

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

(En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat)

S U J E T

Calcul Numérique des Tensions Induites par la
Foudre dans les Circuits du Centre de Calcul
de l'E. N. P.

Proposé par :

A. BOUBAKEUR

Etudié par :

Kamel HADIDI

Larbi BOUDJENAH

Dirigé par :

J. FERRAS

PROMOTION : JANVIER 1986

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

**Calcul Numérique des Tensions Induites par la
Foudre dans les Circuits du Centre de Calcul
de l'E. N. P.**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

...Tafat tsutur itij

Itij ne d asirem ...

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

—o§0o—  M E R C I E M E N T S —o§0o—

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mr A. B O U B A K E R et à Mme J. F E R R A S pour nous avoir prodigué d'utiles conseils et pour nous avoir dirigé tout le long de ce modeste travail.

Nous remercions également messieurs les membres du jury pour avoir bien voulu juger notre travail.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation trouvent ici l'expression de notre gratitude .

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

C H A P I T R E 1 : PHENOMENE DE DECHARGE DE Foudre

- 1.1 -- Généralités
- 1.2 -- Les phénomènes précurseurs
- 1.3 -- Mécanisme du coup de foudre
- 1.4 -- Point d'impact du coup de foudre
- 1.5 -- **Classification des coups de foudre**
- 1.6 -- Paramètres électriques de la foudre
- 1.7 -- Les effets d'un coup de foudre

C H A P I T R E 2 : PROTECTION CONTRE LA Foudre

- 2.1 -- Généralités
- 2.2 -- Niveau céramique
- 2.3 -- Densité de coups de foudre au sol
- 2.4 -- Fréquence de foudroiement d'un objet au sol
- 2.5 -- Paratonnerre
- 2.6 -- Mécanisme d'impact et modèle électrogéométrique
- 2.7 -- Zones de protection de différent paratonnerres

C H A P I T R E 3 : TENSION INDUITE PAR UN COURANT DE Foudre

- 3.1 -- Introduction
- 3.2 -- Induction magnétique produite par un courant fini
- 3.3 -- Tension induite dans un boucle rectangulaire
- 3.4 -- **Méthodes numériques**

C H A P I T R E 4 : APPLICATION DU CALCUL NUMERIQUE DE LA TENSION INDUITE
AU CENTRE DE CALCUL DE L'E.N.P

- 4.1 -- Présentation du centre de calcul
- 4.2 -- Algorithme de calcul
- 4.3 -- Précision de calcul
- 4.4 -- Organigramme
- 4.5 -- Programme en BASIC
- 4.6 -- Résultats de calcul

-o0\$0o- INTRODUCTION -o0\$0o-

La foudre est l'un des grands phénomènes naturels à la fois merveilleux par ses cortèges lumineux et redoutable à cause de son atteinte qui est toujours fatale.

On savait apparemment depuis très longtemps que la foudre frappe les objets élevés. Il y a une citation d'Arbatane, qui date de 2300 ans, qui dit: "vois comme la divinité frappe de la foudre les animaux de grande taille sans permettre qu'ils en fassent parade, tandis qu'elle n'en veut nullement aux petits; vois comme elle lance ses traits contre les édifices les plus hauts et les arbres les plus élevés". On expliquait cela en pensant que la divinité aime rabaisser tout ce qui s'élève.

Grâce aux observations, expériences et calculs qui se poursuivent toujours afin d'éclairer au mieux le mystère qui entoure ce phénomène, on sait bien maintenant pour quelles raisons et dans quelles circonstances la foudre constitue un danger sérieux.

C'est ainsi que des systèmes de protection ont vu le jour pour épargner à l'homme et aux installations importantes les méfaits qui accompagnent souvent un coup de foudre.

Ces systèmes comprennent les câbles de garde et les parafoudres pour la protection des lignes de transport d'énergie électrique et les paratonnerre pour la protection des bâtiments.

Le matériel électronique étant d'une grande sensibilité, celui-ci doit être particulièrement protégé contre les perturbations électromagnétiques générées par la foudre.

Nous nous proposons dans ce projet de mettre en évidence ce danger en calculant numériquement la surtension induite par le champ magnétique d'un courant de foudre dans le circuit électrique du centre de calcul de l'E.N.P.

Ce calcul est précédé par l'étude du phénomène de foudre et des moyens de protection contre son atteinte.

CHAPITRE I

PHENOMENE DE DECHARGE DE FOUDRE

1.1 GENERALITES:

La foudre est un phénomène à caractère électrique lié à la présence de charges électriques à l'intérieur de nuages orageux.

1.2 LES PHENOMENES PRECURSEURS:

Par beau temps, le globe terrestre est chargé négativement par un phénomène d'influence produit par la couche ionisée de HEAVISIDE (fig.1).

Cette couche est générée par le vent solaire et se trouve à une altitude moyenne de 100 km du sol.

Le champ électrique normal E_t à la surface de la terre est de l'ordre de 100 à 400 V/m /1/.

Nuage orageux: C'est un "CUMULO-NIMBUS" qui s'étend sur plusieurs km². Sa base est à environ deux km du sol et se développe en hauteur jusqu'à des altitudes de 10 à 15 km. Dans la plupart des cas, la partie supérieure d'un nuage orageux est constituée de cristaux de glace chargés positivement, alors que sa partie inférieure est constituée de gouttelettes d'eau chargées négativement /2/.

La polarisation d'un tel nuage est représentée sur la fig.(2a). C'est une structure qui se présente dans 80 à 90% des cas en zone tempérée.

Sous l'influence de la base du nuage chargé négativement, la partie du sol située sous le nuage se charge positivement, alors que le reste du globe garde sa charge négative. Le champ électrique au sol est représenté sur la fig.(2.b) /1/.

1.3 MECANISME DU COUP DE FOUDRE:

Pour l'oeil nu, la foudre apparaît comme un simple canal lumineux reliant le nuage à la terre

La mise au point d'appareils photographiques ultra-rapides a permis d'observer les différentes étapes du développement du coup de foudre (fig.3. et fig.4).

1.3.1 Phénomène de traceurs par bonds: Stepped leader

C'est une précharge faiblement lumineuse qui se propage d'un point de la base du nuage, où le champ électrique a atteint le seuil d'ionisation de l'air, vers le sol.

Cette propagation se fait par bonds de 50m environ, séparés par des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 μ s.

Au fur et à mesure qu'ils progressent , ils se ramifient et la luminosité du chemin ionisé s'accroît. Dès que celui-ci approche le sol , des prédécharges ascendantes se développent à partir d'une saillie dans la direction du traceur, il s'agit du traceur d'interception (Connecting leader).

1.3.2 Décharge de foudre principale : Return stroke

Au moment où les deux traceurs se rejoignent , il s'établit un court-circuit entre le nuage et la terre permettant la circulation d'un courant de forte intensité. Ce courant est constitué par les charges superficielles positives induites au sol qui , en remontant le canal ionisé , neutralisent les charges négatives du traceur. On observe alors un trait fortement lumineux qui progresse depuis le sol jusqu'au nuage à une vitesse de $50 \cdot 10^6$ m/s : Il s'agit du return stroke.

Lorsque le courant de la première décharge a cessé de s'écouler , environ 10 à 300 ms plus tard , une seconde décharge apparaît sous forme d'un leader qui progresse d'une façon continue à une vitesse de 10^6 m/s en empruntant le canal du traceur par bonds : c'est le dart leader. Il est suivi d'un return stroke.

En général , un coup de foudre dure de 0,2 à 1 s et comporte en moyenne quatre décharges successives /1;2;3;4/.

1.4 POINT D'IMPACT DU COUP DE Foudre:

C'est le point à la surface de la terre sur lequel la foudre va tomber. Suite aux observations de K. Berger au mont San Salvatore en Suisse , il a été constaté qu'il existe des zones localisées particulièrement foudroyées dites "nids ou greniers d'orage". Ce fait est dû à des facteurs topographiques et géologiques .

Le développement de la décharge ascendante (décharge de capture) est d'autant plus aisé que l'objet qui en est le siège (point d'impact) est peu résistant puisqu'elle appelle un courant de forte intensité , ce qui explique l'effet préférenciel des nappes d'eau et des terrains humides.

1.5 CLASSIFICATION DES COUPS DE Foudre:

On distingue quatre catégories de foudres définies selon l'origine du traceur principal et sa polarité.

Le coup de foudre est ascendant s'il se développe à partir du sol . Il a lieu en présence d'aspérités naturelles (Montagnes , collines) ou artificielles (Bâtiments , pylones) .

Le coup de foudre est descendant si le traceur principal prend naissance à partir de la base du nuage . Il a surtout lieu dans les plaines . La polarité du coup de foudre est celle du traceur principal . Le signe du courant de foudre est le même que celui de la charge de la base du nuage (fig.5).

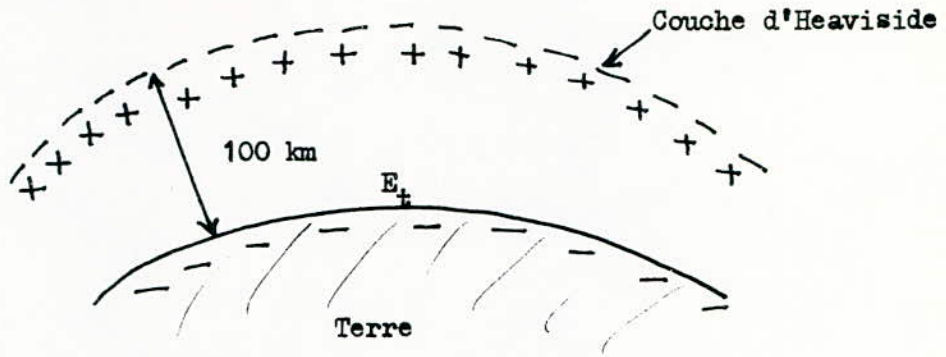


Fig.1

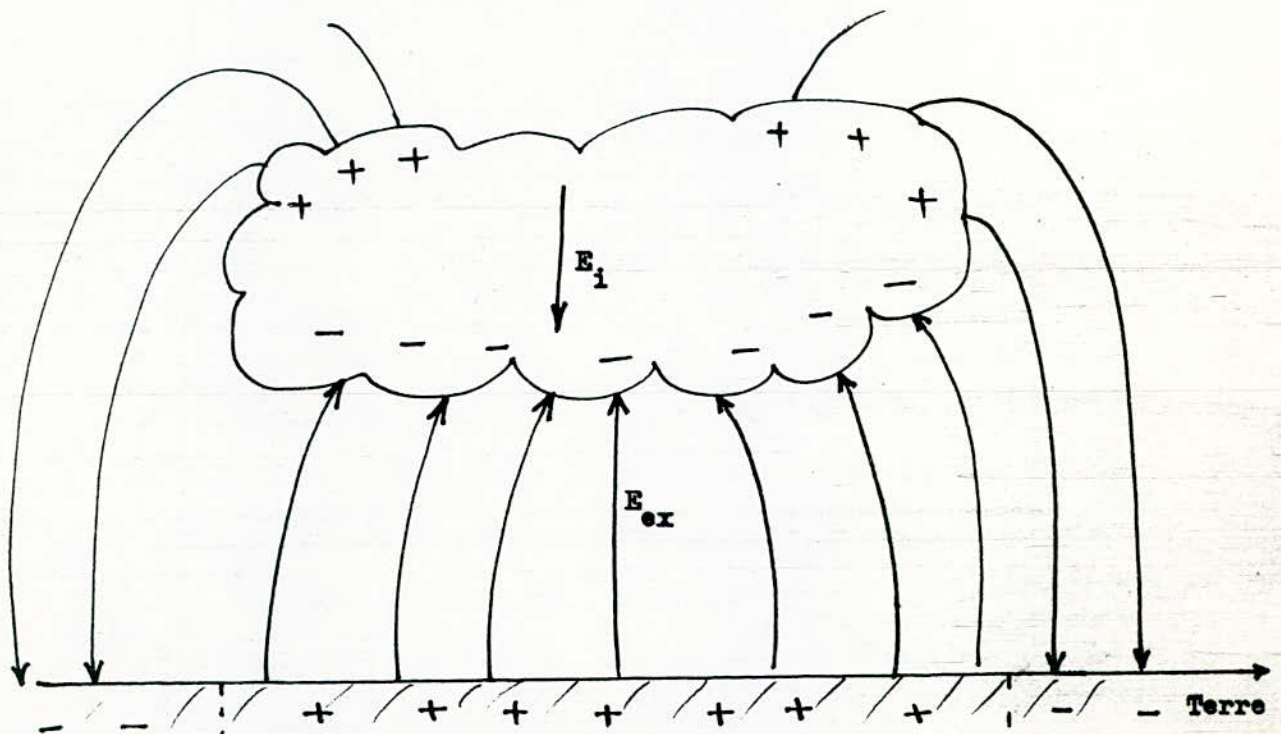


Fig.2a- Polarisation d'un nuage orageux.

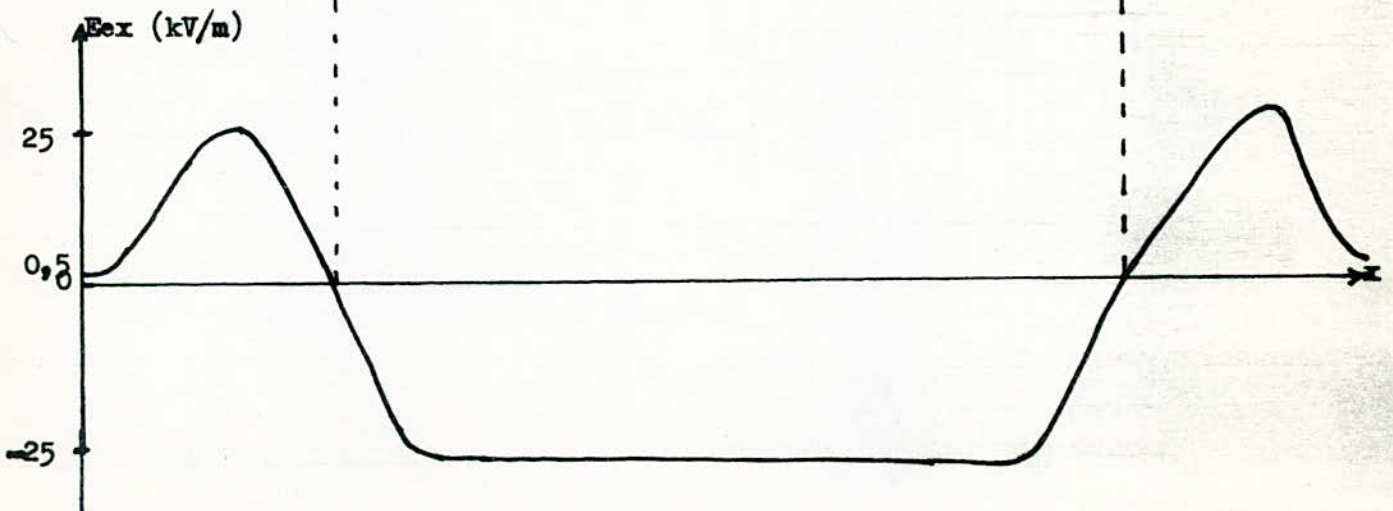


Fig.2b- Champ électrique engendré au niveau du sol durant un orage.

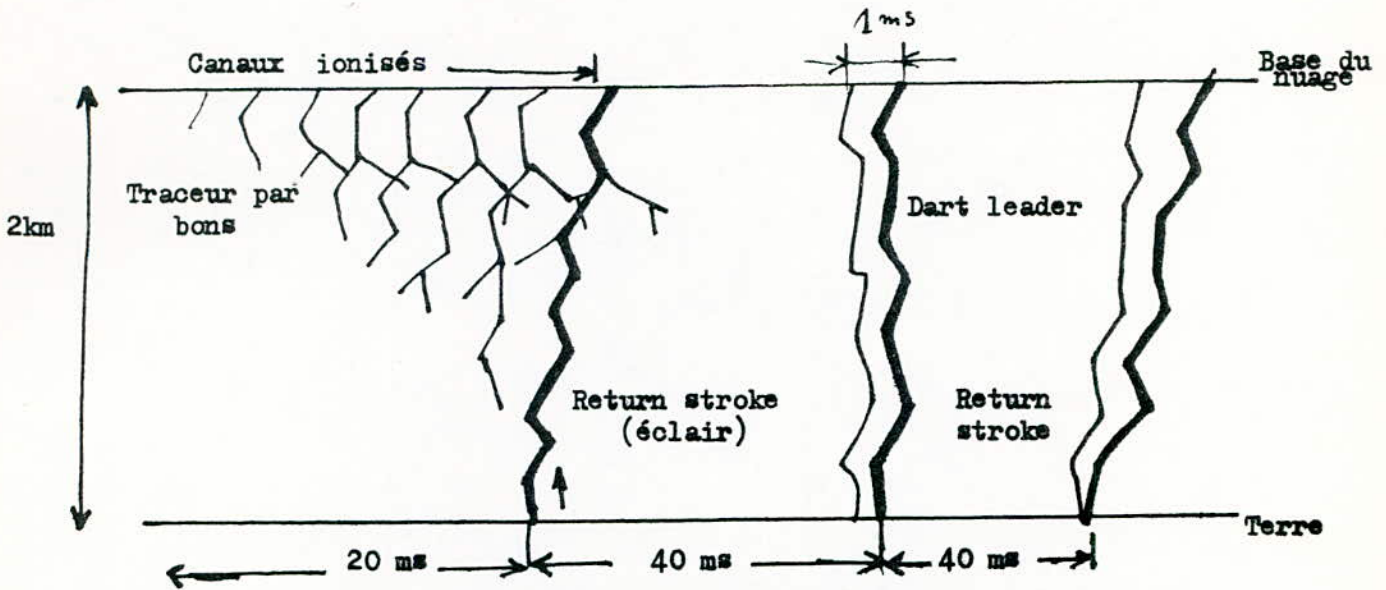


Fig.3- Aspect dynamique d'un coup de foudre descendant /1/.

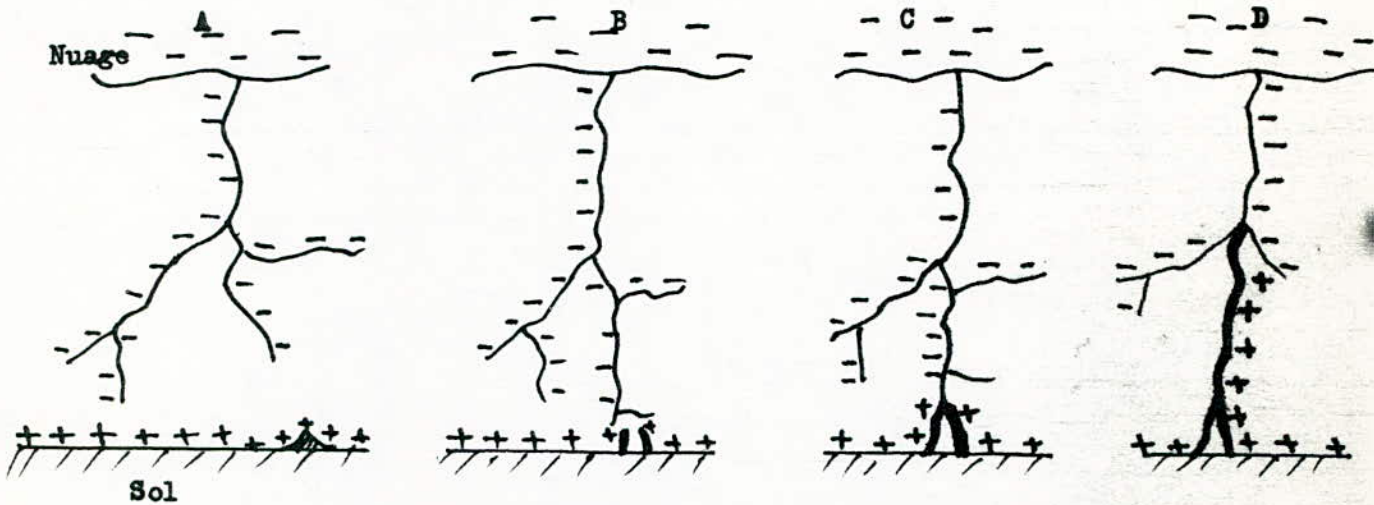
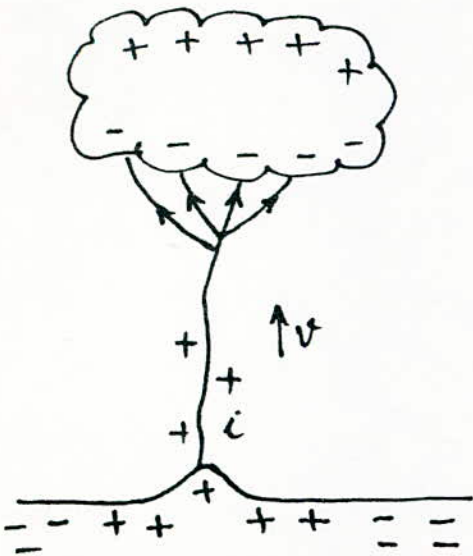


Fig.4- Schéma de l'amorce et du développement du 1^o return stroke /2/.

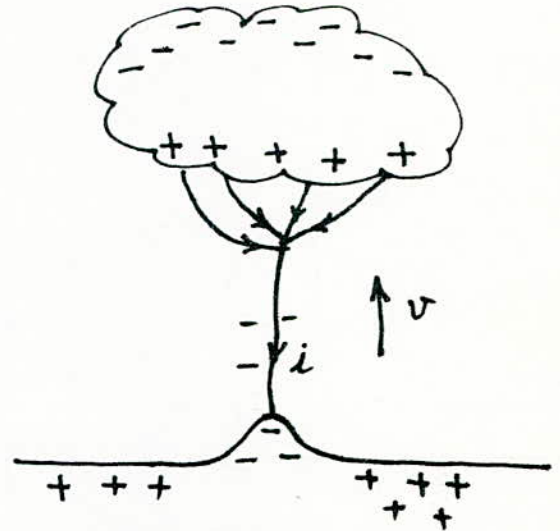
A: Canal d'ionisation ramifié

B: L'abaissement de la colonne négative provoque des des amorces positives au sol.

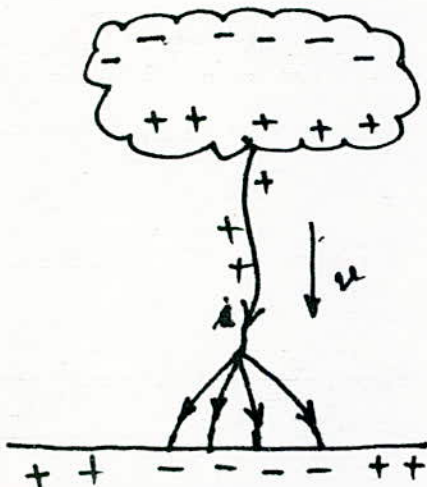
Cet D: Contact établi; Précipitation des chages positives du sol dans le canal.



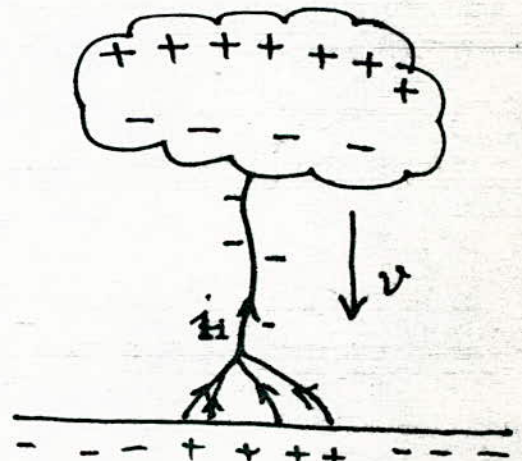
a) Foudre ascendante positive .
(courant de foudre négatif)



b) Foudre ascendante négative .
(courant de foudre positif)



c) Foudre descendante positive .
(courant de foudre positif)

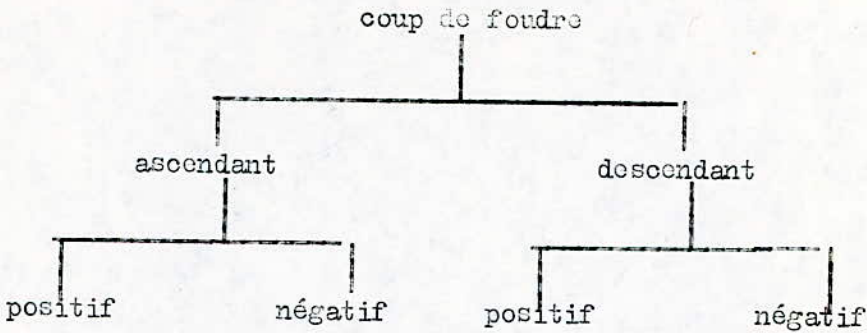


d) Foudre descendante négative .
(courant de foudre négatif)

Fig.5- Types de coups de foudre /1/.

v désigne la vitesse de propagation du canal ionisé.

i désigne le courant de foudre .



1.5 PARAMETRES ELECTRIQUES DE LA Foudre:

Les mesures faites dans les stations expérimentales ont permis d'établir des courbes donnant la forme et la distribution des paramètres électriques de la foudre.

Les principaux paramètres caractérisant la foudre sont:

1.6.1 Intensité de crête du courant:

C'est la plus grande valeur atteinte par le courant lors d'une décharge de foudre.

Des expressions analytiques sont proposées pour le calcul de la probabilité globale qu'a un courant de foudre de dépasser une crête donnée.

a) Selon les Russes /2/

$$\text{Log } \varphi_T = 2 - I/60 \tag{1}$$

Avec φ_T : probabilité globale en %

I Crête de courant en kA

b) Selon Popolansky /12/

$$\varphi(I) = \frac{I}{\sigma_{\log I} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\log I} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log I - \log \bar{I}}{\sigma_{\log I}} \right)^2 \right] d(\log I) \tag{2}$$

Avec I: Crête de courant en kA

$\bar{I} = 25 \text{ kA}$

$\sigma_{\log I} = 0,39$

La fig.(6) nous donne la distribution des amplitudes des courants de foudre positifs et négatifs à partir de résultats obtenus au mont SAN SALVATORE en Suisse /1/.

La courbe (3) (en pointillé) donne la probabilité globale de distribution des amplitudes des courants de foudre. C'est la courbe souvent utilisée pour l'exécution des calculs.

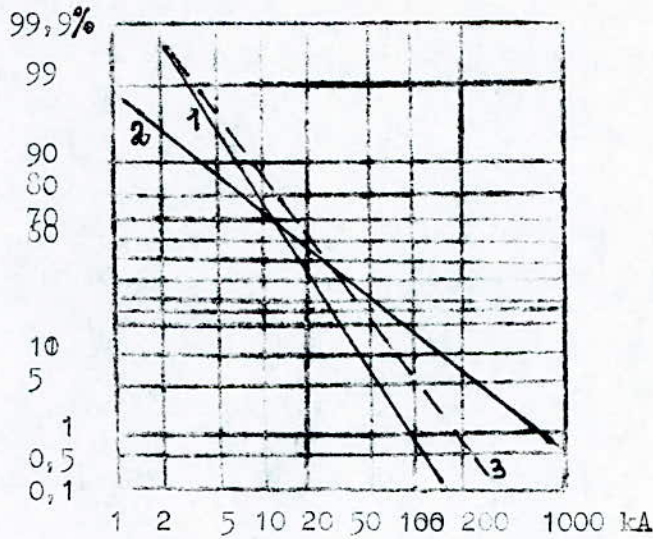


Fig.6 DISTRIBUTION DES AMPLITUDES DES COURANTS DE Foudre

- (1) -- Courants de foudre négatifs
- (2) -- Courants de foudre positifs

Forme des courants de foudre :

Les formes moyennes des courants de foudre varient en fonction de la polarité.

a) Courants négatifs : (Courants Terre- Nuage); ils représentent 80% des cas en zone tempérée . La valeur de crête de la première décharge est supérieure à celle de la décharge secondaire fig (7 , a et b).

b) Courants positifs (Courant Nuage - Terre) ; ils représentent 20% des cas en zone tempérée , ils sont constitués d'une seule décharge d'assez longue durée (0,1 à 0,2 s) et peuvent atteindre de très fortes intensités fig (7.c)

1.6.2 Pente du courant de foudre:

C'est la vitesse de montée du courant de foudre. Elle représentée par le rapport di/dt en $kA/\mu s$.

La distribution des pentes des courants de foudre est représentée sur la figure (8)

1.6.3 Charge du courant de foudre:

C'est la quantité de charge totale neutralisée durant le coup de foudre. Elle s'exprime par l'intégrale $\int_0^{t_f} i dt$ en Coulomb où t_f est la durée totale du courant i .

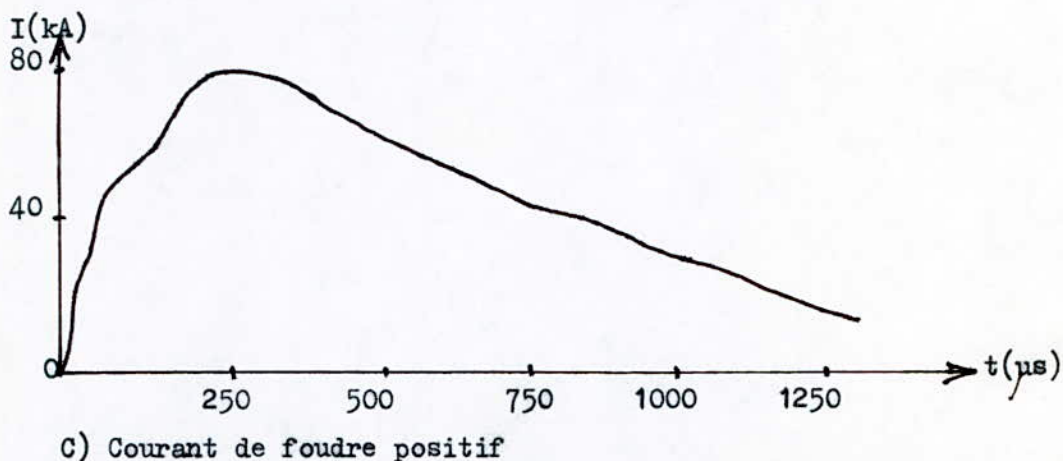
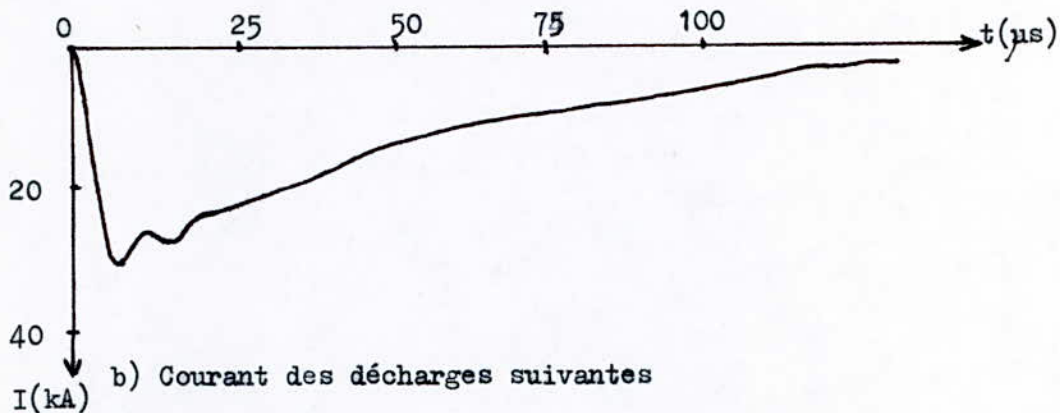
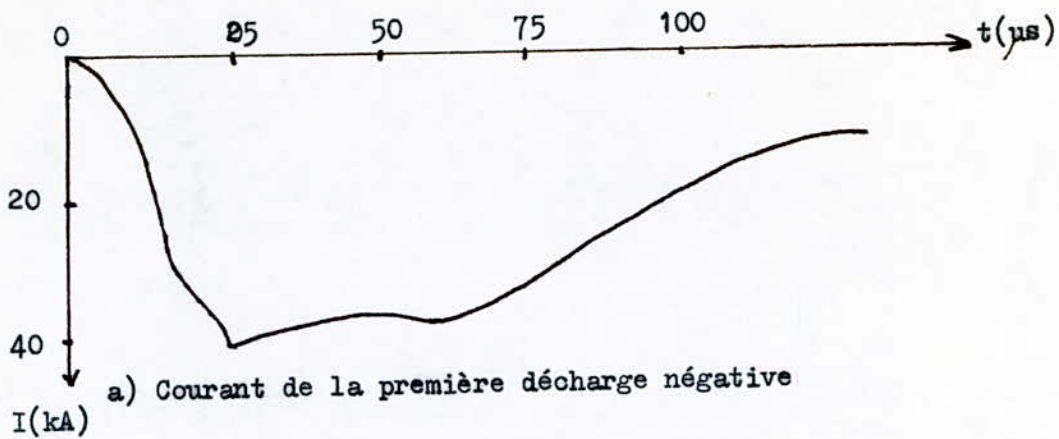


Fig.7- Formes d'onde des courants de foudre enregistrées par K.Berger/

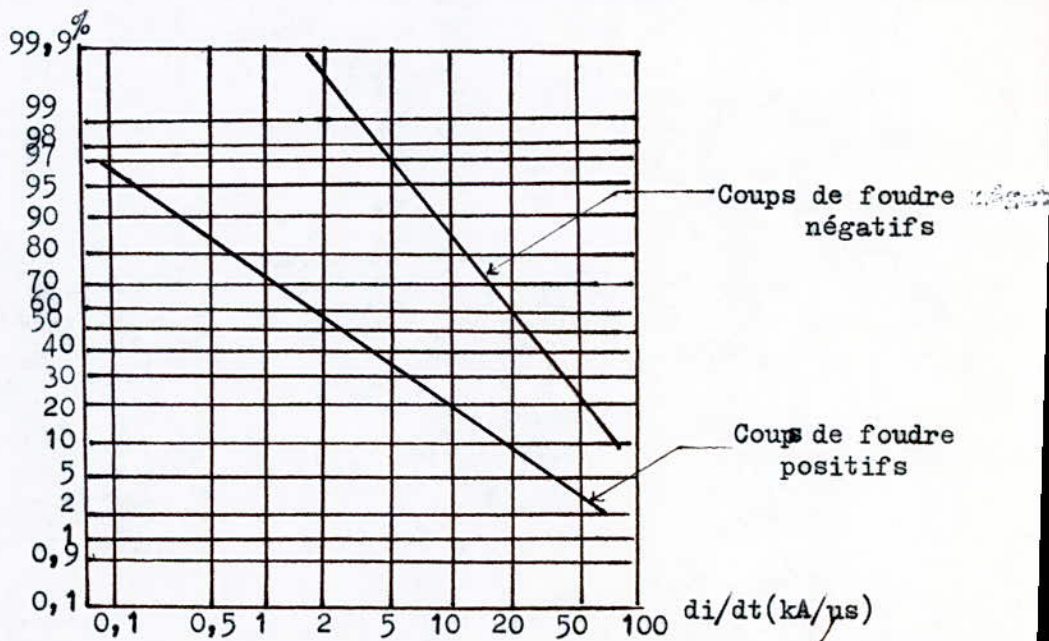


Fig.8 - Distribution des pentes des courants de foudre: résultats obtenus au Mont SAN SALVATORE en Suisse /1/.

1.6.4 Intégrale d' action :

Elle s'exprime par l'impulsion du carré du courant de foudre

$$\int_0^{t_f} i^2 dt \quad \text{en } kA^2.s$$

Elle représente l'énergie qui serait dissipée dans une résistance de 1 Ohm .

1.7 LES EFFETS D'UN COUP DE Foudre :

Les effets d'un coup de foudre , liés aux caractéristiques du courant de foudre sont du type: Thermique , Dynamique , Electromagnétique , Acoustique et Chimique.

1.7.1 Les effets thermiques:

a) Les effets dus à la quantité de charge $Q = \int i dt$; Ces effets sont caractérisés par la fusion des conducteurs au point d'entrée du courant de foudre que l'on désigne par " traces d'impact " . Cette fusion qui peut aller jusqu'à la perforation dans le cas de pôles minces est fonction de la quantité de charge injectée par la foudre.

b) Les effets dus à l'intégrale d'action $\int i^2 dt$; l'énergie libérée sous forme de chaleur dans une charge située au point de chute de la foudre si l'on connaît sa résistance équivalente , est donnée par l'intégrale d'action :

$$W = R . \int_0^{t_f} i^2 dt$$

Si la résistance R est assez grande , l'énergie W peut se traduire par la fusion du métal ; pour cela il faut veiller dans les installations de protection à ce que le raccordement des différents contacts soit très bon .

Des éclatements d'allure explosive sont constatés dans des endroits humides (Arbres , mâts en bois , etc ...). Cela est dû à la vaporisation de l'eau et à la surpression qui en résulte.

1.7.2 Les effets dynamiques :

Si le conducteur de la descente du paratonnerre contourne un obstacle ou passe à proximité d'un autre conducteur parcouru par un courant , les efforts mécaniques importants apparaissent pouvant même arracher les conducteurs ou les faire entrechoquer.

D'autres effets dynamiques peuvent résulter de l'élévation de température , donc de pression dans le milieu concerné.

1.7.3. Les effets électromagnétiques:

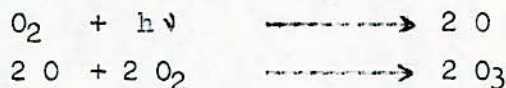
Les ondes électromagnétiques à large spectre de fréquence (kHz à MHz) générées par la foudre provoque des perturbations radiophoniques .

Cet effet a permis la mise au point de compteurs de coups de foudre qui traduisent par l'intermédiaire d'une antenne, le rayonnement électromagnétique des éclairs sous forme d'impulsions de comptage.

Un autre effet lié au champ magnétique du courant de foudre est l'apparition de tensions induites dans une boucle se trouvant à proximité du canal de foudre. Cette boucle peut être constituée par un circuit électrique ce qui provoquera la circulation d'un courant induit et par conséquent, une perturbation au niveau de la charge alimentée par ce circuit.

1.7.4 Les effets électrochimiques :

La décharge de foudre libère assez d'énergie pour que l'oxygène se trouvant dans l'air se transforme en ozone suivant la relation:



h : Constante de Planck

ν : Fréquence de l'onde lumineuse.

1.7.5 Les effets acoustiques : (Le tonnerre):

Le passage du courant de foudre augmente considérablement la température, et par conséquent la pression de l'air se trouvant dans le canal de foudre. À la fin de la décharge, cet air se répand dans l'atmosphère environnante en produisant une onde de choc.

D'autres effets indirects peuvent se produire; en effet, si la foudre "tombe" à proximité d'un objet métallique non relié à la terre, ce dernier se charge par influence et forme un condensateur avec la terre, ce qui peut provoquer une décharge entre cet objet et la terre.

C H A P I T R E 2

--oOo-- PROTECTION CONTRE LA Foudre --oOo--

2.1 GENERALITES:

La protection d'un édifice contre la foudre a pour but d'éviter l'apparition de différences de potentiel dangereuses pour les personnes ou susceptibles de provoquer, par la création d'arcs, d'importants dégâts ou un incendie.

Une méthode mise en oeuvre au moyen d'un modèle mathématique permet de déterminer la zone de protection d'une tige verticale ou de fils tendus horizontalement. Elle permet également de déterminer la taille maximale des mailles d'une cage.

L'étude d'un système de protection contre la foudre nécessite la connaissance statistique de la probabilité de chute de la foudre sur une installation donnée. Pour cela, on doit connaître les importants paramètres cités ci-dessous.

2.2 NIVEAU KERAUNIQUE (N_k) :

C'est une notion qui caractérise la sévérité orageuse d'une région. Elle est définie comme le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu au moins une fois en un lieu donné. C'est une notion subjective puisqu'elle dépend du niveau de bruit de fond régnant au lieu d'observation /1/.

2.3 DENSITE DE COUPS D Foudre AU SOL (N_s) :

Elle peut être calculée à partir de résultats fournis par des compteurs de coups de foudre C I G R E. Mais comme l'utilisation de ceux-ci n'est pas répandue, on l'estime par la formule expérimentale suivante :

$$N_s = N_k / 7 \quad 1/\text{km}^2.\text{année} \quad /1/$$

2.4 FREQUENCE DE FOUROIEMENT D'UN OBJET AU SOL (N_g) :

Elle est estimée par la formule :

$$N_g = N_s.(S.10 + K1.B.10 + K2) \text{ coups par an } /6/$$

- N_s : Densité des coups de foudre de la région coups / km².année
S : Surface du toit de l'édifice m²
B : Circonférence du toit m
K1 ; K2 : Facteurs dépendant de la hauteur de l'édifice, donnés par la figure 9.

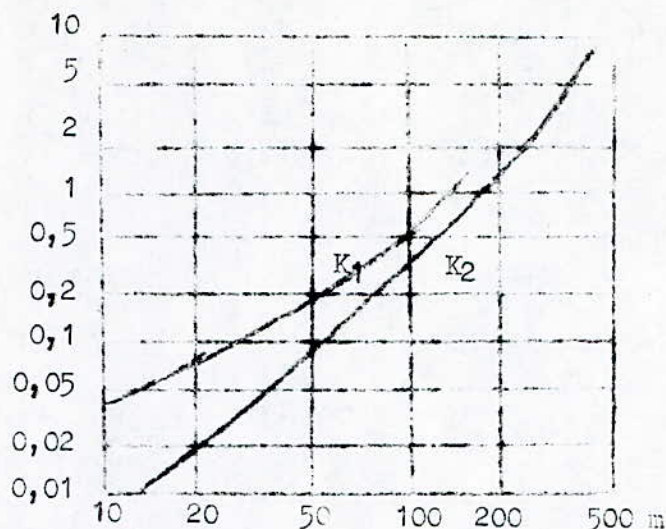


Fig.9 -- abaque donnant les valeurs de K_1 et K_2 en fonction de la hauteur de l'édifice /6/.

2.5 PARATONNERRES:

2.5.1 Introduction

La nécessité de munir une structure d'un paratonnerre est dictée par la fréquence de foudroiement qu'elle présente et par l'importance des dégâts éventuels que pourrait occasionner un coups de foudre.

2.5.2 Constitution d'un paratonnerre

Il est constitué de 3 parties essentielles.

1- Les organes capteurs:

Ce sont des tiges verticales ou des fils tendus horizontalement placés sur les points hauts du bâtiment. Leur rôle est d'intercepter la foudre.

2- Conducteurs de descente:

Ce sont des conducteurs de grande section qui véhiculent le courant de foudre vers la terre. Ils doivent suivre le parcours le plus rectiligne possible et le plus court possible pour éviter des amorçages d'arcs lors de contournements d'obstacles et rester maître du trajet du courant .

3- Les prises de terre:

Elles sont constituées soit d'un grillage, soit de piquets verticaux enfoncés dans le sol à une certaine profondeur. La prise de terre a pour rôle de disperser le courant de foudre dans la terre sans présenter de danger pour les personnes ou le matériel.

La prise de terre doit présenter la résistance la plus faible possible au courant de choc de foudre /2/.

2.6 MECANISME D'IMPACT ET MODELE ELECTROGEOMETRIQUE :

2.6.1 Distance d'amorçage :

La progression du traceur par bond du nuage vers la terre augmente l'intensité du champ électrique au sol. La distance séparant la pointe du traceur du sol à l'instant où le champ électrique au sol atteint une valeur critique (valeur suffisante pour le développement de décharges ascendantes ou de capture) est appelée distance d'amorçage. Celle-ci dépend uniquement de la quantité de charge portée par le traceur. Il a été montré que cette quantité de charge est fonction du courant de crête du coup de foudre /1/; /7/ .

En tenant compte de ce qui a précédé, une expression analytique de la distance d'amorçage en fonction du courant de crête de la première décharge a été établie /2,7/.

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

d: distance d'amorçage en m

I: courant de crête en kA

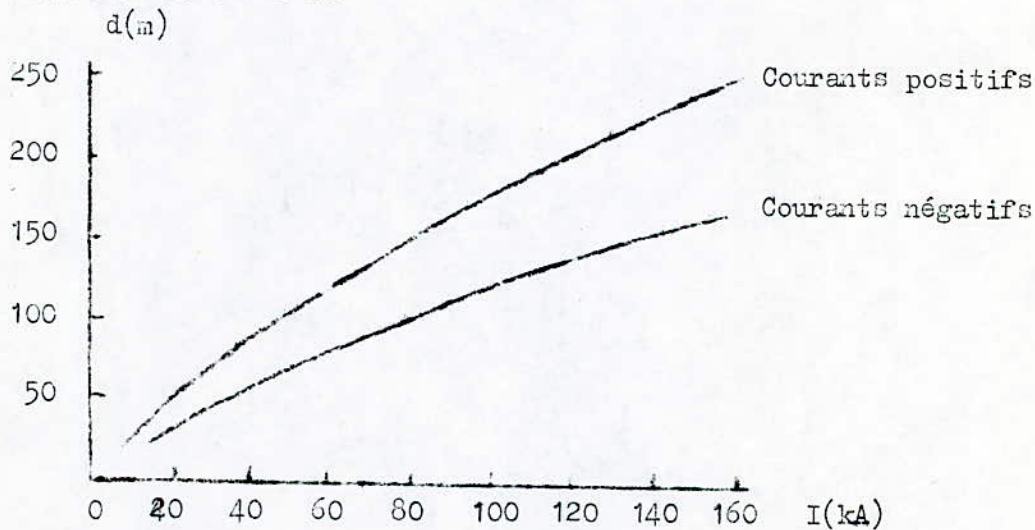


Fig.10 - variation de la distance d'amorçage en fonction du courant de crête /7/.

2.6.2 Modèle électrogéométrique:

Selon le modèle électrogéométrique, le point d'impact de la foudre se détermine par l'objet au sol qui se trouvera le premier à la distance d'amorçage du traceur descendant même si cet objet est le sol lui-même.

Le principe de cette méthode considère que la pointe du traceur est le centre d'une sphère fictive dont le rayon est la distance d'amorçage "d".

Ainsi, pour déterminer la zone que protège un paratonnerre, on imagine que cette sphère roule sur le sol dans toutes les directions. Si au cours de son mouvement, la sphère entre en contact avec le dispositif de protection sans jamais toucher l'objet à protéger, alors la protection de celui-ci est assurée.

2.7 ZONES DE PROTECTION DE DIFFERENTS PARATONNERRES :

2.7.1 Zone de protection d'une tige verticale de hauteur h :

Deux cas sont à considérer:

a) $h < d$ d étant la distance d'amorçage (fig; 11)

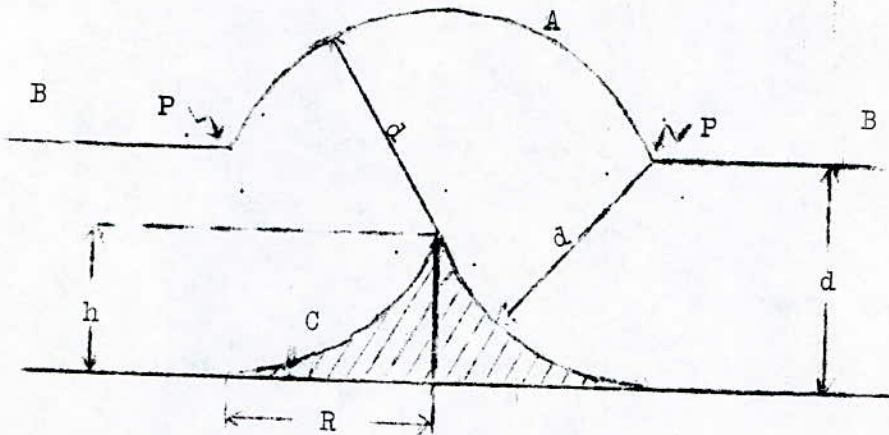


fig.11-a -Zone de protection d'une tige verticale avec $h < d$ /8/.

Si la pointe du traceur pénètre dans la surface limite (A), il sera capté par la pointe de la tige du paratonnerre; s'il pénètre dans la surface limite (B), le coup de foudre se produira au sol. Si la pointe du traceur se présente aux points critiques P (points de contact des surfaces (A) et (B)), l'ensemble des points d'impact du coups de foudre sera constitué par la surface (C) qui délimite la zone de protection du paratonnerre (domaine hachuré sur la figure 11a).

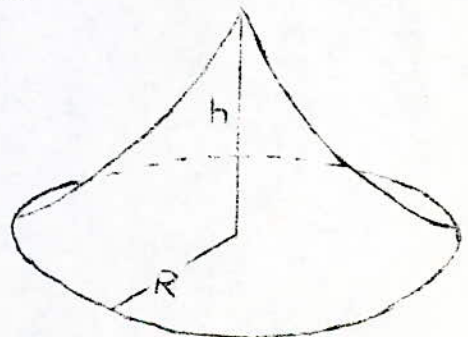
R est le rayon de la surface au sol protégée par le paratonnerre (fig.11b).

$$R = (2dh - h^2)^{1/2}$$

La hauteur optimum de la tige pour une distance d'amorçage donnée est donnée par la résolution de l'équation suivante:

$$\frac{dR}{dh} = 0 \Rightarrow h = d$$

Fig.11b



b) $h > d$

De la même manière que dans le cas précédent, on trace la figure 12.
Le rayon R protégé au sol est dans ce cas:

$$R = d$$

On voit que la hauteur de la tige n'a plus d'effet sur la zone de protection quand le courant de foudre est petit.

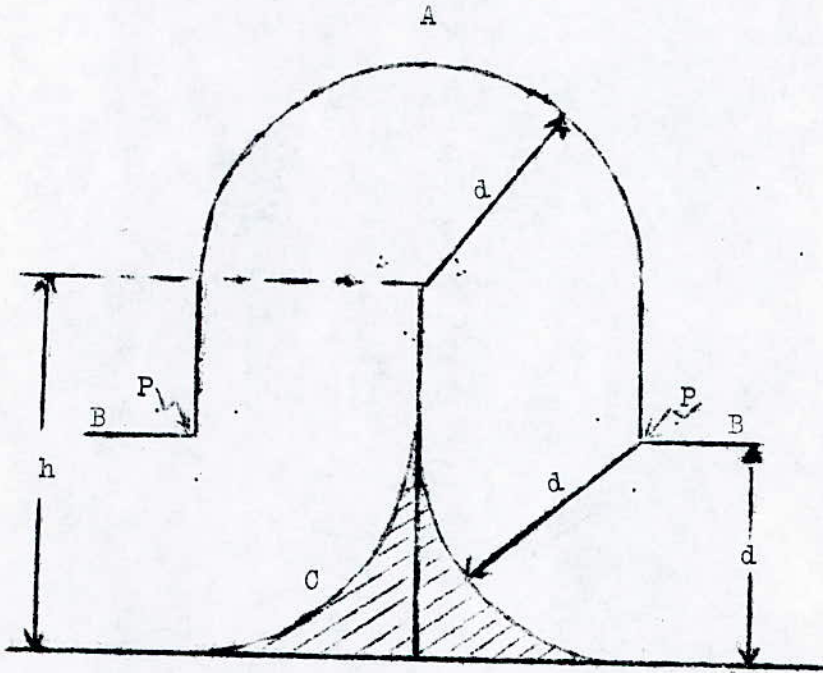


Fig.12- Zone de protection d'une tige verticale avec $h > d/8$.

2.7.2 Zone de protection de deux tiges verticales :

Soit D la distance entre les deux tiges et h leur hauteur commune.

Pour que ces deux tiges n'aient pas une action indépendante, il faut que $D < 2d$ où d est la distance d'amorçage (fig.13).

On considère le cas $h < d$

La hauteur H protégée au sol vaut:

$$H = d - \sqrt{(d-h)^2 + (D/2)^2}$$

2.7.3 Zone de protection d'un conducteur tendu horizontalement :

On considère le cas où $h < d$

La construction géométrique de la zone de protection est représentée sur les figures (14.a et 14.b)

La distance horizontale R protégée au sol vaut :

$$R = \sqrt{2 \cdot d \cdot h - h^2}$$

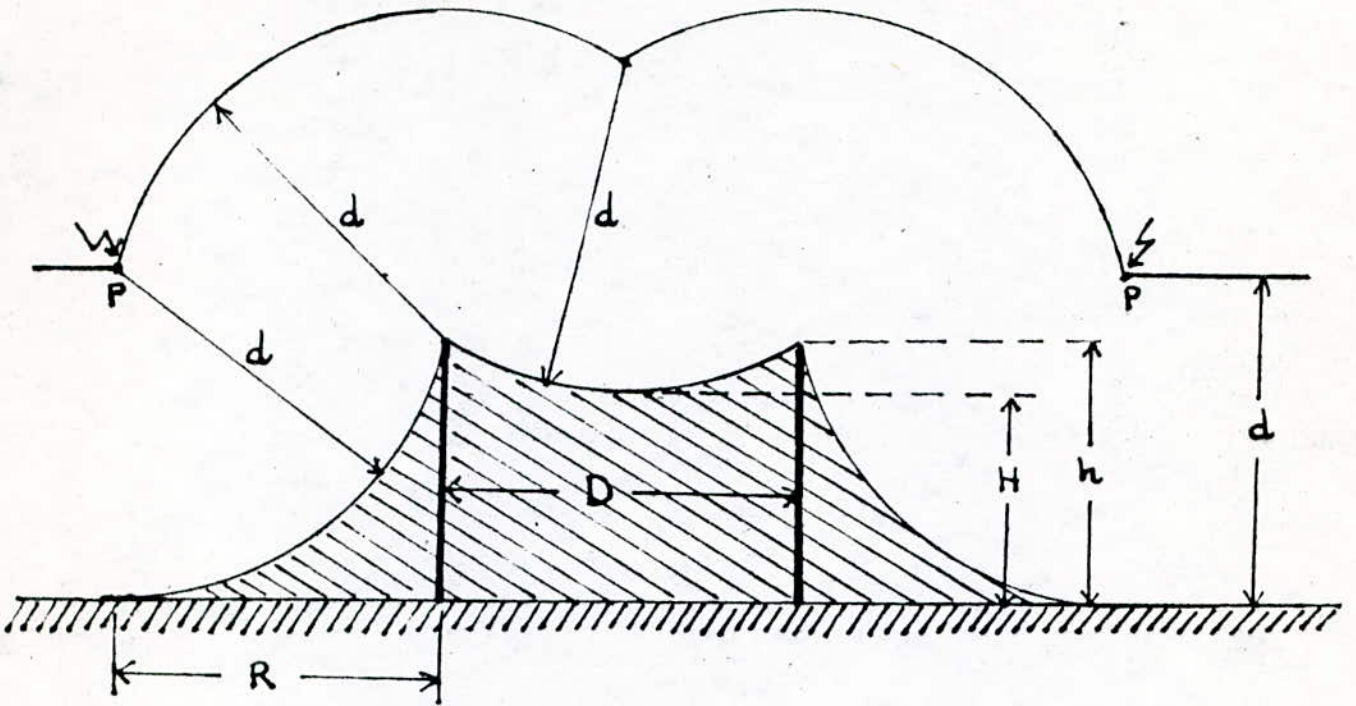
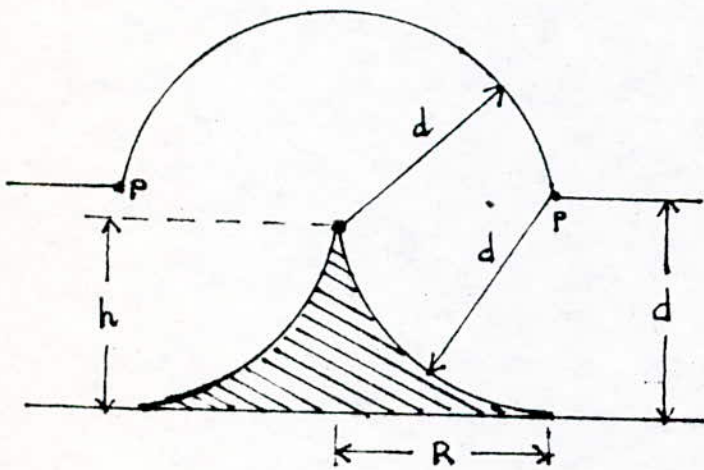
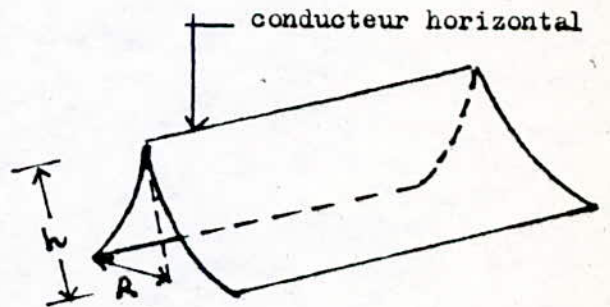


Fig.13 - Zone de protection en coupe de deux tiges verticales ($h < d$)



(a)



(b)

Fig.14 - Zone de protection d'un conducteur tendu horizontalement.

CHAPITRE 3

-oO-TENSION INDUITE PAR UN COURANT DE FOUDRE-oO-

3.1 Introduction :

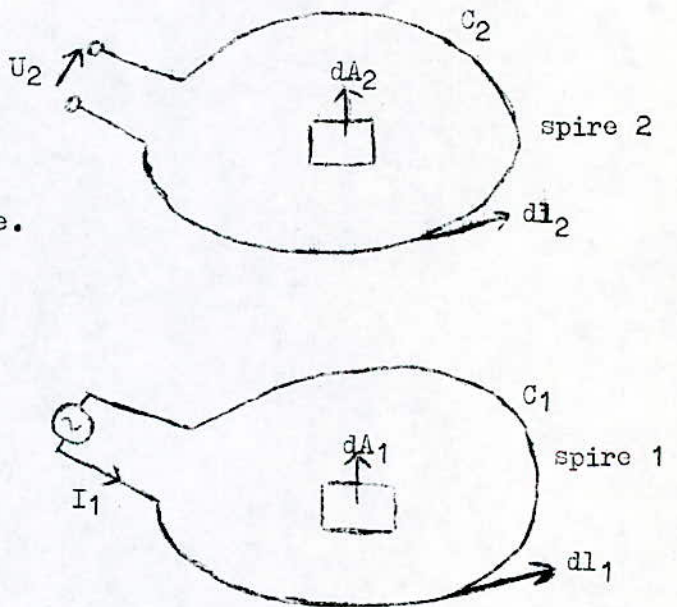
3.1.1 Tension induite

Lorsqu'un champ magnétique varie dans le temps, un champ électrique apparaît suite à l'équation de MAXWELL:

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot } E \quad \text{V/m}^2 \quad (3)$$

Il en résulte qu'à toute variation de courant dans un conducteur va correspondre une tension induite, dans un éventuel autre conducteur formant une boucle et placé à proximité, et dans le conducteur lui même.

Fig.15 Couplage magnétique entre 2 spires placées à proximité l'une de l'autre.



On considère l'effet du courant circulant dans une spire sur la tension aux bornes d'une seconde spire.

La spire 1 est parcourue par un courant I_1 qui fait apparaître un champ magnétique H_1 et une induction B_1 dans l'espace entourant la spire 1.

La spire 2 est ouverte, et de ce fait n'est parcourue par aucun courant on applique l'équation intégrale de MAXWELL suivante /10/ :

$$+\int_S \mathbf{n} \cdot \text{rot } \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \mathbf{n} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} \quad (4)$$

à la surface S_2 délimitée par la spire 2 où n est la normale à l'élément de surface dA , on obtient:

$$- \int_{S_2} n \cdot \frac{\partial B_1}{\partial t} \cdot dA_2 = \oint_{C_2} E \cdot dl_2 = - \frac{\partial}{\partial t} \int_{S_2} n \cdot B_1 \cdot dA_2 = -U_2 \quad (6)$$

$$- \frac{\partial}{\partial t} \int_{S_2} n \cdot B_1 \cdot dA_2 = - \frac{d\phi_2}{dt} \quad (7)$$

$$U_2 = - \frac{d\phi_2}{dt} \quad (8)$$

Si la spire 2 est fermée, elle sera parcourue par un courant dont l'intensité est déterminée par la tension induite et l'impédance de la boucle.

Dans notre cas, le conducteur créant la tension induite est le canal de foudre ou une descente de paratonnerre.

Le calcul analytique de la tension induite est aisé dans le cas où la boucle présente une certaine symétrie de manière à choisir un système de coordonnées adéquat. Dans les autres cas, on doit faire appel à des méthodes numériques approchées.

3.2 INDUCTION MAGNETIQUE PRODUITE PAR UN COURANT FINI:

On peut montrer que l'induction B produite par le courant fini i en un point P de la figure (16) est:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{1}{d} (\sin \phi_A - \sin \phi_B) \quad (9)$$

Si le conducteur est infini, il suffit de poser: $\phi_A = 90^\circ$; $\phi_B = -90^\circ$ on obtient :

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{2}{d} \quad (10)$$

notons que μ_0 est la perméabilité du vide

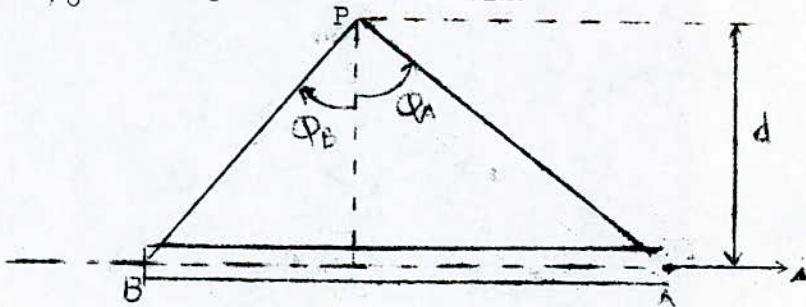


Fig.16. Champ magnétique d'un conducteur fini

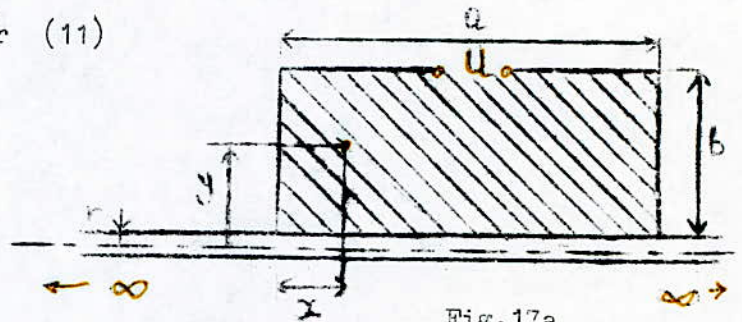
3.3 TENSION INDUITE DANS UNE BOUCLE RECTANGULAIRE /9/

A partir des deux cas de base présentés ci-dessous (fig 17.a et 17.b), on peut déduire facilement la tension induite par beaucoup d'autres dispositions de la boucle par rapport au courant de foudre.

a) Cas de la figure 17.a: Le domaine hachuré représente la surface de la boucle embrassée par le flux magnétique. L'induction magnétique B produite par le courant infini i en un point $P(x,y)$ de la surface de la boucle est

donnée par l'équation (10) ; l'intégrale de l'induction B sur la surface hachurée nous donne le flux magnétique ϕ à travers la boucle, on trouve :

$$\phi = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i \cdot a \cdot \ln b/r \quad (11)$$



La tension induite est la dérivée du flux par rapport au temps .

$$U = \frac{d\phi}{dt} \quad (12)$$

$$U = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{di}{dt} \cdot a \cdot \ln b/r \quad (13)$$

Cette équation donne la valeur instantanée de la tension induite en fonction de di/dt .

Elle est maximale quand le courant de foudre a la grande pente , c'est à dire sur le front de l'onde .

b) Cas de la figure 17.b: On obtient l'expression suivante pour la tension induite:

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{di}{dt} \cdot a \cdot \left[1 + \frac{b}{a} - \sqrt{1 + b^2/a^2} + \ln \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1 + b^2/a^2}) \right] \quad (14)$$

En posant $b/a = z$ et en appliquant **appelant**

l'expression entre crochets $f(z)$

$$\text{avec } f(z) = 1 + z - \sqrt{1 + z^2} + \ln((1 + \sqrt{1 + z^2})/2) \quad (15)$$

A l'aide de l'expression (15) , la tension induite prend la forme :

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{di}{dt} \cdot a \cdot f(b/a) \quad (16)$$

La tension induite pour les configurations de la figure (18) peut facilement être déterminée à partir des deux cas précédemment décrits .

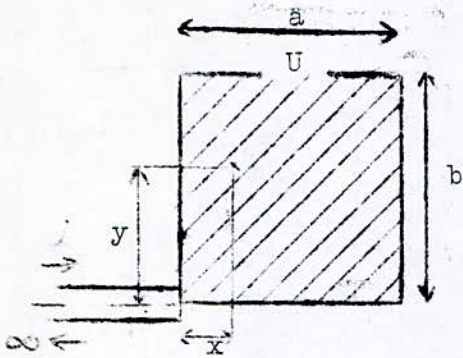


Fig. 17b

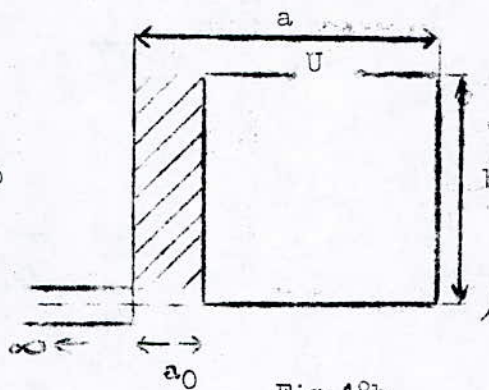


Fig. 18b

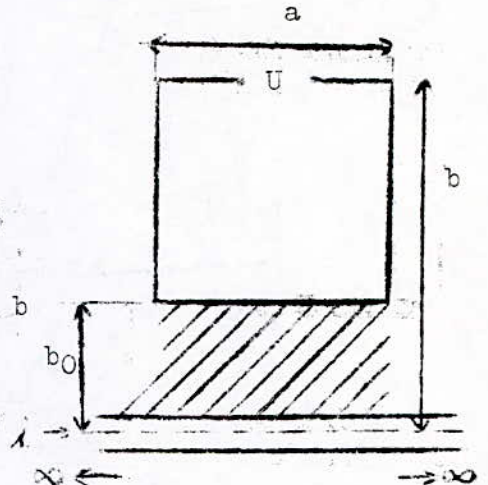


Fig. 18a

Pour la configuration de la figure (18.a) , la boucle ne contourne pas la partie du flux qui embrasse la surface hachurée.

Ainsi , si on remplace b par b₀ dans l'équation (12) , on obtient la tension que l'on doit retrancher de la tension correspondante à la figure (17.a) pour avoir la tension induite dans le cas de la figure (18.a).

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{di}{dt} 2a \cdot (\ln b/r - \ln b_0/r) \quad (17)$$

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{di}{dt} \cdot 2a \cdot \ln \frac{b}{b_0} \quad (18)$$

En suivant le même raisonnement , on obtient pour le cas de la figure (18.b) la tension induite suivante :

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{di}{dt} a \cdot f(b/a) - a_0 \cdot f(b/a_0) \quad (19)$$

On remarque que la tension induite est obtenue en multipliant par $\mu_0/4\pi \cdot di/dt$, une quantité ne dépendant que de la géométrie du système; cette quantité est appelée : "le facteur géométrique".

En combinant de plusieurs façons les configurations originales de la figure (17) , on obtient la tension induite pour plusieurs autres configurations simples .

Quelques-unes sont représentées sur le tableau de la figure (19), /9/, rappelons que si la boucle se trouve des deux côtés du conducteur , on doit affecter ces deux côtés de signes différents.

Les équations de ce tableau ne peuvent être utilisées que pour des cas simples.

Configuration	Facteur géométrique	
	$A_a = 2a \ln \frac{b}{r}$	$A_a(b)$
	$B_a = af\left(\frac{b}{a}\right)$	$B_a(b)$
	$C_a = 2a \ln \frac{b}{b_0}$	$A_a(b) - A_a(b_0)$
	$D_a = af\left(\frac{b}{a}\right) - a_0 f\left(\frac{b}{a_0}\right)$	$B_a - B_{a_0}$
	$E_a = 2a \ln \frac{b}{r} - af\left(\frac{b}{a}\right)$	$A_a - B_a$
	$G_a = af\left(\frac{b}{a}\right) - (a+c)f\left(\frac{b}{a+c}\right) + cf\left(\frac{b}{c}\right)$	$B_a - D_a(c)$
	$H_a = af\left(\frac{b}{a}\right) - af\left(\frac{b_0}{a}\right)$	$B_a(b) - B_a(b_0)$
	$J_a = 2a \ln \frac{b}{b_0} - 2af\left(\frac{b}{a}\right) + 2af\left(\frac{b_0}{a}\right)$	$C_a - 2H_a$
	$K = 2a \ln \frac{b}{r} - af\left(\frac{b}{a}\right) + 2b \ln \frac{a}{r} - bf\left(\frac{a}{b}\right)$	$E_a + E_b$
	$L = 2a \ln \frac{b}{r} - 2af\left(\frac{b}{a}\right) + 2b \ln \frac{a}{r} - 2bf\left(\frac{a}{b}\right)$	$F_a + E_b - B_b$
	$M = 4a \ln \frac{b}{r} - 2af\left(\frac{b}{a}\right) + 2b \ln \frac{a}{r} - 2bf\left(\frac{a}{b}\right)$	$2E_a + F_b$
	$F_a = 2a \ln \frac{b}{r} - 2af\left(\frac{b}{a}\right)$	$A_a - 2B_a$

Fig.19- Facteur géométrique de quelques configurations simples

Un programme de calcul numérique peut être présenté pour le calcul de la tension induite dans ces cas simples. Pour cela, on subdivise la boucle en petits éléments de surface de manière à considérer l'induction magnétique constante au sein de chaque élément.

Le flux magnétique ϕ à travers la boucle est la somme des flux élémentaires des éléments.

$$\phi = \sum_{i=1}^n \phi_i = \sum_{i=1}^n B_i S_i \quad (20)$$

$$\text{Si } S_i \text{ est constant } \phi = S_i \sum_{i=1}^n B_i \quad (21)$$

B_i = Induction magnétique au sein de l'élément i

S_i = Surface de l'élément i

n = Nombre d'éléments dans la boucle

La tension induite dans la boucle sera alors:

$$U = \frac{d\phi}{dt}$$

Exemple d'application :

Boucle rectangulaire dont un côté est constitué par une diode de paratonnerre:

Le programme calcule l'induction magnétique au sein de chaque élément de surface selon la relation :

$$B_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{y_i + r} \cdot (\sin \phi_A - \sin \phi_B) \quad (22)$$

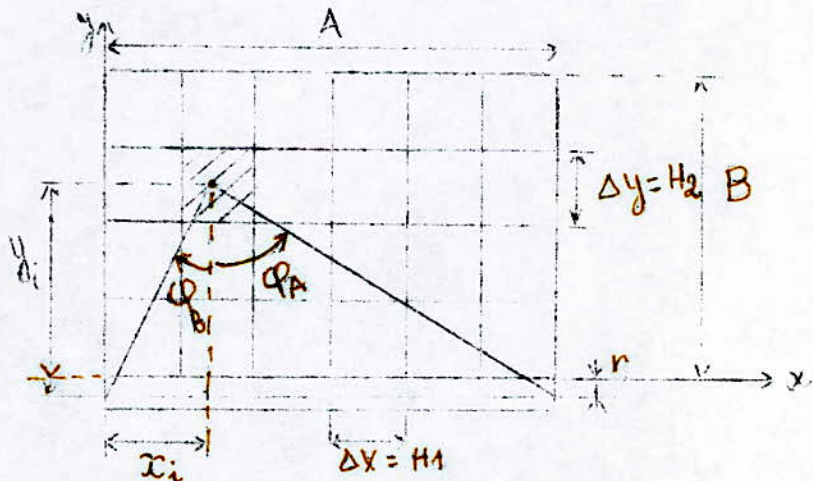


Fig.20: Calcul numérique de la tension induite dans une boucle rectangulaire

Le produit $B_i \cdot S_i$ donne le flux magnétique élémentaire.

La tension induite sera,

$$U = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{di}{dt} \cdot S_i \frac{1}{y_i + r} (\sin \phi_A - \sin \phi_B) \quad (23)$$

Le programme en BASIC est le suivant:

```

100 INPUT H1,H2
110 READ R1;A ; B ; C
120 LET D = C
130 LET S =H1 * H2
140 FOR Y =H2 TO B STEP H2
150   FOR X = H1 TO A STEP H1
160     LET YE = Y - H2/2
170     LET F1 = ATN ((X -H1/2)/(E + R ))
180     LET F2 = ATN ((A - (X -H1/2))/(YE + R))
190     LET D = D + ( SIN (F2) -SIN (F1))/(YE + R ))
200   NEXT X
210 NEXT Y
220 LET U = (1E -7)* D * S * C
230 PRINT "U =" ; U
240 END

```

Où:

H1 : Pas de calcul sur l'axe X , en mètres

H2 : Pas de calcul sur l'axe Y , " "

A : Longueur de la boucle , " "

B : Largeur de la boucle , " "

R : Rayon du conducteur ; " "

C = di/dt ; Variation du courant de foudre par rapport au temps en A/s

Pour les données suivantes:

A = 0,2 m ; B = 0,15 m ; C = 15.10⁹ A/s ; R = 0,01 m

Les résultats obtenus pour différents pas de calcul sont les suivants:

Δ X = Δ Y	= 0,01 m	U = 1236,7 V
Δ X = Δ Y	= 0,005 m	U = 1297 V
Δ X = Δ Y	= 0,001 m	U = 1296,7 V

Le résultat obtenu par le calcul analytique est : U = 1254 V.

Nous remarquons que le choix du pas de calcul doit être optimisé pour que le résultat soit obtenu avec la plus petite erreur.

Généralement , la géométrie des boucles est beaucoup plus complexe ; c'est pourquoi on a recours à des méthodes numériques approchées pour déterminer les tensions induites dans ces boucles .

3;4 METHODES NUMERIQUES :

Les principales méthodes numériques utilisées en électromagnétisme , sont :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.

3.4.1 Méthodes des différences finies:

Cette méthode permet de fournir une solution approchée à l'équation de LAPLACE : $\Delta V = 0$ (24)

V étant le potentiel électrique ou magnétique et l'opérateur de LAPLACE .

L'équation (24) est vraie seulement en électrostatique sans charges d'espace et en magnéto-statique (ou quasi-statique) sans courants .

En se limitant à un problème bi-dimensionnel , l'équation (24) s'écrit:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (25)$$

La méthode des différences finies consiste à remplacer l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences où chaque dérivée partielle est remplacée par une différence de valeurs en un certain nombre fini de points.

En considérant ces points à une distance h les uns des autres (fig 21) on aura les relations:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = [V(x = h , y) - V(x - h , y)] / 2.h \quad (26)$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = [V(x , y + h) - V(x , y - h)] / 2.h$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = [V(x + h , y) + V(x - h , y) - 2.V(x , y)] / h^2$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = [V(x , y + h) + V(x , y - h) - 2.V(x , y)] / h^2$$

$$\Delta V = [V(x + h , y) + V(x - h , y) + V(x , y + h) + V(x , y - h) - 4.V(x , y)] / h^2$$

Ces formules sont en fait des séries de TAYLOR tronquées ; l'erreur qui est de l'ordre de h^2 , est négligeable pour des distances h suffisamment petites.

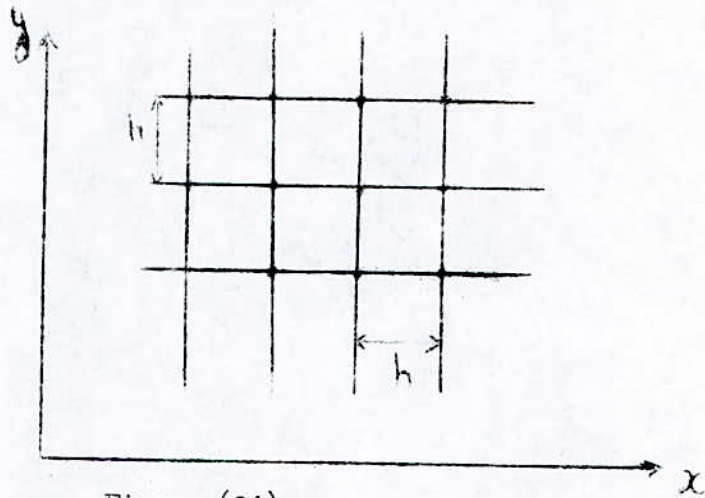


Figure (21)

Ces équations aux différences finies sont appliquées en un certain nombre de points choisis dans le domaine de l'équation aux dérivées partielles en tenant compte des conditions aux frontières.

On a pour chaque point du réseau, l'équation :

$$V(x,y) = \frac{1}{4} [V(x+h,y) + V(x-h,y) + V(x,y+h) + V(x,y-h)] \quad (27)$$

Il en résulte donc un système d'équations linéaires.

La méthode consiste ensuite à trouver la solution de ce système qui a en général des dimensions importantes.

La solution ne peut être obtenue directement à cause du temps de calcul et surtout d'une réservation de mémoire nécessaire. C'est pourquoi on utilise une méthode itérative dont le schéma est le suivant : On se donne une solution de départ (par exemple tous les noeuds sont au même potentiel) satisfaisant aux conditions aux limites et on l'introduit dans l'équation (27) successivement pour tous les points du réseau. Ceci permet de corriger la solution de départ. La solution corrigée est ensuite utilisée comme nouvelle solution de départ et le processus peut se répéter aussi longtemps que l'on constate une amélioration de la solution /10/,/3/ .

3.4.2 Méthode des éléments finis:

Cette méthode consiste à remplacer le problème de l'intégration directe de l'équation de LAPLACE par celui de la minimisation de l'énergie accumulée dans le domaine considéré. Elle s'applique aussi bien au calcul du champ électrique que magnétique, de type LAPLACIEN ou POISSONIEN .

Cette méthode est détaillée dans divers ouvrages /3/ .
et ne nous intéresse pas dans notre cas précis.

C H A P I T R E 4

--oOo--APPLICATION DU CALCUL NUMERIQUE DE LA TENSION INDUITE--oOo--

--oOo--AU CENTRE DE CALCUL DE L'E.N.P--oOo--

4.1 PRESENTATION DU CENTRE DE CALCUL:

Le centre de calcul comporte cinq salles principales .:

1. Le hall: Il est situé à l'entrée du centre et est divisé en deux parties à l'aide d'un faux mur en contre-plaqué. La première partie (qui est plus petite que l'autre) comporte un mini ordinateur V A X 750 et deux imprimantes alimentés à partir d'un disjoncteur qui se trouve dans la même salle . Cette partie est aussi munie de deux prises stabilisées . La seconde partie est le hall proprement dit . Il sert d'accès aux autres salles

2. La salle d'administration: constituée de bureaux et de la direction du centre et ne comporte pas de prises stabilisées .

3. La salle des Visus: elle comporte cinq prises stabilisées alimentant 13 Visus à l'aide de multiprises .

4. La salle des Microordinateurs: elle comporte deux prises stabilisées qui alimentent les microordinateurs à l'aide de multiprises .

5. La salle des stabilisateurs: elle comporte trois stabilisateurs alimentés à travers le disjoncteur principal se trouvant dans la même salle , par un câble de 230 V entre phases et servent à stabiliser la tension à 220 V . Ils alimentent cinq prises dans la salle des Visus , deux prises dans la salle des Micros et le disjoncteur auquel est branché le mini-ordinateur . Notons que toutes les alimentations stabilisées sont reliées à une mise à la terre commune située à l'extérieur du centre. Chaque prise comporte trois bornes auxquelles aboutissent deux conducteurs de phases dont la tension entre eux est de 220 V et un conducteur de terre . La tension terre-phases est de 130 V .

Les figures (22 , 23 et 24) représentent respectivement une vue de dessus du centre de calcul et deux vues en perspective à partir de 2 directions différentes A et B (Voir fig. 22) .

Les figures comportent également le circuit électrique des différentes prises stabilisées .

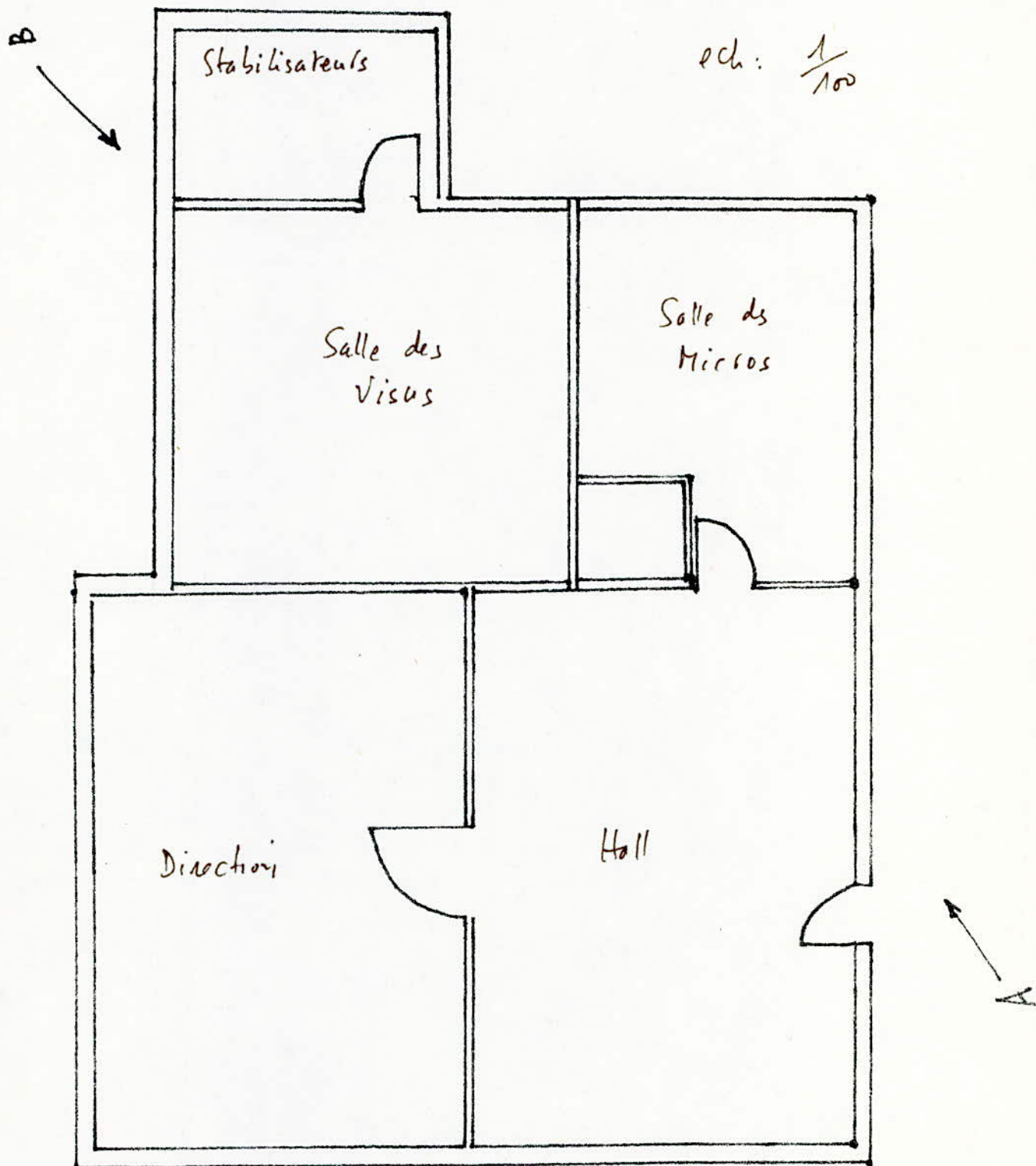


Fig.22- Vue de dessus du centre de calcul

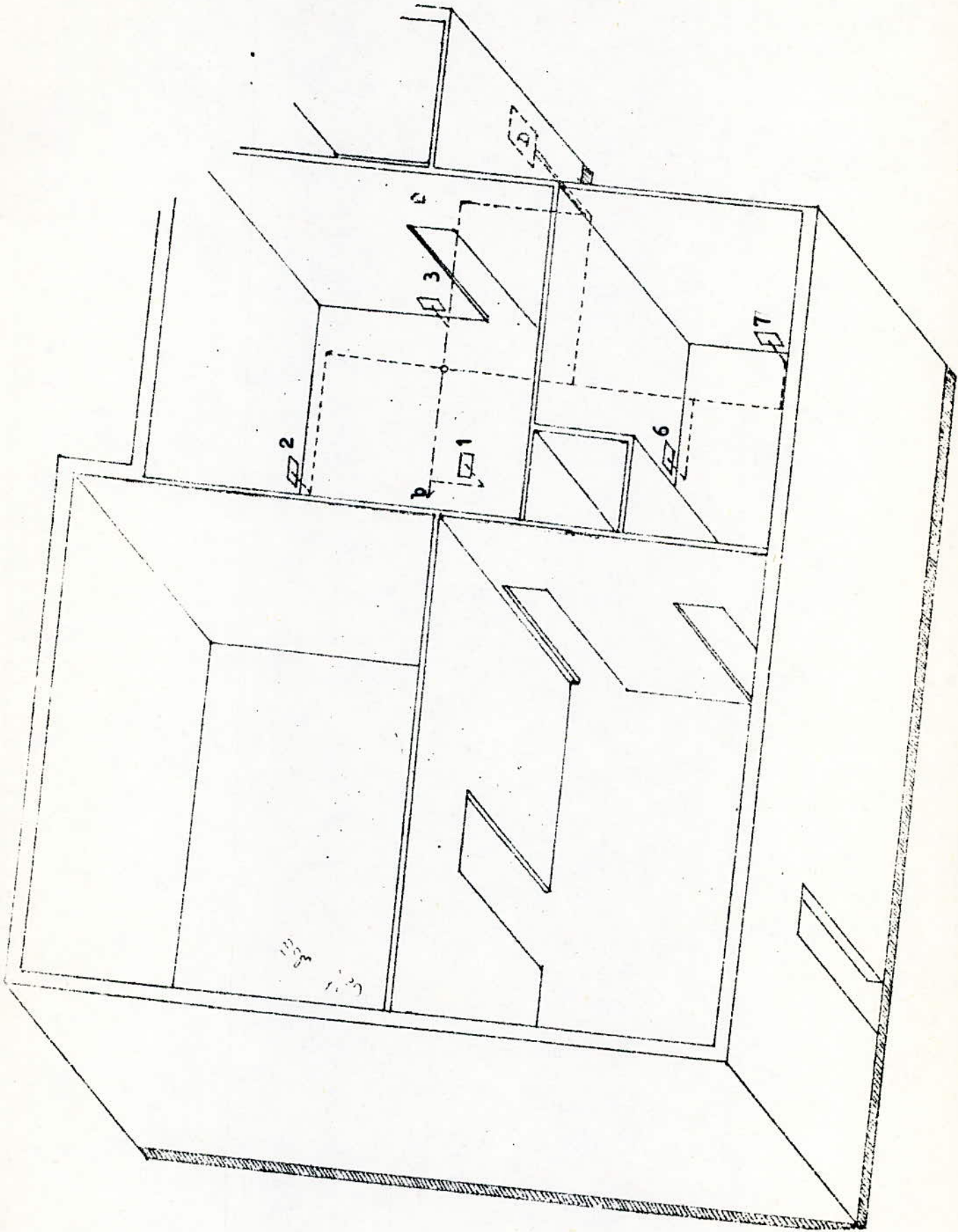


Fig.23- Vue en perspective à partir de A du centre de calcul

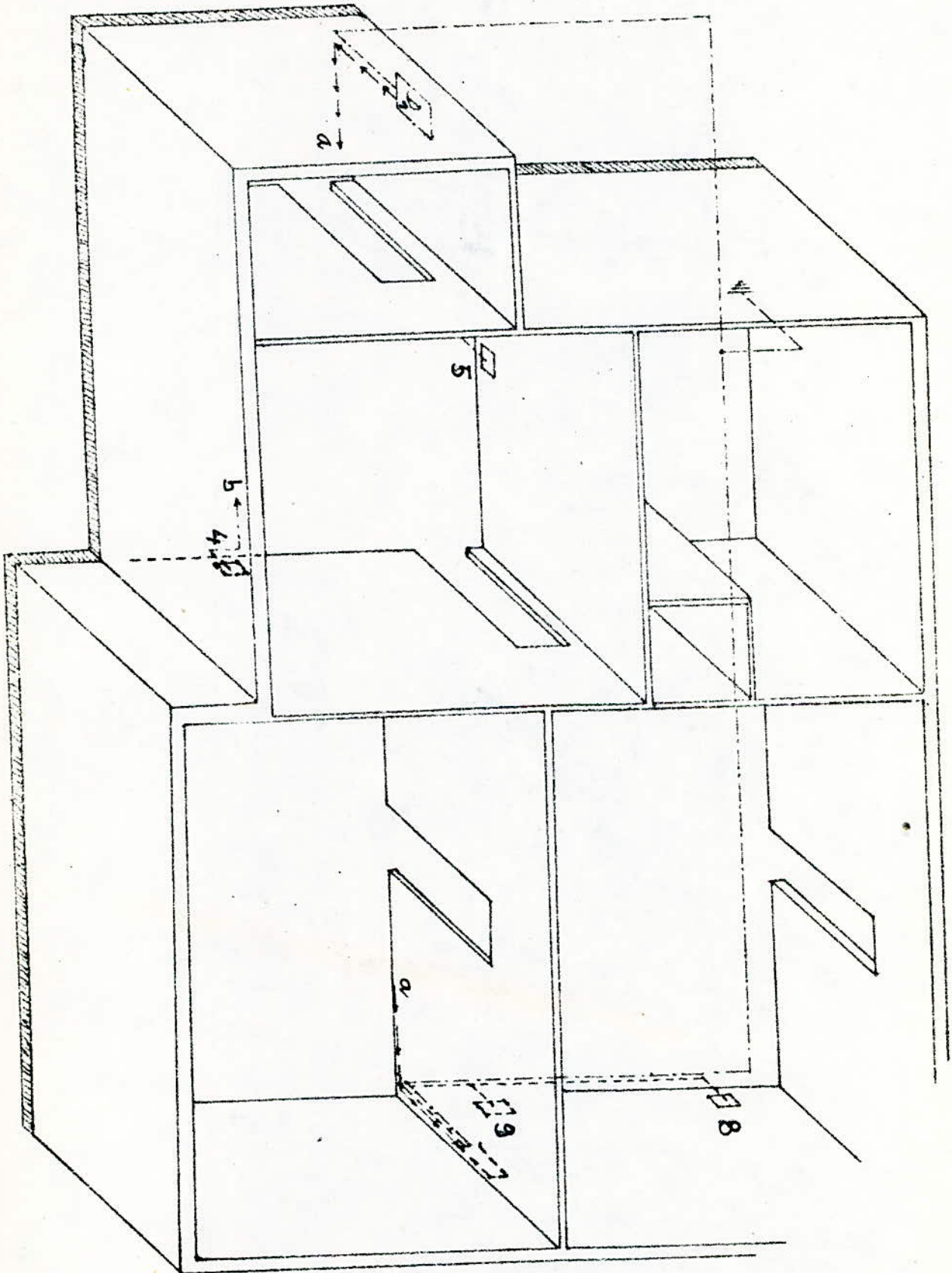


Fig. 24 - Vue en perspective à partir de B du centre de calcul

Le circuit représenté par des flèches ($\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow$) désigne l'alimentation du mini-ordinateur à partir du disjoncteur principal D_1 .

Le but de ce chapitre est le calcul numérique des tensions induites par la foudre dans différentes boucles formées par le circuit électrique des conducteurs de phases. Aux bornes des prises, il en résultera donc une surtension par rapport à la terre égale à cette tension induite.

4.2 ALGORITHME DE CALCUL :

Le canal de foudre est assimilé à un courant rectiligne fini d'un côté (du côté de la terre) et infini de l'autre (du côté du nuage).

On considère aussi que le canal tombe perpendiculairement à la terre .

Le canal est repéré par ses coordonnées X_0 et Y_0 dans un système d'axes orthogonal (X, Y, Z) lié à la boucle étudiée (voir fig.24).

Le plan $X O Y$ étant parallèle à la terre et le plan $Y O Z$ confondu avec le plan de la boucle .

Le problème consiste à calculer le flux magnétique à travers la boucle considérée . Pour ce faire , on calcule l'induction magnétique B en un point quelconque de la surface de la boucle et on intègre sur toute la surface.

Les boucles forment généralement des surfaces trapézoïdales et le calcul analytique n'est pas possible . Un programme de calcul numérique est donc nécessaire pour calculer la tension induite dans ces boucles.

La surface de la boucle est subdivisée en éléments de surface par des pas de calcul dX et dZ .

L'induction magnétique B est calculée au centre de chaque élément par la relation :

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{1}{D} \cdot (1 + \sin \phi_A) \quad (28)$$

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide .

D est la distance entre le centre de l'élément et le canal de foudre.

$$\left. \begin{aligned} D &= x_c / \cos \theta \\ \theta &= \arctg \frac{y_e - y_c}{x_c} \\ \phi_A &= \arctg \frac{D}{z_e + A} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

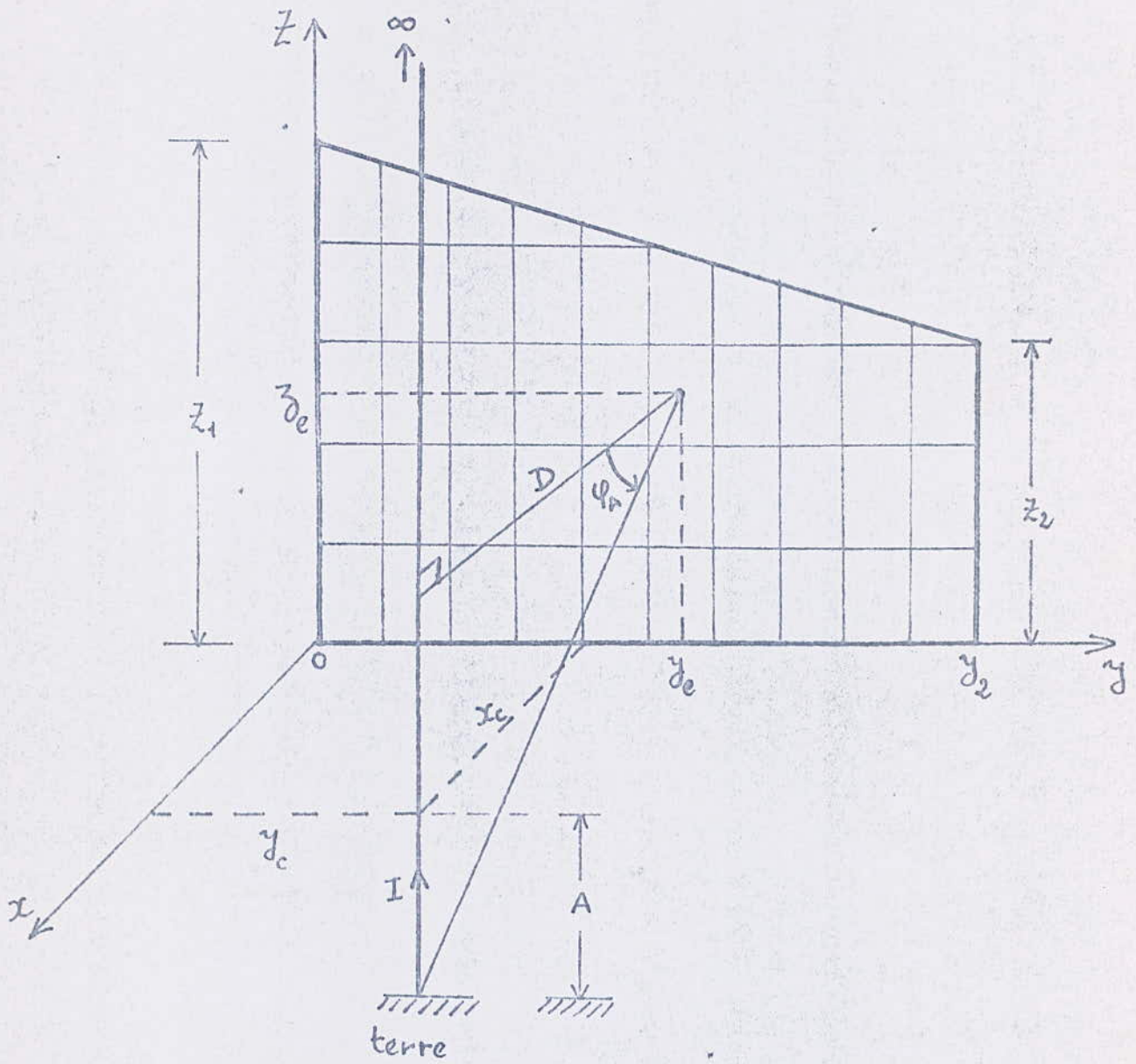


Fig. 24.a - Vue de la boucle et du canal de foudre.

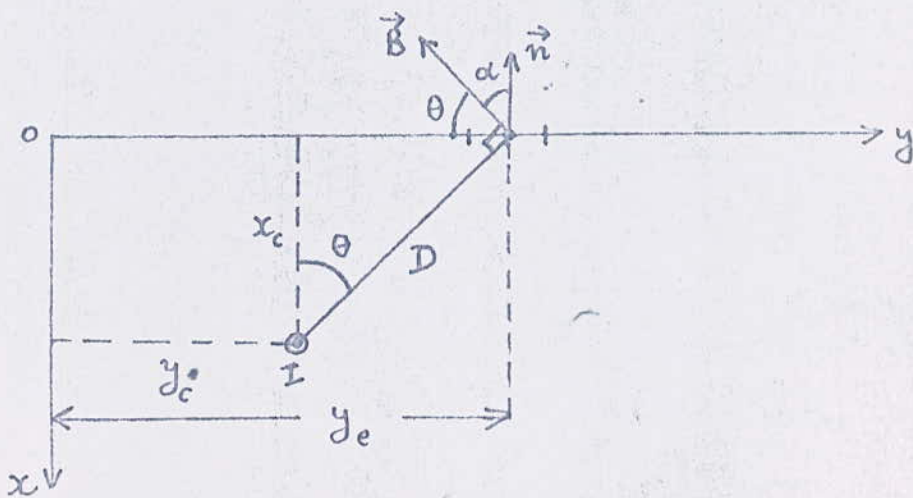


Fig. 24.b - Vue de dessus de la figure 24.a

Le flux ϕ_e à travers l'élément considéré s'exprime par :

$$\phi_e = B \cdot S_e \cdot \cos \alpha \quad (30)$$

α est l'angle formé par la normale à l'élément de surface et l'induction B;
La relation (30) s'écrit alors :

$$\phi_e = B \cdot S_e \cdot \sin \theta \quad (31)$$

L'équation de la droite (Δ) est la suivante:

$$Z = \frac{Z_2 - Z_1}{Y_2} \cdot Y + Z_1 \quad (32)$$

Z_1 , Z_2 et Y_2 sont respectivement les hauteurs et la longueur de la boucle.

Le programme prend les éléments par colonne . Il examine s'il s'agit d'un élément régulier ou irrégulier en comparant à chaque fois sa côte Z à celle calculée par l'équation (32) pour l'ordonnée Y considérée . Ensuite il détermine pour chaque élément son point d'équilibre , sa surface , la distance D , les angles ϕ_A et θ .

L'étape suivante du programme consiste à calculer une quantité proportionnelle à l'induction B au point d'équilibre de chaque élément . Cette quantité, multipliée par le produit $S_e \cdot \sin \theta$, est sommée puis stockée dans un sommateur S U M . Ensuite le programme calcule le flux à travers les éléments hachurés sur la figure (25.a) . Le résultat est stocké dans un sommateur S U M D . Puis il calcule le flux à travers les éléments ~~hachurés~~ ^{en noir} sur la figure (25.b). Le résultat est stocké dans un sommateur S U M E .

Pour avoir la tension induite par défaut dans la boucle , le programme additionne les valeurs S U M et S U M D . Le résultat est multiplié par $\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{dI}{dt}$.

Pour avoir la tension induite par excès , le programme additionne les valeurs S U M , S U M D et S U M E , le résultat est multiplié par $\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{dI}{dt}$.

La tension induite moyenne dans la boucle sera la moyenne des deux tensions calculées par excès et par défaut .

Notons que les pas de calcul dY et dZ doivent être respectivement des multiples de Y_2 et Z_1 .

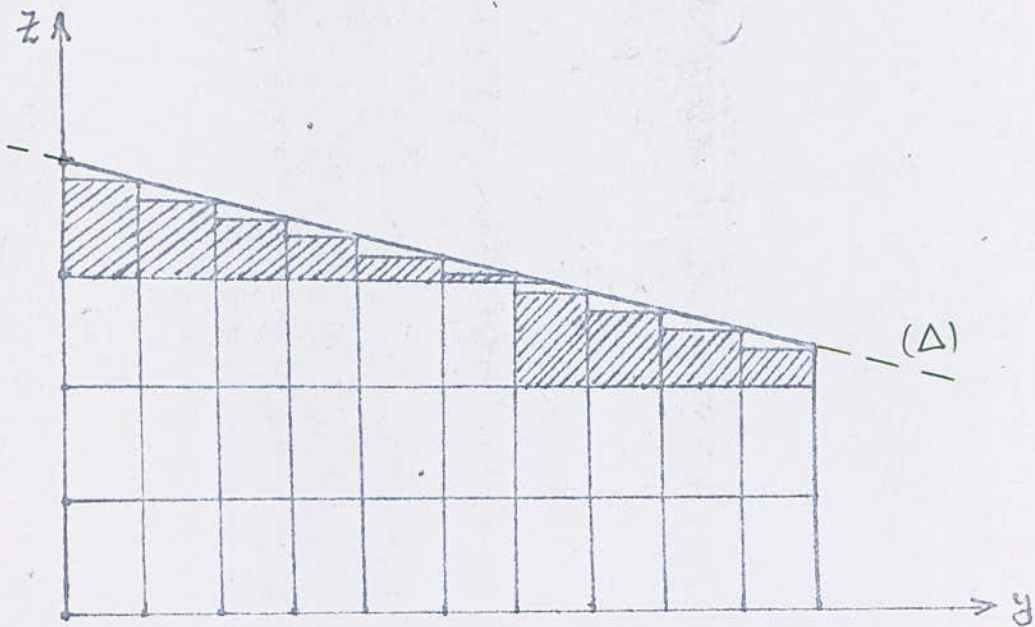


Fig.25.a- Surface par défaut de la boucle

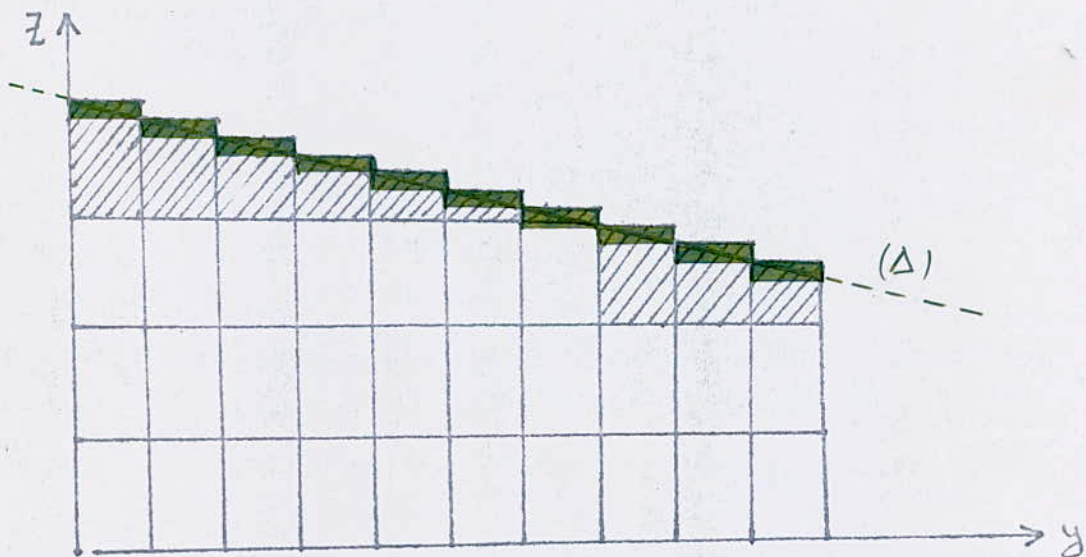
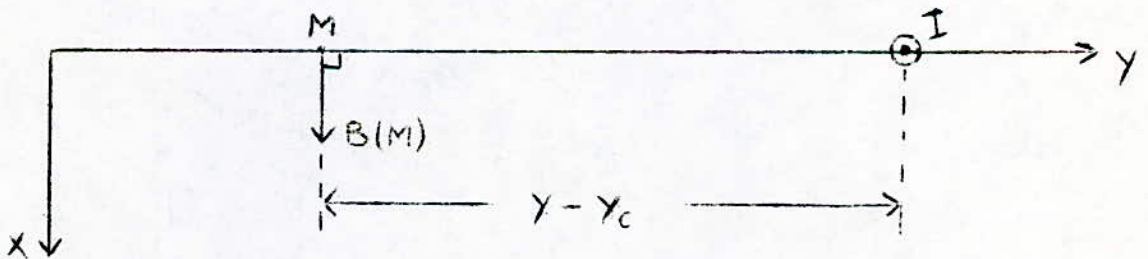
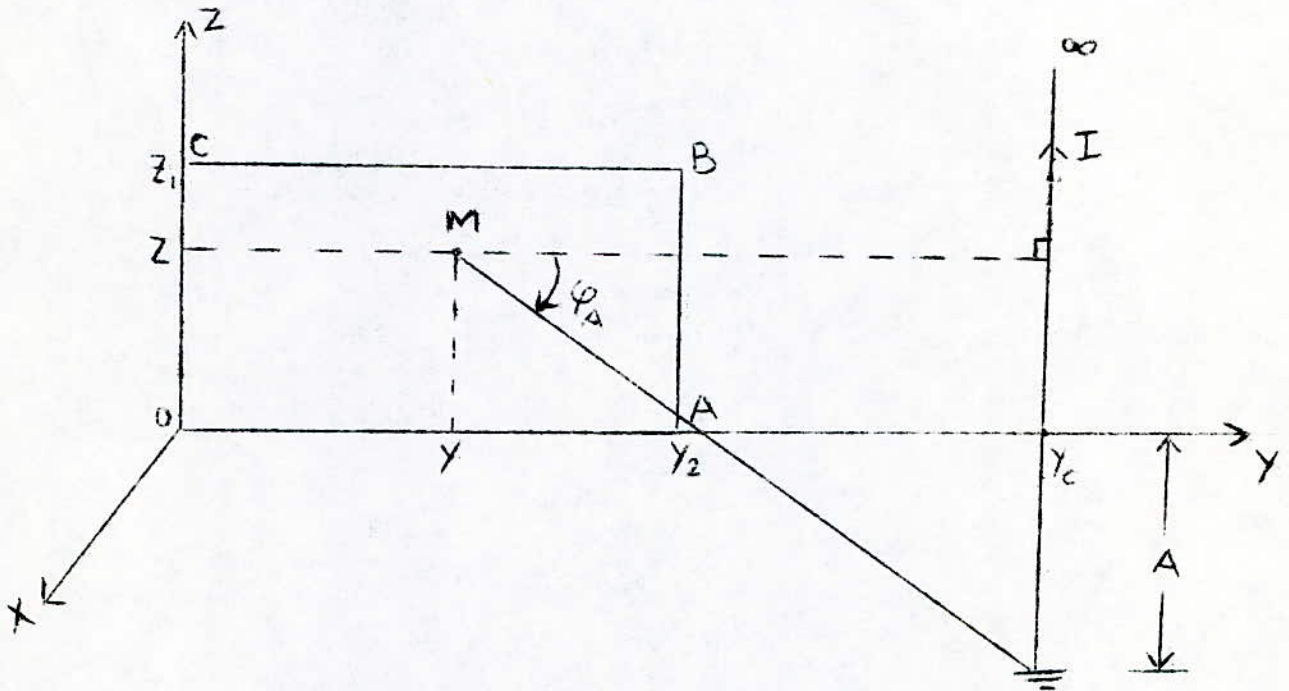


Fig.25.b- Surface par excès de la boucle

4.3 PRECISION DE CALCUL :

Afin de déterminer l'erreur commise dans les calculs pour un pas de calcul donné, on calcul analytiquement la tension induite dans une boucle rectangulaire OABC.

pour obtenir une intégrale assez simple à résoudre, on considère le cas particulier où le coup de foudre tombe sur le prolongement de l'axe OY en un point d'ordonnée Y_c (voir figure ci-dessous).



L'induction magnétique B en un point M(, Y) de la boucle vaut:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{1}{y - y_c} (1 + \sin(\varphi_A)) \quad (33)$$

$$\sin \varphi_A = \frac{z + A}{\sqrt{(z + A)^2 + (y - y_c)^2}} \quad (34)$$

La relation (33) s'écrit alors :

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{1}{y-y_c} \left(1 + \frac{z+A}{\sqrt{(z+A)^2 + (y-y_c)^2}} \right) \quad (35)$$

Le flux magnétique à travers la boucle s'écrit :

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S B dy dz \quad (36)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^{y_2} dy \int_0^{z_1} \frac{1}{y-y_c} \left(1 + \frac{z+A}{\sqrt{(z+A)^2 + (y-y_c)^2}} \right) dz \quad (37)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_0^{y_2} \frac{1}{y-y_c} (z_1 + \sqrt{(z+A)^2 + (y-y_c)^2}) dy \quad (38)$$

$$\Phi = \frac{\mu_0}{4\pi} I \left[z_1 \ln |y-y_c| + \int_0^{y_2} \underbrace{\frac{\sqrt{(y-y_c)^2 + (z+A)^2}}{y-y_c}}_I dy \right] \quad (39)$$

Pour calculer l'intégrale I, qui est de la forme

$$\int R(x, \sqrt{ax^2+bx+c})$$

On utilise la première substitution d'EUCLER /11/.

Pour les données numériques suivantes :

$$X_c = 0$$

$$Y_c = 30 \text{ m}$$

$$A = 1,2 \text{ m}$$

$$dI/dt = 15 \cdot 10^9 \text{ A/s}$$

$$z_1 = 1,5 \text{ m} = z_2$$

$$y_2 = 20 \text{ m}$$

On obtient la tension induite $U \approx 2803 \text{ V}$.

Le calcul numérique pour le même cas et pour des pas de calcul $dy = 0,1 \text{ m}$ et $dz = 0,1 \text{ m}$, donne le résultat suivant $U = 2761 \text{ V}$.

L'erreur relative commise est donc :

$$= \frac{2803 - 2761}{2803}$$

$$= 1,5\%$$

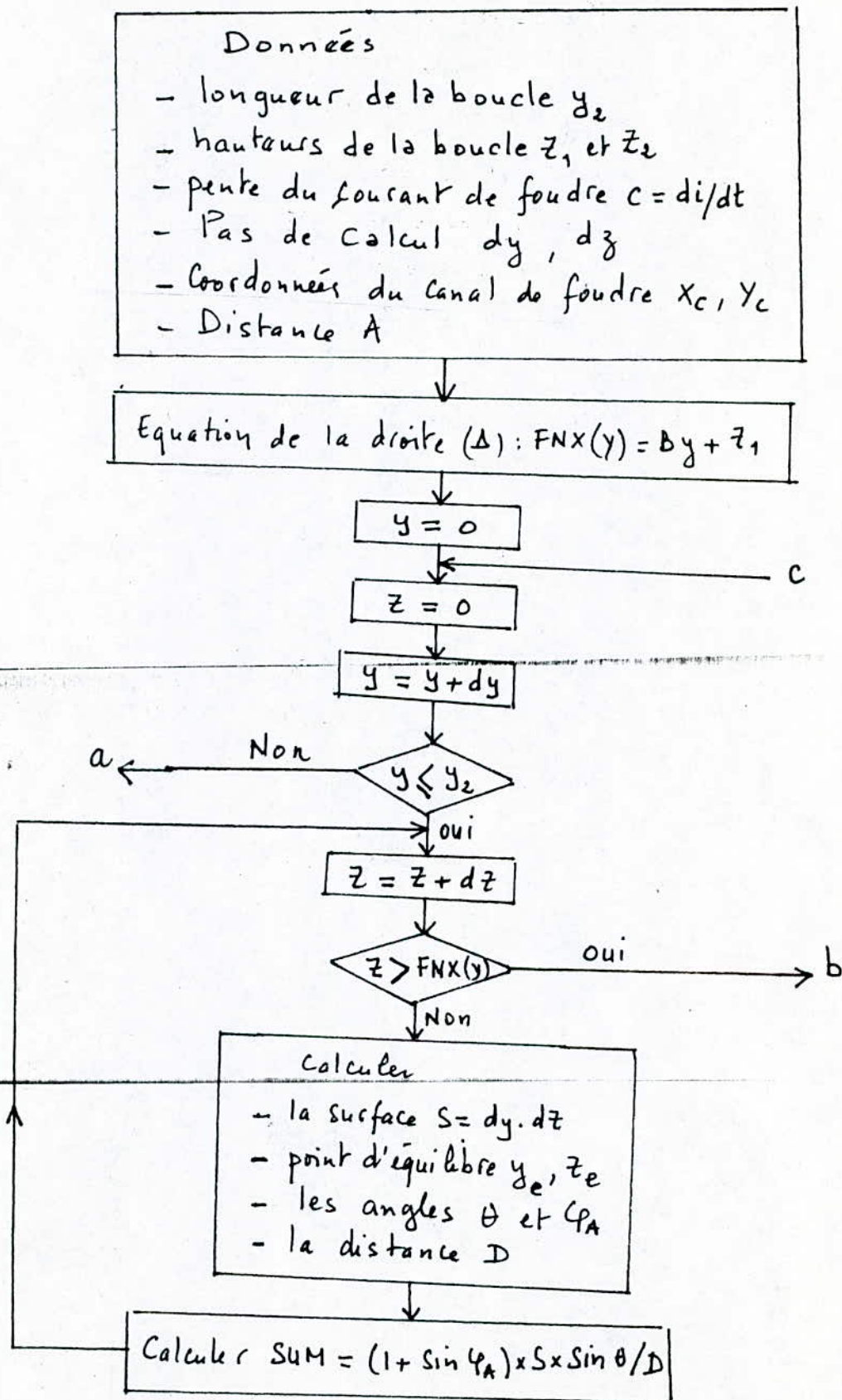
Pour ce cas précis, on a :

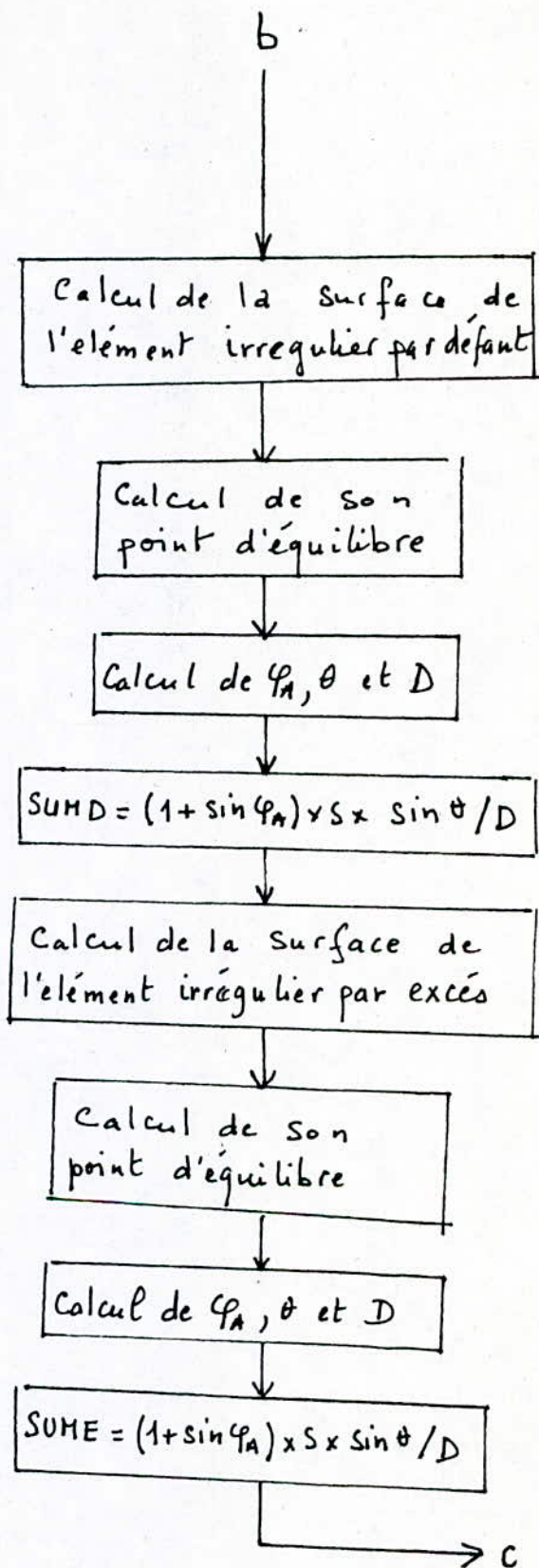
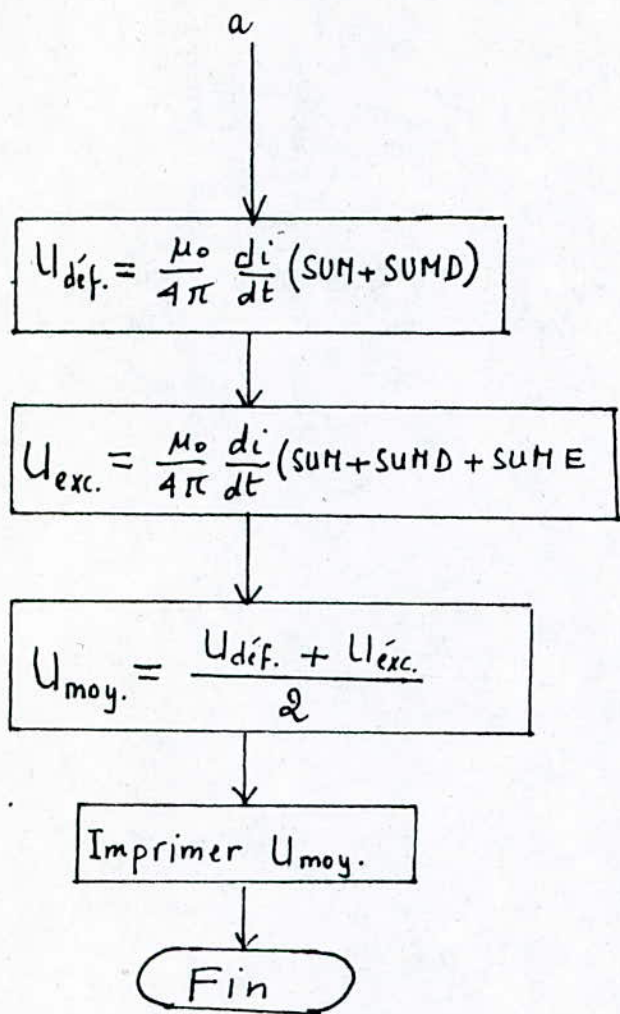
$$\frac{dy}{y_2} = \frac{0,1}{20} = 5 \cdot 10^{-3} \quad (40)$$

La relation (40) permet de calculer le pas de calcul dY à appliquer à une boucle de longueur Y_2 qui donne une erreur relative $\xi = 1,5 \%$.

Notons que le pas dZ n'influe pratiquement pas sur la valeur de la tension induite calculée.

4.4 ORGANIGRAMME





4.5 PROGRAMME EN BASIC SUR VAX 750 :

```
# TYPE SS.BAS
05  OPTION SIZE=REAL DOUBLE
06  INPUT dY,dZ,C
07  READ Y2,Z1,Z2,A
14  FOR Xc=-50 TO 50 STEP 10
15  FOR Yc=-50 TO 50 STEP 10
16  B=(Z2-Z1)/Y2
17  DEF FNX(Y)=B*Y+Z1
20  SUM=0
21  SUMD=0
22  SUME=0
30  Y=0
40  Z=0
45  Y=Y+dY
50  IF Y<(Y2+1E-07) THEN 65
51  Ude=(SUM+SUMD)*C/1E7
52  Uex=(SUM+SUMD+SUME)*C/1E7
53  Umoy=(Ude+Uex)/2
54  PRINT Xc,Yc,Ude,Uex,Umoy
55  GO TO 156
65  Z=Z+dZ
67  T=Z/FNX(Y)
70  IF T>(1+1E-07) THEN 115
75  S=dZ*dY
80  Ze=Z-dZ/2
85  IF Xc=0 THEN 97
90  GO SUB 2000
95  GO TO 100
97  GO SUB 3000
100 SUM=SUM+(SIN(FIA)+1)*S*SIN(TETA)/D
110 GO TO 65
115 S=ABS((FNX(Y)-(Z-dZ)))*dY
120 Ze=(FNX(Y)+Z-dZ)/2
122 IF Xc=0 THEN 127
125 GO SUB 2000
126 GO TO 130
127 GO SUB 3000
130 SUMD=SUMD+(SIN(FIA)+1)*S*SIN(TETA)/D
135 Ze=(FNX(Y)+FNX(Y-dY))/2
140 S=ABS((FNX(Y-dY)-FNX(Y)))*dY
142 IF Xc=0 THEN 147
145 GO SUB 2000
146 GO TO 150
147 GO SUB 3000
150 SUME=SUME+(SIN(FIA)+1)*S*SIN(TETA)/D
155 GO TO 40
156 NEXT Yc
157 NEXT Xc
159 DATA 20,1.5,1.5,1.2
160 STOP

2000 REM SOUBROUTINE 1
2005 Ye=Y-dY/2
2010 TETA=ATN((Ye-Yc)/Xc)
2015 D=Xc/COS(TETA)
2020 FIA=ATN((Ze+A)/ABS(D))
2025 RETURN

3000 REM SOUBROUTINE 2
3005 Ye=Y-dY/2
3010 TETA=1.5708
3030 D=(Ye-Yc)
3040 FIA=ATN((Ze+A)/ABS(D))
3050 RETURN
3060 END
```

4.6 Résultats de calcul

Les résultats représentés sur les pages 41,42 et 43 représentent la tension induite dans la boucle formée par l'alimentation du mini-ordinateur VAX pour différentes positions du canal de foudre et pour 3 probabilités de dépassement de la pente du courant de foudre.

Ces probabilités et les pentes correspondantes sont: / 12 /

$$P = 5\% \quad \frac{dI}{dt} = 190 \frac{kA}{\mu s}$$

$$P = 50\% \quad \frac{dI}{dt} = 37,84 \frac{kA}{\mu s}$$

$$P = 95\% \quad \frac{dI}{dt} = 7,54 \frac{kA}{\mu s}$$

Les résultats de la page 44 représentent la tension induite dans la boucle de la prise N°1 pour différentes positions du canal de foudre et une probabilité de dépassement de la pente du courant de 95 % .

LA Surtension maximale admise par le mini-ordinateur est de 8V. On a calculé que cette valeur est induite par un courant de foudre dont le point de chute serait à une distance de 2,6 Km sur le prolongement de l'axe OY.

La pente du courant prise pour le calcul est celle correspondant à une probabilité de dépassement de 95 % (la presque-totalité des coups de foudre).

R SS

? .0925, .3, 190.01E9

TENSION INDUITE DANS LA BOUCLE FORMEE PAR L'ALIMENTATION DU MAX
PENITE DU COURANT DE Foudre $di/dt = .19001E+12$ A/s (P=5%)

LONGUEUR DE LA BOUCLE Y2= 18.5 m

HAUTEURS DE LA BOUCLE Z1= 1.5 m Z2= 1.5 m

Xc	Yc	Ude	Uex	Umoy
-100	-20	1437.09	1437.09	1437.09
-100	-10	989.629	989.629	989.629
-100	0	488.843	488.843	488.843
-100	10	-39.9693	-39.9693	-39.9693
-100	20	-566.447	-566.447	-566.447
-75	-20	2410.94	2410.94	2410.94
-75	-10	1712.84	1712.84	1712.84
-75	0	863.281	863.281	863.281
-75	10	-71.0297	-71.0297	-71.0297
-75	20	-998.142	-998.142	-998.142
-50	-20	4670.67	4670.67	4670.67
-50	-10	3574.52	3574.52	3574.52
-50	0	1897.46	1897.46	1897.46
-50	10	-158.776	-158.776	-158.776
-50	20	-2181.22	-2181.22	-2181.22
-25	-20	10794.8	10794.8	10794.8
-25	-10	10348.8	10348.8	10348.8
-25	0	6658.24	6658.24	6658.24
-25	10	-596.725	-596.725	-596.725
-25	20	-7480.43	-7480.43	-7480.43
0	-20	19997.4	19997.4	19997.4
0	-10	33420.1	33420.1	33420.1
0	0	365872	365872	365872
0	10	57684.5	57684.5	57684.5
0	20	-101444	-101444	-101444
25	-20	10794.8	10794.8	10794.8
25	-10	10348.8	10348.8	10348.8
25	0	6658.24	6658.24	6658.24
25	10	-596.725	-596.725	-596.725
25	20	-7480.43	-7480.43	-7480.43
50	-20	4670.67	4670.67	4670.67
50	-10	3574.52	3574.52	3574.52
50	0	1897.46	1897.46	1897.46
50	10	-158.776	-158.776	-158.776
50	20	-2181.22	-2181.22	-2181.22
75	-20	2410.94	2410.94	2410.94
75	-10	1712.84	1712.84	1712.84
75	0	863.281	863.281	863.281
75	10	-71.0297	-71.0297	-71.0297
75	20	-998.142	-998.142	-998.142
100	-20	1437.09	1437.09	1437.09
100	-10	989.629	989.629	989.629
100	0	488.843	488.843	488.843
100	10	-39.9693	-39.9693	-39.9693
100	20	-566.447	-566.447	-566.447

BEAS-I-STD, Stop

-BAS-I-FROLINMOD, from line 150 in module SS

#EX

* R 88

? .0925, .3, 37.84E9

TENSION INDUITE DANS LA BOUCLE FORMEE PAR L'ALIMENTATION DU VAX
PENTE DU COURANT DE Foudre $di/dt = .3784E+11$ A/s (P=50%)

LONGUEUR DE LA BOUCLE Y2= 18.5 m

HAUTEURS DE LA BOUCLE Z1= 1.5 m Z2= 1.5 m

Xc	Yc	Ude	Uex	Umoy
-100	-20	286.193	286.193	286.193
-100	-10	197.082	197.082	197.082
-100	0	97.3518	97.3518	97.3518
-100	10	-7.95978	-7.95978	-7.95978
-100	20	-112.806	-112.806	-112.806
-75	-20	480.133	480.133	480.133
-75	-10	341.108	341.108	341.108
-75	0	171.92	171.92	171.92
-75	10	-14.1454	-14.1454	-14.1454
-75	20	-198.777	-198.777	-198.777
-50	-20	930.152	930.152	930.152
-50	-10	711.857	711.857	711.857
-50	0	377.875	377.875	377.875
-50	10	-31.6198	-31.6198	-31.6198
-50	20	-434.384	-434.384	-434.384
-25	-20	2149.76	2149.76	2149.76
-25	-10	2060.94	2060.94	2060.94
-25	0	1325.97	1325.97	1325.97
-25	10	-118.836	-118.836	-118.836
-25	20	-1489.71	-1489.71	-1489.71
0	-20	3982.42	3982.42	3982.42
0	-10	6655.53	6655.53	6655.53
0	0	72862.5	72862.5	72862.5
0	10	11487.7	11487.7	11487.7
0	20	-20202.4	-20202.4	-20202.4
25	-20	2149.76	2149.76	2149.76
25	-10	2060.94	2060.94	2060.94
25	0	1325.97	1325.97	1325.97
25	10	-118.836	-118.836	-118.836
25	20	-1489.71	-1489.71	-1489.71
50	-20	930.152	930.152	930.152
50	-10	711.857	711.857	711.857
50	0	377.875	377.875	377.875
50	10	-31.6198	-31.6198	-31.6198
50	20	-434.384	-434.384	-434.384
75	-20	480.133	480.133	480.133
75	-10	341.108	341.108	341.108
75	0	171.92	171.92	171.92
75	10	-14.1454	-14.1454	-14.1454
75	20	-198.777	-198.777	-198.777
100	-20	286.193	286.193	286.193
100	-10	197.082	197.082	197.082
100	0	97.3518	97.3518	97.3518
100	10	-7.95978	-7.95978	-7.95978
100	20	-112.806	-112.806	-112.806

%BAS-I-STD, Stop

-BAS-I-FROLINMOD, from line 160 in module SS

#EX

\$ R SS

? .0925, .3, 7.54E9

TENSION INDUITE DANS LA BOUCLE FORMEE PAR L'ALIMENTATION DU VAX
 PENTE DU COURANT DE Foudre $di/dt = .754E+10$ A/s (P=95%)

LONGUEUR DE LA BOUCLE Y2= 18.5 m

HAUTEURS DE LA BOUCLE Z1= 1.5 m Z2= 1.5 m

Xc	Yc	Ude	Uex	Umoy
-100	-20	57.0268	57.0268	57.0268
-100	-10	39.2706	39.2706	39.2706
-100	0	19.3983	19.3983	19.3983
-100	10	-1.58607	-1.58607	-1.58607
-100	20	-22.4778	-22.4778	-22.4778
-75	-20	95.6713	95.6713	95.6713
-75	-10	67.9691	67.9691	67.9691
-75	0	34.2568	34.2568	34.2568
-75	10	-2.81861	-2.81861	-2.81861
-75	20	-39.6084	-39.6084	-39.6084
-50	-20	185.342	185.342	185.342
-50	-10	141.845	141.845	141.845
-50	0	75.2953	75.2953	75.2953
-50	10	-6.30056	-6.30056	-6.30056
-50	20	-86.5553	-86.5553	-86.5553
-25	-20	428.362	428.362	428.362
-25	-10	410.663	410.663	410.663
-25	0	264.213	264.213	264.213
-25	10	-23.6793	-23.6793	-23.6793
-25	20	-296.839	-296.839	-296.839
0	-20	793.538	793.538	793.538
0	-10	1326.18	1326.18	1326.18
0	0	14518.6	14518.6	14518.6
0	10	2289.04	2289.04	2289.04
0	20	-4025.53	-4025.53	-4025.53
25	-20	428.362	428.362	428.362
25	-10	410.663	410.663	410.663
25	0	264.213	264.213	264.213
25	10	-23.6793	-23.6793	-23.6793
25	20	-296.839	-296.839	-296.839
50	-20	185.342	185.342	185.342
50	-10	141.845	141.845	141.845
50	0	75.2953	75.2953	75.2953
50	10	-6.30056	-6.30056	-6.30056
50	20	-86.5553	-86.5553	-86.5553
75	-20	95.6713	95.6713	95.6713
75	-10	67.9691	67.9691	67.9691
75	0	34.2568	34.2568	34.2568
75	10	-2.81861	-2.81861	-2.81861
75	20	-39.6084	-39.6084	-39.6084
100	-20	57.0268	57.0268	57.0268
100	-10	39.2706	39.2706	39.2706
100	0	19.3983	19.3983	19.3983
100	10	-1.58607	-1.58607	-1.58607
100	20	-22.4778	-22.4778	-22.4778

%BAS-1-STOP, Stop

-BAS-1-FRBLINMOD, from line 160 in module SS

R. 88

? .0295, .3, 7.54E9

TENSION INDUITE DANS LA BOUCLE FORMEE PAR LA PRISE N1

PENTE DU COURANT DE FOUORE $di/dt = .754E+10$ A/s

(P=95%)

LONGUEUR DE LA BOUCLE Y2= 5.9 m

HAUTEURS DE LA BOUCLE Z1= -1.5 m

Z2= .5 m

Xc	Yc	Ude	Uex	Umoy
-100	-20	9.6402	9.68969	9.66495
-100	-10	5.53207	5.56098	5.54653
-100	0	1.10669	1.11337	1.11003
-100	10	-3.38431	-3.40025	-3.39228
-100	20	-7.67682	-7.71445	-7.69563
-75	-20	16.5987	16.6839	16.6413
-75	-10	9.76691	9.81797	9.79244
-75	0	1.97581	1.98775	1.98178
-75	10	-6.0209	-6.04932	-6.03511
-75	20	-13.4029	-13.4688	-13.4358
-50	-20	34.1485	34.3235	34.236
-50	-10	21.455	21.5671	21.511
-50	0	4.47863	4.50576	4.49219
-50	10	-13.5075	-13.5716	-13.5396
-50	20	-28.5701	-28.7113	-28.6407
-25	-20	92.554	93.0246	92.7893
-25	-10	74.6702	75.0586	74.8644
-25	0	18.1621	18.2725	18.2173
-25	10	-51.8446	-52.0941	-51.9694
-25	20	-87.7745	-88.2163	-87.9954
0	-20	214.293	215.363	214.828
0	-10	414.889	416.95	415.919
0	0	14283.4	14335.7	14309.6
0	10	-770.605	-775.022	-772.813
0	20	-280.503	-281.989	-281.246
25	-20	92.554	93.0246	92.7893
25	-10	74.6702	75.0586	74.8644
25	0	18.1621	18.2725	18.2173
25	10	-51.8446	-52.0941	-51.9694
25	20	-87.7745	-88.2163	-87.9954
50	-20	34.1485	34.3235	34.236
50	-10	21.455	21.5671	21.511
50	0	4.47863	4.50576	4.49219
50	10	-13.5075	-13.5716	-13.5396
50	20	-28.5701	-28.7113	-28.6407
75	-20	16.5987	16.6839	16.6413
75	-10	9.76691	9.81797	9.79244
75	0	1.97581	1.98775	1.98178
75	10	-6.0209	-6.04932	-6.03511
75	20	-13.4029	-13.4688	-13.4358
100	-20	9.6402	9.68969	9.66495
100	-10	5.53207	5.56098	5.54653
100	0	1.10669	1.11337	1.11003
100	10	-3.38431	-3.40025	-3.39228
100	20	-7.67682	-7.71445	-7.69563

%BAS-I-STD, Stop

-BAS-I-FROLINMOD, from line 160 in module SS

#EX

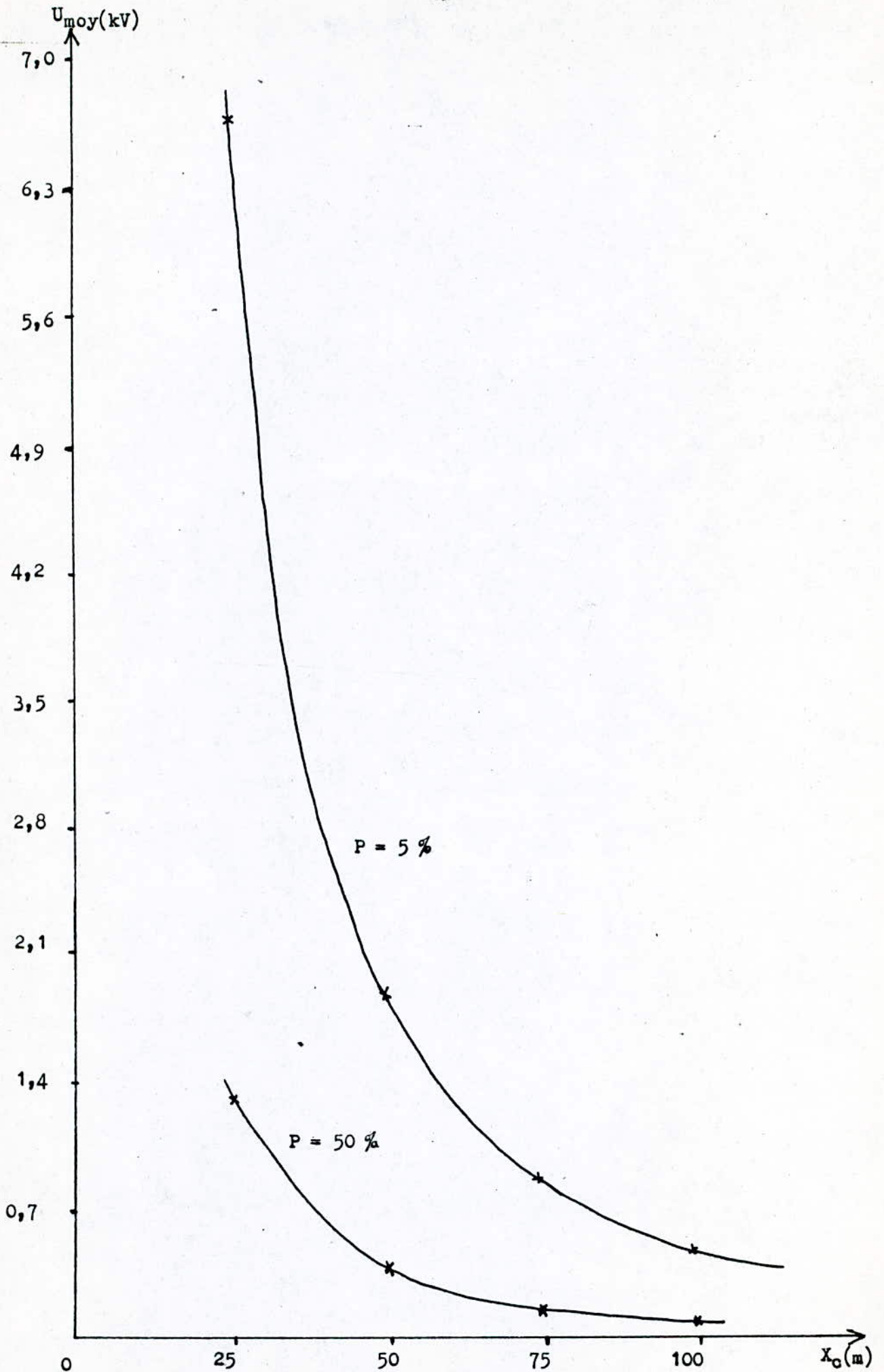


Fig.26 Variation de la tension induite dans la boucle de l'alimentation du V Δ X en fonction de X_0 avec $Y_0 = 0$ pour 2 probabilités de dépassement de la pente du courant de foudre.

-o0§0o- // O N C L U S I O N -o0§0o-

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le phénomène de foudre et les moyens de protection contre son atteinte.

Illinois a également donné l'occasion d'apprendre à traiter un problème pratique (application au centre de calcul) par l'informatique qui est un outil indispensable pour l'ingénieur.

L'établissement du schéma d'alimentation électrique du centre, qui n'existait pas avant, permet de rendre de grands services à la direction du centre.

L'avantage de l'algorithme de calcul utilisé réside dans sa simplicité et le fait qu'il nous permet d'obtenir directement le flux magnétique à travers la boucle, alors que les autres méthodes numériques (différences finies et éléments finis) calculent d'abord le potentiel magnétique et nécessitent la connaissance des conditions aux limites qui n'est pas toujours aisée.

Les résultats obtenus mettent bien en évidence le danger des surtensions auxquelles est exposé le centre de calcul même si le coup de foudre est lointain (2,6 Km).

Il est donc nécessaire de le protéger contre ces surtensions à l'aide d'une cage blindée qui empêcherait les champs électriques et magnétiques d'y pénétrer.

-o0\$0o- I B L I O G R A P H I E -o0\$0o-

- / 1 /. M. A G U E T et M. I A N O V I C I : Traité d'électricité , Vol 22
" Haute tension" . Editions G E O R G I , 1 9 8 2 .
- / 2 /. H A D D A D et T E R K I : "Protection contre la foudre du Labora-
toire H.T. de l'E.N.P.".Projet de fin d'études ; Juin 1 9 8 4 .
- / 3 /. E. K U F F E L et W.S. Z A E N G L : "High voltage Engineering
Fundamentals" . Pergamont press ; 1 9 8 4 .
- / 4 /. W. D I E S E N D O R F : "Insulation co-ordination in high-voltage
electric power systems". Butterworth Group, London ; 1 9 7 4 .
- / 5 /. M. A G U E T et M. I A N O V I C I : "Perturbations électromagnétiques
de manoeuvre et de foudre". Compatibilité électromagnétique ; pp 436-
446 . Presses polytechniques Romandes . 1 9 8 3 .
- / 6 /. T. H O R V A T H : "International lightning protection recommendations"
Part I - Common principles . (International lightning protection con-
ference - B U D A P E S T) 1 9 7 8 .
- / 7 /. R.H. G O L D : " Lightning protection"; Edition A R N O L D , 1 9 7 3 .
- / 8 /. P. H A S S E et J. W I E S I N G E R " Procédé de l'éclair en boule
pour la détermination du domaine disposition de capture"
- / 9 /. T. H O R V A T H : " É p ũ l e t e k V i l l á m v é d e l m e " .
Műszaki Könyvkiadó, B U D A P E S T , 1 9 8 0 .
- / 10 /. F. G A R D I O L : Traité d'électricité, Vol III "Eléctromagnétisme"
Editions G E O R G I . 1 9 7 9 .
- / 11 /. N. P I S K O U N O V : "Calcul différentiel et intégral" T 1 ; Editions
M I R • M O S C O U ; 1 9 8 0 ; pp.403 -- 407 .
- / 12 /. R.B. A N D E R S O N and A.J. E R I K S S O N : "lightning parameters
for engineering application" ; Colloquium and study committee meeting
suceava ; R O U M A N I A : 25 -- 29 June 1 9 7 9 . (C I G R E S T U D Y
C O M M I T T E E 3 3 O V E R V O L T A G E A N D I N S U L A T I O N C O - O R D I N A T I O N)