

المدرسة الوطنية للتقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **GENIE ELECTRIQUE**

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

Etude du foudroiement direct d'une
ligne de transport d'énergie électrique
à haute tension mal protégée

Proposé par :

M. Mahfoudi M.D.

Etudié par :

Noviouat Nazek

Sahali Nour-Eddine

Dirigé par :

M. Mahfoudi M.D.

PROMOTION : Janvier 1988

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

إِنَّمَا يَتَذَكَّرُ أُولُو الْأَلْبَابِ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمِ

وزارة التعليم العالي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

Etude du foudroiement direct d'une
ligne de transport d'énergie électrique
à haute tension mal protégée

Proposé par :

M. Mahfoudi M.D.

Etudié par :

Nouiouat Nazek

Sahali Nour-Eddine

Dirigé par :

M. Mahfoudi M.D.

PROMOTION : Janvier 1988

Dédicaces.

التدريسة الوطنية للتجارة والتسيير
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

À nos parents

À nos amis

Nouiovat Nazek

Sahali Nour-Eddine.

Remerciements

Nous remercions monsieur Djaffar M. Mahfoudi pour son encadrement et ses conseils.

Nous remercions monsieur Boumghar de La Sonelgaz pour son aide

Nous remercions enfin tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à l'élaboration de notre travail.

Noviouat Nazeq

Sahali Noor-Eddine

• SOMMAIRE •



Chapitre I : LA Foudre.

I.1. Mécanisme des coups de foudre.

I.1.1. Le nuage orageux.

I.1.2. Polarisation du nuage orageux.

a) Théorie de Wilson

b) Théorie de Simpson et Scarce

I.1.3. Phénomène de décharge

I.2. Caractéristiques de La foudre.

I.2.1. Classification des coups de foudre.

I.2.2. Paramètres de La foudre.

Chapitre II : SEVERITE ORAGEUSE ET MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

II.1. Sévérité orageuse.

II.1.1. Niveau kéraunique.

II.1.2. Nombre de coups de foudre à La terre

II.1.3. Nombre de coups de foudre à La ligne

II.2. Théorie électrogéométrique

II.2.1. Modele électrogéométrique

Chapitre III : DEFAUTS D'ECRAN

- III.1 Mécanisme de défaillance de l'effet d'écran
 - III.1.1 SFR.
 - III.1.2 SFO.
 - III.2 Calcul du SFR et du SFO.
 - III.3 Forme de l'onde de foudre
 - III.3.1 Introduction.
 - III.3.2 Amplitudes
 - III.3.3 Formes d'onde
 - III.3.4 Approximation linéaire de l'onde de foudre
 - III.3.5 Distribution des raideurs de front.
 - III.4 Calcul des paramètres de l'onde de foudre.
 - III.5 Résultats.
- Conclusion.

INTRODUCTION

On estime que 2000 orages ont lieu chaque instant dans le monde, produisant quelques 30 à 50 coups de foudre chaque seconde.

Chaque coup de foudre a le pouvoir de causer de très graves dommages.

Ainsi, un coup de foudre tombant sur les câbles d'une ligne aérienne, entraîne presque toujours un défaut qui nécessite le déclenchement de la ligne.

L'objectif principal de l'ingénieur est l'établissement de moyens de protection efficaces contre la foudre. Pour cela, une étude des procédés de protection visant l'efficacité et l'économie est nécessaire.

C'est ainsi que la disposition de câbles de garde au dessus des conducteurs actifs, formant une sorte d'écran, diminue notablement le nombre de défauts dû aux décharges de foudre.

Mais, malgré ces dispositifs, un certain taux de coups de foudre arrive à toucher un conducteur. C'est ce qu'on appelle "défaillance de l'effet d'écran" ou "défaut d'écran". Cette défaillance peut entraîner un court-circuit, si la tension injectée dépasse la tension de l'isolation de la ligne, en contournant ou en claquant la chaîne d'isolateurs. Si la tension n'excède pas la tension de l'isolation, l'onde de foudre se pro-

pagera le long de la ligne et pourra occasionner de graves dégâts si le coup de foudre survient près d'un poste.

Le but de notre étude est l'évaluation du nombre de défauts d'écran (SFR), du nombre de défauts entraînant claquage ou contournement de l'isolation (SFO) et ~~des paramètres de l'onde de foudre se propageant le long de la~~ ligne. l'approximation de la forme de l'onde de foudre au point d'impact.

CHAPITRE I

LA Foudre

I.1 Mécanisme des coups de foudre.

I.1.1 Le nuage orageux.

Les nuages orageux, de type cumulo-nimbus sont à l'origine des coups de foudre. Ce sont d'énormes masses, occupant une surface de plusieurs dizaines de kilomètres carrés, et un volume dépassant les 100 km^3 .

D'une épaisseur de plusieurs km, ils surplombent le sol à une hauteur moyenne de deux kilomètres. Leur base est constituée de gouttelettes d'eau alors que leur partie supérieure est constituée de cristaux de glace.

Ces nuages sont dus à l'ascension d'une masse d'air chaud et humide. Cette masse pratiquement isolée thermiquement de l'air ^{environnant} va s'élever et former un nuage orageux aux altitudes où la condensation commence.

I.1.2 Polarisation du nuage orageux.

Au sein du nuage s'opère une séparation de charges électriques. Ce sont les turbulences atmosphériques qui engendrent cette séparation.

Lorsque la limite disruptive est atteinte, des décharges électriques se produisent, soit entre nuages ou régions d'un même nuage, c'est ce qu'on appelle "éclairs", soit

entre nuage et le sol (foudres).

De très nombreuses théories ont été imaginées pour rendre compte des mécanismes de séparation puis de transfert des charges. Parmi les plus répandues, celle de "Wilson" et de "Simpson et Scarce".

a) Théorie de Wilson.

La théorie de Wilson est basée sur la supposition qu'un grand nombre d'ions sont présents dans l'atmosphère. Beaucoup de ces ions s'attachent à de petites particules d'eau et de poussière.

Ainsi, une goutte d'eau tombant dans le champ électrique terrestre devient polarisée. La goutte aura donc un moment électrique dipolaire induit. Le bas de la goutte étant positif et le haut négatif.

La partie inférieure de la goutte va attirer les charges négatives de l'atmosphère laissant une prépondérance de charges positives.

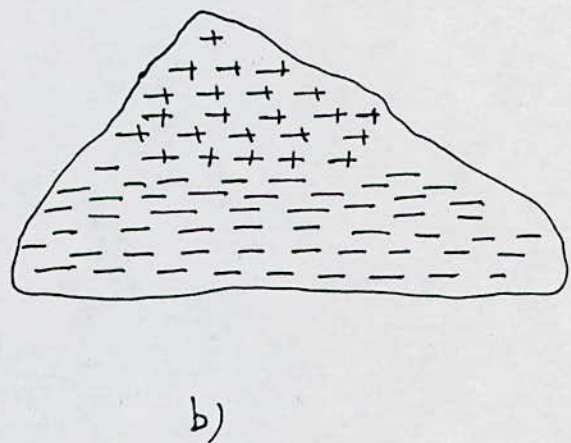
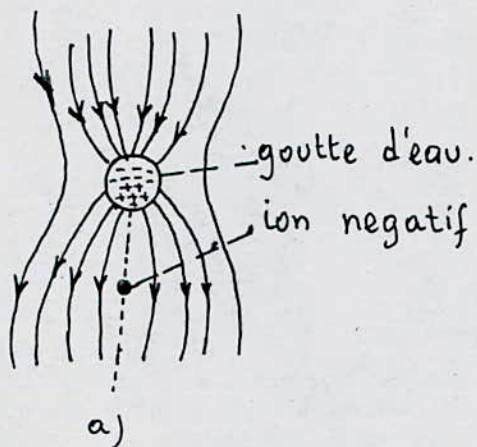
Si un ion positif s'approche de la goutte, il peut être repoussé par le bas de la goutte chargé positivement ou attiré par la partie supérieure négative.

Or, la goutte tombant dans l'air, il se produit

donc un courant d'air ascendant par rapport à elle qui va en éloigner les ions. Ainsi, les ions positifs ne peuvent pas se fixer en haut de la goutte.

La charge négative va être amenée vers le bas du nuage par les gouttes d'eau et les ions positifs qui sont laissés en arrière vont être soufflés vers le haut par les divers courants ascensionnels.

Ainsi la partie inférieure du nuage se charge négativement et la partie supérieure positivement.



a) Capture d'un ion négatif par une goutte d'eau tombante.

b) Séparation de charge dans un nuage orageux selon la théorie de Wilson.

b) Théorie de Simpson et Scarse.

Cette théorie est basée sur les variations de température dans les différentes régions du nuage et sur le fait que lorsque une goutte d'eau se brise en deux sous l'effet des courants d'air ascendants, la gouttelette acquiert une charge positive et l'air se trouve chargé négativement. De même quand les cristaux de glace se divisent, ils se chargent négativement et l'air positivement.

D'après Simpson, Les courants d'air heurtant des particules d'eau à la base du nuage vont les briser. Celles-ci vont se charger positivement et seront entraînées vers le haut du nuage par les courants d'air ascensionnels. Si elles ne se recombinent pas entre elles, pour tomber dans une poche à la base du nuage comme il est indiqué sur la fig. I.2.

Les courants d'air dans leur ascension vont heurter aussi des cristaux de glace dans la partie supérieure du nuage. L'air se chargera alors positivement et remontera encore plus haut tandis que les cristaux de glace chargés négativement, vont, sous l'effet de leur poids dériver doucement vers la partie inférieure du nuage.

- C'est de cette manière que la séparation de charge s'opère au sein du nuage, Une fois complète, les

conditions pour un coup de foudre sont établies.

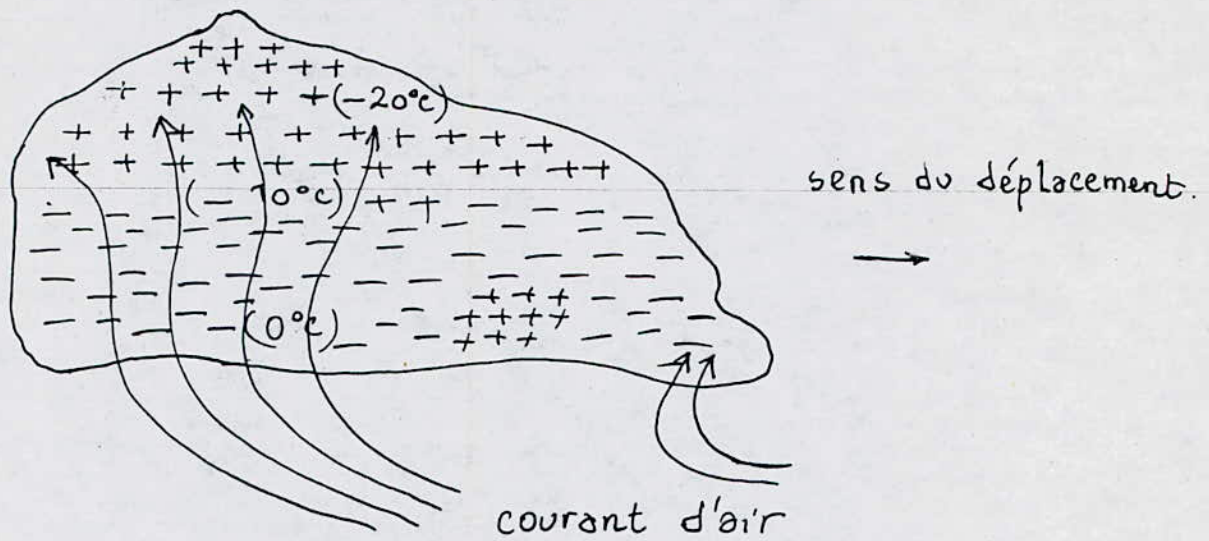


fig. I.2

Pour les différentes théories établies, le résultat net des processus de séparation est que la partie supérieure se charge positivement tandis que la partie inférieure du nuage orageux se charge négativement, avec souvent un paquet de charges positives.

I.2. Phénomène de décharge.

Le phénomène de foudre est le claquage de l'air entre le nuage et la terre qui forment ainsi les deux plateaux d'un gigantesque condensateur.

La première phase d'un coup de foudre est toujours une prédécharge peu lumineuse ou traceur qui

progresses à travers l'air neutre avec une vitesse relativement faible. Cette pré-décharge à son origine, soit dans le nuage, et progresse vers le sol; c'est le coup de foudre descendant, soit au niveau du sol et progresse vers le nuage: c'est le coup de foudre ascendant.

Tout se passe dans les deux cas comme si le canal ainsi formé quoique faiblement ionisé formait entre le sol et le nuage un pont suffisamment conducteur pour préparer la voie à un courant intense qui sera le coup de foudre proprement dit.

Dans le cas d'un coup de foudre descendant le phénomène de décharge s'opère de la manière suivante: De la base du nuage, chargée négativement, s'échappe la pré-décharge qu'on appelle traceur. Elle est faiblement lumineuse et sa progression vers le sol se fait par bonds de quelques dizaines de mètres, suivant les charges d'espace, il s'agit en réalité d'une succession de décharges reprenant le chemin ionisé de la précédente, interrompues de temps d'arrêt de 40 à 100 μ s (vitesse moyenne de progression: 0,15 m/s).

À l'approche du sol, l'extrémité du traceur fortement chargée engendre à sa verticale un important accroissement du champ électrique pouvant atteindre des valeurs de 400 à 500 kV/m. lorsque le seuil d'ioni-

sation de l'air atmosphérique est atteint (30 kV/cm), des effluves s'échappent d'un certain nombre de points caractéristiques du sol, effluves qui se transforment en décharges ascendantes positives, pour des valeurs de champ supérieures.

L'effluve qui offrira les meilleures caractéristiques d'amorçage, ou, qui progressera le plus rapidement rejoindra le traceur. de canal ionisé est alors parfaitement établi, et ils'opère une remontée des charges du sol vers le nuage, tendant à neutraliser ses propres charges. C'est l'éclair de retour (Return Stroke), il est de loin le plus brillant, et c'est lui qui provoque le tonnerre.

Après un temps d'environ une centaine de millisecondes quand l'éclair de retour a disparu, le nuage pouvant encore contenir une certaine quantité de charges non neutralisées, un autre précurseur descend, progressant de façon continue; on l'appelle précurseur obscur (dark leader). A l'instant où il touche le sol, il se produit un éclair de retour s'élevant le long du canal.

En l'espace de 0,2 à 1 seconde, plusieurs décharges successives peuvent ainsi être échangées entre le nuage et le sol et leur progression est alors continue. Leur vitesse de propagation est de l'ordre de 10^6 m/s .

Ces décharges successives ont été mises en évidence

par des caméras du type "Boys" donnant une photographie étalée en fonction du temps. (fig. I.3)

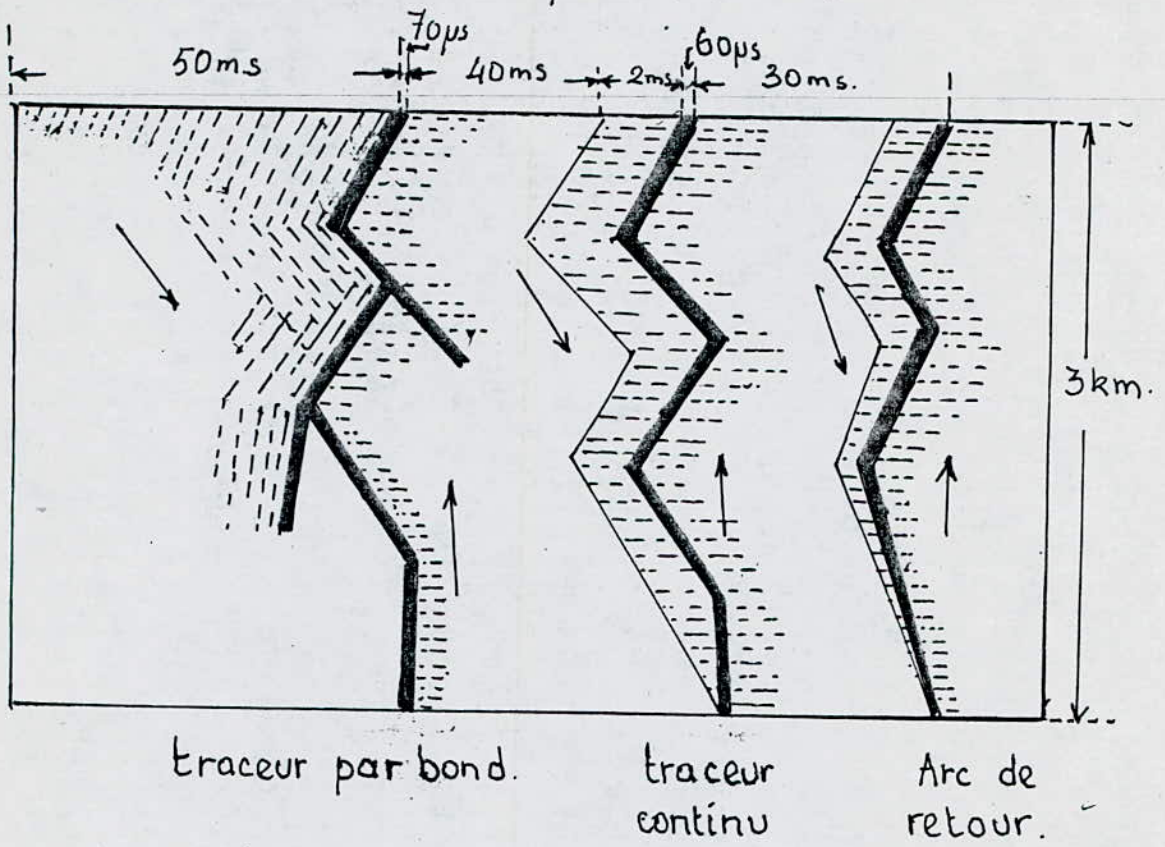


fig. I.3

I.2. Caractéristiques de La foudre.

I.2.1. Classification des coups de foudre.

Une classification a été faite en fonction de.

- de la polarité.

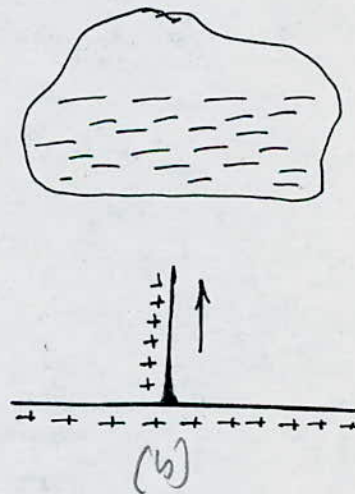
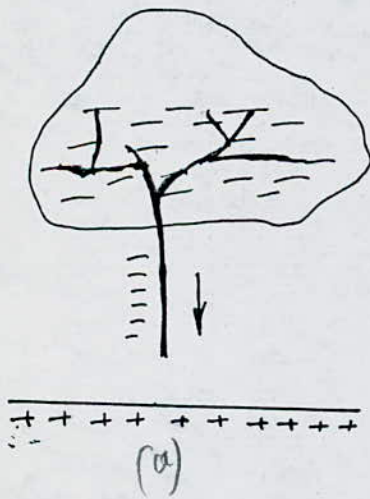
On distingue les coups de foudre négatifs et les coups de foudre positifs.

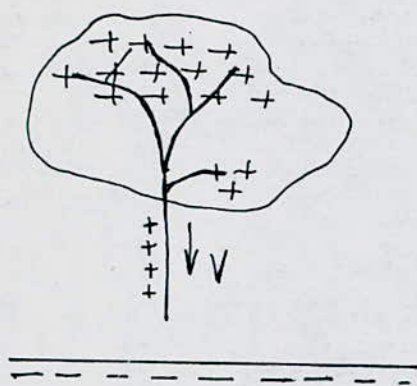
Les coups de foudre négatifs sont dus à la décharge de la partie négative du nuage et les coups de foudre positifs, à la partie positive du nuage.

- d'origine du traceur.

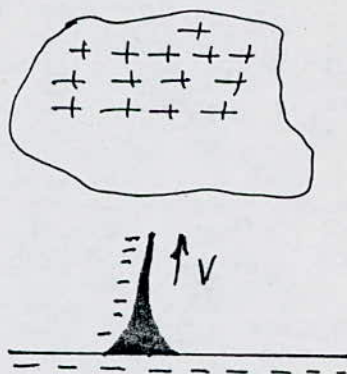
d'origine du traceur diffère aussi suivant les coups de foudre. Les coups de foudre descendants ont l'origine de leur traceur dans le nuage et les coups de foudre ascendants ont l'origine de leur traceur dans le sol.

Schéma montrant les différentes décharges de coups de foudre.





c)



d)

a) Les foudres descendantes négatives : De très loin les plus fréquentes en plaine. (80 à 90% des coups de foudre).

b) Les ascendantes positives : Elles sont issues de proéminences et se rencontrent fréquemment en montagne.

c) Les foudres descendantes positives.

d) Les foudres ascendantes négatives.

I.2.2. Paramètres de la foudre.

Un coup de foudre peut être caractérisé par un certain nombre de paramètres mesurables.

i) de courant de crête : Ici le plus élevé du courant du coup de foudre.

ii) Durée du coup de foudre : Durée pendant laquelle il y'a écoulement de courant ou, dans le cas d'un coup de foudre multiple, le temps qui s'écoule jusqu'à la fin de la dernière impulsion.

iii) Intervalles sans courant: Ce sont les intervalles de temps pendant lesquels il ne s'écoule aucun courant mesurable.

iv) Charge du coup de foudre: C'est la charge totale transportée par un coup de foudre (entre 10 et 20 coulombs).

v) Raideur de front: C'est l'amplitude par unité de temps.

- foudres négatives. de l'ordre de 20 kA/μs

- foudres positives de l'ordre de 2 kA/μs.

CHAPITRE II

SEVERITE ORAGEUSE ET MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

II.1. Sévérité Orageuse.

II.1.1. Niveau kéraunique

C'est le niveau kéraunique qui caractérise la sévérité orageuse d'une région donnée. Il représente le nombre de jours dans l'année où l'on entend le tonnerre.

Il peut être déterminé en se référant aux cartes iso-kérauniques du pays, cartes dans lesquelles des lignes de niveau kéraunique constant ou lignes isokérauniques sont indiquées.

Ces cartes sont établies statistiquement sur une durée de plusieurs années.

Pour ce qui est de l'Algérie on se contentera du tableau 2, car cette carte n'est pas disponible pour l'ensemble du pays. (fig. II.1)

II.1.2. Nombre de coups de foudre à la terre.

A partir de résultats fournis par divers dispositifs de mesure du nombre de coups de foudre au sol, plusieurs chercheurs ont énoncé différentes relations entre la densité de coup de foudre au sol et le niveau kéraunique observé

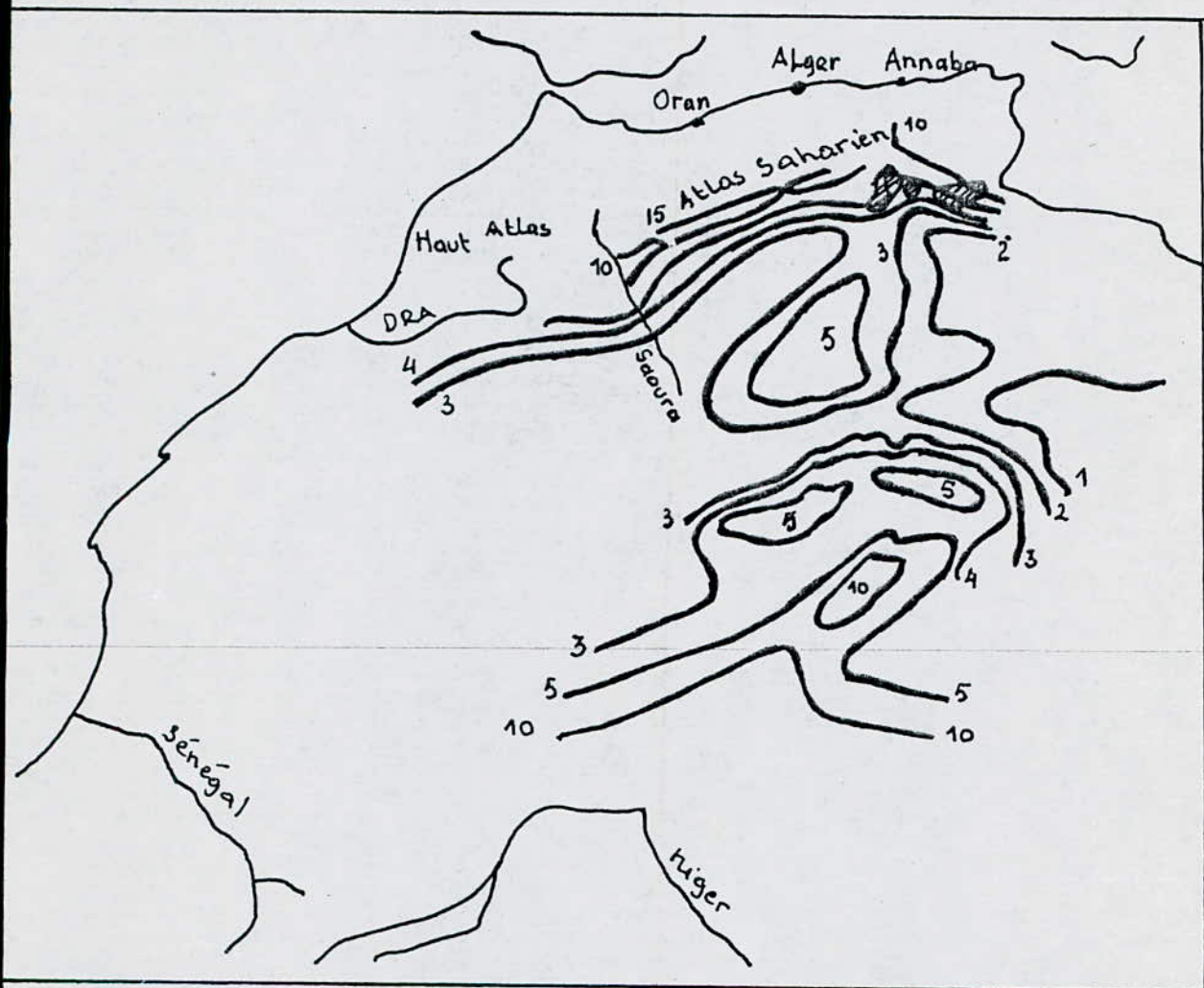


fig. II. 1. Carte isokéraunique du Sud Algérien.

allant de relations linéaires à des équations de la forme.

$$N = kT^n$$

où: N est (la densité de coups de foudre au sol) exprimé en ~~km²/an~~ nb de coups de foudre par km² et par an.

T est le niveau kéraunique moyen exprimé en nombre de journées d'orage.

k et n sont des constantes obtenues généralement de manière empirique.

Le tableau ci-dessous nous donne différentes relations empiriques déjà établies.

Tableau. 1.

Lieu.	Références	densité de foudroiement.
Inde		
Rhodesie	Anderson et Jenner (1954)	0,14T
Af. du Sud	Anderson / Eriksson (1981)	0,023T ^{1,5}
Suède	Muller-Hillebrand (1964)	0,004T ²
G.B.R.	Stringfellow (1974)	aT ^b
USA (Nord)	Horn et Ramsey (1951)	0,11T.
USA (Sud)	Horn et Ramsey (1951)	0,17T
USA	Anderson et autres (1968)	0,1T
USA	Brown et Whitehead (1969)	0,15T
URSS	Kolokov et Pavlova (1972)	0,036T ^{1,3}
Monde (Clim. at. tempéré)	Brooks (1950)	0,19T
//	Golde (1966)	0,15T

Mois Régions	JAN	FEV	MAR.	AVR.	MAI.	JUI.	JUIL.	AOUT	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	AN
ALGER	2	3	3	3	3	4	3	2	4	4	4	4	39
ANNABA	3	3	2	2	2	3	1	3	4	4	2	3	32
ORAN	1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	16
H. MESSAOUD	X	0	X	X	X	1	0	X	1	1	X	0	4
OUARGLA	X	0	1	X	1	1	0	1	1	1	X	X	5
GHARDAÏA	X	X	X	X	1	1	1	X	1	1	0	0	5
TIMIMOUN	0	0	X	X	1	0	0	X	X	X	X	0	2
A. AMENAS	0	X	0	X	1	1	0	X	X	1	0	X	4
LAGHOVAT	0	X	1	1	4	3	3	4	4	2	0	X	22
IN SALAH	0	X	X	X	X	0	0	X	0	0	X	X	1
DJANKT.	0	0	1	X	2	1	X	1	2	1	0	1	7
TAMAN.	X	X	X	1	1	2	1	2	2	X	X	X	12

X: fréquence inférieure à 1/2 Jour.

- Nombre moyen mensuel et annuel des jours d'orages (1960-1969)

Tableau 2.

En ne considérant que les relations concernant les régions tempérées (Cas de l'Algérie), on obtiendra.

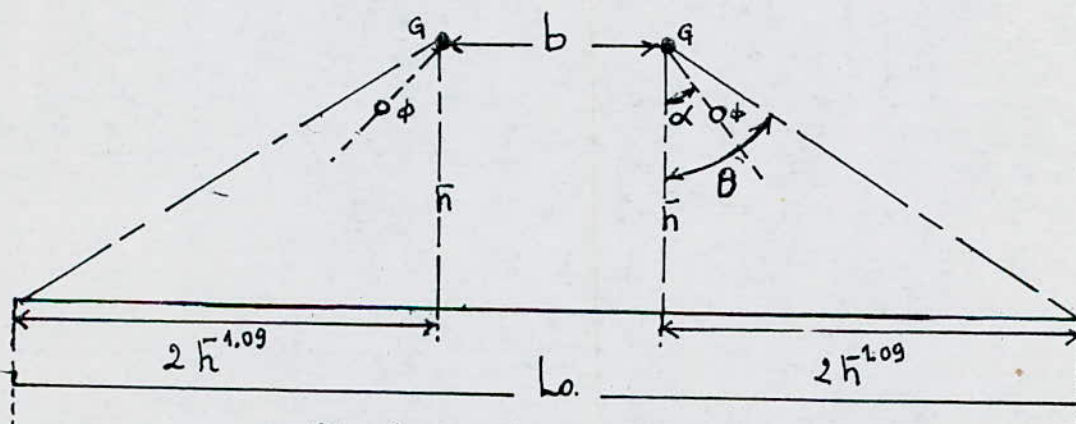
$$N \approx 0,14 T \quad (1)$$

II.1.3. Nombre de coups de foudre à la ligne.

Toute ligne de transmission passant au dessus du sol projette une certaine ombre sur ce même sol. Cette ombre est appelée ombre électrique. Tout coup de foudre tombant dans cette zone se verra capter par la ligne, tandis que les coups de foudre tombant hors de cette zone iront directement à la terre.

La figure II.3 nous donne la largeur de cette ombre

fig. II.3



G : fil de garde

ϕ : conducteur de phase.

α : angle de garde

θ : angle d'ombre électrique.

L_0 : largeur de l'ombre sur le sol.

des travaux de Whitehead ont aboutis à la relation suivante.

$$L_0 = b + 4\bar{h}^{1,09} \quad (2).$$

où L_0 est la largeur de l'ombre (en mètre)

b est la distance entre les fils de garde. (m)

\bar{h} est la hauteur moyenne du fil de garde (m)

Cette hauteur est donnée par.

$$\bar{h} = 1,1 \left(h - \frac{2}{3} S_g \right) \quad (3)$$

avec : h : hauteur du fil de garde au niveau du pylône.

S_g : flèche du fil de garde.

Le nombre de coups de foudre tombant sur une ligne de 100 km par an est donné par les équations (1) et (2).

$$N_L = 0,014.T.L_0 \quad (4)$$

II.2 Théorie électro-géométrique.

Introduction.

Les performances des lignes de transport d'énergie à haute tension sont liées à une protection efficace de celles-ci vis à vis de la foudre.

Cette protection s'effectue par la disposition de cables de garde au dessus des conducteurs actifs. des travaux de recherche basés sur l'analyse d'un grand nombre de fou-

drovements de lignes ont abouti à l'élaboration d'un modèle électrogéométrique grâce auquel l'efficacité des câbles de garde peut être optimisée.

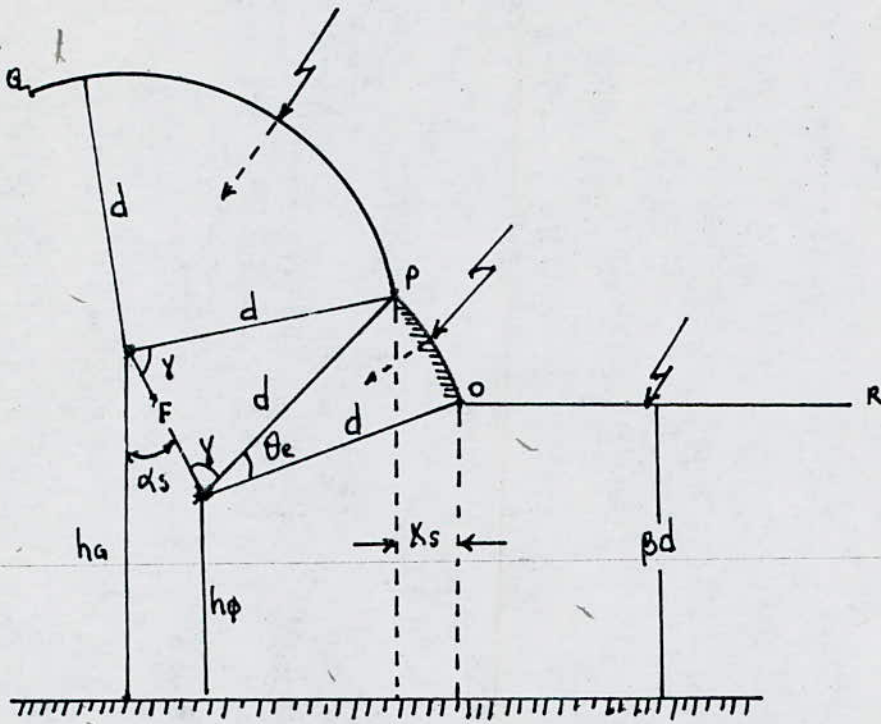
II.2.2. Le modèle électrogéométrique.

C'est un modèle imaginé par Whitehead et qui a été vérifié lors d'une importante campagne d'investigation sur des Lignes de transport d'énergie à haute tension.

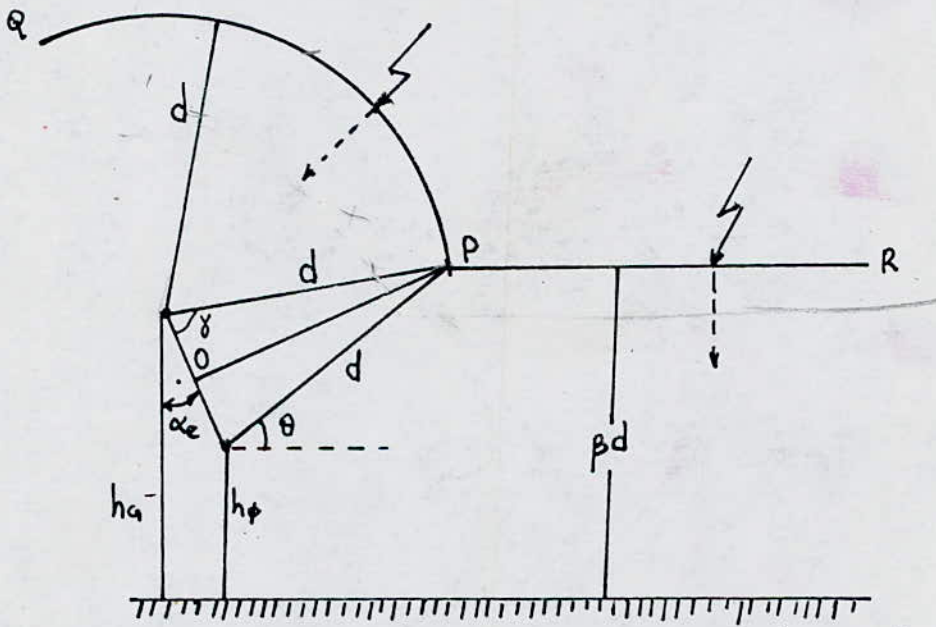
Il est particulièrement adapté à l'étude de la protection des lignes comme il peut représenter assez bien le mécanisme physique d'impact du coup de foudre.

Ce modèle implique l'adoption du concept de la "distance d'amorçage" du coup de foudre. Selon ce concept, le point probable d'impact du coup de foudre reste indéterminé jusqu'au moment où le traceur descendant atteint une certaine distance au dessus du sol. Ensuite par l'intensification locale du champ électrique à la verticale du traceur et de l'émission de streamers ascendants par les structures du voisinage, le processus d'amorçage est orienté dans une direction préférentielle. Le point d'impact sera alors déterminé.

Il est évident que le degré d'intensification du champ électrique et la distance d'amorçage dépendent de la nature des structures sur le sol, ainsi que de l'amplitude et de la répartition des charges sur le traceur du coup de foudre.



a) protection inefficace due à l'angle d'exposition θ_e .



b) protection efficace ($\theta_e = 0$)

fig.II.4 Modèle électrogéométrique.

Les modèles actuels supposent que la première décharge du coup de foudre correspond à la neutralisation des charges du traceur, de sorte qu'il existerait un rapport pratiquement constant entre la quantité de charge et l'intensité du courant de crête du coup de foudre.

D'après ces modèles plusieurs chercheurs ont été amenés à établir des expressions analytiques dont la plus simple et qui donne des valeurs acceptables de la distance d'amorçage est.

$$d = 9,4 I_c^{2/3} \quad (5)$$

d : distance d'amorçage (m)

I_c : courant de crête du coup de foudre (en kA)

Ce modèle est complété par l'hypothèse suivante. La distance d'amorçage reste valable quelque soit la nature de l'objet au sol, le sol lui même, la pointe d'un paratonnerre, un fil conducteur, un arbre, etc...

On notera que ce modèle n'est pas valable pour les traceurs positifs.

Le modèle électrogéométrique peut être expliqué par la figure II.4.

La ligne est symétrique, on ne considérera qu'un conducteur et un fil de garde au dessus d'un sol horizontal.

Les trois traceur A, B et C, (fig. II.4a) arrivant à proximi-

té d'une ligne auront des points d'impact différents.

Soit d la distance d'amorçage de ces différents traceurs. Le traceur A arrivant en un point quelconque de l'arc OP ne pourra finir sa trajectoire que sur le fil de garde, car la distance entre la tête du traceur et ce fil est égale à d , alors que la distance traceur-conducteur excède d .

Le traceur B aussitôt qu'il atteindrait l'arc PQ entrerait en contact directement avec le conducteur actif car la distance au fil de garde et à la terre de la pointe du traceur est supérieure à d .

Le traceur C arrivant sur la ligne QR ira à la terre, car la distance pd est inférieure à la distance d'amorçage d en raison du coefficient β qui définit le fait que la distance d'amorçage au sol horizontal est plus faible et ce en raison de la grande étendue du sol par rapport à la ligne. Pour les lignes de 220 kV, $\beta = 0,9$.

On voit donc que cette disposition du fil de garde n'est pas efficace vu l'existence de l'angle d'exposition θ_e délimitant l'arc PQ . La distance X_s qui est la projection sur le sol de l'arc PQ est appelée zone ou distance non protégée.

Pour une protection efficace de la ligne, il suffirait donc d'annuler la distance X_s d'où la configuration de la fig. II.4b. L'élimination de X_s impliquerait la diminution de

L'angle de garde α_s en rapprochant le cable de garde du conducteur. Le nouvel angle obtenu α_e est l'angle de protection efficace, qui ne dépend que de la distance entre le cable de garde et le conducteur, de leur hauteur moyenne par rapport au sol. et de la distance d'amorçage.

$$\alpha_e = \text{Arcsin} \left(\beta - \frac{Y\phi}{d} \right) - \text{Arccos} \frac{F}{2d} \quad (6)$$

CHAPITRE III

DEFAUTS D'ECRAN

III.1. Mécanisme de défaillance de l'effet d'écran.

La disposition de câbles de garde au dessus des conducteurs forme une sorte d'écran pour ces derniers. Ils évitent ainsi que les coups de foudre atteignent les conducteurs.

Le principe de protection par écran est basé comme nous l'avons vu précédemment sur l'explication suivante: Dans les champs électriques intenses qui sont créés autour des pylônes des lignes de transport et autour des câbles de garde par les charges électriques entraînées vers le bas dans la progression du traceur descendant, des streamers ascendants prennent naissance et viennent intercepter ce traceur. Ainsi il sera écarté des conducteurs. Mais il peut être aussi dévié vers le conducteur. C'est ce qu'on appelle défaillance de l'effet d'écran.

III.1.1. SFR

On appelle SFR ou défaillance de l'effet d'écran, le nombre de coups de foudre qui tombe sur les conducteurs par 100 km de ligne et par an.

III.1.2 SFO

De même Le SFO est déterminé comme étant le nombre de coup de foudre qui en touchant un conducteur provoque un court-circuit et déclenche la ligne.

Ce court-circuit est dû soit au contournement, soit au claquage de l'isolateur.

Le SFO est donc un pourcentage du SFR. Il est aussi calculé pour 100 km de ligne et par an.

III.2. Calcul du SFR et du SFO.

a) Calcul du SFR.

Marche à suivre pour le calcul du SFR.

- i) Etablissement du niveau céramique T.
- ii) Calcul du nombre de coups de foudre à la terre N
$$N = 0,14T$$
- iii) Calcul des hauteurs moyennes des câbles de garde et de phase.

- câble de garde.

$$\gamma_g = 1,1(h_g - \frac{2}{3} S_g) \quad (7)$$

- câble de phase.

$$\gamma_\phi = 1,1(h_\phi - \frac{2}{3} S_\phi) \quad (8)$$

avec. γ_g : hauteur moyenne du câble de garde (m)

γ_ϕ : hauteur moyenne du conducteur (m)

h_g, h_ϕ : hauteurs du câble de garde et de phase au droit du pylône.

S_g, S_ϕ : flèches du câble de garde et du conducteur (m)

iv) Calcul de la zone d'ombre L_0 .

$$L_0 = b + 4\bar{h}_g^{1.09} = b + 4Y_g^{1.09}$$

v) Calcul de nombre de coups de foudre à la ligne.

$$N_L = 0,014 T \cdot L_0.$$

vi) Calcul de l'angle de protection $\bar{\alpha}_s$. moyen

Cet angle est donné par la configuration du pylône (fig. III.4)

$$\bar{\alpha}_s = \text{Arctg} \frac{x_\phi - x_g}{Y_g - Y_\phi} \quad (9)$$

où x_ϕ est l'abscisse de la phase

x_g est l'abscisse du câble de garde.

x_ϕ sera prise comme origine des abscisses.

vii) Calcul du SFR.

$$\text{SFR} = N_L \cdot P_\alpha \cdot 10^{-2} \quad (10)$$

P_α est donnée par la formule empirique de Kostenko. C'est la probabilité donnant le nombre de coups de foudre au conducteur comme un pourcentage du nombre de coups de foudre total à la ligne.

$$\log_{10} P_\alpha = \frac{\alpha \sqrt{Y_g}}{90} - 2 \quad (11)$$

où α est l'angle moyen de protection.

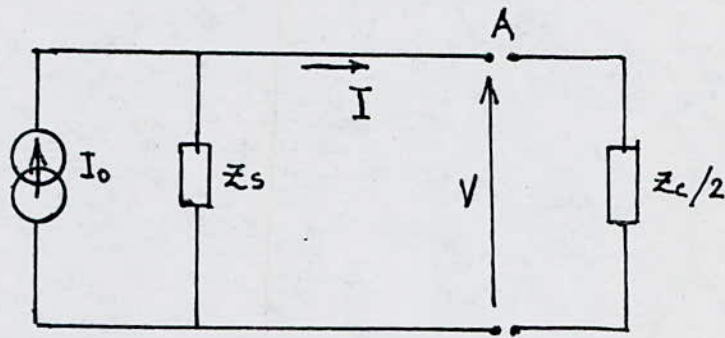
b) Calcul du SFO

marque à suivre pour le calcul du SFO.

i) Détermination du courant critique I_c .

On admettra que quand un coup de foudre tombe sur une ligne (conducteur), le canal ionisé formé par la décharge joue le rôle d'un générateur de courant à forte impédance interne qui injecte le courant au point d'impact, A.

schématiquement on aura.



I_0 : courant de foudre

Z_s : impédance caractéristique du canal.

Z_c : impédance caractéristique du conducteur foudroyé.

V : tension au point d'impact.

on aura.

$$V = \frac{Z_c I_0}{2 \left(1 + \frac{Z_c}{2Z_s}\right)} \quad (12)$$

Comme $Z_s \gg Z_c$

$$V = \frac{Z_c}{2} I_0 \quad \Rightarrow \quad I_0 = \frac{2V}{Z_c} \quad (13)$$

En remplaçant V par V_c (tension de tenue au choc de l'isolation) nous avons le courant critique qui claquerait

ou contournerait la chaîne d'isolateurs.

donc:
$$I_c = \frac{2V_c}{Z_c} \quad (14)$$

- Détermination de la tension d'isolement au choc de la ligne.

Dans le cas de surtensions dues à la foudre, cette tension est définie par la distance minimale dans l'air entre le conducteur et la masse du pylône.

Cette distance étant une donnée de la ligne, on aura.

En polarité négative.

$$V_f^- = 580 d' \quad (\text{kv}) \quad (15)$$

En polarité positive

$$V_f^+ = 530 d' \quad (\text{kv}). \quad (16)$$

Dans les deux cas d' sera comptée en mètre.

Comme on pourrait utiliser le graphe de la (fig III.1) donnant la tension d'isolement au choc (chaîne d'isolateurs) en fonction du temps de montée rapide du front d'onde.

- Impédance caractéristique Z_c

L'impédance d'onde d'un conducteur de rayon r placé à une hauteur moyenne \bar{h} au dessus du sol est donnée par.

$$Z_c = 60 \ln \frac{2\bar{h}}{r} \quad (\Omega) \quad (17)$$

Dans le cas de surtensions dues aux coups de foudre, il.

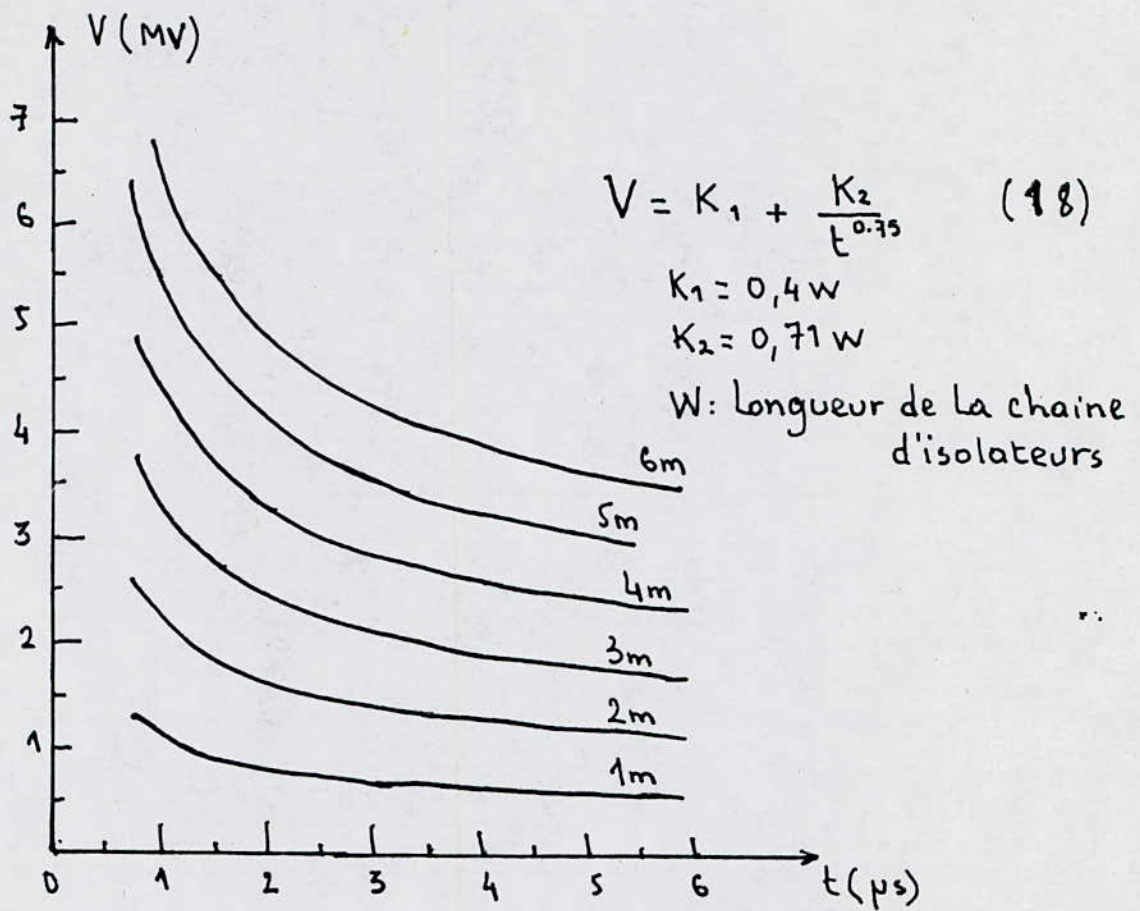


fig III.1a Courbe de tenue des choc des chaines d'isolateurs de Darveniza, Popatanski et Whitehead.

V : tension de tenue au choc en polarité négative (MV)
 t : temps de montée rapide du front d'onde.

Y'a apparition d'un intense effet couronne autour des conducteurs qui modifie leur impédance.

La nouvelle impédance Z_c sera.

$$Z_c = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r} \cdot \ln \frac{2h}{r_c}} \quad (19)$$

avec : r : rayon du conducteur

r_c : rayon apparent du conducteur dû à l'effet couronne. Il est donné par le graphe de la fig III.1b

ii) Calcul de la distance d'amorçage.

Comme il a été vu précédemment la distance d'amorçage est donnée par.

$$d = 9,4 I_c^{2/3}$$

La distance d'amorçage d sera la distance minimale d'amorçage liée au courant minimal qui entraînerait un claquage ou un contournement de la chaîne d'isolateur.

iii) Calcul de la distance non protégée X_s .

La distance X_s est donnée par la géométrie du modèle de la fig. II.4.a.

$$X_s = d [\cos \theta + \sin(\alpha_s - \delta)] \quad (20)$$

dans le cas où $\beta d > \gamma \phi$.

$$X_s = d [1 + \sin(\alpha_s - \delta)] \quad (21)$$

dans le cas où $\beta d < \gamma \phi$

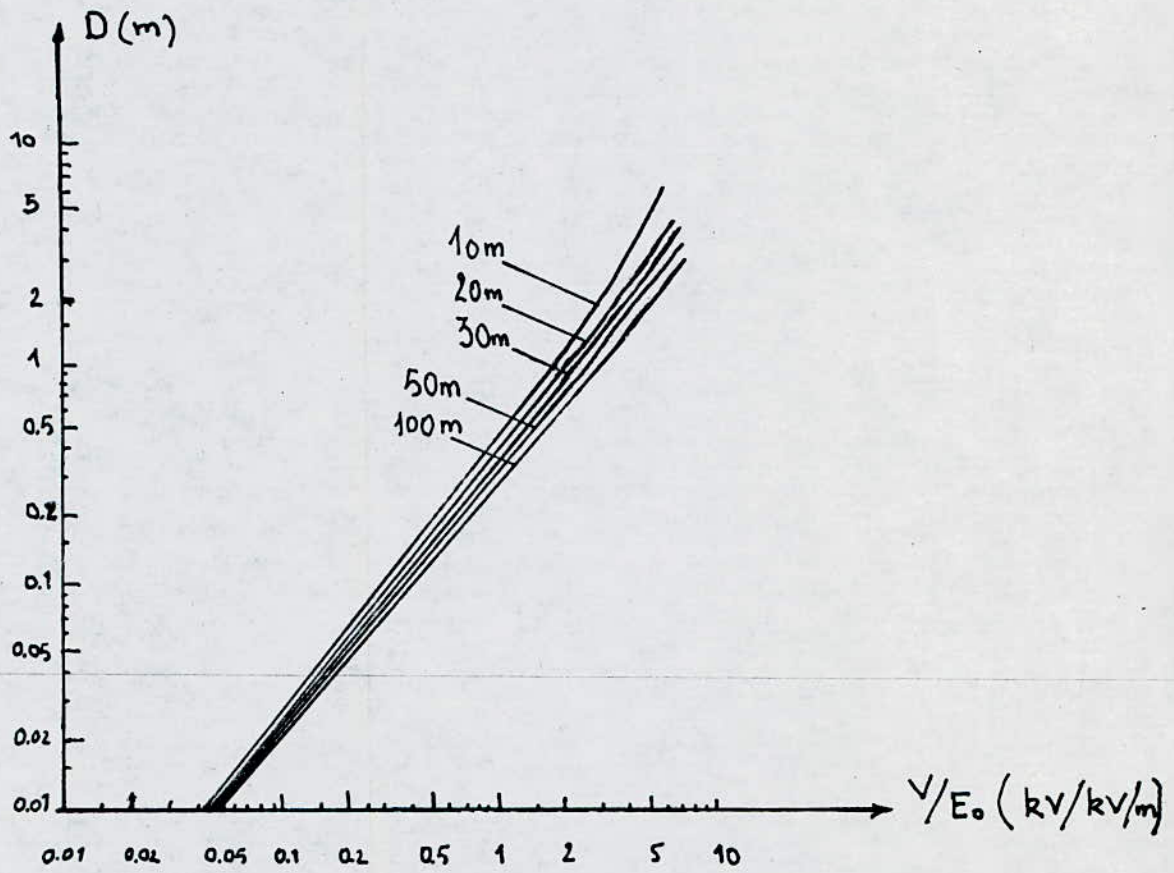


fig. III.1.b

Diamètre approximatif de l'enveloppe
couronne autour du conducteur en H.T

avec. $\theta = \text{Arcsin} \left(\beta - \frac{\gamma_{\phi}}{d} \right)$ (22)

$$\gamma = \text{Arccos} \frac{F}{2d} \quad (23)$$

$$\alpha_s = \text{Arctg} \frac{X_{\phi} - X_G}{\gamma_G - \gamma_{\phi}} \quad (24)$$

iv) Calcul de la coordonnée X_G entraînant une protection efficace.

Une protection efficace implique la suppression de la distance non protégée X_s . Ce qui équivaut à la diminution de l'angle de protection α_s en rapprochant le câble de garde du conducteur.

La nouvelle valeur de X_G est donnée aussi géométriquement par la fig. II.4.b.

$$X_G = \sqrt{d^2 - (\beta d - \gamma_{\phi})^2} - \sqrt{d^2 - (\beta d - \gamma_G)^2} \quad (25)$$

d'où l'angle de protection efficace α_e .

$$\alpha_e = \text{Arctg} \frac{X_G}{\gamma_{\phi} - \gamma_G} \quad (26)$$

v) Détermination de la distance d'amorçage maximale.

La distance d'amorçage maximale, d_{\max} , correspond au courant maximal qui causerait une défaillance de l'effet d'écran. (Les coups de foudre dont l'intensité est supérieure à

I_{max} seront captés par les cables de garde).

Cette distance est approximée à la médiatrice (OP) du triangle $G\phi$. La résolution de d_{max} qui est la résolution de l'équation (25) se trouve ainsi simplifiée et lue directement sur la figure

$$OP = d_{max} = Y_0 \bar{S} \quad (27)$$

où. $Y_0 = \frac{1}{2} (Y_G + Y_\phi)$ est la hauteur moyenne du point O.

\bar{S} est donnée graphiquement par la figure III.3 en fonction de la tangente m de la droite OP, et de β .

$$m = \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi} \quad (28)$$

vi) Calcul du SFO

Le nombre de défaillances entraînant un déclenchement de la ligne est donné par.

$$SFO = 0,014T \frac{X_s}{2} (P_{min} - P_{max}). \quad (29)$$

C'est le produit de la distance moyenne non protégée associée aux courants minimal (X_s) et maximal ($X_s \rightarrow 0$), c'est à dire $\frac{X_s}{2}$ par le nombre de coups de foudre à la ligne et par la différence des probabilités que les courants I_{min} et I_{max} soient dépassés.

Ces probabilités ont été déterminées à la suite de plusieurs expériences (Eriksson, Anderson, Popolanski) et grou-

pées sur des graphes telle la figure III.2 qu'on a approxi-
mé par l'équation.

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (30)$$

où :

P_I est la probabilité que le courant I soit dépassé.

I est le courant de la décharge.

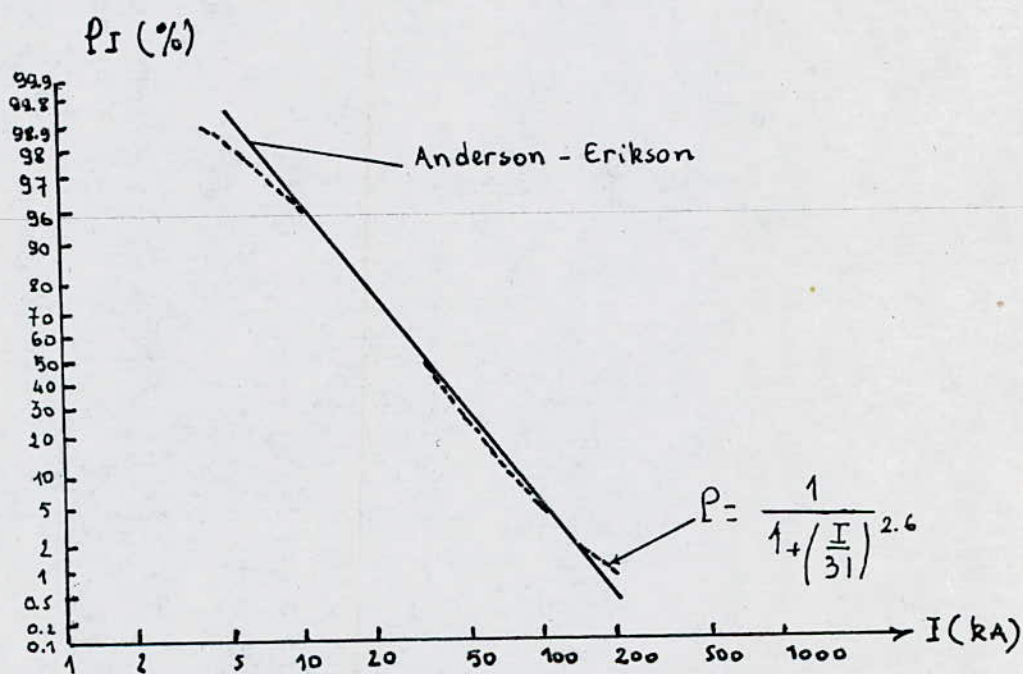
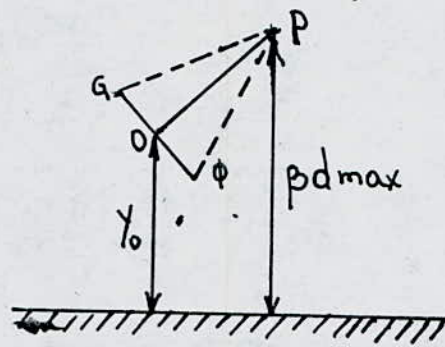


Fig. III.2. Distribution des courant de crête pour
des décharges de courants de foudre négatifs
(Anderson-Erikson).



m: tangente de la droite OP.

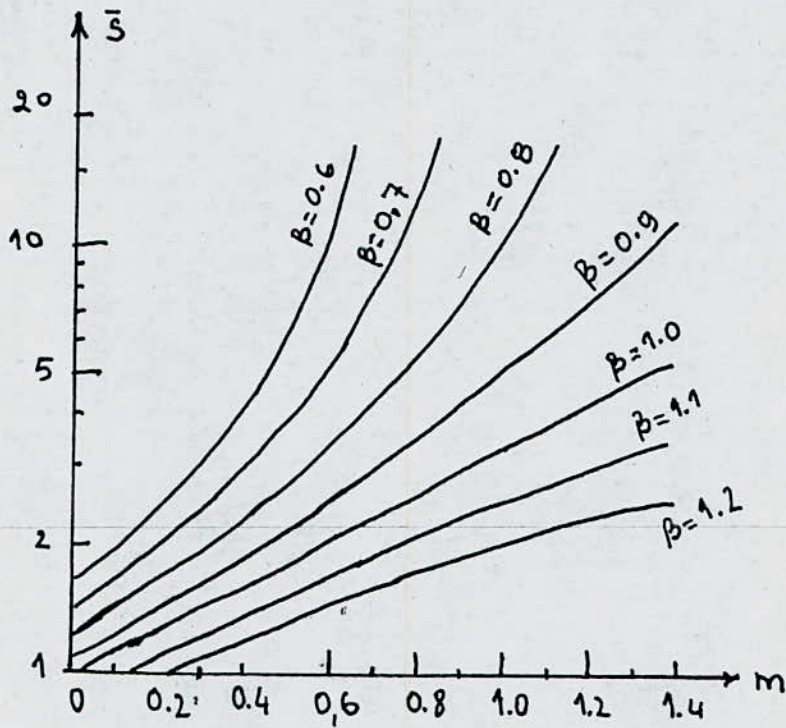


fig III.3 Valeur de \bar{s} qu'on multiplie par y_0 pour avoir d_{max} .

III.3 Forme de l'onde de foudre.

III.3.1 Introduction.

L'évaluation des probabilités d'amorçage provenant de défaillances de l'effet d'écran demande une bonne connaissance des distributions d'amplitudes des courants de foudre et des caractéristiques de formes d'onde.

III.3.2 Amplitudes.

Des mesures de courant effectuées in situ ont été accumulées pendant de nombreuses années et un bon nombre de distribution de courants de crête ont été publiées. La figure III.2. représente une distribution de courants de crête basée sur les travaux d'Anderson et Erikson en Afrique du sud et de Popolanski.

III.3.3 Formes d'onde.

Un coup de foudre se compose généralement d'une première décharge, puis de plusieurs autres décharges qui se succèdent.

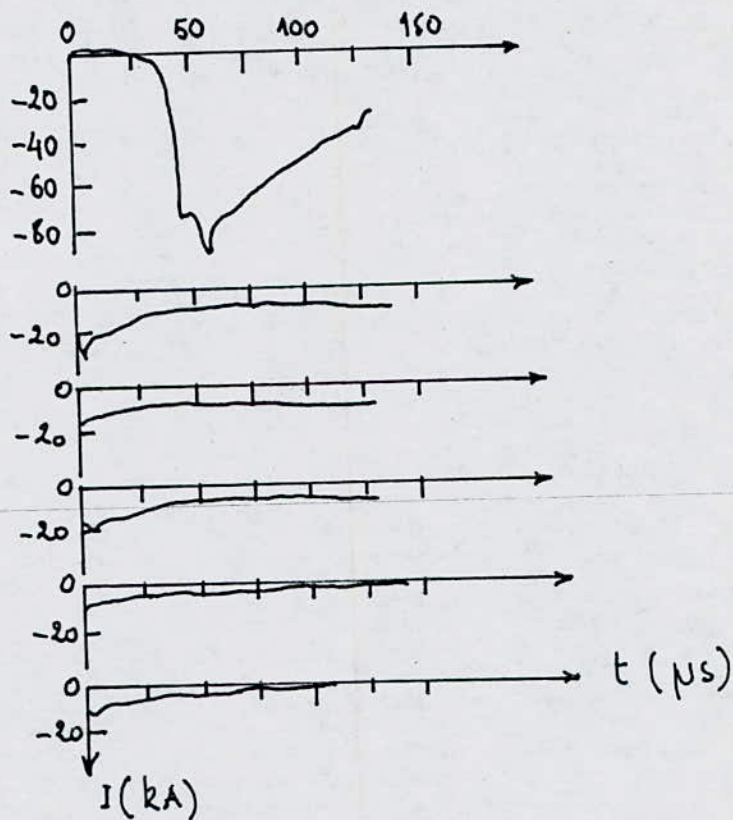
La fig. III.4. représente un oscillogramme d'un coup de foudre négatif avec six décharges.

On remarque que la durée de front des décharges secondaires est plus courte que celle de la première décharge,

de même en ce qui concerne la valeur de crête des décharges.

IL est à noter que les amplitudes de la première décharge et des décharges successives suivantes sont statistiquement indépendantes.

fig. III.4.



III.3.4 Approximation linéaire de l'onde de foudre.

La fig III.5 donne un exemple de forme d'onde moyenne tiré d'une analyse statistique d'un grand nombre d'enregistrements de formes d'onde de la première et des composantes successives suivantes d'un coup de foudre.

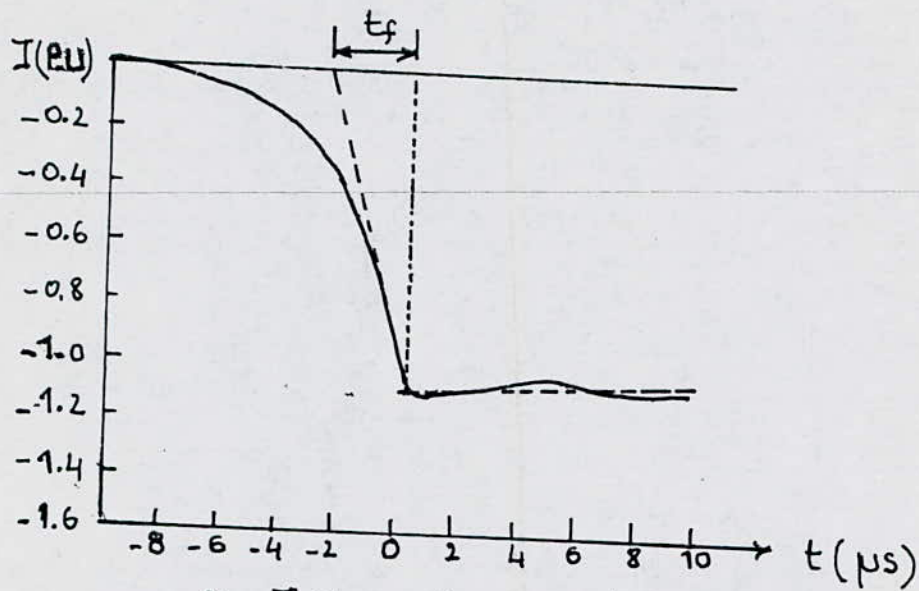


fig III.5. forme d'onde du courant de foudre moyen et approximation linéaire.

abscisses

ordonnées: Amplitudes normalisées du courant.

La forme du courant de décharge à son commencement n'a que peu d'effet sur le claquage de l'isolateur de la ligne. C'est le courant de crête et la montée rapide du courant près de la crête qui jouent un rôle important. Par suite une approximation est possible en linéarisant comme sur la fig III.5 (traits pointillés). La tangente de la queue est choisie de manière qu'à $50 \mu s$ la valeur du courant de décharge soit la moitié de la valeur de crête.

Le temps de crête t_f est obtenu en traçant une rampe sélectionnée de manière à ce qu'elle soit tangente à la décharge près du maximum, où au maximum dI/dt observé sur le

front de l'onde.

III.3.5 Distribution des raideurs de front.

Bien qu'ayant une amplitude en général plus faible que les courants de foudre positifs, les courants de foudre négatifs présentent une raideur de front plus grande. Pour 50% des coups de foudre, la raideur de front dépasse 20 kA/μs. Elle est très importante pour les décharges secondaires.

La fig. III.6 donne une distribution des valeurs des raideurs de front.

Cette distribution est approximée par l'équation suivante.

$$P_{dt} = \frac{1}{1 + \left(\frac{dI/dt}{24}\right)^4} \quad (31)$$

III.4 Calcul des paramètres de l'onde de foudre.

Méthode de calcul.

- i) Choix du temps de crête t_f
- ii) Evaluation de la raideur de front dI/dt
- iii) Evaluation du courant de crête I_p .

Ces trois points sont interdépendants. En fixant le temps t_f de l'onde normalisée de manière à avoir un

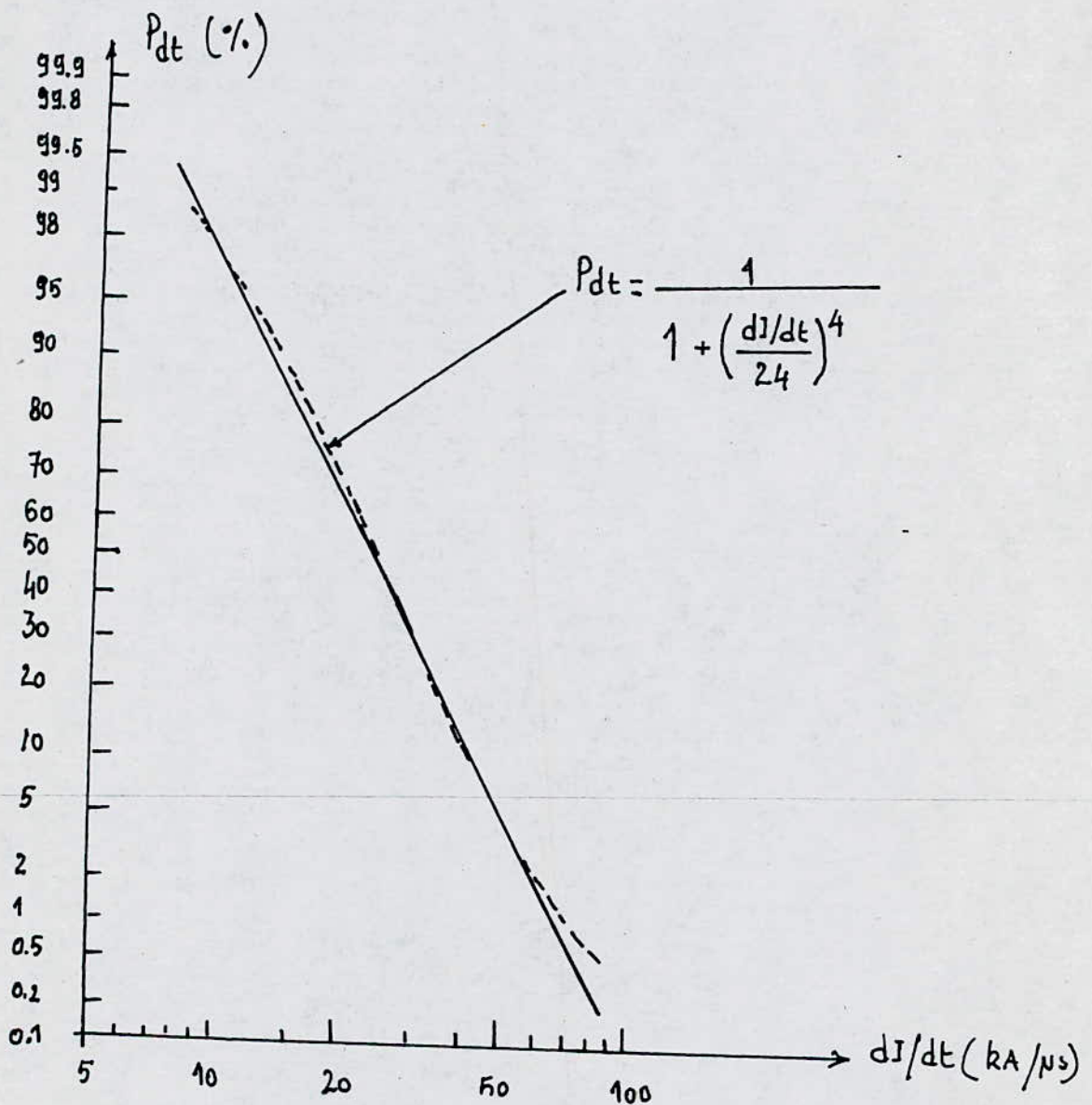


fig. III.6 distribution des raideurs de front des premières décharges d'ou courants de foudre négatifs (75 observations - Anderson - Erikson)

courant I_p inférieur au courant I_{max} . (au-delà les coups de foudre sont interceptés par les câbles de garde). Le courant doit être en accord avec la distribution de Popolanski. (fig. III.2)

t_f et I_p fixés, la raideur de front dI/dt est alors déterminée, mais elle doit aussi être en accord avec la distribution des raideurs de front (fig III.6)

Pour faciliter les calculs, la courbe de la figure liant ces trois paramètres (t_f , I_p et dI/dt) a été tracée à partir des distributions des figures III.2 et III.6

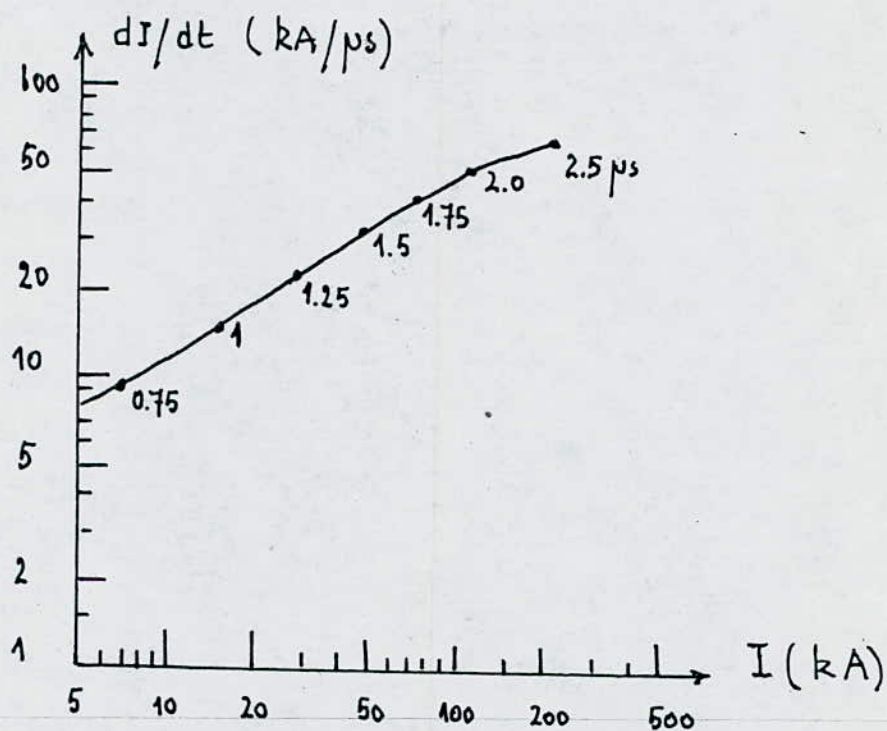


fig III.7 Courbe liant le courant de crête, la raideur de front et le temps de crête d'un onde de courant normalisée.

iv) Calcul de l'impédance propre du conducteur sans effet couronne. (Juste avant l'impact du coup de foudre)

$$Z_c = 60 \ln \frac{2Y\phi}{r} \quad (\Omega) \quad (32)$$

v) Calcul de la tension de crête V_p de l'onde.

$$V_p = \frac{1}{2} Z_c I_p \quad (33)$$

vi) Calcul du diamètre de la couche couronnaire autour du conducteur. (fig. III.1.b)

L'enveloppe due à l'effet couronne ~~apparaît~~ ^{cesse d'évoluer} dès que le champ critique au voisinage du conducteur atteint la valeur critique $E_0 = 15 \text{ kV/cm}$.

vii) Calcul de l'impédance propre du conducteur sous l'effet couronne.

$$Z'_c = 60 \sqrt{\ln \frac{2Y\phi}{r} \ln \frac{2Y\phi}{R_c}} \quad (34)$$

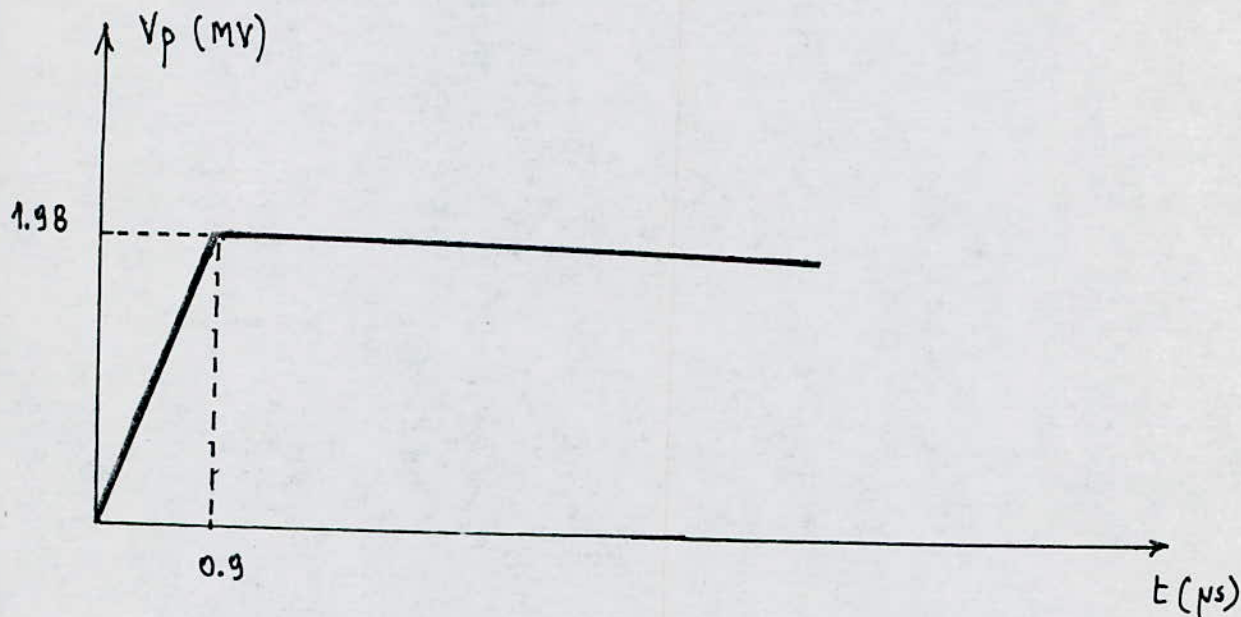
viii) Calcul de la nouvelle tension de crête V'_p de l'onde de foudre en tenant compte de son atténuation due à l'effet couronne.

$$V'_p = \frac{1}{2} Z'_c I_p \quad (35)$$

ix) Vérification si V'_p la tension de crête de l'onde

entraîne un contournement ou un claquage de la chaîne d'isolateurs en la comparant à V_c (tension de tenue au choc de la chaîne d'isolateurs).

Tracé de l'onde.



la pente du front est.

$$a_1 = \frac{V_p}{t_f} = 2.2 \text{ MV}/\mu s$$

la pente de la queue est.

$$a_2 = \frac{V_p/2 - V_p}{s_0 - t_f} = -0.020 \text{ MV}/\mu s$$

Caractéristiques de la ligne étudiée.

- SONEGAS.

Engineering: Réseau de haute tension.

Ligne Aïn Mila - EL Hassi.

Canton n° 1.

Numéro des pylônes : 22 - 23

Portée : 333.00 m

Dénivelée : 1.00 m.

- Conducteur. (ALU. acier).

Section : 411 mm²

rayon : 13.2 mm

tension admissible : 13.38 kg/mm² ; pds du givre : 4. kg/m

tension de pose : 4.25 kg/mm²

flèche (5°C) : 12.67 m.

- Cable de garde. (ALU. acier). ; pds du o

Section : 116.24 mm²

tension admissible : 20.93 kg/mm² ; pds du givre : 1.2 kg/m

tension de pose : 6.88 kg/mm²

flèche (5°C) : 10.99 m.

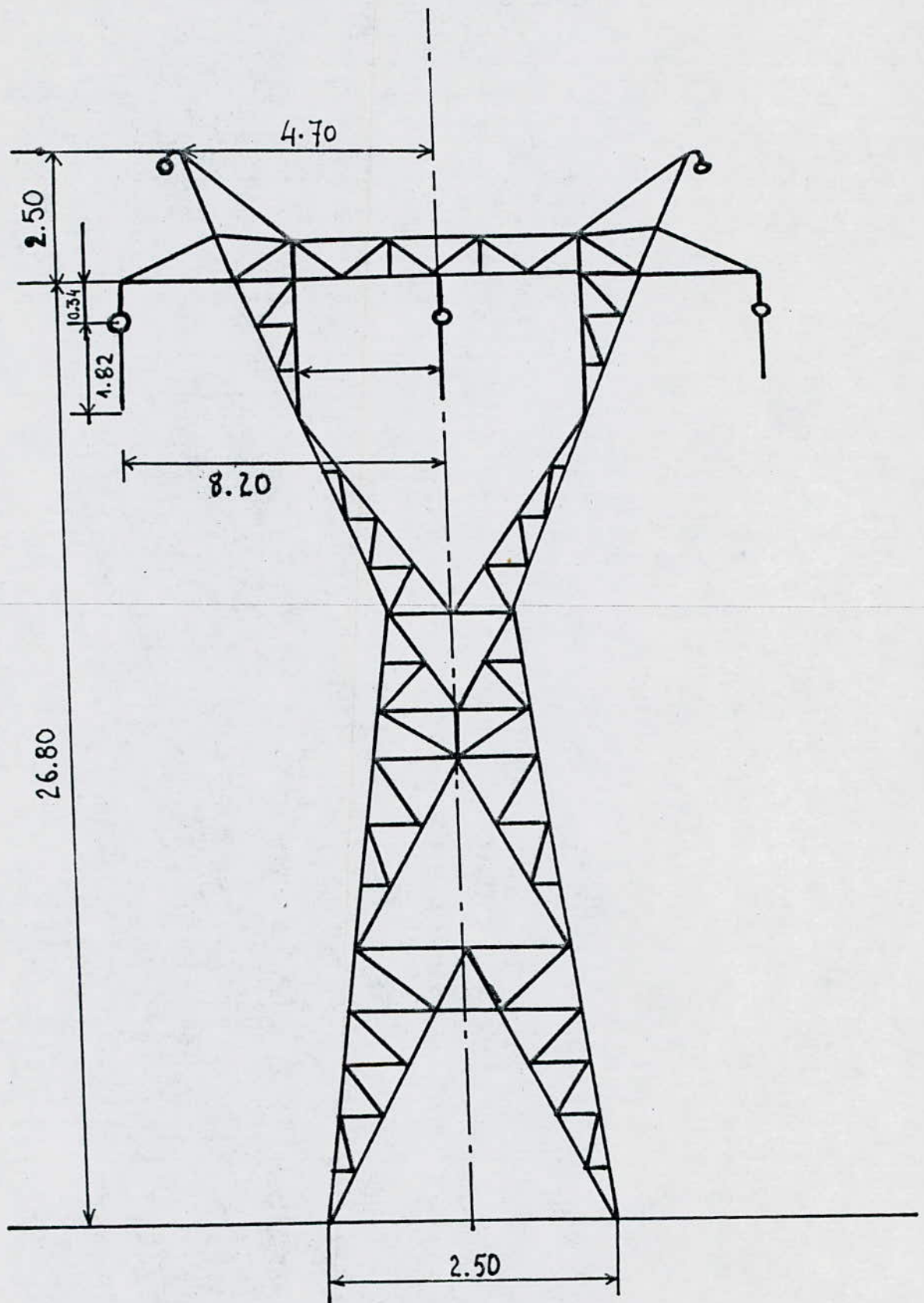


fig. III. 4 Pylône de 220 kV

III.6. Résultats.

Nombre de coups de foudre à la ligne.

Pas	Paramètres	Figures ou équations	Valeurs calculées		
			Total	cote gauche	cote droit
1	Niveau céramique T (journées d'orage par an)	Tab. 2 fig. II.1	30	-	-
2	N : nombre de coups de foudre à la terre (100 km/an)	Tab.1 éq. (1)	4,2	-	-
3	L ₀ : largeur de l'ombre électrique (m)	fig. II.3 éq. (2)	136,89	-	-
4	Y _G et Y _φ : hauteurs moyennes des câbles (m)	éq. (7) éq. (3) éq. (8)	-	Y _G = 23,95 Y _φ = 17,55	Y _G = 23,95 Y _φ = 17,55
5	N _L : nombre de coups de foudre à la ligne (100 km/an)	éq. (2) éq. (4)	57,49	-	-

Nombre de défauts d'écran (SFR)

	Paramètres	figures ou équations	Valeurs calculées		
			Total	côté gauche	côté droit.
6	α : angle de protection (degré)	fig. II.4.a - eq. (9) fig. III.4	28,67	28,67	28,67
7	SFR: (Nb de coups de foudre / 100 km/an)	eq. (10)	-	0.208	0.208
8	SFR total (Nb de coups de foudre / 100 km/an)		0,416		

S.F.O.

Pas	Paramètres	figures ou équations	valeurs calculées		
			Total	côté gauche	côté droit
9	Le conducteur Le plus exposé	fig. III. 4	-	cond. A	cond. C
10	V_c : tension criti- que de la chaîne d'isolateurs (MV)	éq. (18) fig. III.1.a ($t = 0,9 \mu s$)	-	2.12	2.12
11	r : Rayon du conducteur. (m)	page. 35		0.0132	0.0132
12	r_c : Rayon du conducteur sous l'effet couronne	fig. III.1.b ($E_0 = 15 \text{ kV/cm}$)	-	0.3	0.3
13	Z_c : impédance du cond. sous l'ef- fet couronne (Ω)	éq. (19)	-	367.7	367.7
14	I_{\min} : Courant mi- nimal contournant la chaîne d'iso- lateurs (kA)	éq. (14)	-	11.5	11.5
15	d_{\min} : distance d'amorçage mini- male associée à I_{\min} (m)	éq. (5)	-	47.89	47.89

Pas	Paramètres	figures ou équations	valeurs calculées		
			Total	côté gauche	côté droit
16	β : facteur de la ligne.		0.9	-	-
17	X_4 : coordonnée pour une protection efficace (m)	fig. II.4.b éq. (25)	-	3.39	- 3.39
18	α_e : angle de protection efficace (degrés)	fig. II.4.b éq. 26	-	27.91	27.91
19	$\alpha_s < \alpha_e$? Sinon, la ligne est mal protégée	Pas: 6 Pas: 18	-	non	non
20	X_s : largeur non protégée de cha- que côté de la li- gne (cm)	fig. II.4.a éq. (20)	-	0.361	0.361
21	d_{max} : distance d'émorçage maxima- le (m)	éq. (27). (28) fig. III.3	-	50.84	50.84
22	I_{max} : courant max. correspondant à d_{max} (kA)	éq. (5)	-	12.58	12.58
23	P_{min} : probabilité que I_{min} soit dé- passé	fig. III.2 éq. (30)	-	0.9294	0.9294
24	P_{max} : proba, que I_{max} soit dépassé	fig. III.2 éq. (30)	-	0.9125	0.9125

Pas	Paramètres	figures ou équations	Valeurs calculées		
			Total	côté gauche	côté droit.
5 25	SFO: Nb de coups de foudre entraî- nant un contour- nement per 100km per an.	éq. (29)	-	0.0012	0.0012
26	SFO total per 100km per an		0.0024		

Paramètres de l'onde de foudre.

Pas	Paramètres	figures ou équations	Valeurs calculées.		
			Total	côté gauche	côté droit
27	t_f : durée du temps de crête (μs)			0.9	0.9
28	$\frac{dV}{dt}$: Raideur de front. (kA/ μs)	fig. III.7		12	12
29	I_p : courant de crête en (kA)	fig. III.7	-	11	11
30	Z_c : impédance du conducteur sans effet couronne (Ω)	eq (32)	-	473	473
31	V_p : tension de crête (kV)	eq (33)	-	2.6	2.6
32	r : rayon du conducteur (m)	page: 35	-	0.0132	0.0132
33	r_c : rayon du con- ducteur sous l'effet couronne (m)	fig: III.1.b $E_0 = 15 \text{ kV/cm}$		0.35	0.35

Pas	Paramètres	Figures ou équations	Valeurs calculées		
			Total	côté gauche	côté droit
34	Z_c : l'impédance du cond. sous l'effet couronne (-2)	Pas. 32. Pas. 33 éq. (34).	-	361.7	361.7
35	Recalcul de V_p : tension de crête (nV)	Pas. 29 Pas. 34. éq. (35)		1.98	1.98
36	$V_p < V_c$?	Pas. 10 Pas. 35		oui	oui

Conclusion

On notera que la défaillance de l'effet d'écran est due à une disposition mal appropriée des câbles de garde. Doit à un choix inadéquat de l'angle de protection.

De plus les valeurs du SFR et du SFO calculées, bien que faibles, ne peuvent être négligées, car les risques encourus par les installations électriques au voisinage du point d'impact du coup de foudre sont énormes.

Comme le foudroiement d'un conducteur présente un intense effet couronne, qui a tendance à atténuer l'onde de foudre, et que le coût de pose de câbles de garde sur l'ensemble du réseau est très élevé, les compagnies d'électricité ne jugent nécessaire l'installation de ces câbles de garde que sur une certaine distance des postes de transformation.

Bibliographie

- Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions. Georges Le Roy, Claude Gary, Bernard Hutzler, Jacques La Lot, Christian Dubanton.
- Electric Power Systems. CL. Wadhwa.
- Protection contre la foudre 2F Franklin France.
- Formes des décharges glissantes sous tension de choc 4,2/50 ps sur les surfaces de diélectriques solides polués par le sable du SAHARA (Thèse ENP). M. Dobardzic
- Mécanisme des amorçages dus à la foudre sur les lignes de transport à Haute-Tension et sur les lignes de transport à Ultra-Haute-Tension. par D.W. Gilman, E. R. Whitehead ELECTRA n° 27 de mars 1973.
- Les cours de physique de Feynman (Tome II) Feynman/Leighton / Sands.
- Tour d'horizon de la CIGRE concernant les performances des lignes de transport à très haute tension, vis à vis des coups de foudre. ELECTRA n° 33 (mars 1974)
- Paramètres des coups de foudre par. K. Berger, R. B. Anderson, H. Kroninger. ELECTRA n° 47 (Juillet 75).
- Surtension de foudre sur les lignes de transport à haute tension. Recherche sur les caractéristiques de formes d'onde par A. J. Erikson ELECTRA n° 47 (Juillet 76)

— Gas insulated substation overvoltage stresses due to transmission line lightning shielding failure, by Mohamed Djaffar MAHFOUDI.