theta_2 - \theta_1) EST_2^2 = \left( a^3 m_2^2 p^2 ES / 24 - T_2^3 \right) - \left( a^3 m_1^2 p^2 EST_2^2 / 24T_1^2 - T_1 T_2^2 \right)$$

$$\alpha (\theta_2 - \theta_1) EST_2^2 + a^3 m_1^2 p^2 EST_2^2 / 24T_1^2 - T_1 T_2^2 + T_2^3 = a^3 m_2^2 p^2 ES / 24$$

$$T_2^2 \left( T_2 + a^3 m_1^2 p^2 ES / 24T_1^2 + ES \alpha (\theta_2 - \theta_1) - T_1 \right) = a^3 m_2^2 p^2 ES / 24 \quad (3)$$

Cette équation est de la forme :  $T_2^2 (T_2 + A) = B$

Avec  $A = a^3 m_1^2 p^2 ES / 24T_1^2 + ES \alpha (\theta_2 - \theta_1) - T_1$

et  $B = a^3 m_2^2 p^2 ES / 24$

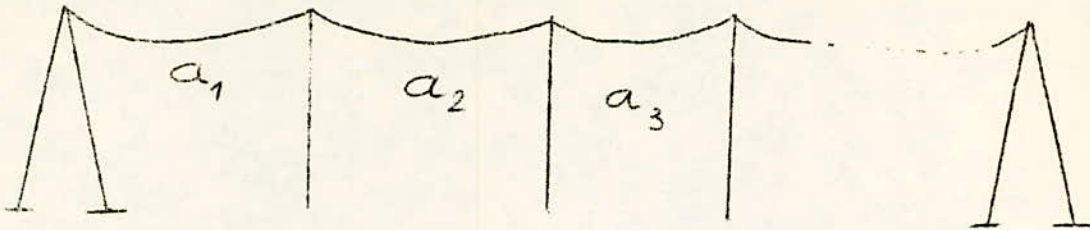
La résolution de cette équation peut se faire par approximation successive. (voir chapitre 4).

#### 4- GENERALISATION DE L'EQUATION DE CHANGEMENT D'ETAT :

En général dans les lignes on rencontre une suite d'alignements de portées, situés chacun entre deux pylônes d'ancrage. Chaque portée se trouve donc soumise à ses extrémités aux actions réciproques des portées qui lui sont adjacentes.



4- 1-Cas des portées de niveau:



On considère:  $\sum a^3 = a_1^3 + a_2^3 + \dots + a_n^3$   
 $\sum a = a_1 + a_2 + \dots + a_n$

On prend les mêmes hypothèses que précédemment;

La différence de longueur du câble entre l'état (2) et l'état (1) est égale à la somme algébrique de l'allongement élastique et l'allongement thermique.

$$\left(\frac{m_2 p^2}{24 T_2^2}\right) \sum a^3 - \left(\frac{m_1 p^2}{24 T_1^2}\right) \sum a^3 = \sum a (T_2 - T_1) / ES - \sum a \alpha (\theta_2 - \theta_1) \quad (4)$$

On passe aux allongements relatifs et on divise par  $\sum a$  l'expression (4)

$$\left(\frac{m_2 p^2}{24 T_2^2}\right) \frac{\sum a^3}{\sum a} - \left(\frac{m_1 p^2}{24 T_1^2}\right) \frac{\sum a^3}{\sum a} = (T_2 - T_1) / ES - \alpha (\theta_2 - \theta_1)$$

On pose:  $l^2 = \frac{\sum a^3}{\sum a}$  et on obtient l'équation:

$$\alpha (\theta_2 - \theta_1) = \left(\frac{m_2 p^2}{24 T_2^2} - \frac{T_2}{ES}\right) - \left(\frac{m_1 p^2}{24 T_1^2} - \frac{T_1}{ES}\right) \quad (5)$$

L'équation (5) ressemble exactement à l'équation (2) du paragraphe précédent dans laquelle la portée (a) a été remplacée par la portée fictive  $l = \sqrt{\frac{\sum a^3}{\sum a}}$

Elle nous montre que la section de ligne  $a_1, a_2, \dots, a_n$  se comporte comme une portée simple de longueur l du point de vue du changement d'état.

L'équation (5) devient alors:

$$\frac{T_2^2}{2} \left( \frac{T_2}{2} + \frac{m_2 p^2}{1} \frac{ES}{24 T_1^2} + ES \alpha (\theta_2 - \theta_1) - T_1 \right) = \frac{m_2 p^2}{2} \frac{ES}{24} \quad (6)$$

4- 2-Cas des portées dénivellées :

L'équation devient :

$$\frac{T_2^2}{2} \left( \mu \frac{T_2}{2} + \frac{m_2 p^2}{1} \frac{ES}{24 T_1^2} + ES \alpha (\theta_2 - \theta_1) - \mu T_1 \right) = \frac{m_2 p^2}{2} \frac{ES}{24} \quad (7)$$

Avec :  $l = \sqrt{\sum a^3 \cos(\psi) / \sum a}$  : portée moyenne

$\mu = \sum [a (1 + h^2 / 2a^2)] / \sum a$  : facteur d'inclinaison moyen

$\psi = \arctg(h/a)$  h: dénivellation

4-3 Autre écriture de l'équation de changement d'état :

$P = T/p$  P: paramètre

$p =$  poids linéaire =  $w s$

$T =$  tension totale

$T = t \times S$  S : section totale du conducteur

t: tension unitaire

$P = (t \times S) / p = t/w$  w: poids spécifique du conducteur

a) Cas des portées de niveau:

$$T_2^2 \left( T_2 + m_1 l_1^2 p \frac{E S}{24 T_1^2} + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - T_1 \right) = m_2^2 p l_2^2 \frac{E S}{24} \quad (8)$$

Divisons l'équation (8) par "S":

$$\begin{aligned} T_2^2 \left( T_2/S + m_1 l_1^2 p E / 24 T_1^2 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - T_1/S \right) &= m_2^2 l_2^2 p E / 24 \\ T_2^2 \left( t_2 + m_1 l_1^2 p E / 24 T_1^2 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - t_1 \right) &= m_2^2 l_2^2 p E / 24 \\ T_2^2 \left( t_2 + m_1 l_1^2 E w s / 24 T_1^2 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - t_1 \right) &= m_2^2 l_2^2 E w s / 24 \\ (T_2^2 / S^2) \left( t_2 + m_1 l_1^2 E w / 24 (T_1^2 / S) + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - t_1 \right) &= m_2^2 l_2^2 E w / 24 \\ \boxed{t_2 \left( t_2 + m_1 l_1^2 E w / 24 t_1 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - t_1 \right) = m_2^2 l_2^2 E w / 24} & \quad (9) \end{aligned}$$

b) Cas des portées dénivellées:

On obtient l'équation:

$$\boxed{t_2 \left( \mu t_2 + w l_1^2 E / 24 t_1 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - \mu t_1 \right) = w l_2^2 E / 24} \quad (10)$$



### Chapitre 3 : REGLAGE DES CABLES (Tensions de pose ).

C'est l'opération qui consiste à donner aux conducteurs dans chacune des portées du canton une tension horizontale convenable . Cette tension dépend de la température au moment du réglage. Pour assurer les différentes tensions on procède à des mesures de flèches ce qui est plus facile.

A l'aide de l'équation de changement d'état on calcule d'abord la tension dans chaque canton en utilisant la portée moyenne correspondante, et ceci pour différentes valeurs de la température ( $\theta_2 = -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50$  ). Dans ce calcul les effets du vent et du givre sont considérés nuls.

Comme on a admis que cette tension est la même dans toutes les portées du canton, ceci permet de calculer la flèche dans chaque portée aux températures considérées.

Dans la pratique, on découpe les grands cantons en plusieurs sections élémentaires de 1000 à 2000m chacune que l'on règle l'une après l'autre . Ce découpage doit être fait de manière à associer des portées de longueurs analogues. Les grandes portées doivent être réglées séparément. Dans le cas de cette ligne on subdivise les 31 cantons en 82 sous-cantons (voir résultats du programme page ).

#### Remarque:

La température de réglage étant celle du câble, elle dépend:

- de la température ambiante
- du rayonnement thermique solaire direct
- du rayonnement du sol.

Elle est donc variable en fonction de la distance au sol de l'altitude, du temps ,... Cela rend son appréciation délicate.

Ainsi pour avoir une température de réglage correcte on utilise un thermomètre coincé à l'intérieur d'un morceau de conducteur évidé de son âme d'acier que l'on accroche à un pylône à une hauteur de 15 m environ.

Pour une température comprise entre deux de celles déjà mentionnées , on interpole .



Chapitre 4 : RESOLUTION DE L'EQUATION DE  
CHANGEMENT D'ETAT .

I- INTRODUCTION :

Pour résoudre cette équation, on utilise la méthode de Newton-Raphson .  
Le théorème de Newton-Raphson montre que la suite définie par la relation de récurrence  $x_{n+1} = x_n - F(x_n)/F'(x_n)$  converge vers la racine de  $F(x) = 0$  si les conditions suivantes sont vérifiées:

- sur l'intervalle  $[a, b]$  considéré il existe une seule racine
- la dérivée ne s'annule pas sur  $[a, b]$
- la dérivée seconde est continue sur  $[a, b]$

Dans le cas de l'équation de changement d'état ces conditions sont vérifiées à l'intérieur de l'intervalle  $[0, 2T_{max}]$  avec  $T_{max}$  = charge de rupture maximale unitaire.

L'équation à résoudre est:

$$t_2^2 (\mu t_2 + m_1^2 w^2 l^2 E / 24 t_1^2 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - \mu t_1) = m_2^2 w^2 l^2 E / 24 \quad (10)$$

L'équation (10) est de la forme:  $F(x) = \mu x^3 + Ax^2 - B = 0$

$$A = m_1^2 l^2 w^2 E / 24 t_1^2 + E \alpha (\theta_2 - \theta_1) - \mu t_1$$

$$B = m_2^2 w^2 l^2 E / 24$$

Avant de résoudre cette équation il est nécessaire de calculer d'abord  $l$  et  $\mu$  ( $l$  étant la portée moyenne et  $\mu$  le coefficient de dénivellation moyen).

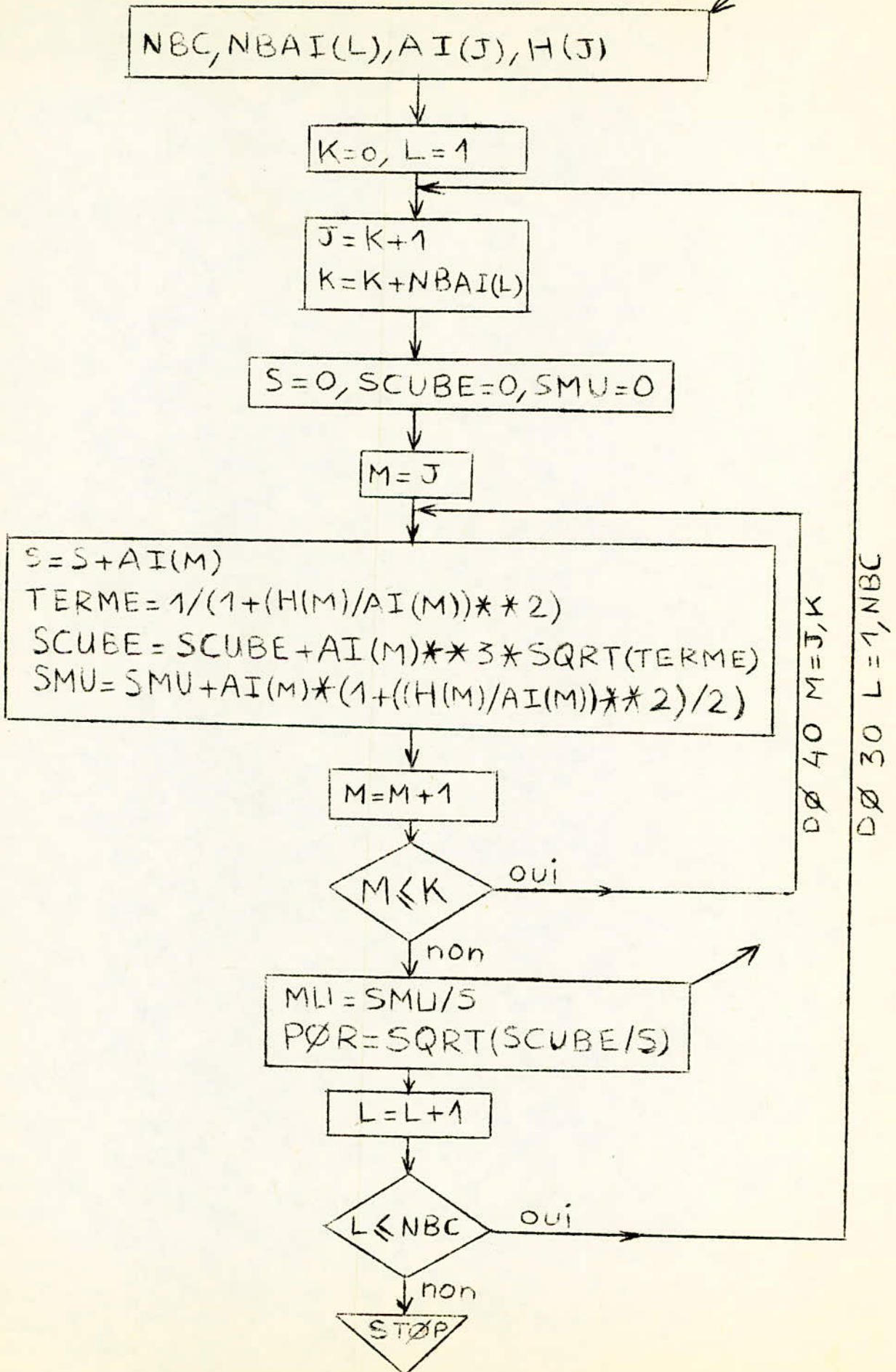
Le programme que nous avons conçu permet d'effectuer le calcul de la portée moyenne et du coefficient  $\mu$ , de résoudre l'équation de changement d'état (trouver la valeur de la tension) et de calculer les flèches dans le cas des tensions de pose.

On part des données principales suivantes:

- portées (AI) et dénivellations (H)
- nombre de portées par canton (NBAI)
- hypothèse d'état (M1, M2, TETA1, TETA2)
- caractéristiques de conducteur ( $w, E, \alpha, T_{max}$ )

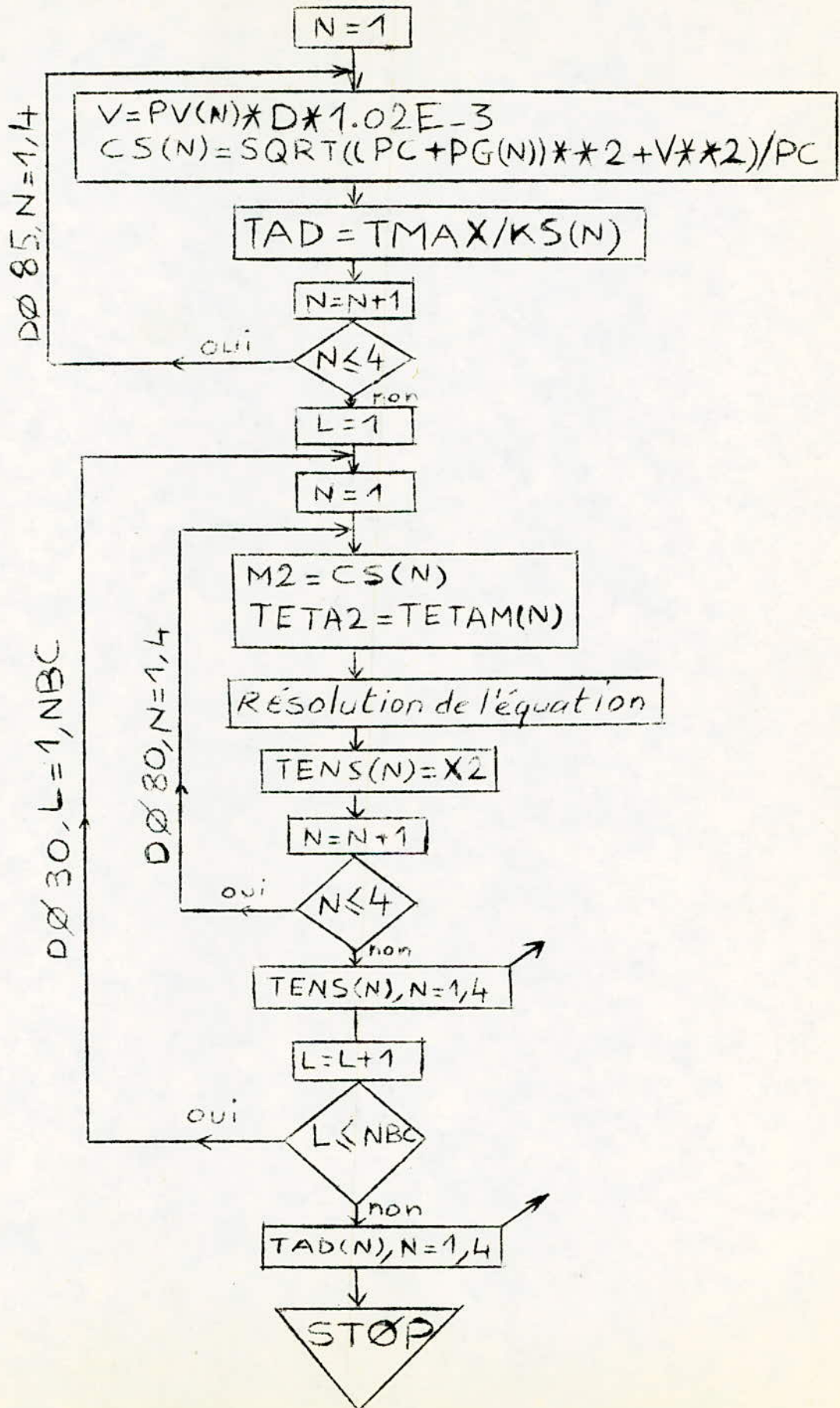
De même il calcule le coefficient de surcharge  $M2$  et la tension admissible  $T_{ad}$  pour les différentes hypothèses climatiques.



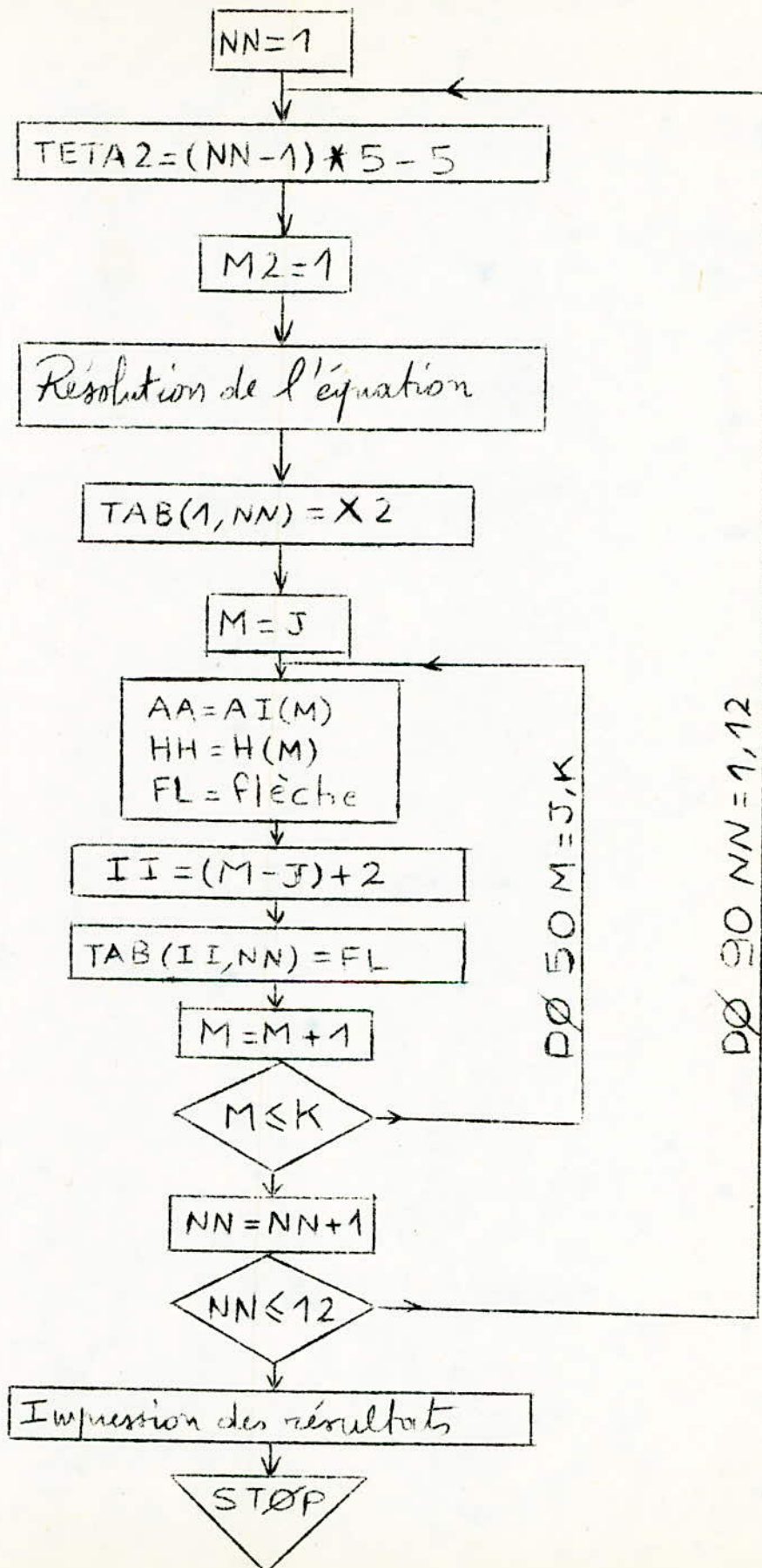




## 2.3-ORGANIGRAMME DES TENSIONS DES ETATS



2 - 4 - ORGANIGRAMME DES TENSIONS ET FLECHES DE POSE.



### 3 - NOTATIONS UTILISEES DANS CE PROGRAMME .

- MOD : indicateur
- NBP : nombre totale de portées de la ligne
- NBC : nombre de cantons (ou de sous cantons)
- ~~nba~~ NBAI(J) : nombre de portées dans le canton J
- AI(J) : valeur de la portée J en m
- H(J) : dénivellation correspondante à la portée J en m
- P(L) : paramètre du canton L en m
- TETAM(J) : température pour les différents états 1
- ~~MU~~(J) : coefficient de surcharge de l'état 2 pour l'hypothèse J
- MU : coefficient de dénivellation moyen
- POR : portée moyenne
- FONC : équation de changement d'état
- DEFONC : dérivée de FONC
- XX : précision du calcul de la racine (tension )
- BB : distance entre les points d'appui ( $b = a / \cos \gamma$  )
- FL : flèche
- PV : pression du vent en cpz
- PG : poids du givre en Kg
- KS : coefficient de sécurité
- SEC : section du conducteur en mm<sup>2</sup>
- D : diamètre du conducteur en mm
- V : force du vent en Kg/m
- PC : poids linéique du conducteur en Kg/m
- Tmax : charge de rupture en Kg
- TAD : tension maximale admissible en Kg/mm<sup>2</sup>
- CS = M2



```

*****
*
* CE PROGRAMME CALCULE : LES TENSIONS AUX DIFFE-
* RENTES HYPOTHESES D'ETATS OU LES TENSIONS DE
* POSES SUIVANT LES VALEURS DE MOD :
*
*   MOD=10 CALCUL DES TENSIONS D'ETATS.
*
*   MOD=20 CALCUL DES TENSIONS DE POSES ET LES
*
*           FLECHES CORRESPONDANTES.
*
*****
* CE PROGRAMME A ETE REALISE PAR :
*
*   HADID ABDERAHMANE ET HAMANI HOCINE ...
*
*****

```

```

REAL MU,M1,M2,KS
DIMENSION AI(1000),H(1000),NBAI(300),P(300)
DIMENSION TETAM(4)
DIMENSION PV(4),KS(4),TAD(4),PG(4)
DIMENSION CS(4)
DIMENSION TENS(4)
DIMENSION TAB(7,12)

```

```

LECTURE DES DONNEES (MOD,NBC,NBP,NBAI,P...).

```

```

READ(105,106) MOD
READ(105,101) NBC,NBP
READ(105,606)(NBAI(I),I=1,NBC)
READ(105,602)(P(I),I=1,NBC)

```

```

IF(MOD.EQ.20)GO TO 71

```

```

READ(105,104) TETAM
READ(105,610)PV
READ(105,611)KS
READ(105,612)PG

```

```

71 READ(105,100) OMEGA,E,ALPHA,M1,TETA1,TMAX
READ(105,613)SEC,D
READ(105,604)(AI(I),I=1,NBP)
READ(105,605)(H(I),I=1,NBP)

```

```

136 C
15C TMAX=TMAX/SEC
15C C
162 IF(MOD.EQ.20) GO TO 87
162 C
172 PC=OMEGA*SEC
178 DO 85 N=1,4
178 C
178 C CALCUL DES TENSIONS MAXIMALES ADMISSIBLES
178 C
17C TAD(N)=TMAX/KS(N)
17C C
17C C CALCUL DE LA FORCE DU VENT
17C C
196 V=PV(N)*D*1.02E-3
196 C
196 C CALCUL DU COEF DE SURCHARGE
196 C
A6 CS(N)=SQRT((PC+PG(N))**2+V**2)/PC
D6 85 CONTINUE
DE 87 CONTINUE
DE K=0
DE C
DE C SI MOD=20 CALCUL DES TENSIONS DE POSE.
DE C SINON CALCUL DES TENSIONS POUR LES HYPOTHESES D'ETATS
DE C
E2 IF(MOD.EQ.20)GO TO70
F2 WRITE(108,247)
FC WRITE(108,202)
06 GO TO 66
08 70 WRITE(108,157)
08 C
08 C CALCUL DES TENSIONS ET DES PORTEES MOYENNES POUR
08 C TOUS LES CANTONS.
08 C
12 66 DO 30 L=1,NBC
12 C
12 C J INDICE DE LA PREMIERE PORTEE DU CANTON
12 C
6 J=K+1
6 C
6 C K INDICE DE LA DERNIERE PORTEE DU CANTON.
6 C
C K=K+NBAI(L)
E S=0.
2 SCUBE=0.
6 SMU=0.
A DO 40 M=J,K
E S=S+AI(M)
0 TERME=1./(1.+(H(M)/AI(M))**2)
4 SCUBE=SCUBE+AI(M)**3*SQRT(TERME)
0 40 SMU=SMU+AI(M)*(1.+(H(M)/AI(M))**2)/2.)

```



90 C  
90 C  
90 C  
90 C  
C4  
CA: CALCUL DE LA PORTEE MOYENNE POR ET DU COEFFICIENT  
D0 DE DENIVELLATION MOYEN MU .  
D6  
E8  
E8 C  
E8 C  
E8 C

MU=SMU/S  
TERME=SCUBE/S  
POR=SQRT(TERME)  
T1=OMEGA\*P(L)  
IF(MOD.EQ.20) GO TO 11

MOD=10 CALCUL DES TENSIONS D'ETATS

DORO N=1,4  
M2=CS(N)  
TETA2=TETA1(N)  
GO TO 110  
RTIE(108,200)L  
RTIE(108,201)POR

MOD=20 CALCUL DES TENSIONS DE POSE

DO 90 NN=1,12

SUITE DONNANT LES TEMPERATURES DE POSE : -5,0,5,  
10,15,20,25,30,35,40,45,50.

TETA2=(NN-1)\*5.-5.

SANS VENT ET SANS GIVRE.

M2=1.

110 CONTINUE

A=(POR\*\*2\*OMEGA\*\*2\*M1\*\*2\*E)/(24\*T1\*\*2)  
A=A+ALPHA\*E\*(TETA2-TETA1)-MU\*T1  
B=(POR\*\*2\*OMEGA\*\*2\*M2\*\*2\*E)/24

I=0

X1=2\*TMAX

RESOLUTION DE L'EQUATION.

1 FUNC=MU\*X1\*\*3+A\*X1\*\*2-B  
DEFONC=3\*MU\*X1\*\*2+2\*A\*X1  
X2=X1-FONC/DEFONC  
I=I+1  
XX=ABS(X2-X1)/X2  
IF(XX.GT.1.0E-6) GO TO 2



```

046C C
046C C SI MOD#20 NE PAS CALCULER LES FLECHES
046C C
0482 IF(MOD.NE.20) GO TO 112
0496 TAB(1,NJ)=X2
04AA DO 50 M=J,K
0480 AA=AI(M)
04C0 HH=H(M)
04D0 BB=AA*SQRT(1.+(HH/AA)**2)
04E6 FL=(AA*BB*OMEGA)/(8*X2)
0500 FL=FL*(1.+(BB**2*OMEGA**2)/(48*X2**2))
053A II=(M-J)+2
0546 TAB(II,NN)=FL
055C 50 CONTINUE
056C GO TO 90
0570 112 CONTINUE
0572 TENS(N)=X2
0584 GO TO 80
0584 C
0584 C SI LE NOMBRE (I) D'ITERATIONS EST INFERIEUR A 100
0584 C METTRE LA VALEUR DE X2 DANS X1 ET CONTINUER LE
0584 C CALCUL.
0586 2 IF(I.LT.100)GO TO 3
0586 C
0586 C SINON PAS DE RACINES EN 100 ITERATIONS.
0586 C
059C WRITE(108,98)
05A6 IF(MOD.EQ.20) GO TO 90
05RE GO TO 80
05C2 3 X1=X2
05C8 GO TO 1
05CA 90 CONTINUE
05CA C
05CA C
05CA C IMPRESSION DU TABLEAU DES TENSIONS DE POSE ET
05CA C DES FLECHES.
05D4 WRITE(108,240)
05E0 WRITE(108,241)(TAB(1,JL),JL=1,12)
05EA DO 62 M=J,K
05E2 IK=M-J+2
05E4 62 WRITE(108,242)(M,(TAB(IK,JL),JL=1,12))
05E6 WRITE(108,243)
05E8 GO TO 30
05F0 80 CONTINUE
05F0 C
05F0 C
05F0 C IMPRESSION DES TENSIONS DES DIFFERENTS ETATS.
05F8 WRITE(108,246)L,POR,P(L),(TENS(N),N=1,4)
0600 30 CONTINUE
0602 WRITE(108,248)
0604 IF(MOD.EQ.20)GO TO67
0606 WRITE(108,250)(TAD(N),N=1,4)
0608 67 WRITE(108,206)
0610 STOP
0612 C
0612 C
0612 C

```



```

0722 C          ***** FORMATS *****
0722 C
0722 C
0724      98 FORMAT(15H PAS DE RACINE. )
0724      100 FORMAT(E8.3,F5.0,E8.3,F2.0,F3.0,F6.0)
0724      101 FORMAT(12,I3)
0724      104 FORMAT(4F3.0)
0724      106 FORMAT(I2)
0724      157 FORMAT(45X,31(1H*)/45X,1H*,29X,1H*/
-45X,1H*, ' TENSIONS ET FLECHES DE POSE ',1H*/
-45X,1H*,29X,1H*,/45X,31(1H*)//)
0724      200 FORMAT(50X,'S O U S C A N T O N :',I2/50X,25(1H-)//)
0724      201 FORMAT(56X,'PORTEE MOYENNE = ',F6.2,/)
0724      202 FORMAT(30X,76(1H*)/30X,1H*,8X,1H*,6(10X,1H*)/30X,1H*,8X,1H*,
-' PORTEE ',1H*,4(10X,1H*),1X,'-5C 72CPZ',1H*/30X,1H*,
-' CANTON ',1H*,10X,1H*,1X,'PARAMETRE',1H*,1X,'30C 48CPZ',1H*,
-1X,'30 E.D.S.',1X,1H*,1X,'-5C 18CPZ',1H*,10X,1H*,/30X,1H*,
-8X,1H*,2X,'MOYENNE',1X,1H*,4(10X,1H*), ' 2KG GIVRE',1H*/30X,
-1H*,8X,1H*,6(10X,1H*)/30X,76(1H*)/30X,1H*,8X,1H*,6(10X,1H*))
0724      206 FORMAT(1H1)
0724      240 FORMAT(4X,123(1H*)/4X,1H*,12X,1H*,12(8X,1H*)/
-4X,1H*,2X,'T E T A',3X,1H*,3X,'-5',3X,1H*,3X,'0',4X,1H*,
-3X,1H5,4X,1H*,3X,2H10,3X,1H*,3X,2H15,3X,1H*,3X,2H20,3X,1H*,3X,
-2H25,3X,1H*,3X,2H30,3X,1H*,3X,2H35,3X,1H*,3X,2H40,3X,1H*,
-3X,2H45,3X,1H*,3X,2H50,3X,1H*/4X,1H*,12X,1H*,12(8X,1H*)/
-4X,123(1H*)/4X,1H*,12X,1H*,12(8X,1H*))
0724      241 FORMAT(4X,1H*,2X,'TENSTON',3X,1H*,12(1X,F6.3,1X,1H*)/4X,1H*,12X,
-1H*,12(8X,1H*))
0724      242 FORMAT(4X,1H*,1X,'FLECHE ',I3,1X,1H*,12(1X,F6.3,1X,1H*)/
-4X,1H*,12X,1H*,12(8X,1H*))
0724      243 FORMAT(4X,123(1H*)//)
0724      246 FORMAT(30X,1H*,2X,I3,3X,1H*,2X,F6.2,2X,1H*,2X,
-F5.0,3X,1H*,4(2X,F6.3,2X,1H*)/30X,1H*,8X,1H*,6(10X,1H*))
0724      247 FORMAT(61X,45(1H*)/61X,1H*,43X,1H*/
-61X,1H*,5X,'TENSTON UNITAIRE POUR L',1H*, 'HYPOTHESE',5X,
-1H*/61X,1H*,43X,1H*)
0724      248 FORMAT(30X,76(1H*))
0724      250 FORMAT(30X,76(1H*)/30X,1H*,30X,1H*,4(10X,1H*)/
-30X,1H*,2X,'TENSTON MAXIMALE ADMISSIBLE',1X,1H*,4(2X,F6.3,2X,1H*)
-30X,1H*,30X,1H*,4(10X,1H*)/30X,76(1H*))
0724      602 FORMAT(16F5.0)
0724      604 FORMAT(13F6.3)
0724      605 FORMAT(13F6.2)
0724      606 FORMAT(40I2)
0724      610 FORMAT(4T2)
0724      611 FORMAT(4F4.2)
0724      612 FORMAT(4I1)
0724      613 FORMAT(F5.1,F4.1)
0724 C
0724      END

```



TENSION UNITAIRE POUR L'HYPOTHESE

| CANTON                      | PORTEE MOYENNE | PARAMETRE | 300 48CP7 | 30 E.O.S | -50 18CP7 | -50 72CP7 | 2KG CIVRE |
|-----------------------------|----------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 1                           | 467.21         | 1800.     | 9.141     | 7.394    | 8.581     | 17.128    |           |
| 2                           | 321.67         | 1600.     | 8.254     | 6.800    | 8.469     | 15.320    |           |
| 3                           | 473.62         | 1800.     | 9.138     | 7.384    | 8.545     | 17.143    |           |
| 4                           | 470.17         | 1800.     | 9.140     | 7.389    | 8.564     | 17.135    |           |
| 5                           | 457.76         | 1800.     | 9.147     | 7.410    | 8.635     | 17.106    |           |
| 6                           | 459.58         | 1800.     | 9.146     | 7.407    | 8.624     | 17.111    |           |
| 7                           | 491.77         | 1800.     | 9.128     | 7.357    | 8.453     | 17.182    |           |
| 8                           | 465.22         | 1800.     | 9.142     | 7.397    | 8.502     | 17.124    |           |
| 9                           | 465.36         | 1800.     | 9.142     | 7.397    | 8.501     | 17.124    |           |
| 10                          | 475.83         | 1800.     | 9.137     | 7.380    | 8.534     | 17.148    |           |
| 11                          | 478.47         | 1800.     | 9.135     | 7.376    | 8.520     | 17.153    |           |
| 12                          | 480.17         | 1800.     | 9.134     | 7.374    | 8.511     | 17.157    |           |
| 13                          | 474.88         | 1800.     | 9.137     | 7.382    | 8.539     | 17.145    |           |
| 14                          | 415.28         | 1800.     | 9.174     | 7.492    | 8.925     | 16.997    |           |
| 15                          | 437.10         | 1800.     | 9.159     | 7.447    | 8.766     | 17.055    |           |
| 16                          | 438.25         | 1800.     | 9.158     | 7.445    | 8.758     | 17.058    |           |
| 17                          | 467.67         | 1700.     | 8.637     | 6.946    | 7.982     | 16.361    |           |
| 18                          | 514.13         | 1600.     | 8.107     | 6.454    | 7.276     | 15.597    |           |
| 19                          | 675.07         | 1300.     | 6.541     | 5.123    | 5.500     | 12.912    |           |
| 20                          | 428.29         | 1700.     | 8.661     | 7.009    | 8.199     | 16.288    |           |
| 21                          | 224.46         | 1400.     | 7.398     | 6.227    | 8.516     | 13.706    |           |
| 22                          | 459.10         | 1700.     | 8.641     | 6.958    | 8.024     | 16.343    |           |
| 23                          | 412.85         | 1700.     | 8.668     | 7.026    | 8.260     | 16.270    |           |
| 24                          | 391.11         | 1700.     | 8.689     | 7.084    | 8.465     | 16.209    |           |
| 25                          | 400.99         | 1550.     | 7.917     | 6.377    | 7.437     | 15.072    |           |
| 26                          | 395.48         | 1600.     | 8.177     | 6.614    | 7.786     | 15.457    |           |
| 27                          | 404.53         | 1600.     | 8.170     | 6.597    | 7.726     | 15.472    |           |
| 28                          | 535.14         | 1300.     | 6.570     | 5.169    | 5.641     | 12.923    |           |
| 29                          | 438.60         | 1800.     | 9.158     | 7.444    | 8.756     | 17.059    |           |
| 30                          | 447.70         | 1800.     | 9.153     | 7.427    | 8.697     | 17.082    |           |
| 31                          | 423.45         | 1800.     | 9.168     | 7.475    | 8.863     | 17.019    |           |
| TENSION MAXIMALE ADMISSIBLE |                |           | 13.382    | 8.029    | 13.382    | 22.941    |           |



S O U S C A N T O N : 9

PORTEE MOYENNE = 436.43

| *****    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|
| T E T A  | * -5     | * 0      | * 5      | * 10     | * 15     | * 20     | * 25     | * 30     | * 35     | * |
| *****    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |
| TENSTION | * 8.479  | * 8.312  | * 8.151  | * 7.998  | * 7.852  | * 7.711  | * 7.577  | * 7.449  | * 7.329  | * |
| LECHE 30 | * 10.388 | * 10.598 | * 10.807 | * 11.014 | * 11.220 | * 11.425 | * 11.627 | * 11.829 | * 12.028 | * |
| LECHE 31 | * 10.145 | * 10.351 | * 10.555 | * 10.757 | * 10.958 | * 11.158 | * 11.356 | * 11.552 | * 11.747 | * |
| LECHE 32 | * 12.273 | * 12.521 | * 12.768 | * 13.013 | * 13.256 | * 13.498 | * 13.737 | * 13.975 | * 14.211 | * |
| LECHE 33 | * 10.683 | * 10.899 | * 11.114 | * 11.327 | * 11.539 | * 11.749 | * 11.958 | * 12.164 | * 12.370 | * |
| *****    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |

S O U S C A N T O N : 10

PORTEE MOYENNE = 433.65

| *****    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|
| T E T A  | * -5     | * 0      | * 5      | * 10     | * 15     | * 20     | * 25     | * 30     | * 35     | * |
| *****    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |
| TENSTION | * 8.499  | * 8.329  | * 8.166  | * 8.011  | * 7.862  | * 7.720  | * 7.584  | * 7.454  | * 7.329  | * |
| LECHE 34 | * 12.191 | * 12.441 | * 12.689 | * 12.936 | * 13.181 | * 13.424 | * 13.665 | * 13.905 | * 14.142 | * |
| LECHE 35 | * 9.740  | * 9.940  | * 10.138 | * 10.335 | * 10.531 | * 10.725 | * 10.918 | * 11.109 | * 11.298 | * |
| LECHE 36 | * 10.560 | * 10.776 | * 10.991 | * 11.204 | * 11.416 | * 11.627 | * 11.836 | * 12.043 | * 12.249 | * |
| LECHE 37 | * 10.315 | * 10.527 | * 10.737 | * 10.945 | * 11.152 | * 11.358 | * 11.562 | * 11.764 | * 11.965 | * |
| *****    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |   |

## CONCLUSION

Ce programme permet d'avoir ~~par conséquent~~ les résultats voulus avec une bonne précision ~~et~~ en un temps très court. Il permet aussi d'é-  
-tendre le calcul des tensions de pose et des flèches à toutes les portées.

Dans le cas de la ligne M'SILA-BISKRA les tensions obtenues aux dif-  
-férentes hypothèses d'état sont acceptables car elles sont toutes inférieures aux tensions maximales admissibles.

Les résultats obtenus pour les tensions de pose pourront être utilisés directement au montage des câbles.

Dans ce document nous avons reproduit que quelques exemplaires à cause du grand nombre de pages que cela nécessite.

3<sup>eme</sup> **P**ARTIE :

ETUDE ELECTRIQUE .



## Chapitre 1: LES ISOLATEURS.

### 1-ROLE DES ISOLATEURS:

Les isolateurs sont destinés à fixer les conducteurs sur leurs supports et isoler électriquement la ligne de ceux-ci.

### 2-TYPES D'ISOLATEURS:

On distingue deux types: -isolateurs rigides  
- " " suspendus

#### 2-1 Isolateurs rigides:

Ils sont destinés à des lignes à basse et moyenne tension (jusqu'à 50 kV). Le corps de cet isolateur comporte une double ou une triple cloche qui sert à allonger les lignes de fuite conducteur-tige support. C'est l'humidité déposée par le brouillard qui nécessite une telle forme. Alors que la protection contre la pluie s'obtient à l'aide d'une seule cloche.

#### 2-2 Isolateurs suspendus:

Au delà de 50 kV on utilise un autre type qui permet un assemblage de plusieurs éléments, ce qui constitue une chaîne d'isolateurs suspendus au pylône et portant le conducteur à sa partie inférieure. Le nombre d'éléments varie en fonction de la tension de la ligne.

Il existe trois types d'isolateurs destinés à former des chaînes:

- à capot et tige
- fût plein
- long fût

#### \*Avantages des isolateurs à capot et tige:

- Plus légers
- Plus économiques à l'achat et lors des remplacements en cas de dommage
- Pour une même tension une chaîne d'isolateurs à capot et tige est moins longue qu'une chaîne d'isolateurs à long fût.

#### \*Avantages des isolateurs à long fût:

- Imperforables électriquement
- Ont une meilleure répartition du potentiel le long de la chaîne.





- Charge d'essai mécanique de 24h
- Charge de destruction dans l'essai électromécanique de courte durée.
- Charge de rupture par contrainte mécanique.
- Tension de perforation à fréquence industrielle.

\*Les caractéristiques des chaînes d'isolateurs sont les trois premières caractéristiques d'un élément séparé citées ci-dessus.

La tension de contournement varie en fonction de :

- Nature de la contrainte électrique appliquée (constante, alt.,...)
- Conditions atmosphériques et climatiques (température, densité de l'air, ionisation de l'air...)
- Etat de surface (humide, pollué...)

## 5- POLLUTION:

### 5-1- Introduction:

En service les isolateurs se salissent par des dépôts de toute nature. Cela diminue leurs qualités diélectriques, par conséquent la tension d'amorçage baisse.

### 5-2- Types de pollutions: a) Pollution naturelle:

Elle est due aux sels marins dans les zones côtières et au sable dans les régions désertiques. En présence d'humidité ou de brouillard ces dépôts peuvent provoquer la formation d'arcs électriques.

### b) Pollution industrielle:

Ce problème n'est actuellement pas important en Algérie, mais il faut en tenir compte pour les réalisations futures en raison du développement industriel rapide du pays. Car les agents polluants les plus importants sont les résidus des industries chimiques....

### 5-3- Remèdes:

Pour remédier à l'effet de pollution on adopte plusieurs solutions:

- On donne des formes appropriées aux isolateurs ce qui augmente la ligne de fuite (isolateur antibrouillard) on rend le nettoyage plus facile par le vent (isolateur pour région désertique) ou par la pluie (isolateur à ailette hélicoïdale).
- On applique des produits à la surface (graissage).



-On organise des campagnes de nettoyage .

-.....

Ces deux dernières solutions doivent être renouvelées à chaque fois que cela s'avère nécessaire.

En conclusion il faut noter que jusqu'à présent on n'a pu trouvé de solution idéale à ce problème.

#### 6- CHOIX DES ISOLATEURS:

Le choix doit porter sur le type (à capot et tige, à long fût,....) le matériau isolant ...

Dans les pays possédant déjà un réseau électrique d'une certaine importance ce choix est déjà fixé .En Algérie la SONELGAZ utilise l'isolateur à capot et tige standard et antibrouillard(cas de cette ligne).

D

#### 7-CALCUL DU NOMBRE D'ELEMENTS DE LA CHAINE:

Pour une ligne de fuite spécifique de 3,2cm/kV on obtient une ligne de fuite totale de  $3,2 \times 220 = 704$  cm

L'isolateur a une<sup>1,5</sup> de fuite de 44,5 cm

Le nombre d'éléments serait:  $n = 704:44,5 = 15,82$

Soit 16 éléments par chaîne.

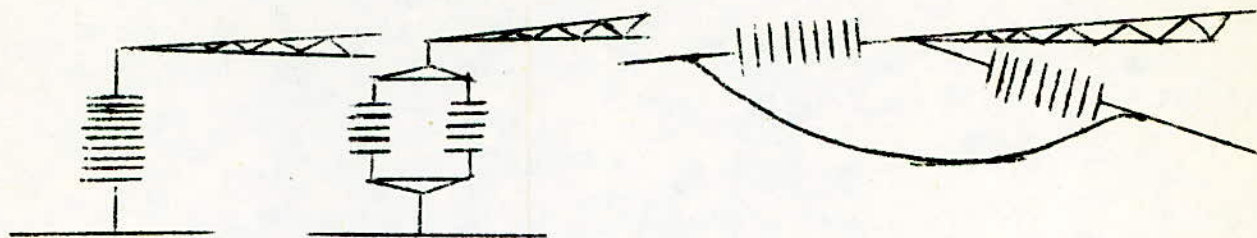
#### Remarque 1 :

Généralement on utilise pour les chaînes d'ancrage un élément de plus que pour les chaînes de suspension. Cela est purement d'ordre mécanique, c'est-à-dire que l'on considère que les chaînes d'ancrage résisteraient mieux ainsi aux efforts de traction des conducteurs. Or les chaînes d'ancrage sont en général horizontales, donc les efforts de traction ne se décomposent pas (tous les éléments supportent la même force), ainsi l'élément supplémentaire devient inutile.

Du point de vue électrique la position de la chaîne d'ancrage (ou d'arrêt) lui permet un lavage plus facile par la pluie ce qui conserve ses propriétés isolantes ; contrairement à la chaîne de suspension (verticale) qui ne peut être lavée uniformément (donc risque de contournement plus grand).

Remarque 2: Les chaînes de suspension sont montées sur les pylônes d'alignement .

Les chaînes d'ancrage et d'arrêt sont montées sur les pylônes d'angles importants et d'arrêt. Dans ce cas on utilise souvent deux chaînes indépendantes chacune dans une portée.



Chaîne de suspension  
simple

Chaîne de suspension  
double

Chaîne d'ancrage





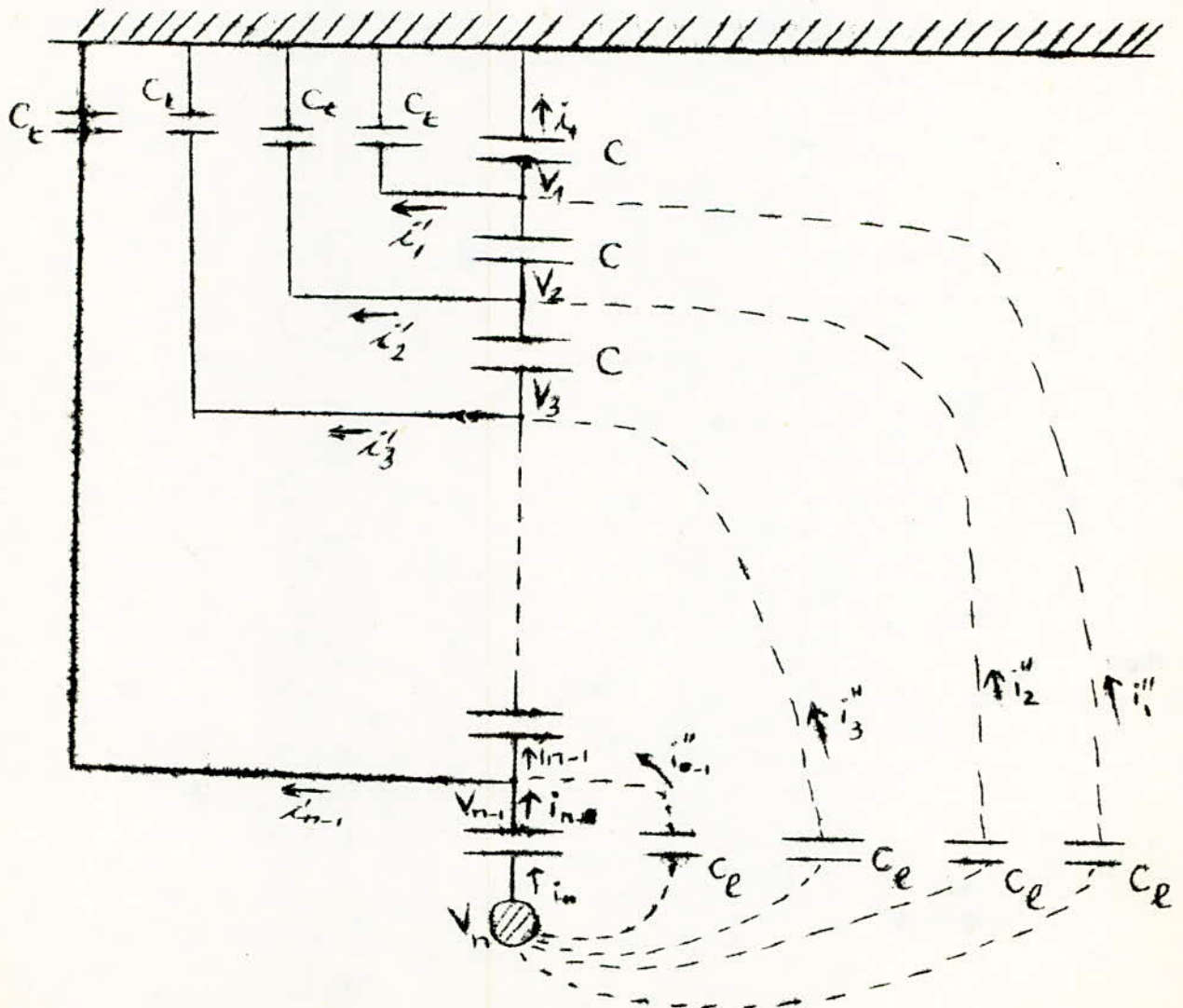


CHAPITRE-2- REPARTITION DU POTENTIEL LE LONG DE LA CHAÎNE.

La répartition du potentiel le long de la chaîne n'est pas uniforme. Ceci est du à la présence de plusieurs capacités:

- Capacité propre de ~~BBB~~ de chaque isolateur  $C$ .
- Capacités des isolateurs par rapport à la terre  $C_t$
- Capacités des isolateurs par rapport à la ligne  $C_l$

Dans le cas de cette ligne:  $C = 50 \cdot 10^{-5} \mu F$   
 $C_t = 7 \cdot 10^{-5} \mu F$   
 $C_l = 4 \cdot 10^{-5} \mu F$



1-Calcul des potentiels  $V_1 \dots \dots V_n$

a) On néglige  $C_1$

$$I_n = i_{n-1} + i'_{n-1}$$

$$jCw(\bar{V}_n - \bar{V}_{n-1}) = jCw(\bar{V}_{n-1} - \bar{V}_{n-2}) + jC_t w \bar{V}_{n-1}$$

$$C(V_n - V_{n-1}) = C(V_{n-1} - V_{n-2}) + C_t V_{n-1}$$

Posons  $\alpha = C_t : C$

$$V_n - V_{n-1} = V_{n-1} - V_{n-2} + \alpha V_{n-1}$$

$$V_n = (2 + \alpha) V_{n-1} - V_{n-2}$$

$$V_p = (2 + \alpha) V_{p-1} - V_{p-2}$$

$$V_2 = (2 + \alpha) V_1$$

$$V_3 = (2 + \alpha) V_2 - V_1$$

⋮

$$V_n = (2 + \alpha) V_{n-1} - V_{n-2}$$

Application numérique: chaîne de 16 isolateurs  $\alpha = 0,14$

$$V_p = (2 + \alpha) V_{p-1} - V_{p-2}$$

$$V_2 = (2 + \alpha) V_1 = 2,14 V_1$$

$$V_3 = 2,14 V_2 - V_1 = 3,58 V_1$$

$$V_4 = 2,14 V_3 - V_2 = 5,52 V_1$$

$$V_5 = 2,14 V_4 - V_3 = 8,23 V_1$$

$$V_6 = 2,14 V_5 - V_4 = 12,09 V_1$$

$$V_7 = 2,14 V_6 - V_5 = 17,65 V_1$$

$$V_8 = 2,14 V_7 - V_6 = 25,68 V_1$$

$$V_9 = 2,14 V_8 - V_7 = 37,31 V_1$$

$$V_{10} = 2,14 V_9 - V_8 = 54,16 V_1$$

$$V_{11} = 2,14 V_{10} - V_9 = 78,60 V_1$$

$$V_{12} = 2,14 V_{11} - V_{10} = 114,04 V_1$$

$$V_{13} = 2,14 V_{12} - V_{11} = 165,45 V_1$$

$$V_{14} = 2,14 V_{13} - V_{12} = 240,02 V_1$$

$$V_{15} = 2,14 V_{14} - V_{13} = 348,20 V_1$$

$$V_{16} = 2,14 V_{15} - V_{14} = 505,15 V_1 = 127 \text{ kV}$$

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

Cette valeur de  $V_1$  nous permet de calculer les potentiels des autres armatures ainsi que la tension de chaque élément ( $U_i = V_i - V_{i-1}$ ).

Tableau des résultats

| N° d'élément | Potentiel d'armature $V_i$ | Tension d'un élément ( kV ) | Tension d'élément % de $V_{16}$ |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1            | 0,25                       | 0,25                        | 0,20                            |
| 2            | 0,54                       | 0,29                        | 0,23                            |
| 3            | 0,90                       | 0,36                        | 0,28                            |
| 4            | 1,38                       | 0,48                        | 0,38                            |
| 5            | 2,05                       | 0,67                        | 0,53                            |
| 6            | 3,02                       | 0,97                        | 0,76                            |
| 7            | 4,41                       | 1,39                        | 1,09                            |
| 8            | 6,42                       | 2,01                        | 1,58                            |
| 9            | 9,33                       | 2,91                        | 2,29                            |
| 10           | 13,54                      | 4,21                        | 3,31                            |
| 11           | 19,65                      | 6,00                        | 4,72                            |
| 12           | 28,51                      | 8,86                        | 7,00                            |
| 13           | 41,36                      | 12,85                       | 10,12                           |
| 14           | 60,00                      | 18,64                       | 14,68                           |
| 15           | 87,05                      | 27,05                       | 21,30                           |
| 16           |                            | 39,95                       | 31,46                           |



b) On tient compte de  $C_1$

$$i_p + i_{P_1}'' = i_{P_1}' + i_{P-1}$$

$$jC\omega(\bar{V}_p - \bar{V}_{P_1}) + (\bar{V}_n - \bar{V}_{P_1})jC_1\omega = jC_t \omega \bar{V}_{P_1} + jC\omega(\bar{V}_{P_2} - \bar{V}_{P_1})$$

$$C(V_p - V_{P_1}) + (V_n - V_{P_1})C_1 = C_t V_{P_1} + C(V_{P_2} - V_{P_1})$$

Posons  $\alpha = C_t : C$  ,  $\beta = C_1 : C$

$$V_p = (2 + \alpha + \beta)V_{P_1} - V_{P_2} - \beta V_n$$

$$V_2 = (2 + \alpha + \beta)V_1 - \beta V_n$$

$$V_3 = (2 + \alpha + \beta)V_2 - V_1 - \beta V_n$$

⋮  
⋮  
⋮

$$V_n = (2 + \alpha + \beta)V_{n-1} - V_{n-2} - \beta V_n$$

Application numérique: chaîne de 16 éléments  $\alpha = 0,14$  ,  $\beta = 0,08$

$$V_2 = 2,22V_1 - 10,16$$

$$V_3 = 2,22V_2 - V_1 - 10,16 = 2,22(2,22V_1 - 10,16) - V_1 - 10,16$$

$$V_4 = 3,93V_3 - 32,71$$

$$V_4 = 2,22V_3 - V_2 - 10,16 = 6,50V_1 - 72,61$$

$$V_5 = 2,22V_4 - V_3 - 10,16 = 10,50V_1 - 138,64$$

$$V_6 = 2,22V_5 - V_4 - 10,16 = 16,81V_1 - 245,33$$

$$V_7 = 2,22V_6 - V_5 - 10,16 = 26,82V_1 - 416,15$$

$$V_8 = 2,22V_7 - V_6 - 10,16 = 42,73V_1 - 688,68$$

$$V_9 = 2,22V_8 - V_7 - 10,16 = 68,04V_1 - 1122,88$$

$$V_{10} = 2,22V_9 - V_8 - 10,16 = 108,32V_1 - 1814,27$$

$$V_{11} = 2,22V_{10} - V_9 - 10,16 = 172,43V_1 - 2914,96$$

$$V_{12} = 2,22V_{11} - V_{10} - 10,16 = 274,47V_1 - 4667,10$$

$$V_{13} = 2,22V_{12} - V_{11} - 10,16 = 436,89V_1 - 7456,16$$

$$V_{14} = 2,22V_{13} - V_{12} - 10,16 = 695,43V_1 - 11895,74$$

$$V_{15} = 2,22V_{14} - V_{13} - 10,16 = 1106,96V_1 - 18962,54$$

$$V_{16} = 2,22V_{15} - V_{14} - 10,16 = 1762V_1 - 30211,26$$

$$V_{16} = 127 \text{ kV} \Rightarrow V_1 = 17,22 \text{ kV}$$

Tableau des résultats

| N° d'élément | Potentiel d'armature ( kV ) | Tension d'élément ( kV ) | Tension d'élément en % $V_{16}$ |
|--------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 1            | 17,22                       | 17,22                    | 13,56                           |
| 2            | 28,07                       | 10,85                    | 8,5                             |
| 3            | 34,96                       | 6,89                     | 5,4                             |
| 4            | 39,32                       | 4,36                     | 3,4                             |
| 5            | 42,17                       | 2,85                     | 2,2                             |
| 6            | 44,14                       | 1,97                     | 1,55                            |
| 7            | 45,70                       | 1,56                     | 1,2                             |
| 8            | 47,13                       | 1,43                     | 1,1                             |
| 9            | <del>51,00</del> 48,77      | 1,64                     | 1,3                             |
| 10           | 51,00                       | 2,23                     | 1,75                            |
| 11           | 54,28                       | 3,28                     | 2,9                             |
| 12           | 59,27                       | 4,99                     | 3,9                             |
| 13           | 67,08                       | 7,81                     | 6,1                             |
| 14           | 79,56                       | 12,48                    | 9,8                             |
| 15           | 99,31                       | 19,75                    | 15,55                           |
| 16           |                             | 27,69                    | 21,8                            |

## 2- Conclusion:

Dans le premier cas (  $C_1$  négligée) l'élément voisin de la ligne est soumis au tiers de la tension totale tandis que le premier isolateur n'est soumis qu'à 0,2 % de celle-ci.



Cela nous montre que la répartition du potentiel n'est pas uniforme. Dans le deuxième (2<sup>ème</sup>) cas où  $C_1 \neq 0$  on trouve 13 % pour le premier élément et 22 % pour le dernier.

La présence de la capacité  $C_1$  réduit l'inégalité de répartition de la ~~tension~~ tension. Celle-ci peut-être améliorée en ajoutant à la chaîne d'isolateurs des anneaux de garde (électrodes) qui augmentent la capacité des ar-matures par rapport à la ligne. Ces anneaux (ou boucliers...) servent aussi à éloigner l'arc électrique de la chaîne, mais abaissent quelque peu la tension d'amorçage de la chaîne.

On constate sur la deuxième courbe un relèvement de la tension des iso-lateurs du côté terre, cependant les isolateurs du milieu de la chaîne ~~restent~~ restent sans utilisés.

#### Remarque:

En supposant une répartition uniforme du potentiel le long de la chaîne le contournement de celle-ci se produit à  $U = 85 \times 16 = 1360$  kV, alors que si l'on admet que le contournement se produit lorsque <sup>l'isolateur</sup> voisin de la li-gne est soumis à 85 kV, la tension correspondante serait  $U' = 85 \cdot 0,22$  soit  $U' = 386$  kV,  $U' = 28$  % de  $U$ .

Avec: +85 kV la tension de contournement à sec de l'élément utilisé  
(voir caractéristiques de l'isolateur U 120 AS antipollution)  
+22 la tension de l'élément 16 en % de  $V_{16}$

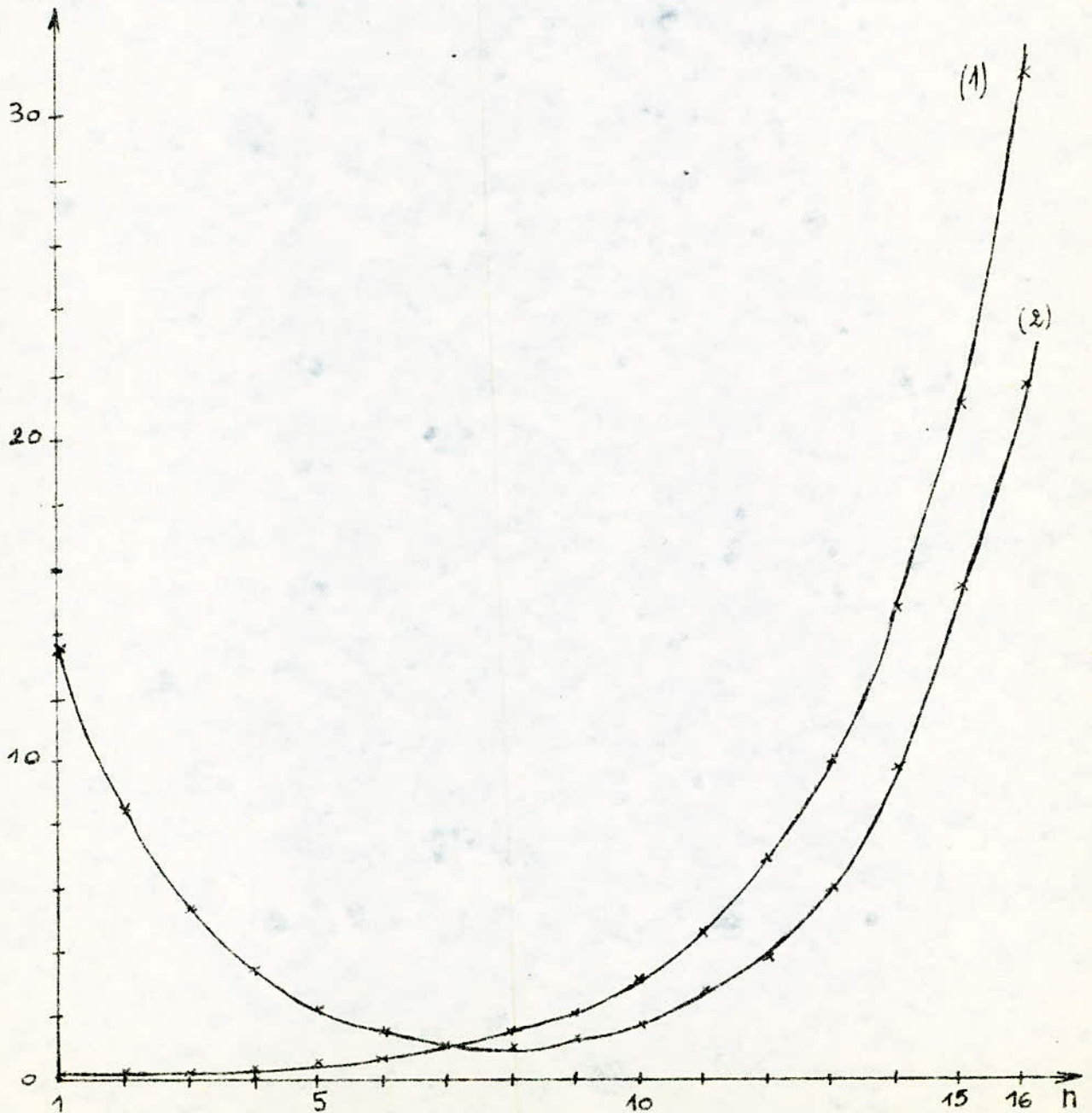
La tension réelle de contournement est légèrement supérieure à  $U'$ , mais reste faible devant  $U(1360$  kV).

Tension d'élément en pourcentage  
de la tension simple de la ligne

(1)  $\rightarrow C_\ell = 0$

(2)  $\rightarrow C_\ell \neq 0$

$U_n$  (% de  $V_{16} = 127 \text{ kV}$ )



CHAPITRE- 3 - CALCULS ELECTRIQUES .

1- CALCUL DES CONSTANTES DE LA LIGNE :

Resistance:  $R_{20^{\circ}\text{C}} = 0,089 \Omega/\text{Km}$

$$\sum a_i = 152,55 \text{ Km}$$

Avec un coefficient de correction  $K = 1,01$  la longueur de la ligne sera :  $l = 152,55 \times 1,01 = 154 \text{ Km}$

$$R_{l,20^{\circ}\text{C}} = 0,089 \times 154 = 13,70 \Omega$$

$$R_{l,70^{\circ}\text{C}} = R_{l,20^{\circ}\text{C}} (1 + \alpha \Delta\theta) = 13,70 (1 + 0,00403 \times 50)$$

$$R_{l,70^{\circ}\text{C}} = 16,46 \Omega$$

Inductance:

$$L = \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \right) \ln(d_{\text{moy}} / 0,779 r) \text{ (H/Km)} \quad (\text{voir Siemens})$$

Avec :  $d_{\text{moy}} = d \times d \times d = 7.7.14 = 8,82 \text{ m}$

$$r = 13,2 \text{ mm}$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

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

Reactance:

$$X'_l = L \cdot \omega = 0,424 \Omega/\text{Km}$$

Reactance totale de la ligne :

$$X_l = X'_l \cdot l = 65,30 \Omega$$

Capacité :

$$C' = 2\pi \epsilon_0 \cdot 1/\ln(d_{\text{moy}}/r) \text{ F/Km} \quad (\text{voir Siemens})$$

Avec:  $r = 13,2 \text{ mm}$  ,  $d_{\text{moy}} = 8,82 \text{ m}$  ,  $\epsilon_0 = 0,886 \cdot 10^{-8} \text{ F/Km}$

d'où :  $C' = 8,56 \cdot 10^{-8} \text{ F/Km}$

Capacité de la totale de la ligne:

$$C = 1,32 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Susceptance:

$$B_l = \omega \cdot C = 4,14 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1}$$

Perdittance :

Siemens donne pour une ligne de 220 Kv dans les conditions normales une perdittance :  $G = 1/40 \cdot 10^6 = 25 \cdot 10^{-9} \Omega^{-1}/\text{Km}$

Soit :

$$G_{\text{th}} = 3,85 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}$$



Impédance:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j X_1$$

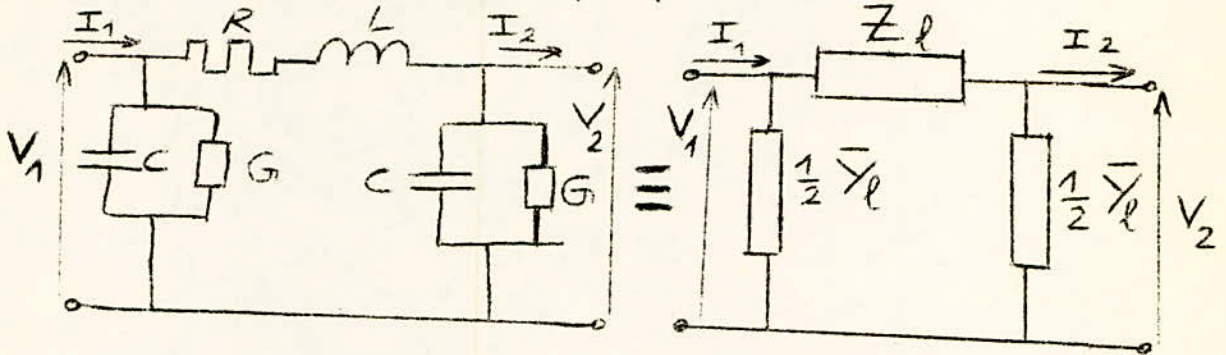
$$\bar{Z}_1 = 16,46 + j 65,30$$

Admittance:

$$\bar{Y}_1 = G_1 + j B_1$$

$G_1$  est négligeable devant  $B_1$ , d'où :  $\bar{Y}_1 = j B_1 = j 4,14 \cdot 10^{-4}$

2 - CALCUL DES GRANDEURS ELECTRIQUES :  $V_1$ ,  $I_1$ , .....



Les relations qui résultent de ce schéma ( $\Pi$ ) sont les suivantes:

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = \bar{V}_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \bar{Z}_l \bar{Y}_l \right) + \bar{Z}_l \bar{I}_2 \\ \bar{I}_1 = \bar{V}_2 \bar{Y}_l \left( 1 + \frac{1}{4} \bar{Z}_l \bar{Y}_l \right) + \left( 1 + \frac{1}{2} \bar{Z}_l \bar{Y}_l \right) \bar{I}_2 \end{cases}$$

On calcule les valeurs de  $I_1$ ,  $V_1$ , à partir des valeurs connues de

$V$ ,  $I$ ,  $P \cos \varphi_1$  :

- calculs préliminaires :

On admet une tension à l'arrivée  $U_2 = U_n - 5\% U_n = 0,95 U_n$

$$U_2 = 0,95 \times 220 = 209 \text{ Kv} \quad \longrightarrow \quad V_2 = 120,66 \text{ Kv}$$

$$\bar{Y}_l \bar{Z}_l = j 4,14 \cdot 10^{-4} ( 16,46 + j 65,30 ) = - 0,0270 + j 0,0068$$

$$1 + \frac{1}{2} \bar{Z}_l \bar{Y}_l = 0,9865 + j 0,0034$$

$$\bar{V}_2 \left( 1 + \frac{1}{2} \bar{Z}_l \bar{Y}_l \right) = 119037 + j 410$$

$$\begin{aligned} \bar{V}_2 \bar{Y}_l \left( 1 + \frac{1}{4} \bar{Z}_l \bar{Y}_l \right) &= 120666 \times j 4,14 \cdot 10^{-4} \left( 1 + (-0,027 + j 0,0068)/4 \right) \\ &= - 0,085 + j 49,62 = j 49,62 \end{aligned}$$

$$\text{d'où : } \bar{I}_1 = j 49,62 + ( 0,9865 + j 0,0034 ) \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = j 49,62 + 0,9865 \bar{I}_2$$

$$\bar{V}_1 = 119037 + j 410 + ( 16,46 + j 65,30 ) \bar{I}_2$$

2- 1 Calculs pour  $\cos \varphi = 0,8$  inductif :

a)  $I_2 = 500 \text{ A}$

$$\bar{I}_2 = 500 (0,8 + j(-0,6)) = 400 - j 300$$

$$\bar{V}_1 = 119037 + j 410 + (16,46 + j 65,30) (400 - j 300)$$

$$\bar{V}_1 = 145211 + j 21592 = 146807 \angle 8,46^\circ$$

Soit  $V_1 = 146,8 \text{ Kv} \longrightarrow U_1 = 254,3 \text{ KV}$

$$\Delta U\% = (254,3 - 209)/220 = 20,6 \%$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= j 49,62 + 0,9865 (400 - j 300) \\ &= 394,6 - j 246,33 = 465,2 \angle -31,9^\circ \end{aligned}$$

$$\varphi_1 = 8,46 + 31,9 = 40,36^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,762 ; \sin \varphi_1 = 0,647$$

$$P_1 = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \times \cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 254,3 \cdot 465,2 \cdot 0,762 = 156,13 \text{ MW}$$

$$P_2 = \sqrt{3} \times U_2 \times I_2 \times \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 209 \cdot 500 \cdot 0,8 = 144,78 \text{ MW}$$

$$\Delta P = 11,35 \text{ MW} ; \eta = 92,7 \%$$

$$Q_1 = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1 \times \sin \varphi_1 = 132,57 \text{ MVAR}$$

$$Q_2 = \sqrt{3} \times U_2 \times I_2 \times \sin \varphi_2 = 108,60 \text{ MVAR}$$

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 23,97 \text{ MVAR}$$

b)  $I_2 = 400 \text{ A}$

$$\bar{I}_2 = 400 (0,8 - j 0,6) = 320 - j 240$$

$$\bar{V}_1 = 139976 + j 17356 = 141048 \angle 7,07^\circ$$

$V_1 = 141 \text{ kv} \longrightarrow U_1 = 244,2 \text{ kv} \quad \Delta U = 16 \%$

$$\bar{I}_1 = 315,7 - j 187,1 = 367 \angle -30,65^\circ$$

$$\varphi_1 = 7,07 + 30,65 = 37,72^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,791 ; \sin \varphi_1 = 0,618$$

$$P_1 = 122,78 \text{ MW} ; P_2 = 115,84 \text{ MW} ; \Delta P = 6,94 \text{ MW} ; \eta = 94,3 \%$$

$$Q_1 = 95,94 \text{ MVAR} ; Q_2 = 86,88 \text{ MVAR} ; \Delta Q = 9,06 \text{ MVAR}$$

c)  $I_2 = 300 \text{ A}$

$$\vec{I}_2 = 300 ( 0,8 - j 0,6 ) = 240,00 - j 180$$

$$\vec{V}_1 = 134741 + j 13119 = 135378 \angle 5,56^\circ$$

$$\vec{V}_1 = 135,4 \text{ kV} \longrightarrow \vec{U}_1 = 234,5 \text{ kV} \quad \Delta U = 11,6 \%$$

$$\vec{I}_1 = 236,76 - j 127,95 = 269 \angle -28,38^\circ$$

$$\varphi_1 = 5,56 + 28,38 = 33,94^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,829 \quad \sin \varphi_1 = 0,558$$

$$P_1 = 90,57 \text{ MW} \quad P_2 = 86,88 \text{ MW} \quad \Delta P = 3,69 \text{ MW} \quad \eta = 95,9 \%$$

$$Q_1 = 60,96 \text{ MVAR} ; Q_2 = 65,16 \text{ MVAR} \quad \Delta Q = -4,2 \text{ MVAR}$$

d)  $I_2 = 200 \text{ A}$

$$\vec{I}_2 = 200 ( 0,8 - j 0,6 ) = 160 - j 120$$

$$\vec{V}_1 = 129506 + j 8883 = 129810 \angle 3,92^\circ$$

$$V_1 = 129,80 \text{ kV} \longrightarrow U_1 = 224,8 \text{ kV} \quad \Delta U = 7,2 \%$$

$$\vec{I}_1 = 157,84 - j 68,76 = 172 \angle -23,54^\circ$$

$$\varphi_1 = 3,92 + 23,54 = 27,46^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,887 \quad \sin \varphi_1 = 0,461$$

$$P_1 = 59,40 \text{ MW} \quad P_2 = 57,92 \text{ MW} \quad \Delta P = 1,48 \text{ MW} \quad \eta = 97,5 \%$$

$$Q_1 = 30,87 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 43,44 \text{ MVAR} \quad \Delta Q = 12,57 \text{ MVAR}$$

Tableau des résultats :

| $I_2 \text{ (A)}$ | $\Delta U \text{ (\% )}$ | $\Delta P \text{ (MW)}$ | $\Delta Q \text{ (MVAR)}$ | $\eta \text{ (\% )}$ | $\cos \varphi_1$ |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|
| 500               | 20,6                     | 11,35                   | 23,97                     | 92,7                 | 0,762            |
| 400               | 16                       | 6,94                    | 9,06                      | 94,3                 | 0,791            |
| 300               | 11,6                     | 3,69                    | - 4,2                     | 95,9                 | 0,829            |
| 200               | 7,2                      | 1,48                    | - 12,57                   | 97,5                 | 0,887            |



2- 2 Calculs pour  $\cos \varphi_2 = 0,9$

a)  $I_2 = 500 \text{ A}$

$$\bar{I}_2 = 500 ( 0,9 - j 0,436 ) = 450 - j 218$$

$$\bar{V}_1 = 140679 + j 26207 = 143099 \angle 10,55^\circ$$

$$V_1 = 143,7 \text{ kV} \quad U_1 = 247,8 \text{ kV} \quad \Delta U = 17,6 \%$$

$$\bar{I}_1 = 443,9 - j 165,44 = 473,7 \angle -20,44^\circ$$

$$\varphi_1 = 10,55 + 20,44 = 30,99^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,857 \quad \sin \varphi_1 = 0,515$$

$$P_1 = 174,24 \text{ MW} \quad P_2 = 162,9 \text{ MW} \quad \Delta P = 11,34 \text{ MW} \quad \eta = 93,5 \%$$

$$Q_1 = 104,7 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 78,91 \text{ MVAR} \quad \Delta Q = 25,79 \text{ MVAR}$$

b)  $I_2 = 400 \text{ A}$

$$\bar{I}_2 = 400 ( 0,9 - j 0,436 ) = 360 - j 174,4$$

$$\bar{V}_1 = 136350 + j 21047 = 137965 \angle 8,77^\circ$$

$$V_1 = 138 \text{ kV} \quad U_1 = 239 \text{ kV} \quad \Delta U = 13,6 \%$$

$$\bar{I}_1 = 355,14 - j 122,42 = 375,6 \angle -19,02^\circ$$

$$\varphi_1 = 8,77 + 19,02 = 27,79^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,884 \quad \sin \varphi_1 = 0,466$$

$$P_1 = 137,45 \text{ MW} \quad P_2 = 130,32 \text{ MW} \quad \Delta P = 7,13 \text{ MW} \quad \eta = 94,8 \%$$

$$Q_1 = 72,45 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 63,13 \text{ MVAR} \quad \Delta Q = 9,32 \text{ MVAR}$$

c)  $I_2 = 300 \text{ A}$

$$\bar{I}_2 = 300 ( 0,9 - j 0,436 ) = 270 - j 130,8$$

$$\bar{V}_1 = 132022 + j 15888 = 132974 \angle 6,86^\circ$$

$$V_1 = 133 \text{ kV} \quad U_1 = 230,3 \text{ kV} \quad \Delta U = 9,7 \%$$

$$\bar{I}_1 = 266,35 - j 79,41 = 277,9 \angle -16,60^\circ$$

$$\varphi_1 = 6,86 + 16,60 = 23,46^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,917 \quad \sin \varphi_1 = 0,398$$

$$P_1 = 101,65 \text{ MW} \quad P_2 = 97,74 \text{ MW} \quad \Delta P = 3,91 \text{ MW} \quad \eta = 96,1 \%$$

$$Q_1 = 44,12 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 47,35 \text{ MVAR} \quad \Delta Q = -3,23 \text{ MVAR}$$

d)  $I_2 = 200 \text{ A}$

$\bar{I}_2 = 200 ( 0,9 - j0,436 ) = 180 - j 87,2$

$\bar{V}_1 = 127694 + j 10729 = 128144 \angle 4,80^\circ$

$V_1 = 128, \text{ kV}$        $U_1 = 221,9 \text{ kV}$        $\Delta U = 5,8 \%$

$\bar{I}_1 = 177,57 - j 36,40 = 181,2 \angle -11,58^\circ$

$\varphi_1 = 4,80 + 11,58 = 16,38^\circ$        $\cos \varphi_1 = 0,959$        $\sin \varphi_2 = 0,282$

$P_1 = 66,78 \text{ MW}$        $P_2 = 65,16 \text{ MW}$        $\Delta P = 1,62 \text{ MW}$        $\eta = 97,5 \%$

$Q_1 = 19,64 \text{ MVAR}$        $Q_2 = 31,56 \text{ MVAR}$        $\Delta Q = -11,92 \text{ MVAR}$

Tableau des résultats:

| $I_2 \text{ (A)}$ | $\Delta U(\%)$ | $\Delta P(\text{MW})$ | $\Delta Q(\text{MVAR})$ | $\eta(\%)$ | $\cos \varphi_1$       |
|-------------------|----------------|-----------------------|-------------------------|------------|------------------------|
| 500               | 17,6           | 11,34                 | 25,79                   | 93,5       | <del>0,884</del> 0,857 |
| 400               | 13,6           | 7,13                  | 9,32                    | 94,8       | 0,884                  |
| 300               | 9,7            | 3,91                  | - 3,23                  | 96,1       | 0,917                  |
| 200               | 5,8            | 1,62                  | - 11,92                 | 97,5       | 0,959                  |

2- 3 Calculs pour  $\cos \varphi_2 = 1$

a)  $I_2 = 600 \text{ A}$

$\bar{V}_1 = 128913 + j 39590 = 134855 \angle 17,07^\circ$

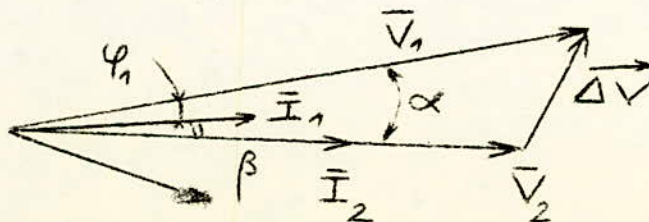
$V_1 = 134,8 \text{ kV}$        $U_1 = 233,5 \text{ kV}$        $\Delta U = 11,1 \%$

$\bar{I}_1 = 591,9 + j 49,62 = ~~42,28~~ = 594 \angle +4,79^\circ$

$\varphi_1 = 17,07 - 4,79 = 12,28^\circ$        $\cos \varphi_1 = 0,977$        $\sin \varphi_1 = 0,212$

$P_1 = 234,7 \text{ MW}$        $P_2 = 217,2 \text{ MW}$        $\Delta P = 17,5 \text{ MW}$        $\eta = 92,5 \%$

$Q_1 = 50,93 \text{ MVAR}$        $Q_2 = 0$        $\Delta Q = 50,93 \text{ MVAR}$



$\varphi_1 = \alpha - \beta$

b)  $I_2 = 500 \text{ A}$

$$\bar{V}_1 = 127267 + j 33060 = 131491 \quad | \quad 14,36^\circ$$

$$V_1 = 131,5 \text{ kV} \quad U_1 = 227,7 \text{ kV} \quad \Delta U = 8,5 \%$$

$$\bar{I}_1 = 493,25 + j 49,62 = 495,7 \quad | \quad + 5,74^\circ$$

$$\varphi_1 = 14,36 - 5,74 = 8,62^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,988 \quad \sin \varphi_1 = 0,150$$

$$P_1 = 193,15 \text{ MW} \quad P_2 = 181 \text{ MW} \quad \Delta P = 12,15 \text{ MW} \quad \eta = 93,7 \%$$

$$Q_1 = 29,32 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 0 \quad \Delta Q = 29,32 \text{ MVAR}$$

c)  $I_2 = 400 \text{ A}$

$$\bar{V}_1 = 125621 + j 26530 = 128392 \quad | \quad 11,9^\circ$$

$$V_1 = 128,4 \text{ kV} \quad U_1 = 222,40 \text{ kV} \quad \Delta U = 6,1 \%$$

$$\bar{I}_1 = 394,6 + j 49,62 = 397,70 \quad | \quad 7,1^\circ$$

$$\varphi_1 = 11,9 - 7,1 = 4,8^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,996 \quad \sin \varphi_1 = 0,084$$

$$P_1 = 152,58 \text{ MW} \quad P_2 = 144,80 \text{ MW} \quad \Delta P = 7,78 \text{ MW} \quad \eta = 94,9 \%$$

$$Q_1 = 12,87 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 0 \quad \Delta Q = 12,87 \text{ MVAR}$$

d)  $I_2 = 300 \text{ A}$

$$\bar{V}_1 = 123975 + j 20000 = 125578 \quad | \quad 9,16^\circ$$

$$V_1 = 125,5 \text{ kV} \quad U_1 = 217,3 \text{ kV} \quad \Delta U = 3,7 \%$$

$$\bar{I}_1 = 295,95 + j 49,62 = 300 \quad | \quad + 9,52^\circ$$

$$\varphi_1 = -9,52 + 9,16 = -0,32^\circ \quad \cos \varphi_1 = 0,999 \quad \sin \varphi_1 = -0,006$$

$$P_1 = 113 \text{ MW} \quad P_2 = 108,60 \text{ MW} \quad \Delta P = 4,4 \text{ MW} \quad \eta = 96,1 \%$$

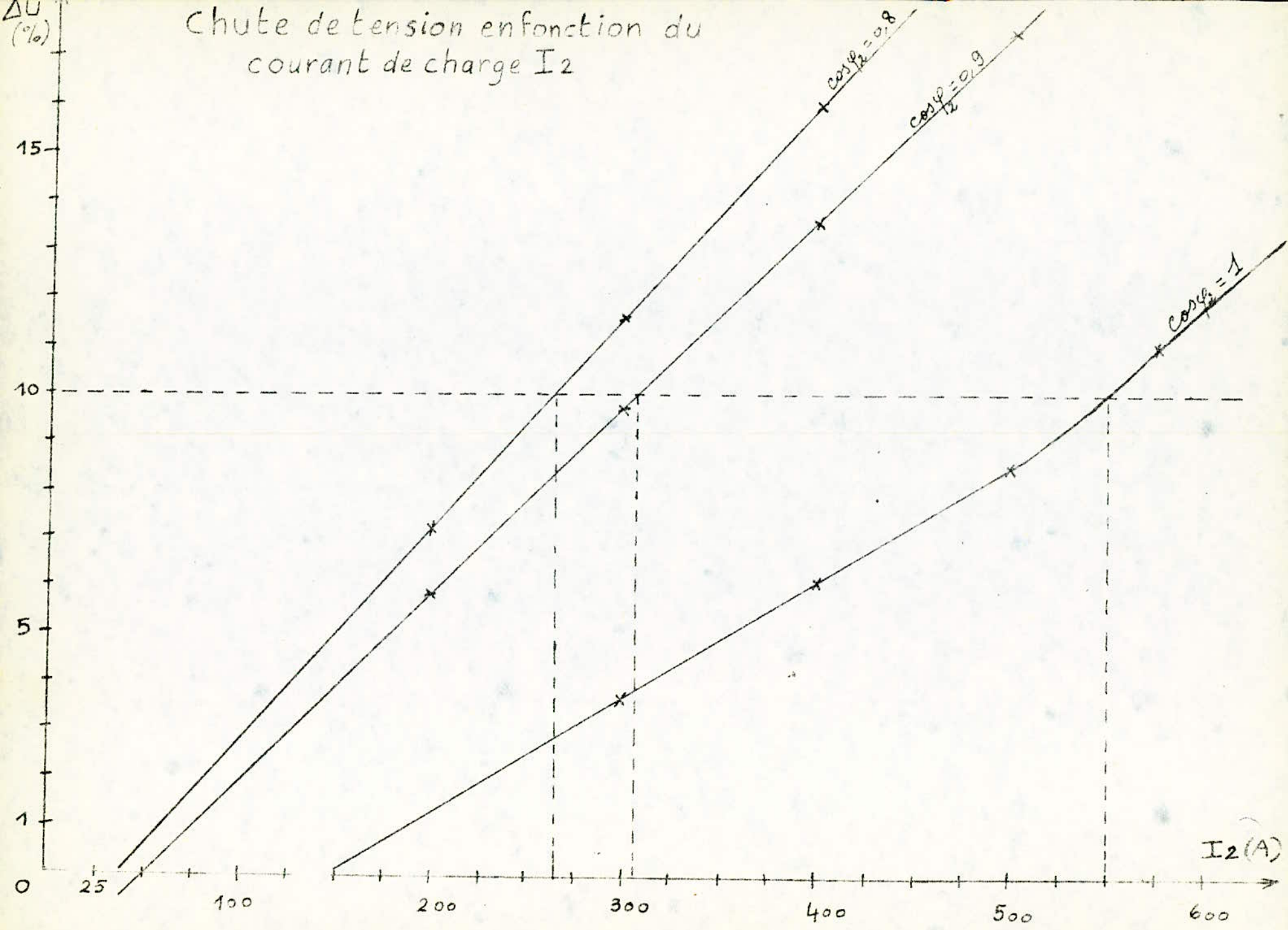
$$Q_1 = -0,68 \text{ MVAR} \quad Q_2 = 0 \quad \Delta Q = -0,68 \text{ MVAR}$$

Tableau des résultats :

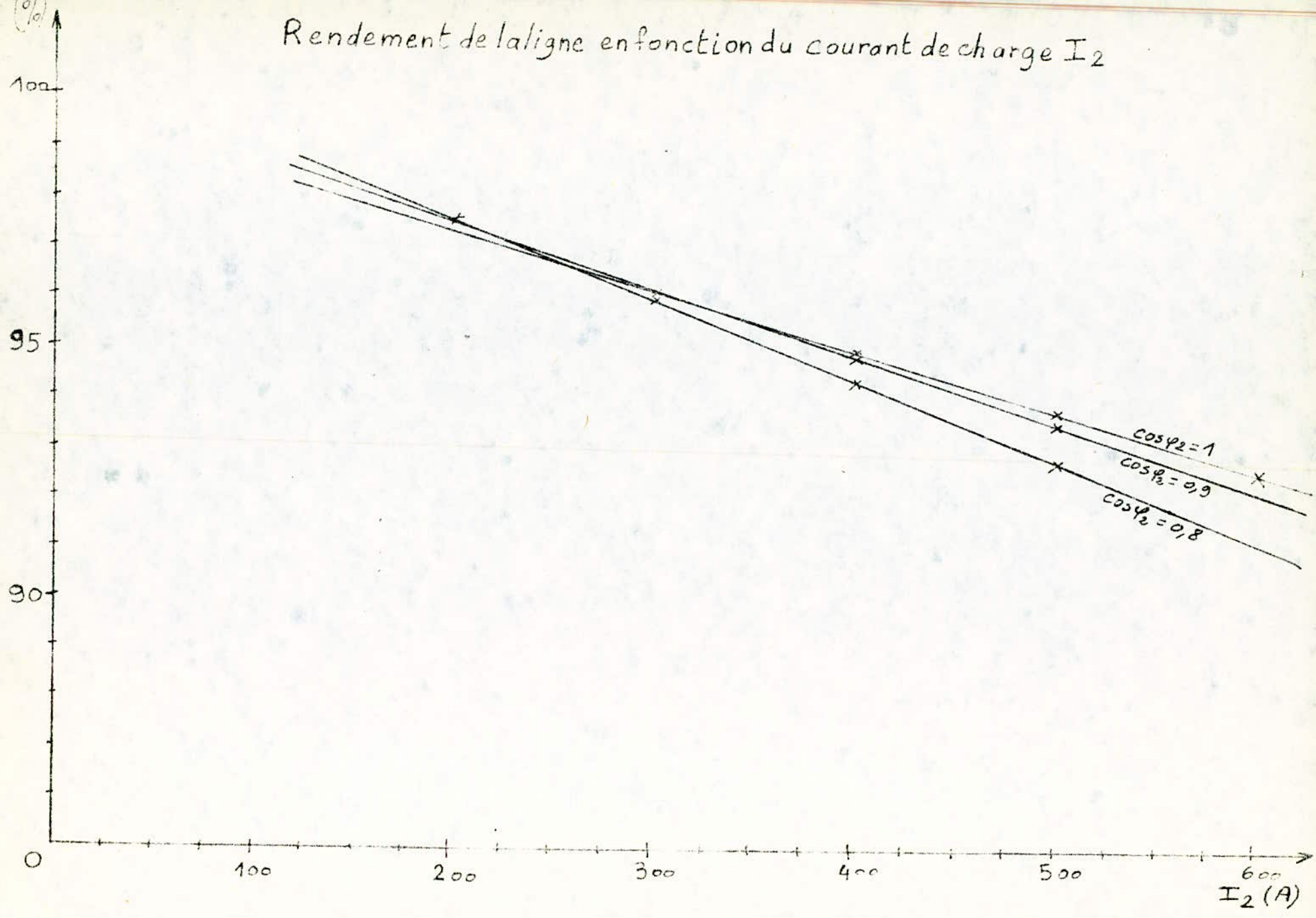
| $I_2 \text{ (A)}$ | $\Delta U \text{ (%)}$ | $\Delta P \text{ (MW)}$ | $\Delta Q \text{ (MVAR)}$ | $\eta \text{ (%)}$ | $\cos \varphi_1$ |
|-------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| 600               | 11,1                   | 17,5                    | 50,93                     | 92,5               | 0,977            |
| 500               | 8,5                    | 12,15                   | 29,32                     | 93,7               | 0,988            |
| 400               | 6,1                    | 7,78                    | 12,87                     | 94,9               | 0,996            |
| 300               | 3,7                    | 4,4                     | - 0,68                    | 96,1               | 0,999            |



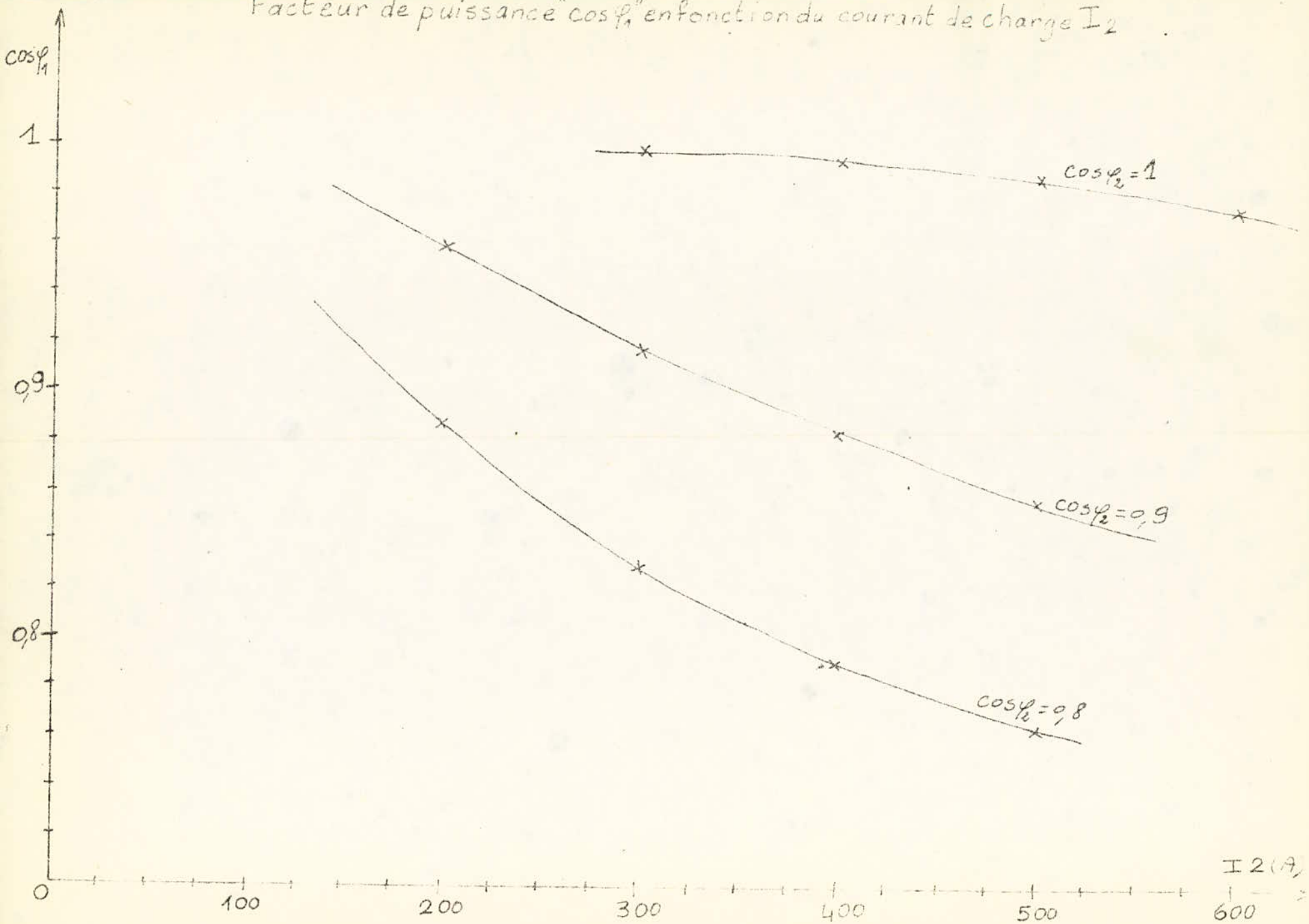
Chute de tension en fonction du courant de charge  $I_2$



# Rendement de la ligne en fonction du courant de charge $I_2$



Facteur de puissance " $\cos \varphi_1$ " en fonction du courant de charge  $I_2$





### 3 - CALCUL DES PERTES PAR EFFET COURONNE.

Les pertes par effet couronne proviennent du fait que l'air n'est pas un isolant parfait. A partir d'une certaine tension, dite critique, le conducteur s'entoure d'une couronne lumineuse due aux pertes d'électricité qui se dissipent dans l'air (effluves). Ces décharges ont lieu lorsque l'intensité du champ électrique à la surface du conducteur dépasse la rigidité diélectrique de l'air. Ce phénomène dépend de la tension, du conducteur (rayon, état de surface), des conditions atmosphériques (humidité, température...) et de la pollution.

Selon PECK la tension critique est donnée par la formule :

$$V_{cr} = 2,11 m_s m_t \delta r \ln(d/r) \cdot 10^3 \quad (V)$$

$m_s$  = coefficient d'état de surface, varie de 0,82 à 0,87

$m_t$  = coefficient qui tient compte des conditions atmosphériques.

$m_t = 1$  beau temps

$m_t = 0,8$  mauvais temps

$\delta$  : coefficient tenant compte de la densité de l'air

$$\delta = (b/760) \cdot (273 + 20) / (273 + t) = 0,386 b/t$$

$b$  = pression atmosphérique en mm de mercure

$t$  = température en degré K

$r$  = rayon du conducteur en mm

$$V_{cr} = 2,11 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 13,2 \cdot \ln 882/1,32 \cdot 10^3$$

$$V_{cr} = 123 \text{ Kv}$$

Les pertes sont données par la formule suivante :

$$P_c = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{r/d} (V - V_{cr})^2 \cdot 10^{-5} \quad \text{en Kw/Km par ph}$$

$f$  : fréquence

$$V = 1,05 U / \sqrt{3}$$

$$P_c = \frac{241}{1} (50 + 25) \sqrt{1,32/882} (133,4 - 123)^2 \cdot 10^{-5}$$

$$P_c = 0,756 \text{ Kw/Km par phase}$$

$$P_{c \text{ tot}} = 3 \cdot 0,756 = 2,27 \text{ Kw/km}$$

#### 4 - CONCLUSIONS :

En admettant une chute de tension de 10% c'est-à-dire  $U_1 = 1,05 U_n = 231 \text{ Kv}$  et  $U_2 = 0,95 U_n = 209 \text{ Kv}$ , on aura une puissance maximale disponible à l'extrémité de la ligne de :

|                              |   |
|------------------------------|---|
| -pour $\cos \varphi_2 = 0,8$ | $I_2 = 260 \text{ A}$ soit $P_2 = 75 \text{ MW}$  |
| -pour $\cos \varphi_2 = 0,9$ | $I_2 = 310 \text{ A}$ soit $P_2 = 100 \text{ MW}$ |
| - pour $\cos \varphi_2 = 1$  | $I_2 = 540 \text{ A}$ soit $P_2 = 195 \text{ MW}$ |

La puissance naturelle de la ligne est :

$$P_{\text{nat}} = U^2/Z_c \quad \text{avec} \quad Z_c = \sqrt{L/C} \quad : \text{ l'impédance caractéristique}$$

de la ligne .  $Z_c = 397,13 \Omega$

$$P_{\text{nat}} = 122 \text{ MW} \quad \text{soit un courant} \quad I_2 = 337 \text{ A}$$

Le transfert d'énergie réactive ( $\Delta Q$ ) est nul à  $I_2 = 330 \text{ A}$  environ pour  $\cos \varphi_2 = 0,8$  et  $0,9$  cela est en concordance avec le résultat précédent . A ce moment la ligne se comporte comme une résistance morte. A vide on voit d'après les résultats que la ligne se comporte comme un générateur d'énergie réactive, alors qu'en charge elle en consomme beaucoup. Ceci provoque l'augmentation des pertes d'énergie et des chutes de tension ainsi qu'un surdimensionnement des conducteurs, des appareils de coupure, ..

Cette ligne nécessite donc la compensation de l'énergie réactive. Celle-ci peut se faire soit avec des capacités soit à l'aide d'un compensateur synchrone qui permet un réglage très fin mais qui n'est rentable que dans les grands réseaux.

Les pertes par effet couronne ne sont pas négligeables par mauvais temps, mais restent faibles devant les pertes ohmiques  $P_J$

$$P_J = 3 R I^2 = 3 \cdot 0,107 \cdot 400^2 = 51,36 \text{ KW/Km}$$

Alors que  $P_C = 2,27 \text{ KW/Km}$



## CONCLUSION G E N E R A L E .

Le but de ce travail n'est pas le calcul complet d'une ligne haute tension, parce que l'étude d'une telle ligne est complexe et nécessite beaucoup de temps. C'est ainsi que nous nous sommes limités à l'étude de certaines parties. Néanmoins nous espérons avoir donné un aperçu sur quelques problèmes relatifs à la construction des lignes de transport d'énergie.

En ce qui concerne le programme que nous avons réalisé, celui-ci pourrait être amélioré avec l'utilisation d'un fichier cables dans lequel les caractéristiques ( $E, \alpha, W, S, \dots$ ) seront stockées. Ainsi on évitera de donner à chaque fois les caractéristiques en entrée. Ceci est valable aussi pour les hypothèses climatiques de référence. Cette étude pourrait rentrer dans un projet grandiose qui consisterait en l'automatisation complète du calcul de lignes, à l'aide de programmes tels que ceux relatifs à la recherche d'un tracé, à la répartition optimale des supports, aux calculs électriques, etc...

Cette étude nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des lignes et constitue pour nous une première expérience dans la programmation.



## BIBLIOGRAPHIE.

- CHARLES AVRIL : Construction des lignes aériennes à Haute tension  
Editions Eyrolles.
- A . MAUDUIT - Tome I - : Installations électriques à Haute tension  
Editions Dunod.
- E; GILON : Cours d'électrotechnique . Troisième partie.  
Editions Dunod .
- SIEMENS : Electrical Engineering. Handbook.  
~~Handbook.~~
- M.DREYFUS : Fortran IV .  
Editions Dunod.
- C.CARASSO : Analyse Numérique.

TABLE DES MATIÈRES .

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCTION .....                                    | 1  |
| 1ere PARTIE : CHOIX ET DEFINITION DU TRACE .          |    |
| 1 - Etude préalable sur carte.....                    | 2  |
| 2 - Etude topographique.....                          | 2  |
| 3 - Profil en long.....                               | 3  |
| 2eme PARTIE : ETUDE MECANIQUE .                       |    |
| Chapitre 1 - Généralités.                             |    |
| 1 - Supports.....                                     | 6  |
| 2- Ecartement des conducteurs.....                    | 7  |
| 3 - Hypothèse d'étude.....                            | 8  |
| Chapitre 2 - Equation de changement d'état.           |    |
| 1 - Définition.....                                   | 10 |
| 2 - Rappels.....                                      | 10 |
| 3 - Etablissement de l'équation de changement d'état. | 13 |
| 4 - Généralisation de l'équation " " "                | 14 |
| Chapitre 3 - Reglage des câbles (tensions de pose).   |    |
| Chapitre 4 - Résolution de l'équation.                |    |
| 1 - Introduction .....                                | 18 |
| 2 - Organigrammes.....                                | 19 |
| 3 - Notations utilisées.....                          | 23 |
| 4 - Programme et résultats.....                       | 24 |
| 3eme PARTIE : ETUDE ELESTRIQUE.                       |    |
| Capitre 1 Isolateurs.                                 |    |
| 1 - Rôle des isolateurs.....                          | 34 |
| 2 - Types d'isolateurs.....                           | 34 |
| 3 - Matériau utilisé.....                             | 35 |
| 4 - Contraintes d'exploitation .....                  | 35 |
| 5 - Pollution des isolateurs.....                     | 36 |

|  |        |
|--|--------|
| 6 - Choix des isolateurs.....                                      | 37     |
| 7 - Calcul du nombre d'isolateurs.....                             | 37     |
| Chapitre 2 - Répartition du potentiel le long de<br>la chaîne..... | 39     |
| 1 - Calcul des potentiels d'isolateurs.....                        | 40     |
| 2 - Conclusions.....   | 43     |
| Chapitre 3 - Calculs électriques.                                  |        |
| 1 - Calcul des constantes de la ligne.....                         | 45     |
| 2 - Calcul des grandeurs électriques $U_1, I_1$ .....              | 46     |
| 3 - Calcul des pertes par effet couronne.....                      | 52     |
| 4 - Conclusion.....  | 53     |
| <br>C O N C L U S I O N   G E N E R A L E .                        | <br>54 |
| <br>B I B L I O G R A P H I E .                                    | <br>55 |



