

SECRETARIAT D'ETAT A L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Département de GENIE ELECTRIQUE

THÈSE
DE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : MACHINES

Présentée par :

Kamel NACEREDDINE

Thème

**PROTECTION CONTRE LA FOUDRE
SUR UN SOL HETEROGENE;
SIMULATION NUMERIQUE**

Soutenue publiquement le : 29 Décembre 1992

Devant le Jury composé de :

Président :
M. E. ZAIM

Directeur de Thèse :
M. A. BOUBAKEUR

Examineurs :
M. A. BENSENOUCI
Mme S. DJEMA
M. A. MEKHALDI

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

SECRETARIAT D'ETAT A L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Département de GENIE ELECTRIQUE

**THESE
DE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : MACHINES

Présentée par :

Kamel NACEREDDINE

Thème

**PROTECTION CONTRE LA FOUDRE
SUR UN SOL HETEROGENE;
SIMULATION NUMERIQUE**

Soutenue publiquement le : 29 Décembre 1992

Devant le Jury composé de :

Président :
M. E. ZAIM

Directeur de Thèse :
M. A. BOUBAKEUR

Examineurs :
M. A. BENSENOUCI
Mme S. DJEMA
M. A. MEKHALDI

Dédiées

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

A la mémoire de mon défunt père,

à ma mère,

à mon autre mère,

et à ma famille de CONDOR'Eng.

**je dédie
ce modeste travail.**

Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je tiens à remercier vivement Monsieur Ahmed BOUBAKEUR, mon professeur, et par deux fois mon promoteur, pour l'aide, la confiance et l'amabilité qui ont accompagné l'accomplissement de ce travail.

Je remercie avec la même intensité, Monsieur Abd-el-Moumen OULD KADDOUR, Président Directeur Général de CONDOR' Engineering. SPA; pour avoir autorisé ma réinscription en Post-Graduation et surtout, pour s'être constamment enquis de l'avancement de cette thèse.

Mes remerciements vont également à M. El-Hadi ZAIM, Président du Jury et à Mme S.DJEMA, M. A. BENSENOUCI et M. A. MEKHALDI, membres de Jury.

Je remercie aussi M. Bouzid TALEB pour son aide déterminante dans la partie informatique de ce travail, et M. A. DJERMOUNI pour avoir autorisé ma première inscription.

Puissent toutes les personnes qui m'ont aidé, et elles sont nombreuses, trouver ici une part du témoignage de ma gratitude.



INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE 1 : CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA Foudre ET
 PROTECTION.....5

1.1. CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA Foudre :.....5

1.1.1 La terre, un gigantesque condensateur.....5

1.1.2 Mécanismes générateurs de la foudre.....6

1.1.3 Structure type d'un nuage orageux.....7

1.1.4 Caractéristiques électriques de la foudre.....7

1.1.4.1 Description des étapes du coup de foudre descendant.....7

1.1.4.1 Paramètres électriques des coups de foudre.....8

1.2 Protection contre la foudre; le modèle électrogéométrique...9

1.2.1 La distance d'amorçage.....11

1.2.2 La zone de protection.....12

1.2.3 La surface de capture.....13

1.2.4 Commentaires et critiques du modèle électrogéométrique...14

CHAPITRE 2: COMPARAISON ENTRE LA Foudre ET SA SIMULATION AU
 LABORATOIRE. MODELES DE LA Foudre.....15

2.1 Comparaison qualitative.....16

2.2 Comparaison quantitative.....17

2.2.1 Le traceur négatif descendant.....17

2.2.2 Leader positif ascendant.....18

2.3 Effet d'échelle.....19

2.4 Modèles analytiques de la foudre.....19

2.4.1 Modèle du nuage.....19

2.4.2 Relations entre hauteur, charge et courant du traceur;
 champ électrique au sol.....20

2.5 Modèles expérimentaux de la foudre.....22

2.5.1 Influence des propriétés électrologiques du sol sur
 le point d'impact de la décharge de foudre.....22

2.5.1.1	Modèle mathématique.....	22
2.5.1.2	Modèle expérimental.....	24
2.5.1.3	Conclusions.....	25
2 5.2	Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène.....	25
2.5.2.1	Dispositif expérimental.....	25
2.5.2.2	Conclusions.....	26
 CHAPITRE 3 CALCUL NUMERIQUE DU CHAMP: LE PROGRAMME "PROC2D"....		27
3.1	INTRODUCTION.....	28
3.2.1	La méthode variationnelle.....	28
3.2.2	Etapes de la méthode variationnelle.....	29
3.3	Le programme "PROC2D".....	29
3.3.1	Présentation du pré-processeur "PREPROC".....	30
3.3.2	Présentation du processeur "MEFPROC".....	34
3.3.3	Présentation du post-processeur "POSTPROC".....	36
3.4	Application: visualisation de l'allure des lignes de champ et des équipotentielles.....	37
 CHAPITRE 4: SIMULATION NUMERIQUE DE LA Foudre.....		39
4.1	Présentation du Modèle.....	40
4.2	Protection sur sol homogène.....	42
4.2.1	Sol conducteur.....	42
4.2.2	Sol mauvais conducteur.....	43
4.3	Protection sur sol hétérogène.....	45
4.3.1	Généralités.....	45
4.3.2	Protection au dessus du sable.....	45
4.3.2.1	Tige comprise entre la protection et l'interface; configuration (S-P-T-I).....	45
4.3.2.2	Protection comprise entre la tige et l'interface; configuration (S-T-P-I).....	47
4.3.3	Protection au dessus de l'acier.....	50
4.3.3.1	Tige comprise entre la protection et l'interface; configuration (A-P-T-I).....	50

4.3.3.2 Protection comprise entre la tige et l'interface;
 configuration (A-T-P-I).....52

4.4 Influence de la permittivité relative du sol.....55

4.4.1 Tige et protection au dessus de l'acier.....55

4.4.2 Tige et protection au dessus du sable.....55

4.5 Critiques du modèle.....61

4.5.1 Limites Physiques.....61

4.5.2 Limites numériques.....61

CHAPITRE 5 CONFRONTATION DES RESULTATS DE SIMULATION A CEUX
 DU LABORATOIRE.....63

5.1 Introduction.....64

5.2 récapitulation des résultats de simulation numérique.....64

5.3 Comparaison simulation-laboratoire.....65

5.3.1 Paratonnerre situé au dessus du sable.....65

5.3.2 Paratonnerre situé au dessus de l'acier.....67

5.4 Extension à la foudre réelle.....69

5.5 Conclusions.....70

6 CONCLUSIONS GENERALES.....71

7 BIBLIOGRAPHIE.....75

8 ANNEXES.....78

INTRODUCTION

"En pénétrant ce phénomène merveilleux de la nature réelle - au lieu des sphères idéales de conducteurs parfaits à l'intérieur d'autres sphères, que nous pouvons calculer si précisément - nous découvrons que nous n'y connaissons pas grand-chose. Et pourtant c'est vraiment passionnant. Quiconque s'est trouvé pris dans un orage, en a éprouvé de la joie ou de la frayeur ou tout au moins une certaine émotion. Et dans la nature, là où nous éprouvons une émotion, on trouve qu'il lui correspond en général une complexité et un mystère..."

Ces mots de Richard Feynman [1], outre leur connotation philosophique, expriment la complexité de ce phénomène qui n'a cessé d'attiser la curiosité des philosophes et des poètes et qui est un domaine d'investigations scientifiques intenses depuis les travaux de B. Franklin.

L'intérêt que suscite l'étude de la foudre peut être motivé aussi bien par des considérations de recherche fondamentale (thermodynamique, physique des plasmas etc...), que par des considérations de recherche appliquée, en l'occurrence la protection contre ses effets directs ou indirects.

En effet chaque année, la foudre endommage ou détruit des équipements électriques ou électroniques, ainsi que des installations portuaires, des raffineries de pétrole et des réservoirs de matières combustibles.

Le coût économique de ces dégâts a accéléré les travaux consacrés à la protection contre la foudre, qui ont abouti au modèle électrogéométrique.

Dans cet ordre d'idées, nous citons sommairement dans le premier chapitre de ce travail, les principales caractéristiques de la foudre et nous présentons le modèle électrogéométrique.

Malgré les immenses services qu'il rend, le modèle électrogéométrique n'est pas parfait. En effet sa formulation simpliste actuelle néglige un grand nombre de paramètres essentiels à une bonne détermination des points d'impact de la foudre.

La quête de l'amélioration de la protection et les difficultés d'étude directe de la foudre ont amené les équipes de recherche à travers le monde à simuler ce phénomène au laboratoire

ou à l'aide de modèles analytiques.

Dans Le deuxième chapitre nous expliquons les difficultés de modélisation et de simulation au laboratoire, et présentons les résultats des travaux entrepris au laboratoire de Haute Tension de l'E.N.P, dont ce travail se veut une continuité.

L'une des faiblesses du modèle électrogéométrique réside dans le fait qu'il ne tient pas compte des propriétés électrogéologiques du sol. Notre contribution est justement d'étudier le rôle de la nature du sol dans la détermination du point d'impact de la foudre en présence d'un paratonnerre horizontal.

Pour cela, nous avons développé un outil de maillage, de calcul numérique et de visualisation du champ et du potentiel électrostatiques, dans un domaine bidimensionnel.

Ce programme que nous avons nommé "PROC2D", fait l'objet d'une présentation au troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, nous appliquons ce programme à la simulation numérique de la foudre et ce, en calculant la distribution du champ électrostatique pour différentes positions des conducteurs, puis pour différentes permittivités relatives du sol.

Nous terminons ce travail par un cinquième chapitre où nous confrontons nos résultats de simulation à ceux du laboratoire, avec une tentative d'extension au phénomène réel de la foudre.

CHAPITRE -1-

CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA

FOUDRE ET PROTECTION.

1.1. CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA FOUDRE :

1.1.1 La terre, un gigantesque condensateur.

La terre forme avec l'électrosphère située à 50 km d'altitude, un condensateur sensiblement sphérique. Des mesures montrent qu'il existe par beau temps, un champ électrique permanent, de faible intensité, dirigé de l'électrosphère vers la surface de la terre. De plus la présence de radiations cosmiques ou radioéléments naturels entraîne l'existence de charges électriques entre les deux armatures. Ces charges dérivent sous l'action du champ électrique et déchargent le condensateur terrestre. On estime la conductivité moyenne de l'espace interélectrodes à $2.4 \cdot 10^{-14}$ S/m, d'où une densité de courant de $3 \cdot 10^{-12}$ A/m², pour un champ de 130 V/m [2,3].

A cette valeur du champ moyen correspond une densité de charge à la surface de la terre de l'ordre de $1.15 \cdot 10^{-3}$ μ C/m², et un calcul montre que la constante de temps de décharge est de l'ordre de 500 s.

Mais la persistance du champ électrique terrestre, malgré quelques fluctuations, nécessite un mécanisme qui l'entretient, et on pense que c'est la foudre [3].

1.1.2 MECANISMES GENERATEURS DE LA FOUDRE, LA SEPARATION DES CHARGES.

Il existe en permanence autour du globe terrestre, entre 2000 et 5000 orages produisant une centaine de décharges électriques par seconde; parmi celles-ci un tiers frappe la terre - c'est la foudre - les deux autres tiers jaillissent entre nuages ou à l'intérieur d'un même nuage et on parle alors d'éclairs ou de décharges intra-nuages. La formation des nuages orageux est généralement due à l'apparition de courants atmosphériques ascendants dont la vitesse peut dépasser 360 km/h. Si les conditions de température et d'humidité sont convenables, il se produit une détente de l'air humide au cours de son ascension, avec refroidissement entraînant la condensation [2,3].

Le vent ascendant maintient en suspension des goutelettes qui s'agglomèrent et grossissent de plus en plus jusqu'à finir par se briser; cette pulvérisation entraîne une électrisation des goutelettes : les particules légères chargées positivement, sont entraînées par les courants ascendants vers le sommet du nuage et les particules lourdes chargées négativement, tombent sous l'action de leur poids. On assiste ainsi au phénomène de séparation des charges dans une cellule orageuse. Les estimations concernant la charge contenue dans une cellule d'orage varient entre quelques dizaines et quelques centaines de Coulombs [2].

1.1.3 STRUCTURE TYPE D'UN NUAGE ORAGEUX.

Le résultat de la séparation des charges dans un nuage est schématisé à la figure 1.1.a.

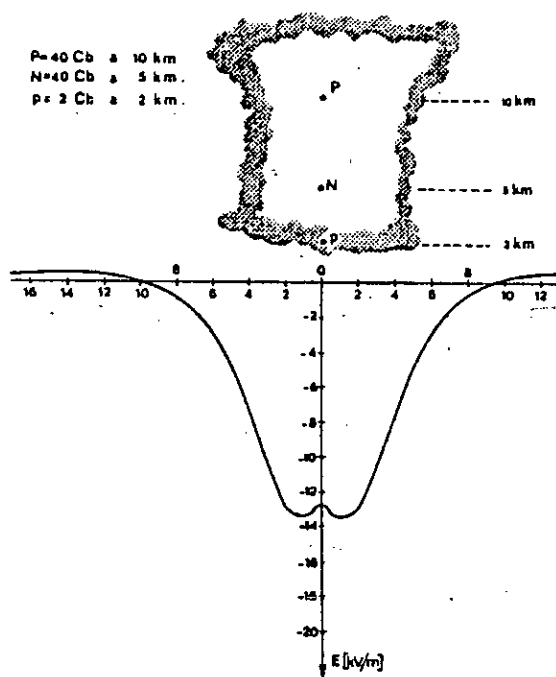


Fig 1.1. a: Structure type d'une cellule d'orage.
b: Répartition du champ au sol [3].

Le centre des charges positives est situé en haut du nuage et celui des charges négatives en bas, conférant ainsi au nuage une structure de dipôle. Les charges de signes contraires créent entre-elles un champ électrique intense. On a également représenté la répartition du champ sur la surface d'un terrain plat au dessous d'une cellule d'orage (fig 1.1.b).

1.1.4 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DE LA FOUDRE:

On classe habituellement les coups de foudre en quatre types:

- Ascendant négatif.
- Ascendant positif.
- Descendant positif.
- Descendant négatif.

Cette classification se base sur le sens du traceur et le signe des charges de la base du nuage [2,3].

Nous nous intéresserons par la suite au quatrième type de coup de foudre qui est de loin le plus fréquent (80 % des cas dans les régions tempérées plates) [3].

1.1.4.1 Description des étapes du coup de foudre descendant.

L'initiation de la décharge est un phénomène encore mal cerné, mais on sait que la première étape d'un coup de foudre négatif, est l'apparition d'un traceur sous forme d'un filament ionisé qui prend naissance dans une zone négative d'une cellule d'orage.

Ce traceur se développe en progressant par bonds successifs de quelques dizaines de mètres; entre les bonds on observe des temps d'arrêt de l'ordre de 40 à 100 μ s. La vitesse de progression moyenne et comprise entre 0.15 et 1.5 m/ μ s [2,3].

Au fur et à mesure que le traceur progresse, on remarque une accentuation de sa luminosité et une ramification.

A l'approche du sol, des prédécharges ascendantes se développent de ce dernier. Lorsque l'une des décharges ascendantes et le traceur se rejoignent, il s'établit un canal conducteur reliant la terre au nuage. Une fois ce lien établi, un courant de forte intensité remonte le canal ionisé à une vitesse de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière, c'est l'arc en retour (fig 1.2).

En général un coup de foudre complet dure de 0.2 à 1 s et comporte en moyenne quatre décharges impulsionnelles. Dans l'intervalle entre les décharges, un faible courant (relativement aux décharges principales) de l'ordre de la centaine, au millier d'Ampères, continue à s'écouler par le canal ionisé. C'est ce courant qui écoule souvent la plus grande partie de la charge totale du coup de foudre [2,3].

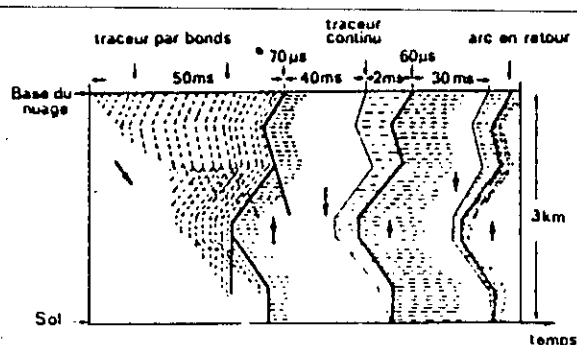


Figure 1.2 Evolution temporelle du coup de foudre descendant [3].

1.1.4.2 Paramètres électriques des coups de foudre.

- Forme des décharges négatives.

Les coups de foudre négatifs offrent une large variété de combinaisons de courants impulsionnels et de courants persistants. La durée de front de la première décharge est de l'ordre de 5 à 15 μ s, la durée de queue est de l'ordre de la centaine de microsecondes (fig 1.3 a & b).

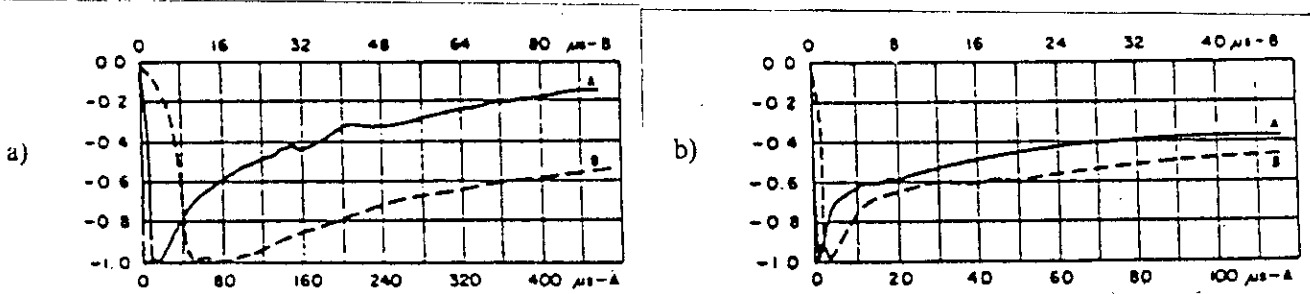


Figure 1.3 a: Forme moyenne des premières impulsions négatives
 b: Forme moyenne des impulsions négatives suivantes [3].

- Amplitude des coups de foudre

La distribution des amplitudes de courant de foudre obéit à une loi de probabilité du type log-normal. En effet si on porte en abscisse le logarithme de l'intensité (en kA) du courant du coup de foudre et en ordonnée la probabilité qu'a un coup de foudre de dépasser une intensité de courant donnée, on obtient sensiblement des droites (fig 1.4). La probabilité p qu'a un coup de foudre pour dépasser l'intensité I est exprimée par [3] :

$$\text{Log } p = 2 - I / 60$$

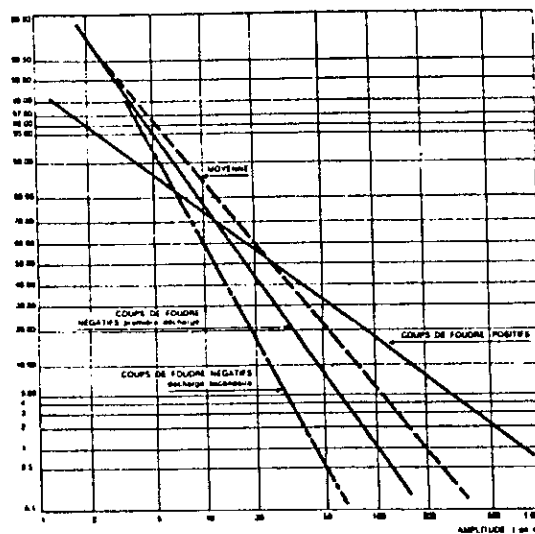


Figure 1.4: Distribution statistique des coups de foudre [3].

- Raideur de front des coups de foudre.

Les coups de foudre négatifs sont caractérisés par des raideurs de front importantes, elles sont supérieures en moyenne à 2 kA/ μ s. Les raideurs de front des décharges négatives secondaires peuvent être beaucoup plus grandes. On a mesuré jusqu'à 100 kA/ μ s (Tableau 1) .

- Charge totale neutralisée :

Elle se situe en moyenne aux environs de la dizaine de Coulombs; elle peut dépasser 300 Coulombs, pour une très longue et violente décharge (Tableau 1).

- Effet thermique :

On considère généralement l'intégrale du carré du courant de foudre pour estimer ses effets thermiques. Sa valeur pouvant atteindre 35 kA².s (Tableau 1).

Probabilité de dépassement	Crête	Charge	Pente	$\int I^2 dt$	Durée totale
P%	I (kA)	Q (C)	S (kA/us)	(kA ² .s)	t (s)
50	26	14	48	0.54	0.09
10	73	70	74	1.9	0.56
1	180	330	97	35	2.7

Tableau 1 : Récapitulation des principales caractéristiques des coups de foudre [3].

1.2 PROTECTION CONTRE LA Foudre , LE MODELE ELECTROGEOMETRIQUE

Les dégâts causés par la foudre sont considérables, ces dégâts sont dûs aussi bien à des effets directs qu'à des effets indirects.

Les effets de la chute directe sont cause de mort humaine et animale, de destruction d'installations et d'incendie. Les effets indirects, ou d'induction sont, la perturbation voire la destruction d'installations électriques et électroniques [2,3].

L'importance de ces dégâts, a mené des équipes de chercheurs à travers le monde, à développer des méthodes pratiques de protection contre la foudre , parallèlement à la recherche fondamentale qui se soucie de cerner l'origine et les différents aspects du phénomène de foudre.

1.2.1. La distance d'amorçage.

L'un des concepts sur lesquels se basent les modèles de protection contre la foudre, est celui de distance d'amorçage. Selon ce concept, le point probable du sol qui sera frappé par la foudre, reste indéterminé jusqu'au moment où le leader descendant atteint dans sa progression, une certaine distance au dessus du sol; ensuite, du fait de l'intensification locale du champ électrique et de l'émission de streamers ascendants par les structures du voisinage, le processus d'amorçage s'oriente dans une direction préférentielle, et le point d'aboutissement du coup de foudre est déterminé [2].

D'autre part, si l'on s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle l'amplitude de la charge et le courant de crête sont positivement corrélés, ce qui est conforté par les observations de K.Berger, il est évident que la distance d'amorçage est en rapport avec la charge du leader et donc avec le courant de foudre.

En accord avec d'autres chercheurs, Whitehead [4] a proposé l'expression suivante :

$$D = 10 I^{2/3}$$

où D , exprimée en mètres, est la distance d'amorçage.

I , exprimée en kA, est la valeur de crête du courant de foudre.

1.2.2. La zone de protection.

Tout se passe selon le modèle électrogéométrique, comme si la tête du traceur était le centre d'une sphère fictive de rayon D . A l'approche du sol, le premier objet que touchera la sphère déterminera le point d'impact. Nous allons appliquer cette méthode au cas du paratonnerre vertical, pour mettre en évidence la notion de zone de protection.

Supposons qu'un traceur négatif se dirige vers le sol au voisinage du paratonnerre, la sphère fictive associée à sa tête peut atteindre le sol suivant trois possibilités (fig 1.5) :

- Contact avec la tige seulement (sphère (A));
- contact avec le sol seulement (sphère (B));
- Contact simultané, avec la tige et le sol (sphère (C)).

C'est la troisième possibilité qui définit la zone de protection.

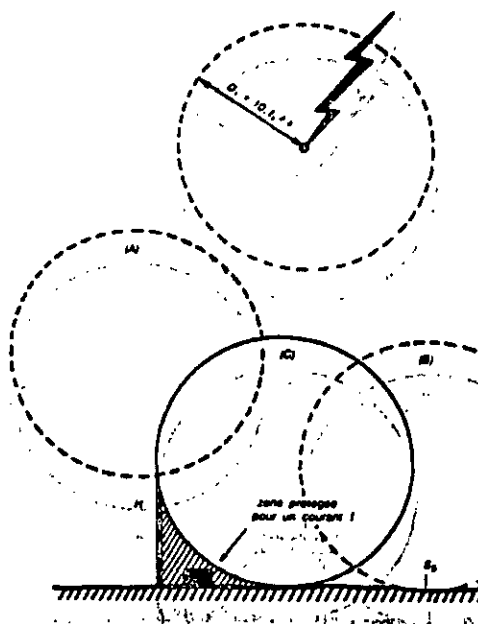


Figure 1.5: Zone de protection [3].

Considérons par exemple l'ensemble des sphères qui touchent simultanément la tige et le sol, le lieu des centres de ces sphères délimitent la zone d'attraction de la tige. Dans un plan perpendiculaire à la terre ce lieu est, pour des rayons $D < H$ une droite issue du pied de la tige, et devient à partir de $D = H$ une parabole, dont la projection sur la surface du sol, comptée à partir du pied de la tige est :

$$OX = H\sqrt{2(D/H) - 1}$$

1.2.3. Surface de capture.

La figure 1.6 représente les sphères fictives associées à différentes distances d'amorçage et, ainsi donc à différents courants de foudre. Pour une hauteur H de la protection et pour une distance d'amorçage D , le volume de capture de la tige est constitué par un cône prolongé par un parabololoïde de révolution. La base de ce volume constitue la surface de capture de la tige, elle est donnée par:

$$S = \pi \cdot H^2 \cdot (2(D/H) - 1)$$

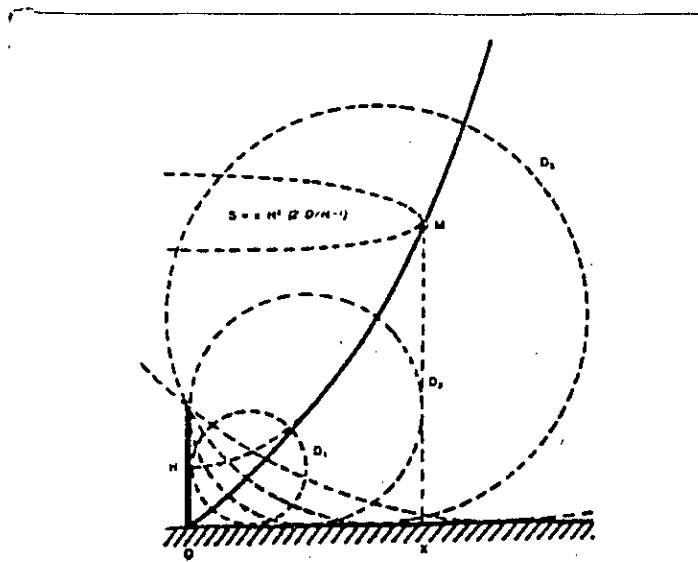


Figure 1.6 : Zone de capture [3].

1.2.4 Commentaires et critiques du modèle électrogéométrique.

Le modèle électrogéométrique prévoit une zone de protection d'autant plus grande que l'intensité du courant de foudre augmente. Il ne faut cependant pas dissimuler que dans la réalité il existe un grand nombre de causes de dispersion inhérentes pour la plupart à la définition de la distance d'amorçage.

On ne dispose en effet actuellement que d'une quantité limitée de données existant entre la distance d'amorçage et le courant de foudre [4].

Il semblerait par ailleurs que la distance d'amorçage est également une fonction de la géométrie de la structure et plus particulièrement de sa hauteur [5]. On signalera aussi que le modèle ne tient pas compte des particularités électrogéologiques du sol et c'est là qu'est centrée l'activité de notre laboratoire depuis plusieurs années .

On notera enfin, que malgré ses insuffisances, le modèle électrogéométrique a rendu d'énormes services dans la conception de protections contre la foudre et plus particulièrement dans le domaine du transport d'énergie. Il constitue de ce fait l'approche la plus cohérente du mécanisme d'impact de la foudre qui a été élaboré à ce jour [2].

CHAPITRE -2-

COMPARAISON ENTRE LA Foudre ET SA SIMULATION AU
LABORATOIRE. MODELES DE LA Foudre.

INTRODUCTION :

De par sa nature incontrôlable l'étude directe de la foudre est extrêmement difficile. Par ailleurs, la comparaison de photographies au convertisseur d'images de la décharge des grands intervalles d'air et les photographies dynamiques de la progression de la foudre, montre qu'il existe une similitude substantielle entre les phénomènes de foudre et de décharge des grands intervalles d'air [6].

De plus, on bénéficie au laboratoire de la possibilité de répéter à souhait le phénomène; on peut travailler dans l'obscurité et donc utiliser des méthodes de diagnostic sophistiquées telle que la spectroscopie. On peut aussi mesurer des paramètres inaccessibles dans le cas de la foudre réelle, tel que le courant associé au précurseur etc...

Ceci fait souvent préférer la simulation au laboratoire du phénomène de foudre à son étude directe.

2.1 COMPARAISON QUALITATIVE.

Nous avons vu au premier chapitre que l'évolution du coup de foudre négatif se divisait schématiquement en quatre étapes :

- La première phase consiste en une réorganisation des charges dans les nuages créant les conditions d'initiation d'un traceur. Dans le laboratoire par contre, c'est une impulsion de tension qui crée les conditions de développement d'un précurseur.

- La deuxième phase est le développement vers la terre de ce précurseur ; c'est à la fin de cette étape que se déterminera le point d'impact au sol.

Cette phase est comparable au phénomène de laboratoire mis à part le fait que le développement du précurseur dans le cas de la foudre est la conséquence du champ résultant de l'ensemble des poches de charges et de leurs fluctuations.

- La troisième phase commence avec l'écoulement du courant impulsionnel de foudre qui peut être suivi d'un courant

persistant. la comparaison est aussi envisageable lors du court-circuit entre nuage et terre ou entre les deux électrodes du laboratoire, une fois établi le lien entre le précurseur et le leader positif ascendant.

- La quatrième phase consiste éventuellement en la, ou les impulsions secondaires. Ceci ne peut être reproduit au laboratoire que si on connecte en parallèle plusieurs générateurs de choc, déclenchés à des instants déterminés [6].

2.2 COMPARAISON QUANTITATIVE

La comparaison portera sur les étapes similaires des deux phénomènes, à savoir la propagation du traceur négatif descendant et l'initiation et la propagation du leader positif ascendant menant au coup de foudre.

2.2.1 Le traceur négatif descendant

- Charge du leader

La charge par unité de longueur du leader, observée dans les décharges de laboratoire (jusqu'à 14 m de distance d'amorçage) est d'environ 100 à 200 $\mu\text{C}/\text{cm}$, avec une petite tendance à augmenter avec la longueur du leader [7].

Ces valeurs sont cohérentes avec celles des charges les plus petites pouvant être déduites des phénomènes d'éclairs descendants observés[7].

- Vitesse du leader.

On a trouvé que la vitesse moyenne de progression des leaders négatifs au laboratoire se situe autour de 5 à 10 $\text{cm}/\mu\text{s}$, pour des amorçages jusqu'à 14m de longueur, avec une tendance à croître avec la distance d'amorçage. Une vitesse quelques peu plus élevée, 30 $\text{cm}/\mu\text{s}$ découle d'observations des décharges de foudre [7].

2.2.2 Leader positif ascendant

Les caractéristiques du leader positif ascendant sont

similaires à celles trouvées pour des configurations de laboratoire lorsqu'elles sont sollicitées par une surtension de manœuvres de polarité positive. Cette similitude est une conséquence du fait que pendant la propagation du leader négatif descendant, le champ électrique à proximité des structures mises à la terre, présente une variation temporelle similaire à celle provoquée par des impulsions de front long [7].

- Initiation du leader

Des expériences ont montré que l'initiation du leader positif est la même, soit lorsque l'électrode est directement excitée avec polarité positive, soit lorsqu'elle est chargée positivement par la présence d'autres électrodes excitées, ou, comme pour la foudre, par la progression du traceur négatif descendant.

- Charge du leader

Des essais jusqu'à 30m indiquent une charge moyenne par unité de longueur de l'ordre de $50 \mu\text{C/m}$. Comme pour les leaders négatifs, on peut s'attendre à une dispersion autour de cette valeur [7].

- Vitesse du leader

La vitesse observée dans les expériences de laboratoire, pour des leaders positifs, se place autour de 1.5 à 2 $\text{cm}/\mu\text{s}$. Néanmoins, on peut s'attendre à des vitesses plus grandes à cause d'effets de forte humidité et de sursollicitation, atteignant des valeurs similaires à celles trouvées lors des observations des leaders positifs ascendants dans les coups de foudre, qui sont environ de 8 à 10 $\text{cm}/\mu\text{s}$ [7].

2.3 Effet d'échelle.

De nombreux paramètres ne sont pas accessibles à la mesure dans le cas de la foudre. Nous sommes donc confrontés à la difficulté relative aux ordres de grandeur des paramètres qu'on peut comparer. C'est le cas par exemple, du courant associé au précurseur descendant où on soupçonne que la différence laboratoire-réel est due à ce qu'on peut appeler l'effet d'échelle [6].

Cet effet explique également les différences quantitatives qu'on observe au voisinage du point d'impact. Dans le cas de la foudre frappant une structure au sol, on observe un leader positif ascendant bien avant que la décharge négative descendante n'atteigne la structure. Au laboratoire, la couronne est moins développée, la charge associée au leader est plus faible et par conséquent le champ propre créé par la décharge descendante est plus faible. Il en résulte que la décharge descendante doit s'approcher plus près de la structure pour déclencher la décharge ascendante, laissant à cette dernière peu de temps pour se développer [6].

2.4 Modèles Analytiques de la foudre

2.4.1 Modèle du nuage

Un modèle approprié de la charge du nuage est fondamental puisque, dans le cas des structures hautes, la présence des nuages seuls peut être suffisante pour provoquer le début des leaders positifs ascendants, qui généralement se développent en éclairs ascendants [7].

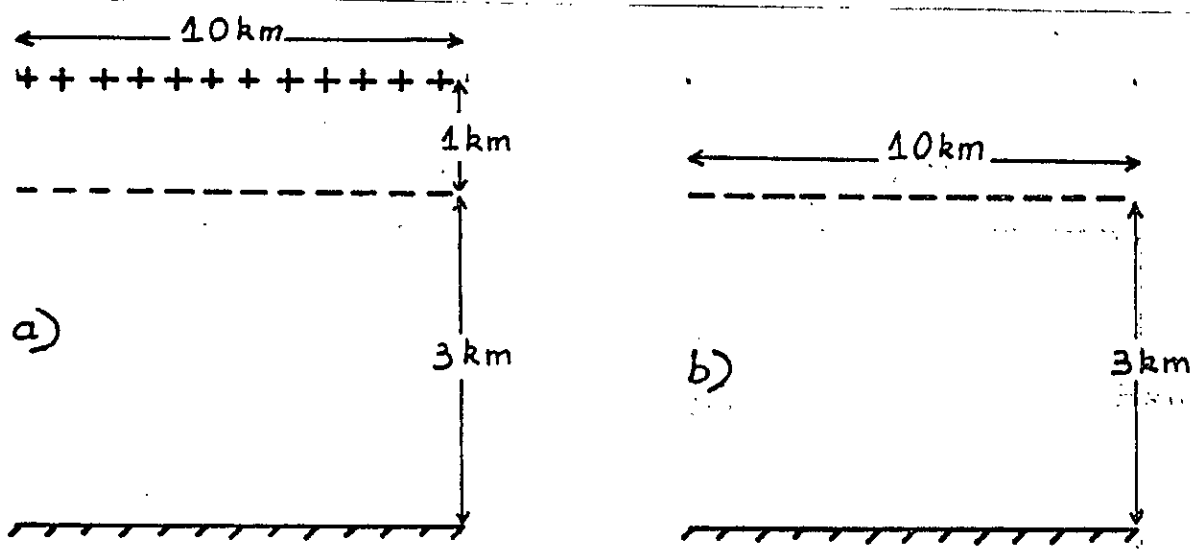


Figure 2.1 a: Modèle bipolaire du nuage.

b: Modèle unipolaire équivalent [7].

Les données disponibles sur la hauteur des charges, leur valeur et leur extension spatiale présentent une grande dispersion, mais il y a un certain accord sur leur nature bipolaire (fig 2.1.a). Cependant, pour limiter le nombre de variables, on utilise la distribution unipolaire équivalente (fig 2.1.b).

2.4.2 Relations entre hauteur, charge et courant du traceur; champ électrique au sol.

Une des difficultés de la modélisation de la foudre, est l'incertitude sur la distribution des charges électriques le long du traceur.

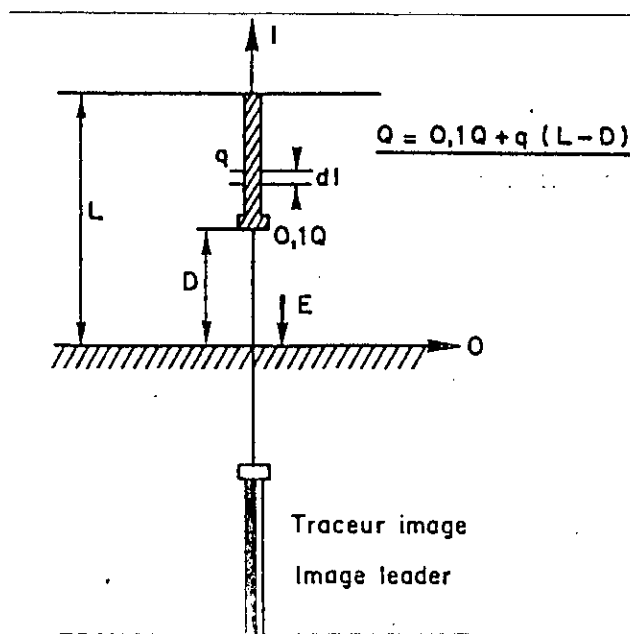


Figure 2.2 : Modèle du traceur [8].

L'une des modélisations [8] suppose 10 % de la charge concentrée sur la pointe du traceur et le reste uniformément réparti sur sa longueur (fig 2.2) ; soit:

$$Q = 0.1 Q + l q$$

avec :

$$l = L - D$$

L : Longueur du traceur; D : hauteur de formation du traceur

q : Charge linéique; Q : Charge totale.

On rencontre aussi dans la littérature [8], la corrélation :

$$I \text{ (kA)} = 15 Q \text{ (C)}$$

Où Q est la charge totale du traceur à l'instant de l'impact au sol, c'est à dire quand $L = 1$ (fig 2.2); on en déduit que :

$$q \text{ (C)} = 0.9 I \text{ (kA)} / 15 L \text{ (m)}$$

En se basant sur ces hypothèses, on calcule à l'aide de la méthode des images le champ électrique au sol par [8]:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 L} (1-k) \frac{9k+1}{9k^2}$$

avec $k=D/l$

On donne dans le tableau 2, les charges linéiques pour quelques valeurs du courant de crête, avec $L = 3000$ m, et à la figure 2.3, le champ au sol en fonction de l'altitude de la tête du précurseur descendant, pour différentes valeurs du courant de foudre [8].

I (kA)	10	20	50	75	100	150
q (μ C/m)	200	400	1000	1500	2000	3000

Tableau 2: Charges linéiques en fonction du courant de crête[8].

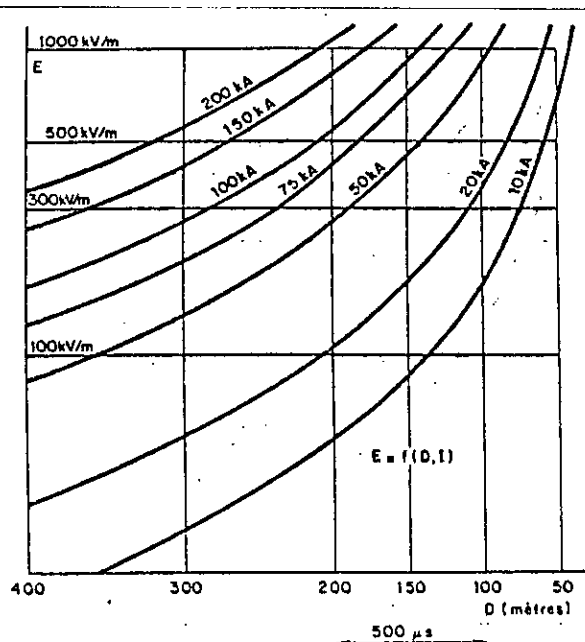


Figure 2.3: Champ électrique au sol en fonction de l'altitude de la tête du traceur pour différentes valeurs du courant de foudre [8].

2.5 Modèles expérimentaux de la foudre

2.5.1 Influence des propriétés électrogéologiques du sol sur le point d'impact de la décharge de foudre.

Nous avons vu au premier chapitre, que l'une des limites du modèle électrogéométrique était la non intervention des propriétés électrogéologiques du sol dans la détermination du point d'impact. L'objet du travail de J. FERRAS [9] est de voir justement, quelle influence pourrait avoir l'hétérogénéité du sol sur le point d'impact de la foudre. Pour cela deux modèles ont été utilisés, l'un numérique et l'autre expérimental, que nous présentons sommairement et dont nous donnons les conclusions.

2.5.1.1 Modèle mathématique :

- Hypothèses :

La description mathématique du phénomène se base sur

l'équation de Poisson :

$$\Delta\phi = -\rho/\epsilon_0$$

et l'équation de conservation de la charge :

$$\nabla \cdot \mathcal{J} = -\partial\rho/\partial t$$

Le modèle tient compte de l'aspect propagatoire du phénomène en l'assimilant à une succession de situations statiques reliées suivant le schéma-bloc de la figure 2.4.

Pour une position donnée de la prédécharge et pour une répartition initiale des charges sur le sol, on détermine le potentiel à l'aide de l'équation (1). On déduit la valeur du champ à l'aide de (2). Ce champ engendre une densité de courant \mathcal{J} selon (3), et à l'aide de l'équation (4), on calcule la variation de la densité de charges. Cette dernière constitue la condition initiale d'un nouveau calcul du potentiel pour une nouvelle position du précurseur et ainsi de suite ...

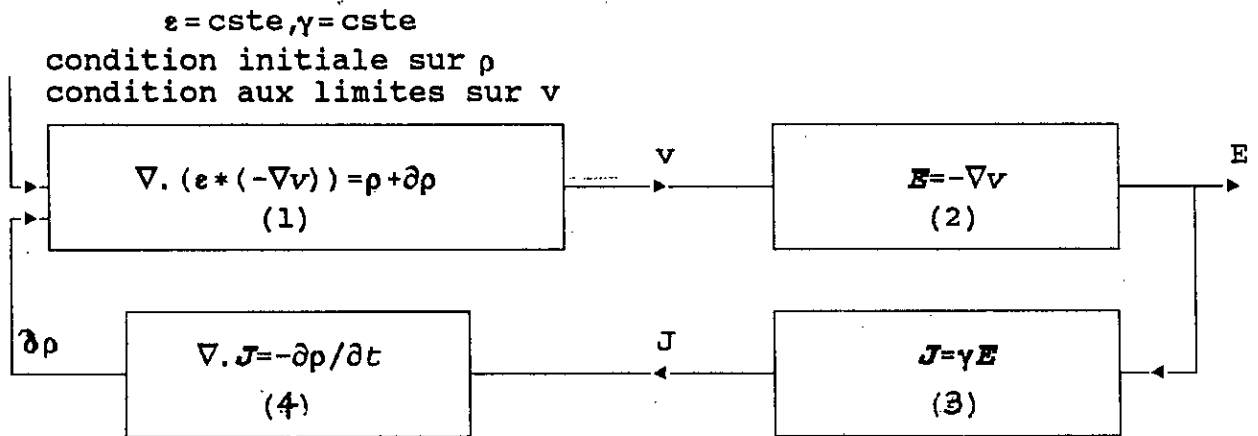


Figure 2.4: Schéma bloc des relations entre le potentiel, le champ, la densité de courant et la densité de charges sur le sol.

Ce procédé permet de suivre l'évolution du champ électrique sur la surface du sol en fonction de la progression du traceur par bonds.

2.5.1.2 Modèle expérimental

Le modèle expérimental (fig 2.5) a été choisi dans le but d'étudier l'influence de l'hétérogénéité du sol sur l'impact de la décharge de foudre. Cette décharge est simulée par des impulsions de forme 1.2/50 μ s obtenues à l'aide d'un générateur de choc.

Ce modèle représente le saut final de la décharge de foudre. Le sol est constitué pour une moitié de sable sec ou humide et pour l'autre moitié d'acier.

Les essais sur ce modèle, pour différentes conductivités du sable, ont permis l'étude de la répartition des décharges sur la surface d'un sol hétérogène et celle de l'influence de la position de l'interface par rapport au précurseur, sur l'impact de la décharge de foudre.

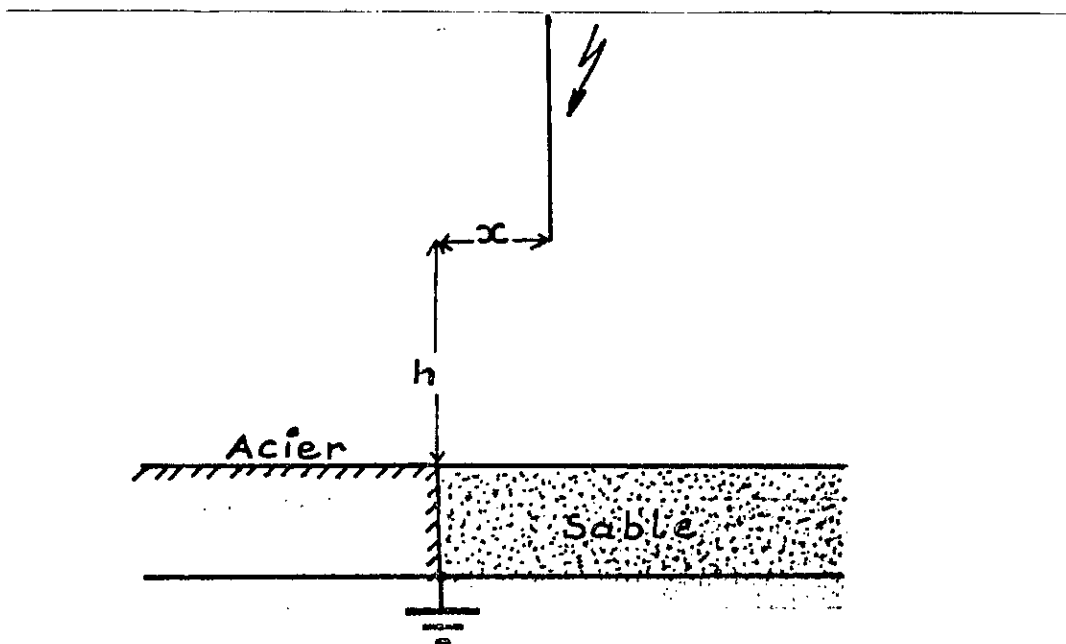


Figure 2.5 : Modèle expérimental

2.5.1.3 Conclusions

Les conclusions pour le modèle mathématique sont une augmentation en exponentielle de l'intensité du champ à l'interface lorsque la prédécharge évolue en direction du sol.

En ce qui concerne le modèle expérimental, on a pu voir que la répartition des décharges sur la surface d'un sol hétérogène est différente de celle du cas du sol homogène, et que l'influence de l'interface augmente avec le degré d'hétérogénéité du sol.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence l'influence que pourrait avoir l'hétérogénéité du sol, sur l'impact des décharges de foudre.

2.5.2 Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène.

2.5.2.1 Dispositif expérimental.

Le dispositif expérimental (fig 2.6) est celui déjà présenté (fig 2.5) mais en présence d'une tige cylindrique horizontale mise à la terre représentant le paratonnerre [10].

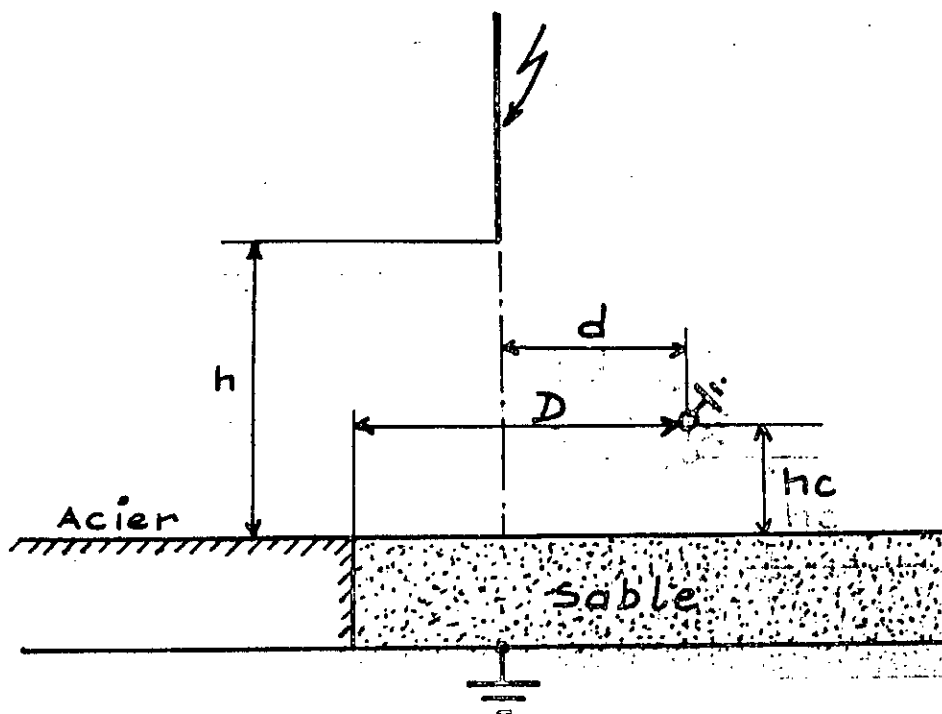


Figure 2.6 : Modèle expérimental.

La terre est constituée de deux composants de propriétés électrogéologiques différentes. La décharge de foudre, au moment du saut final est simulée par une tige; le paratonnerre est constitué d'un conducteur cylindrique placé horizontalement au dessus du sol et ayant son axe parallèle à l'interface constitué par les deux milieux.

Les essais consistent à déterminer les positions de la tige pour lesquelles la probabilité de décharge sur le conducteur est égale à 90% .

Ces dernières déterminent la zone d'attraction du paratonnerre. Pour cela, on fixe les distances D et h_c et on fait varier d et h , et ce pour les différentes positions relatives de la tige par rapport à l'interface et au paratonnerre.

Les résultats des essais sont comparés, aux prévisions du modèle électrogéométrique et aux résultats obtenus dans le travail présenté au paragraphe (2.5.1).

2.5.2.2 Conclusions

Il ressort de cette étude que l'hétérogénéité du sol a une influence considérable sur l'attraction des décharges de foudre descendantes négatives par un paratonnerre horizontal.

En effet, dans le cas où la décharge évolue au dessus de la partie de grande conductivité du sol hétérogène, en étant entre le paratonnerre et l'interface, un écart relativement important a été constaté par rapport aux prévisions du modèle électrogéométrique. En effet celui-ci donne des zones de protection plus grandes que celles obtenues expérimentalement.

Dans les autres cas de figure, le modèle électrogéométrique donne des zones de protection identiques et même plus petites.

Les résultats expérimentaux seront présentés en détail au chapitre 5, où nous les confrontons à ceux que nous avons obtenus à partir du calcul du champ.

CHAPITRE -3-

CALCUL NUMERIQUE DU CHAMP; LE PROGRAMME "PROC2D"

3.1 INTRODUCTION :

La connaissance de la répartition du champ électrique joue un rôle primordial dans l'étude de la foudre et plus précisément dans la détermination de son point d'impact [2].

Comme les méthodes analytiques s'avèrent impuissantes dans le calcul du champ, vue la complexité des configurations en présence, nous avons opté pour une méthode numérique, à savoir la méthode des éléments finis.

La méthode des éléments finis (M.E.F) est un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles (E.D.P), forme sous laquelle sont écrites la plupart des lois physiques. La variété des lois physiques donc des E.D.P qui les décrivent, font que la M.E.F présente plusieurs variantes. Nous nous intéressons dans ce chapitre à la méthode variationnelle, appliquée à la résolution de l'équation de Poisson dans le cas bidimensionnel.

3.2.1 La méthode variationnelle.

La méthode variationnelle substitue la recherche du minimum d'une fonctionnelle à la résolution directe de l'E.D.P. La méthode s'applique essentiellement aux problèmes pour lesquels on connaît la fonctionnelle, ce sont les problèmes stationnaires tels que l'équation de Poisson :

$$\nabla \cdot (\epsilon \cdot \nabla v) = -\rho$$

avec: v : la fonction recherchée,
 ϵ, ρ : les caractéristiques physiques du milieu.

En effet, pour les équations décrivant les phénomènes stationnaires, la fonctionnelle à minimiser est l'énergie [11]. L'expression de la fonctionnelle pour des conditions aux limites du type Dirichlet et/ou du type Neuman $\partial v / \partial n = 0$, est la suivante :

$$f = \int_D [\epsilon (\nabla v)^2 - \rho \cdot v] dx dy$$

où D : représente le domaine où on résout l'équation.

3.2.2 Etapes de la méthode variationnelle [11].

La méthode est basée sur la recherche de la fonction qui minimise la fonctionnelle f dans tout le domaine D , et comme v n'est pas connue a priori, la première étape de la méthode est la discrétisation du domaine, c'est à dire son découpage en sous-domaines ou éléments, de manière à pouvoir faire des approximations pour v dans chaque sous-domaine. Une fois le domaine discrétisé, on applique le critère de minimisation à tous les éléments pour obtenir des systèmes matriciels ayant un ordre égal au nombre de degrés de liberté. On aura ainsi autant de systèmes matriciels élémentaires que d'éléments. On passe alors à une formulation globale du critère de minimisation par un assemblage approprié des systèmes élémentaires, et on obtient un système matriciel dont la résolution, après introduction des conditions aux limites de type Dirichlet, donnera la valeur de la fonction v aux noeuds du domaine.

3.3 Le programme "PROC2D".

Le programme "PROC2D" est une application de la méthode variationnelle dans le plan. Les éléments choisis pour la discrétisation sont des triangles, les polynômes d'approximation par élément sont du premier ordre.

Le programme "PROC2D" est divisé en trois modules qui sont (fig 3.1):

- Le pré-processeur "PREPROC" où s'effectue le maillage du domaine et sa caractérisation, c'est à dire l'affectation de propriétés physiques, tels que la densité de charges et la permittivité, aux éléments et la désignation des noeuds limites.

- Le processeur "MEFPROC" où on calcule la solution par la méthode des éléments finis, du problème discrétisé dans le pré-processeur.

- Le post-processeur "POSTPROC" qui sert à la visualisation du potentiel et du champ électrostatiques calculés dans le processeur.



Figure 3.1: Modules du programme "PROC2D".

3.3.1 Présentation du pré-processeur "PREPROC".

La discrétisation ou maillage du domaine d'étude constitue une part importante de la méthode, dans la mesure où la précision de la solution en est tributaire.

Il est en effet établi [12] que l'incertitude du calcul par la MEF tend vers zéro lorsque la taille des éléments utilisés pour la discrétisation diminue.

Il s'avère cependant que l'utilisation d'éléments de taille réduite entraîne une augmentation prohibitive du temps et de l'espace nécessaires au calcul par ordinateur, d'où la nécessité d'adaptation du maillage aux particularités géométriques et physiques du problème.

L'adaptation du maillage consiste ici, à choisir des éléments de taille réduite dans les régions à gradient élevé (fortes courbures, interfaces ...), et des éléments de taille relativement grande dans le reste du domaine, réduisant ainsi la taille du problème sans sacrifier l'exigence de précision [13].

La figure 3.2 présente les trois étapes essentielles du pré-processeur "PREPROC".

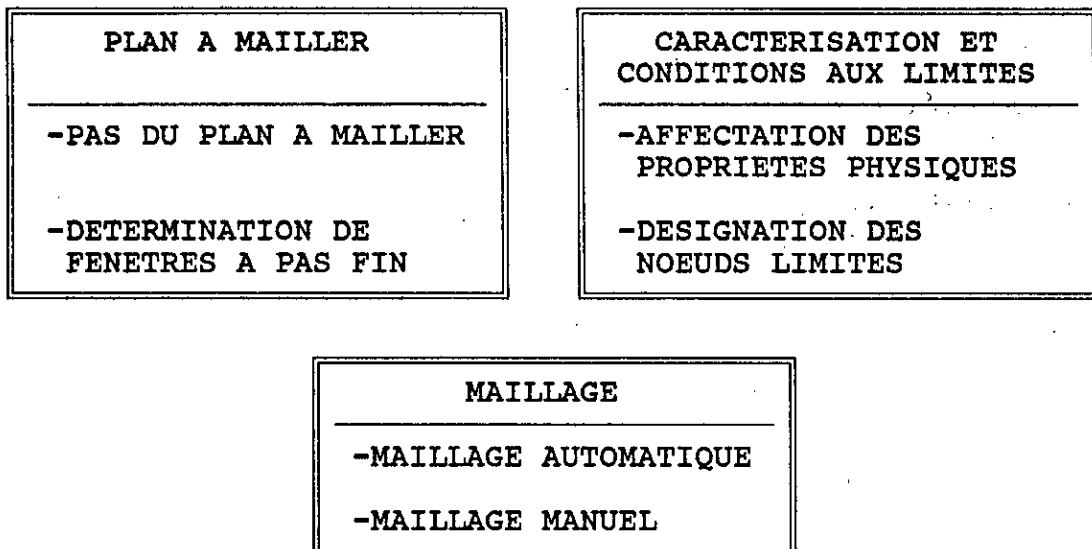


figure 3.2 : Organisation du Pré-processeur.

On commence dans une première étape par délimiter le plan rectangulaire à mailler ou "bain" en spécifiant son pas et ses limites. Nous déterminons ensuite à l'intérieur de ce "bain" une ou plusieurs fenêtres à pas fin (fig 3.3).

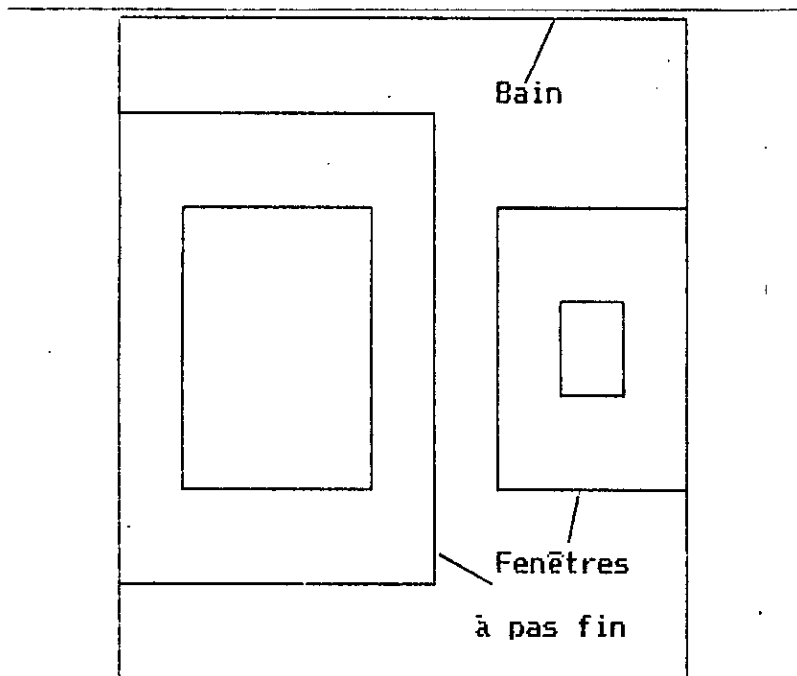


Figure 3.3 : Délimitation du bain et désignation des fenêtres.

Une fenêtre à pas fin est constituée d'une fenêtre extérieure (grande fenêtre) et d'une fenêtre intérieure (petite fenêtre). La petite fenêtre est caractérisée par son pas "petipas" , la région comprise entre les deux fenêtres ou "interfenêtre", sert au passage graduel de la taille des éléments, de celle de la petite fenêtre à celle extérieure à la grande fenêtre, de manière à obtenir des éléments compatibles au sens de la M.E.F.

Une fois les fenêtres déterminées, nous effectuons le maillage. Celui-ci consiste à générer les éléments triangulaires constituant l'approximation géométrique du domaine (fig 3.4).

Le maillage à l'intérieur des fenêtres à pas fin commence par celui des petites fenêtres dont le pas de maillage est fixe; nous maillons ensuite l'"interfenêtre" en générant des fenêtres intermédiaires dont le pas de maillage s'accroît depuis celui de la fenêtre interne jusqu'à celui de la fenêtre externe, assurant ainsi un passage progressif de la taille des éléments de celle de la petite fenêtre à celle du "bain".

Le maillage du "bain" s'effectue en générant des éléments triangulaires réguliers ayant pour pas, celui défini dans la première étape.

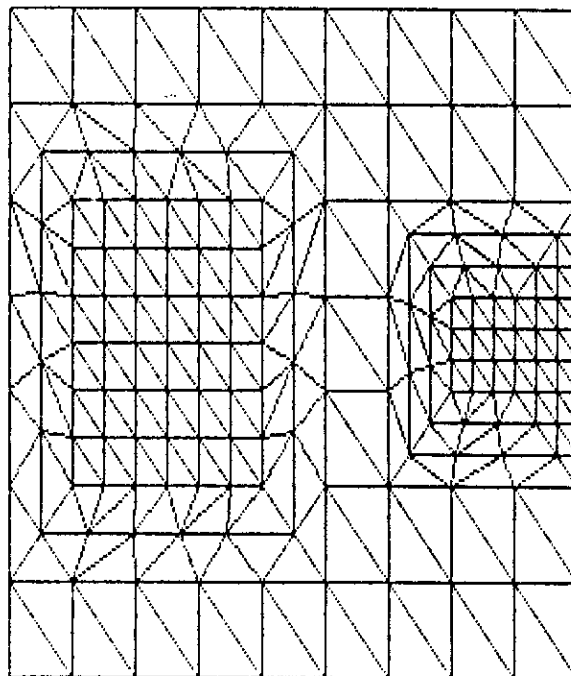


Figure 3.4 maillage du domaine.

Après le maillage automatique, nous pouvons procéder manuellement à des modifications locales, en créant d'autres éléments par la donnée graphique de leurs noeuds générateurs.

Vient ensuite l'étape de caractérisation du domaine qui consiste à affecter aux éléments leurs caractéristiques physiques qui sont la densité de charges et la permittivité.

L'affectation de ces caractéristiques peut se faire individuellement pour chaque élément, ou par groupe d'éléments en quadrillant la région désirée (fig 3.5).

Nous opérons de même, pour la désignation des conditions aux limites de type Dirichlet, en affectant à chaque noeud marqué la valeur de son potentiel.

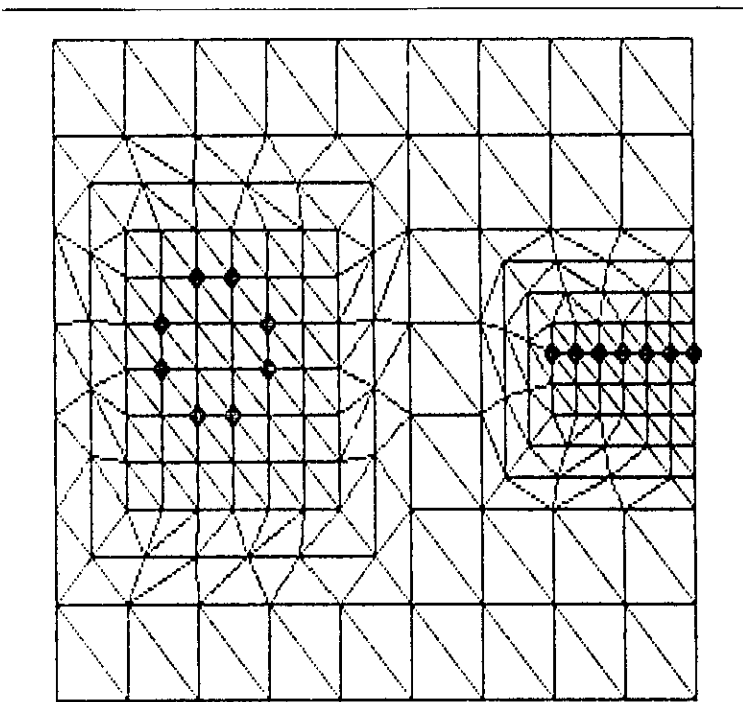


figure 3.5 : Affectation des propriétés physiques et désignation des noeuds limites.

L'exécution de toutes les étapes pré-citées conduit à la discrétisation géométrique du domaine qui servira comme donnée au programme de calcul numérique du champ.

Les informations concernant la discrétisation sont stockées dans:

- Le fichier des éléments (connectivités);
- le fichier des noeuds;
- un ou plusieurs fichiers conditions au limites.

3.3.2 Présentation du processeur "MEFPROC".

Le processeur "MEFPROC" calcule la distribution du potentiel aux noeuds et la distribution du champ dans les éléments générés par la discrétisation effectuée dans le pré-processeur (fig 3.6).

Dans cette première implémentation, le traitement s'effectue pour un seul type d'éléments à savoir: des triangles, avec une approximation linéaire par élément.

Le choix des éléments triangulaires, avec une approximation linéaire par élément a été fait dans le but d'éviter certaines difficultés telles que la dérivation et l'intégration numériques. Par ailleurs ce choix débouche sur un système global symétrique défini positif [11], ce qui assure sa convergence et fait une économie d'espace et de temps machine pour sa résolution.

Les étapes de calcul sont :

- Lecture des données : le sous-programme "SEME".

Ce sous-programme lit les résultats du pré-processeur et les stocke dans des tableaux bidimensionnels. Ces données sont, le nombre d'éléments et de noeuds ainsi que le nombre de potentiels connus, les caractéristiques physiques des éléments et enfin les informations concernant les noeuds du domaine .

- Construction des matrices élémentaires: Le sous-programme "COMAT".

Disposant des données du problème, on formule numériquement la méthode variationnelle en exprimant le principe de minimisation dans chaque élément. Les systèmes élémentaires sont construits en tenant compte de la forme triangulaire des éléments et de l'approximation polynomiale par élément. Les matrices et les vecteurs élémentaires sont stockés dans des tables .

- Assemblage des systèmes élémentaires : le sous-programme "UNION".

L'assemblage consiste à former la matrice et le vecteur second membre globaux à partir des systèmes élémentaires. Une composante donnée du système global s'obtient par addition des contributions des éléments communs à cette composante. La taille du système matriciel obtenu est égale ici au nombre total de noeuds.

- Introduction des conditions limites: Le sous-programme "PREMAT"

Si on ne tient pas compte des potentiels connus, le système global reste à déterminant nul. L'introduction des conditions limites consiste à mettre les noeuds dont le potentiel est connu, en tête du vecteur global des potentiels. Les numéros de ces composantes aiguilleront les permutations de lignes et de colonnes de la matrice et du vecteur second membre globaux qui permettront un partitionnement du système global, puis la réduction de sa taille.

- Résolution du système réduit : Le sous-programme "SOLSYM".

Le système obtenu à l'issue de la discrétisation du problème étant symétrique défini positif, l'algorithme de résolution adopté est celui de Cholevsky. Dans cette première implémentation, on n'a pas tenu compte des particularités de la matrice globale qui est creuse et à bande, ce qui aurait permis d'optimiser

l'occupation de l'espace et le temps machine nécessaires à la résolution.

- Impression des résultats : Le sous programme "RECOLT".

Dans ce module s'effectue le calcul du champ dans les éléments à partir des potentiels de leurs sommets . Le champ dans les éléments et le potentiel aux noeuds sont stockés dans le fichier "recolt.dat", qui servira comme donnée au postprocesseur.

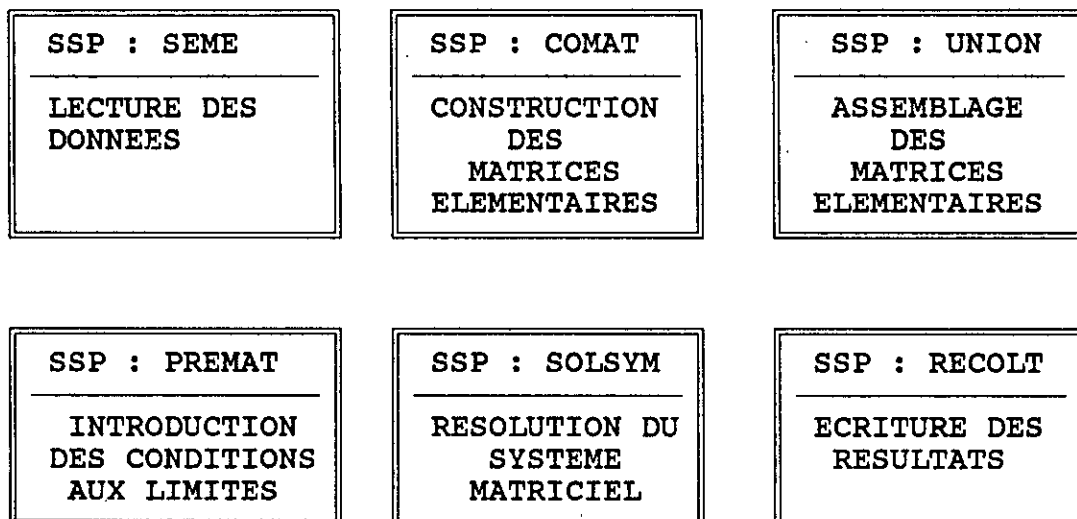


Figure 3.6: Macro-organigramme du Processeur.

3.3.3 Présentation du post-processeur "POSTPROC".

La visualisation joue un rôle important dans l'interprétation des résultats de calcul, surtout lorsqu'aucune disposition de vérification numérique n'est prise.

Dans cet esprit, le Post-Processeur sert à la visualisation du potentiel au noeuds et du champ dans les éléments (fig 3.7).

Dans sa phase de développement actuelle, le programme "POSTPROC" permet de visualiser l'allure des lignes de champ et

celle des équipotentielles à l'aide de segments ayant la direction du champ ou des directions perpendiculaires pour les équipotentielles. Ces segments sont centrés sur les barycentres des éléments. On peut également visualiser le champ à l'aide de motifs ou de couleurs.

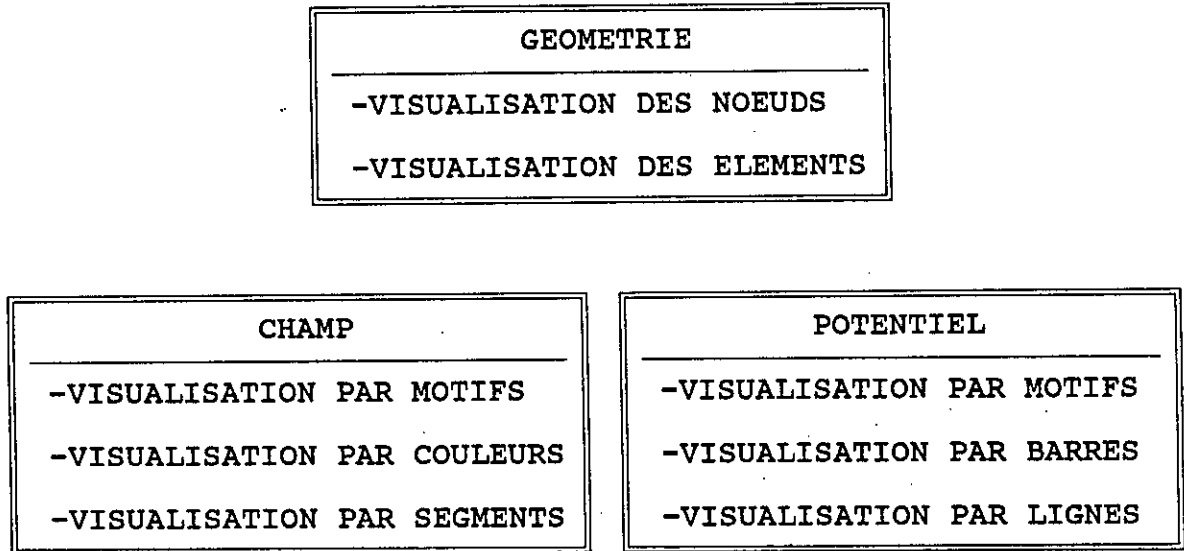


Figure 3.7: Organisation du Post-Procresseur.

3.4 Application du Post-Procresseur.

Les figures 3.8 et 3.9 représentent respectivement, l'allure des lignes de champ et celle des équipotentielles pour le système tige-sphère, dans un plan contenant la tige.

Les étapes de maillage et de caractérisation de cette configuration, ont été présentées aux figures 3.3 à 3.5; le calcul du champ et du potentiel ont été fait à l'aide du processeur "MEFPROC".

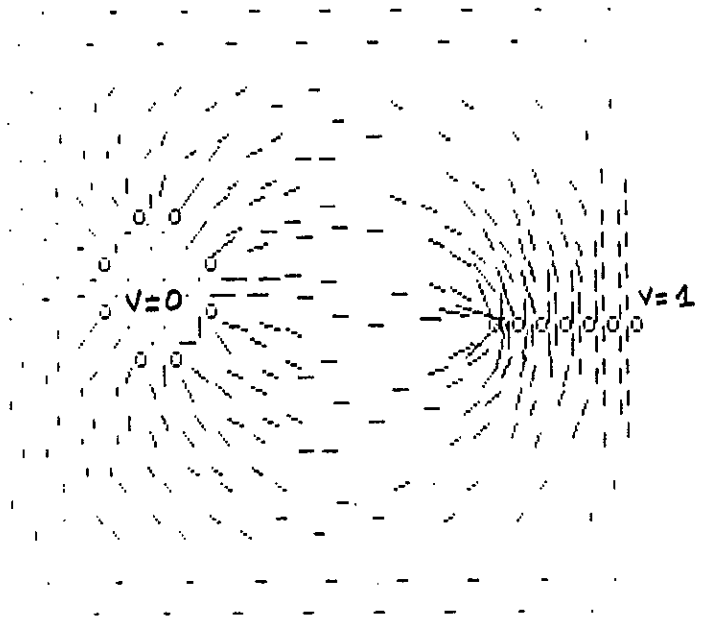


Figure 3.8 : Allure des lignes de champ.

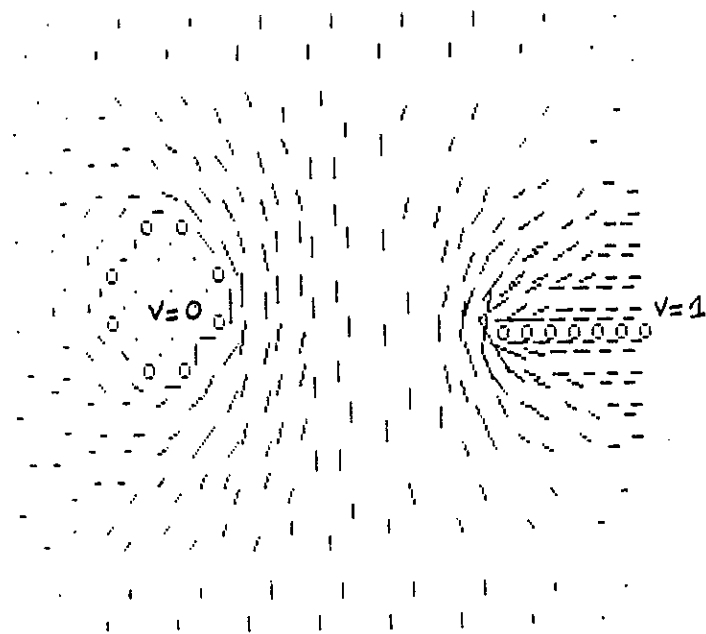


Figure 3.9 : Allure des équipotentiellles.

CHAPITRE -4-

SIMULATION NUMERIQUE DE LA Foudre.

4.1 Présentation du modèle.

Notre modèle s'appuie sur le calcul de la distribution du champ dans une configuration plane constituée du sol hétérogène, du nuage, du précurseur de foudre assimilé à une tige verticale et de la protection constituée par un conducteur horizontal. Cette configuration (fig 4.1) représente l'étape ultime du développement du précurseur de foudre.

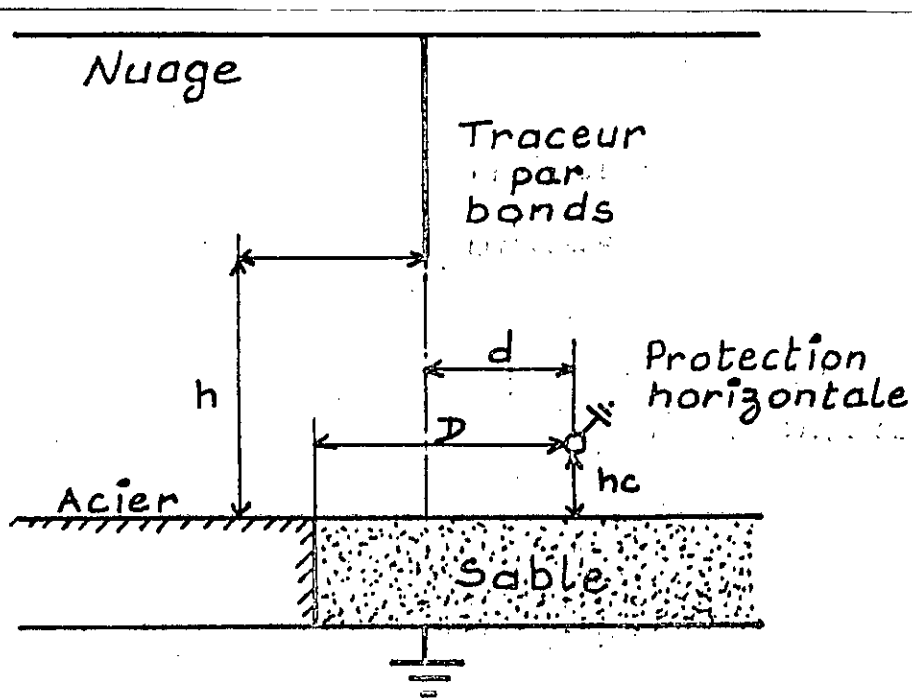


Figure 4.1: Modèle d'étude de la foudre.

Il s'agit de déterminer le, ou les points du sol ou de la protection, susceptibles d'être le point d'impact de la foudre. Notre critère de sélection est l'intensité du champ, c'est à dire que pour une configuration donnée, le point dont l'intensité du champ est la plus élevée, constituerait le point d'impact le plus probable de la foudre.

La configuration d'étude pour le modèle numérique est présentée à la figure 4.2.

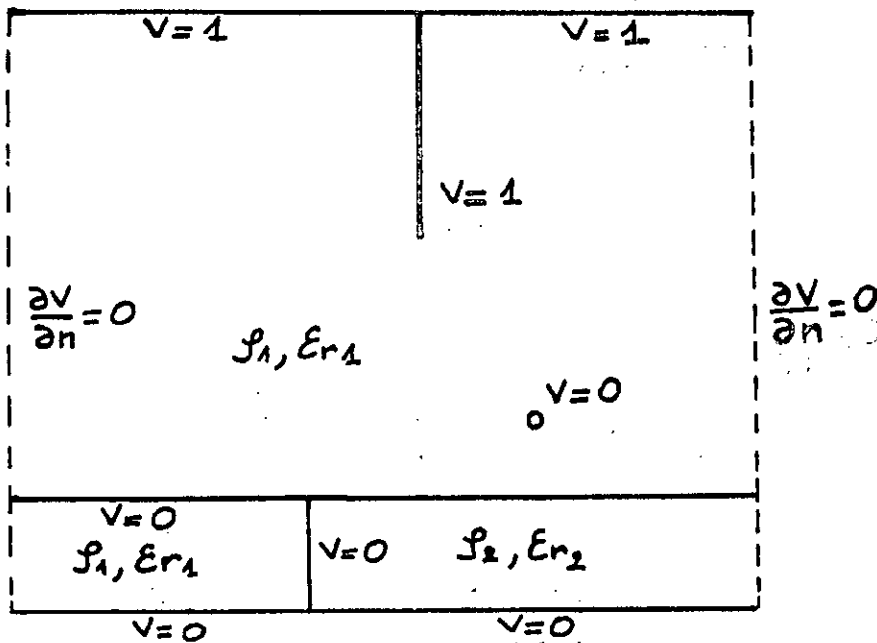


Figure 4.2 : Modèle numérique de la foudre.

La base du nuage est simulée par un conducteur horizontal maintenu au potentiel $V_{\text{nuage}} = 1$, le traceur par bond est simulé par une tige verticale maintenue au même potentiel que celui du nuage. La protection, la partie conductrice du sol ainsi que la limite inférieure du domaine sont maintenues à un potentiel nul. Sur les limites latérales du domaine on a imposé des conditions de type Neuman $\partial v / \partial n = \partial v / \partial x = 0$; (fig 4.2).

Le sol est caractérisé par la densité de charges et par la permittivité de ses composantes. Nous avons utilisé des densités de charges nulles partout, une permittivité relative égale à 90 pour le sable et égale à 1 partout ailleurs.

Pour une disposition donnée de la tige et de la protection par rapport à l'interface, nous générons à l'aide du pré-processeur "PREPROC", le fichier des éléments, le fichier des noeuds et un ou plusieurs fichiers conditions aux limites correspondant à différentes distances d . La variation de la hauteur h est obtenue par la modification du fichier conditions aux limites correspondant à une distance d donnée.

Nous exécutons le programme "MEFPROC" pour différentes distances d et pour différentes hauteurs h , et nous recueillons pour chaque execution, la valeur du champ sur la protection, sur la projection de la tige au niveau du sol et sur l'interface.

La hauteur de la protection h_c est la même pour toutes les configurations, et toutes les distances et les hauteurs utilisées, lui sont ramenées.

4.2 Protection sur sol homogène.

Nous commençons par étudier la configuration où le sol est homogène. Pour ce cas de figure, on compare la valeur du champ sur la protection à celle du champ sur le sol.

4.2.1 Sol conducteur :

Le modèle d'étude est celui présenté à la figure 4.3.

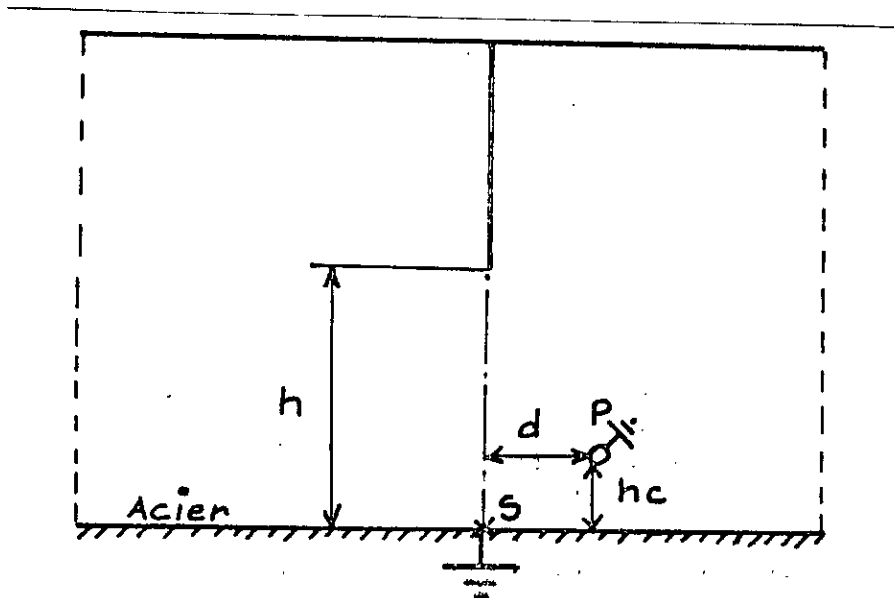


figure 4.3 : Protection sur un sol conducteur.

Dans ce cas de configuration, le champ sur la protection est prédominant par rapport au champ sur le sol, pour les grandes hauteurs relatives de la tige et ce, quelque soit la distance relative tige-protection. Pour les faibles hauteurs relatives de la tige par contre, le champ sur le sol devient plus important. Pour les hauteurs relatives intermédiaires, le champ sur la protection n'est prépondérant que pour les faibles distances relatives tige-protection (fig 4.4).

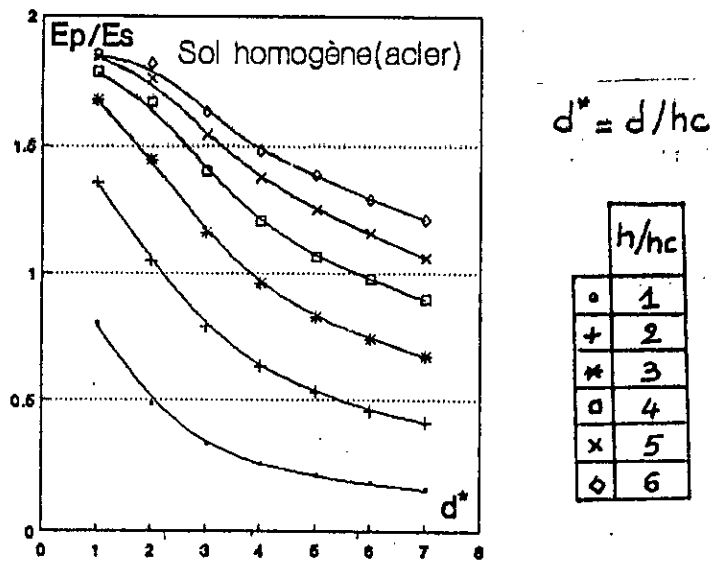


Figure 4.4 : Evolution du champ sur un sol conducteur

4.2.2 Sol mauvais conducteur :

La figure 4.5 représente la configuration du système étudié dans le cas du sol mauvais conducteur caractérisé par sa permittivité relative.

Le champ sur la protection est prépondérant par rapport au champ sur le sol pour les faibles distances relatives tige-protection, il décroît ensuite jusqu'à devenir inférieur à celui du sol pour les grandes distances relatives tige-protection.

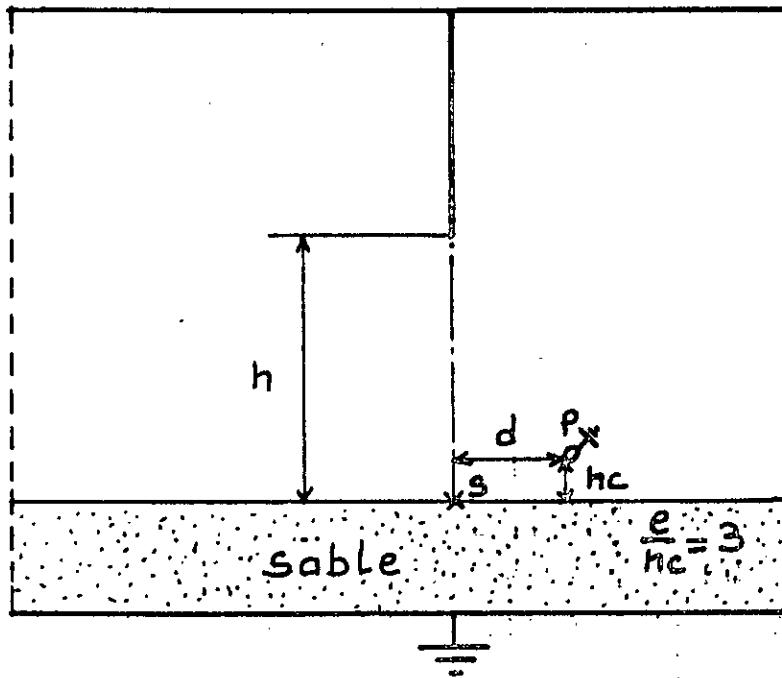


Figure 4.5 : Protection sur un sol mauvais conducteur.

La comparaison avec le cas du sol homogène conducteur fait apparaître une allure similaire des courbes E_p/E_s , mais des niveaux de champ plus importants pour le sol homogène mauvais conducteur (fig 4.6).

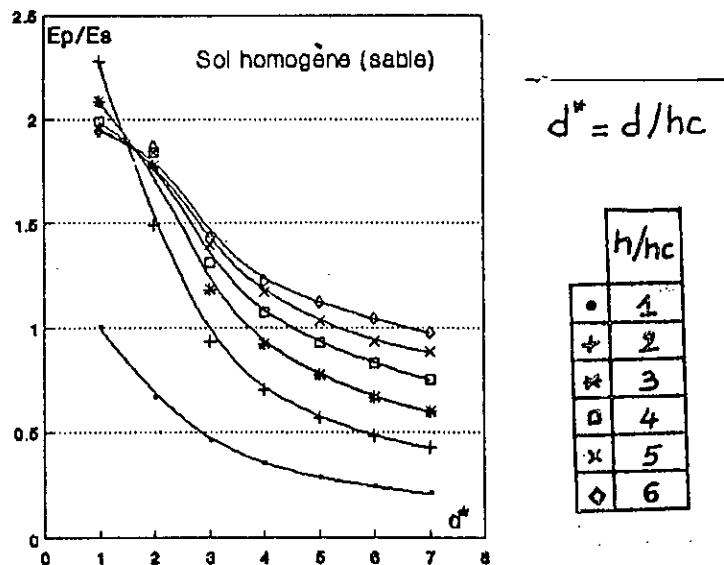


Figure 4.6 : Evolution du champ sur un sol mauvais conducteur

4.3 Protection sur un sol hétérogène.

4.3.1 Généralités.

Le sol hétérogène est composé d'une partie conductrice (acier) et d'une partie mauvaise conductrice (sable). Il s'agit d'étudier l'influence de l'interface ou zone de séparation entre les deux milieux, sur l'attraction des décharges de foudre. Nous étudierons les configurations où la tige et la protection sont au dessus du sable puis celles où elles sont au dessus de l'acier.

4.3.2 Protection au dessus du sable.

Pour cette configuration, nous étudions deux dispositions relatives de la tige par rapport au conducteur et à l'interface.

4.3.2.1 Tige comprise entre la protection et l'interface; configuration (S-P-T-I) :

Pour une distance D et une hauteur de la protection h_c maintenues constantes, nous calculons le champ au points S, P et I pour différentes valeurs de h et de d (fig 4.7).

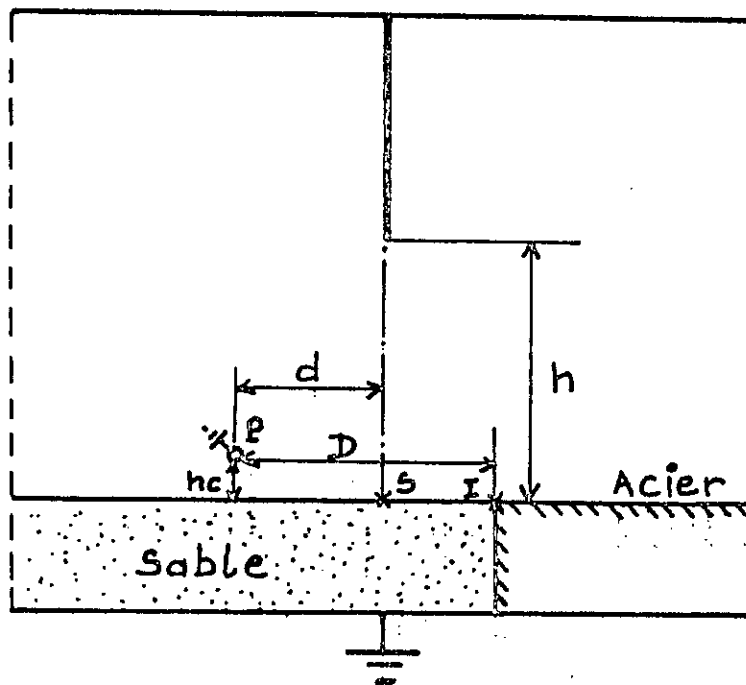


Figure 4.7 : Configuration Protection-Tige-Interface (S-P-T-I)

Afin de comparer nos résultats à ceux obtenus à l'aide du modèle expérimental [10], nous avons choisi les positions relatives D/hc égales à 11 et à 4.

A la figure 4.8, nous présentons l'ensemble des résultats de calcul obtenus pour ces deux positions.

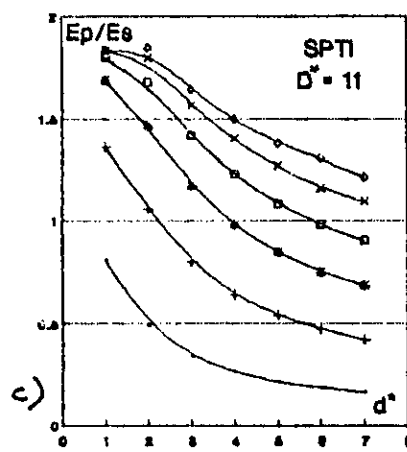
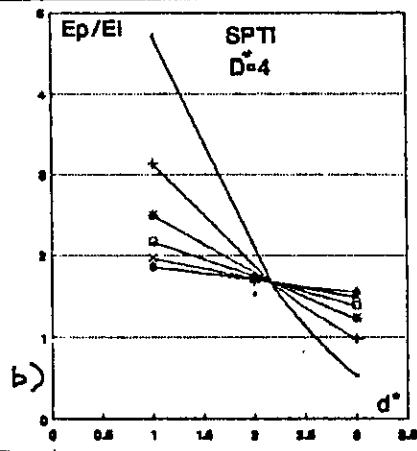
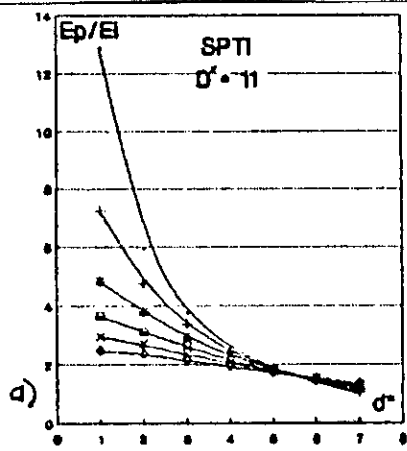
- Influence de la distance tige-protection et de la hauteur de la tige :

Le champ sur la protection comparé au champ sur l'interface décroît aussi bien avec l'élevation de la tige qu'avec son éloignement de la protection, en notant que pour les grandes hauteurs de la tige, le rapport des champs est peu influencé par la distance tige protection (fig 4.8-a).

Pour ce qui est des courbes E_p/E_s , on note leur décroissance avec l'augmentation de la distance relative d/hc et une croissance avec la hauteur relative h/hc . Pour les faibles hauteurs h/hc de la tige et pour les grandes distances d/hc , on remarque que le champ sur le sol l'emporte sur celui de la protection, il est plus faible dans les autres cas (fig 4.8-c). En ce qui concerne enfin le champ sur l'interface comparé au champ sur le sol, on remarque que ce dernier est toujours prépondérant. Cette prépondérance est d'autant plus marquée, que la hauteur relative de la tige et la distance relative tige-protection sont faibles (fig 4.8-e).

- Influence de la distance interface-protection :

Le rapprochement entre l'interface et la protection se traduit par une diminution de la valeur du rapport E_p/E_i et par une atténuation de la pente de ces courbes (fig 4.8-b). Par contre, ce rapprochement n'a pas une grande influence sur les courbes E_p/E_s (fig 4.8-d), pour les mêmes hauteurs h/hc et les mêmes distances d/hc . Pour ce qui est des courbes E_i/E_s , on note une légère augmentation de ce rapport et ce, pour les grandes hauteurs relatives de la tige et les très faibles distances relatives tige-protection (fig 4.8-f).



$$D^* = D/hc$$

$$d^* = d/hc$$

h/hc	
•	1
+	2
*	3
◻	4
x	5
◊	6

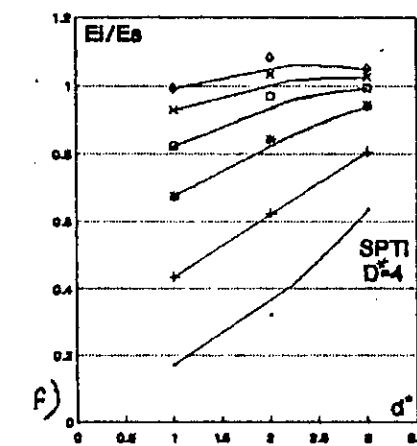
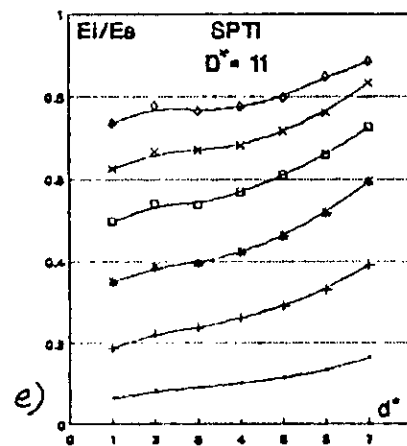
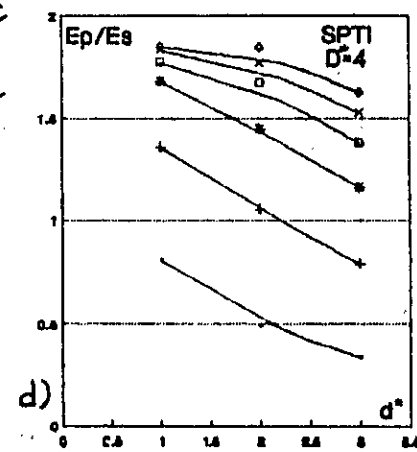


Figure 4.8 : Champ sur l'interface, la protection et le sol pour la configuration (S-P-T-I).

4.3.2.2 Protection comprise entre la tige et l'interface; configuration (S-T-P-I).

Le calcul du champ est fait comme pour le cas précédant, pour D/hc égal à 11 et à 4 et en faisant varier les paramètres d et h .

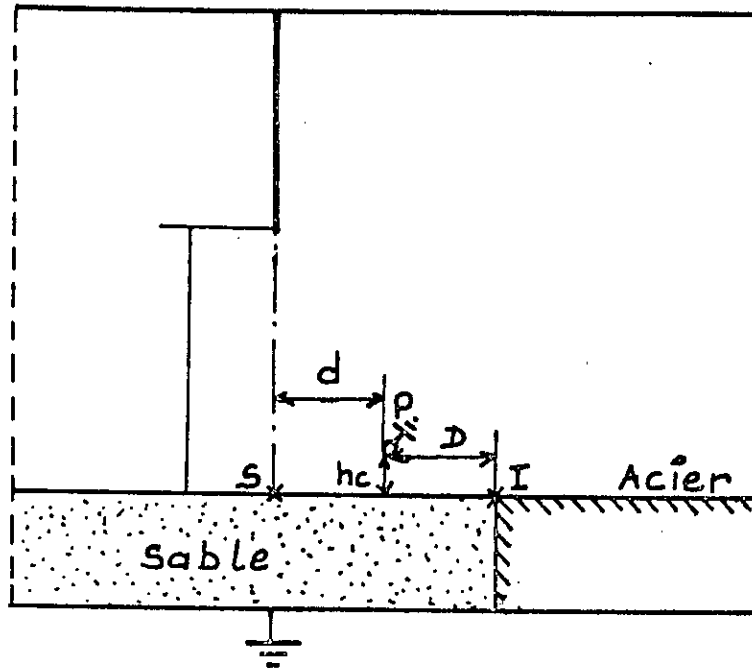


Figure 4.9 : Configuration Tige-Protection-Interface (S-T-P-I).

A la figure 4.10 nous présentons l'ensemble des résultats obtenus pour ce cas de disposition de la protection.

- Influence de la hauteur de la tige et de la distance tige-protection :

Le champ sur la protection est prédominant par rapport à celui de l'interface pour toutes les hauteurs relatives de la tige et les distances relatives tige-protection étudiées, leur rapport tendant à diminuer aussi bien avec l'augmentation de la hauteur de la tige qu'avec celle de la distance tige-protection (fig 4.10-a).

Pour cette disposition, le champ sur la protection n'est prépondérant par rapport au champ sur le sol que pour les grandes

hauteurs relatives de la tige et les faibles distances relatives tige-protection; dans les autres cas, le champ sur le sol l'emporte (fig 4.10-c).

En ce qui concerne les courbes E_i/E_s on note que le champ sur le sol est toujours supérieur au champ sur l'interface pour toutes les hauteurs relatives de la tige et toutes les distances relatives tige-protection étudiées (fig 4.10-e).

- Influence de la distance interface-protection :

La réduction de la distance entre la protection et l'interface a pour effet de diminuer le rapport des champs E_p/E_i (fig 4.10-b), de maintenir le rapport E_p/E_s constant pour les mêmes hauteurs relatives de la tige et les mêmes distances relatives tige-protection (fig 4.10-d), et d'élever le rapport E_i/E_s (fig 4.10-f).

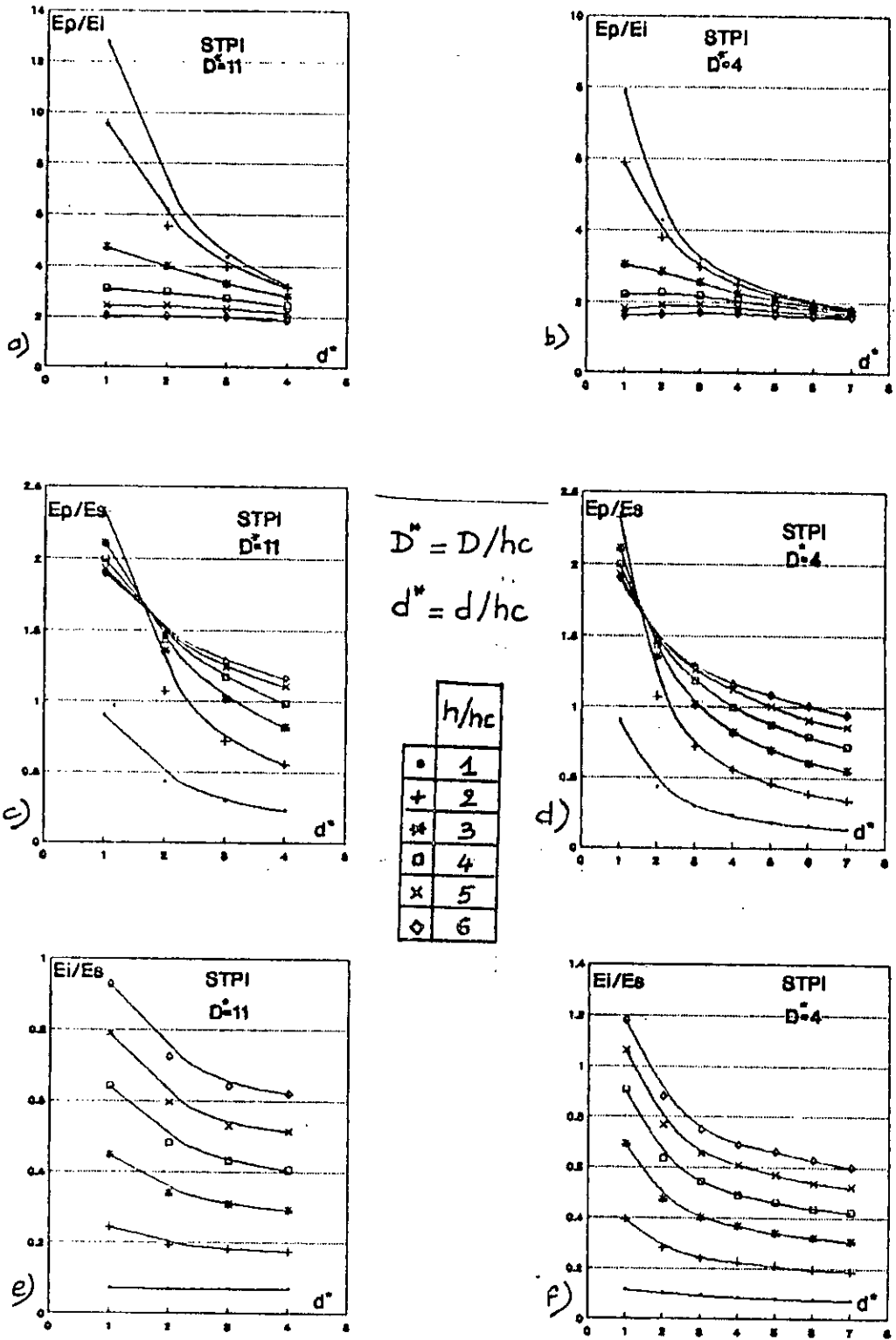


Figure 4.10 : Champ sur l'interface, la protection et le sol pour la configuration (S-T-P-I).

4.3.3 Protection au dessus de l'acier :

Comme pour le cas de la protection au dessus du sable, nous étudierons deux dispositions possibles de la tige et de la protection, avec deux distances interface-protection pour chaque disposition.

4.3.3.1 Tige comprise entre la protection et l'interface; configuration (A-P-T-I).

Cette configuration est schématisée à la figure 4.11. La tige évolue entre l'interface et la protection en étant au dessus de l'acier.

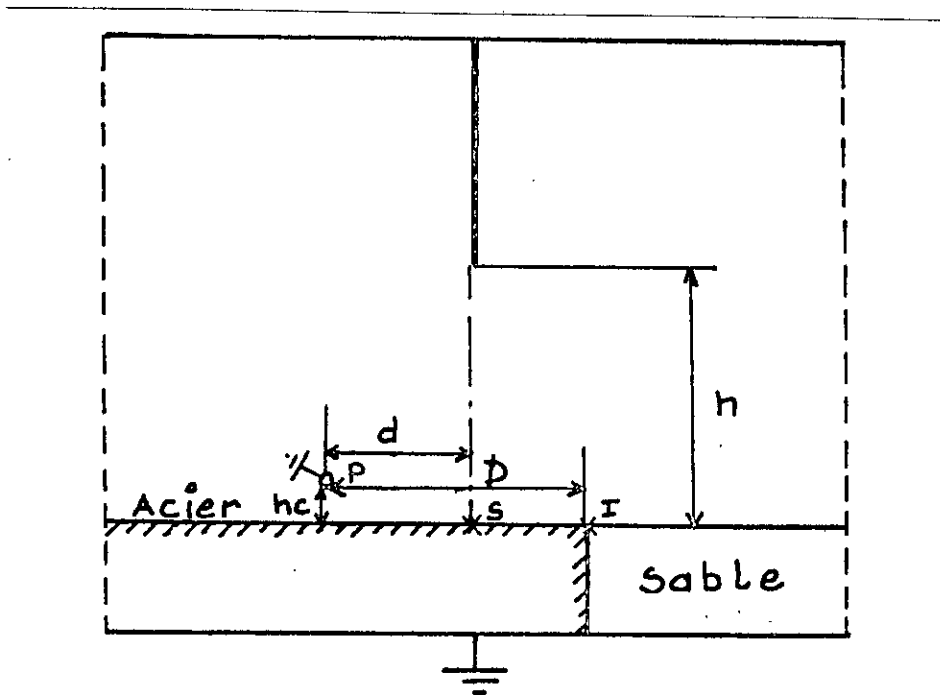


Figure 4.11: Configuration protection-tige-interface (A-P-T-I)

Les résultats sont résumés à la figure 4.12, pour D/hc égal à 11 et à 4 et différentes valeurs de h/hc et de d/hc , la hauteur de la protection hc étant constante.

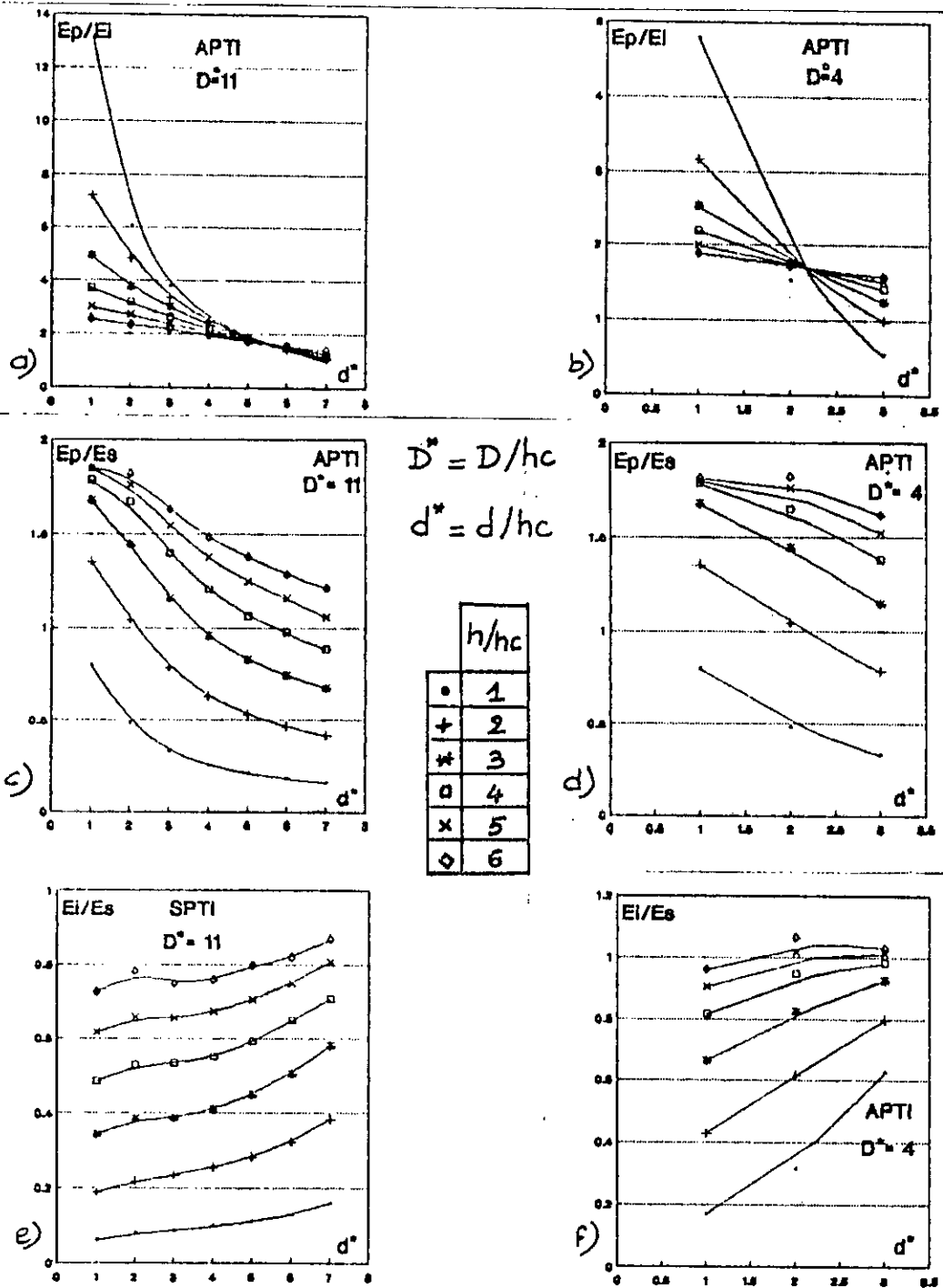


Figure 4.12 : Evolution du champ sur l'interface, la protection et le sol pour la configuration (A-P-T-I).

- Influence de la distance tige-protection et de la hauteur de la tige.

Pour cette configuration, on remarque que le champ sur la protection comparé au champ sur l'interface est toujours supérieur à un pour les faibles hauteurs relatives de la tige et les petites distances relatives tige protection (fig 4.12-a).

Pour le champ sur la protection comparé au champ sur le sol, on note que leur rapport diminue avec la distance relative tige-protection, mais augmente avec la hauteur relative de la tige (fig 4.12-c).

Concernant enfin le champ sur l'interface comparé au champ au sol, on remarque que ce dernier l'emporte pour la plupart des distances d/hc et des hauteurs h/hc étudiées (fig 4.12-e).

- Influence de la distance interface-protection :

Quand l'interface est plus proche de la protection, le rapport du champ sur la protection et sur l'interface diminue de façon notable mais tout en gardant le champ sur la protection prépondérant (fig.4.12-b).

Ce rapprochement n'a, par contre, pas un grand effet sur les courbes E_p/E_s (fig 4.12-d) et il a un léger effet sur les courbes E_i/E_s , car pour les hauteurs relatives élevées de la tige et pour une distance relative tige-interface assez petite, le champ sur l'interface devient prépondérant par rapport au champ sur le sol (fig 4.12-f).

Pour ce qui est du champ sur la protection comparé au champ sur le sol, on note que le champ sur la protection devient prédominant par rapport au champ sur le sol quand la hauteur relative de la tige augmente, mais diminue quand la distance relative tige-protection augmente (fig 4.14-c).

Le rapport des champ sur l'interface et sur le sol quant à lui, montre une prépondérance de ce dernier pour les grandes distances relatives tige-protection (fig 4.14-e).

- Influence de la distance interface-protection :

Cette influence se manifeste par une diminution de l'écart entre les valeurs du champ sur la protection comparé à celui de l'interface (fig 4.14-b).

La variation de cette distance semble peu influencer les courbes E_p/E_s (fig 4.14-d) et influence les courbes E_i/E_s par une légère élévation de ce rapport et ce pour les faibles distances relatives tige-protection et les grandes hauteurs relatives de la tige (fig 4.14-f).

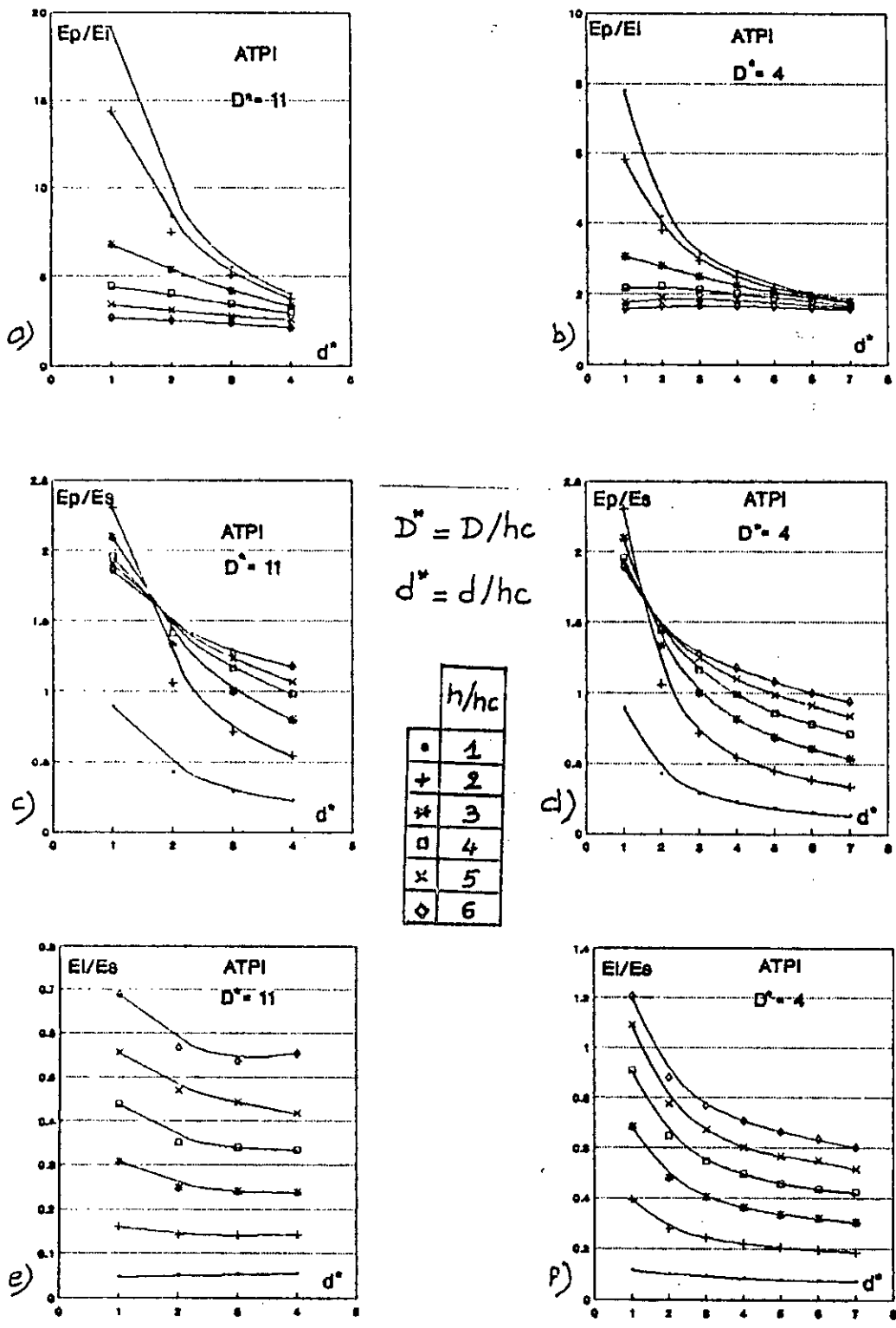


Figure 4.14 : Evolution du champ sur l'interface, la protection et le sol pour la configuration (A-T-P-I).

4.4 Influence de la permittivité du sol :

Pour voir l'influence de la permittivité de la composante mauvaise conductrice du sol sur le champ aux différents points considérés, nous avons balayé la plage de variation de la permittivité relative du sable qui s'étend de 3 à 90 [12].

Les figures (4.15) à (4.17) montrent l'évolution du champ sur la protection, sur l'interface et sur le sol pour la configuration protection au dessus de l'acier, avec la tige comprise entre l'interface et la protection (A-P-T-I), et ce pour trois permittivités relatives. Les figures (4.18) et (4.19) présentent, quant à elles les variations du champ sur la protection, sur l'interface et sur le sol pour les configurations (S-P-T-I) et (S-T-P-I), pour une permittivité du sable $\epsilon_r = 1$.

4.4.1 Tige et protection au dessus de l'acier:

En observant les figures (4.15) à (4.17), on remarque que le champ est peu influencé par la permittivité, du moins dans cette plage de variation; mis à part pour le cas des courbes E_p/E_i et E_i/E_s dans les conditions $\epsilon_r = 1$ où on note une légère augmentation du champ sur l'interface comparée à celui de la protection ou du sol.

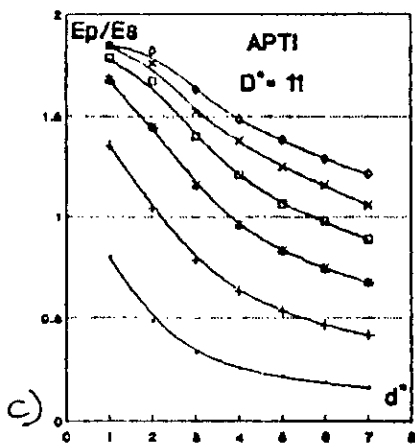
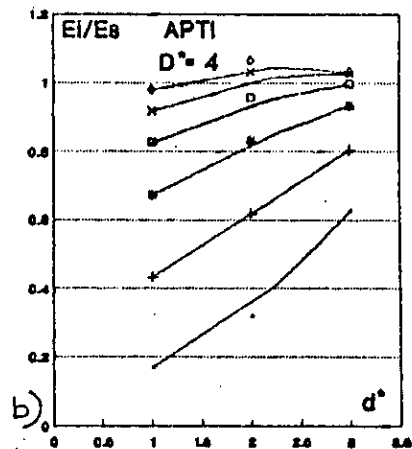
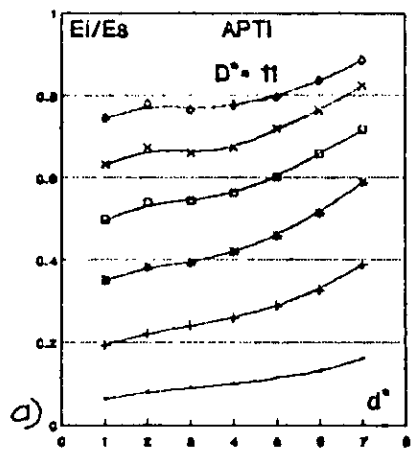
4.4.2 Tige et protection au dessus du sable.

- Tige comprise entre la protection et l'interface:

La figure 4.18 montre que le rapport des champs sur la protection et sur l'interface est moins élevé quand la permittivité du sol diminue, avec une même allure des courbes (fig 4.18 -a,-b). Les courbes E_p/E_s quant à elles, présentent une allure différentes et des rapports de champs plus élevés (fig 4.18 -c,-d). Pour les courbes E_i/E_s , on note aussi une nette différence par rapport au cas ($\epsilon_r = 90$), qui se traduit par une pente accentuée des courbes et par des rapports de champs plus grands.

- Protection comprise entre la tige et l'interface:

Pour cette configuration, les courbes présentent une allure similaire au cas ($\epsilon_r = 90$), avec néanmoins, des rapports de champs plus élevés (fig 4.19).



$$D^* = D/hc$$

$$d^* = d/hc$$

h/hc	
o	1
+	2
*	3
□	4
x	5
◇	6

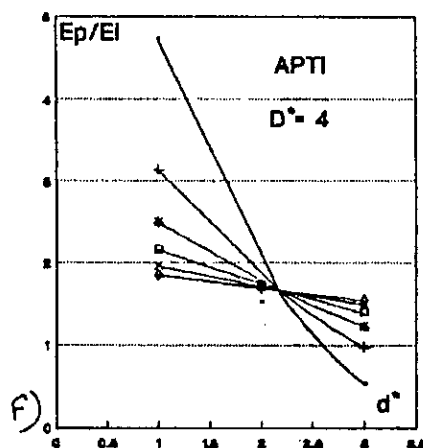
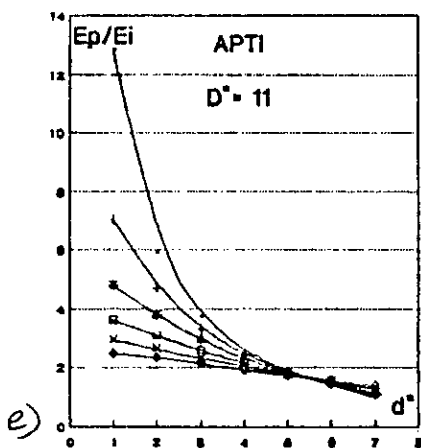
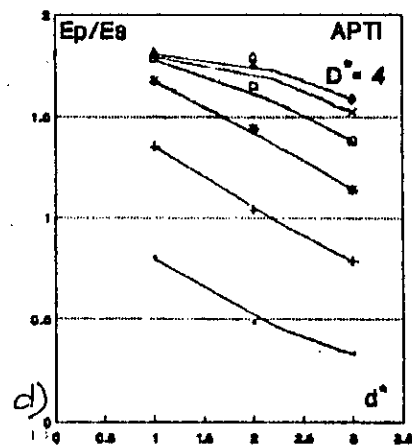
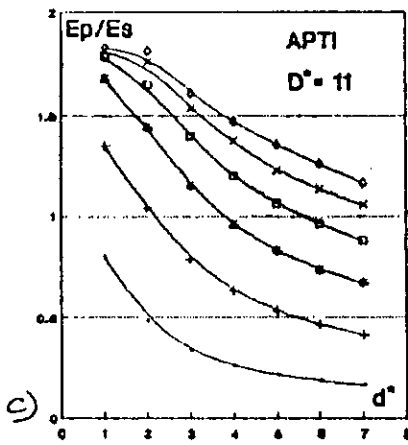
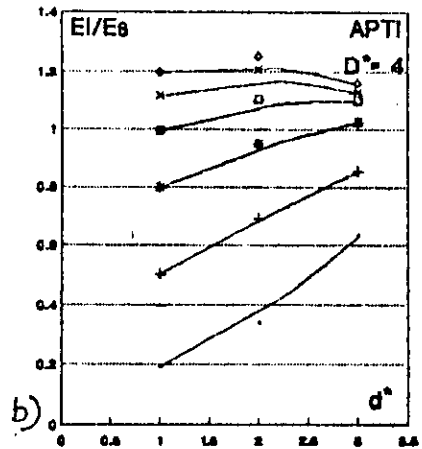
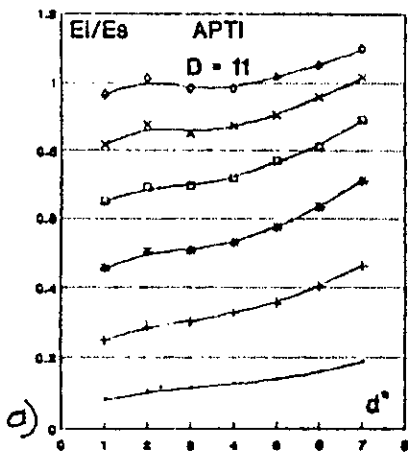


Figure 4.16: Configuration (A-P-T-I); évolution du champ pour $\epsilon_r = 20$.



$$D^* = D/hc$$

$$d^* = d/hc$$

	h/hc
•	1
+	2
*	3
□	4
x	5
◇	6

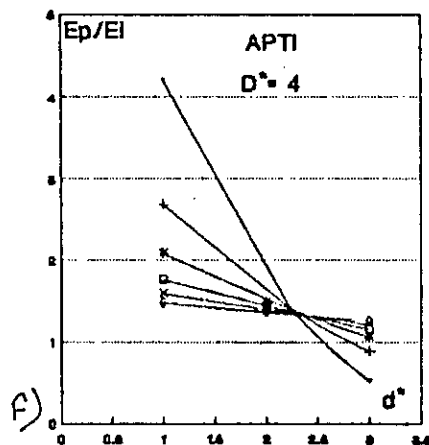
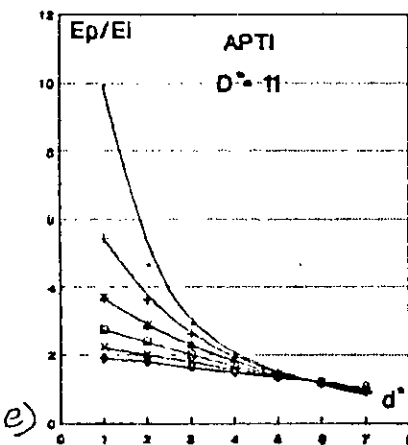
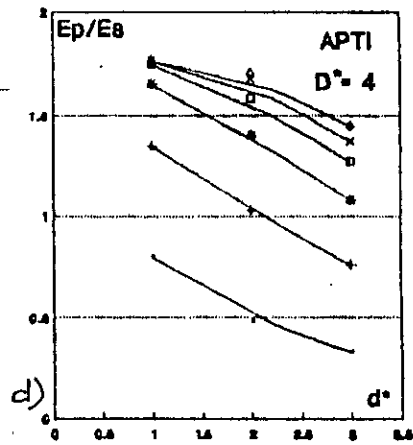
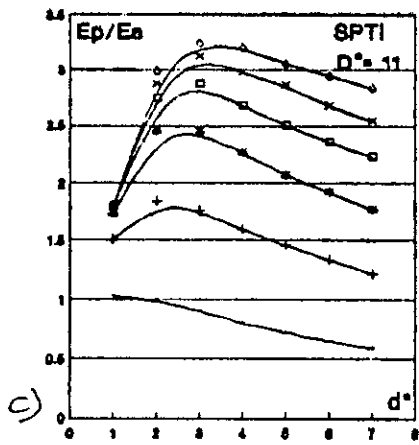
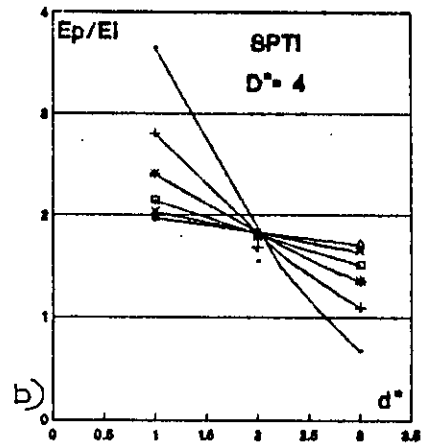
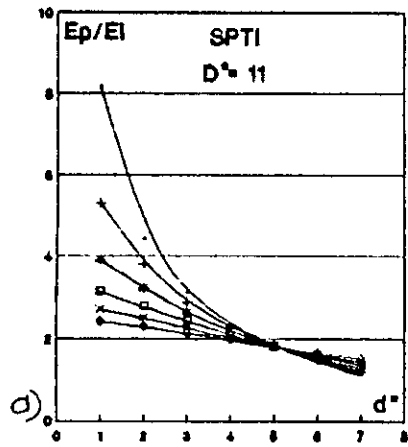


Figure 4.17: Configuration (A-P-T-I); évolution du champ pour $\epsilon_r=1$.



$$D^* = D/hc$$

$$d^* = d/hc$$

h/hc	
•	1
+	2
*	3
◻	4
×	5
◊	6

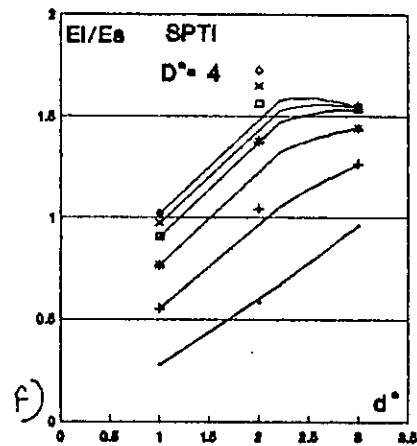
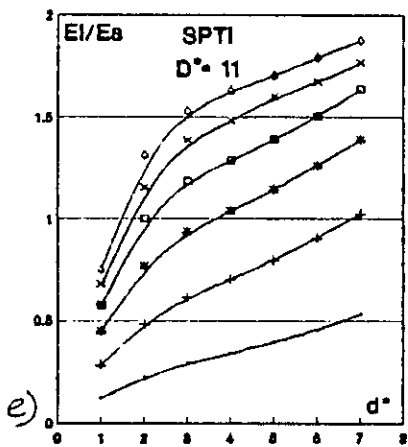
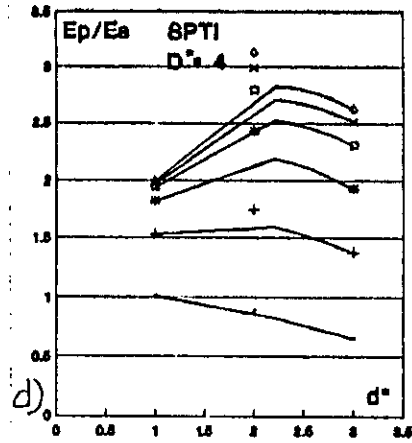


Figure 4.18: Configuration (S-P-T-I); évolution du champ pour $e_r=1$.

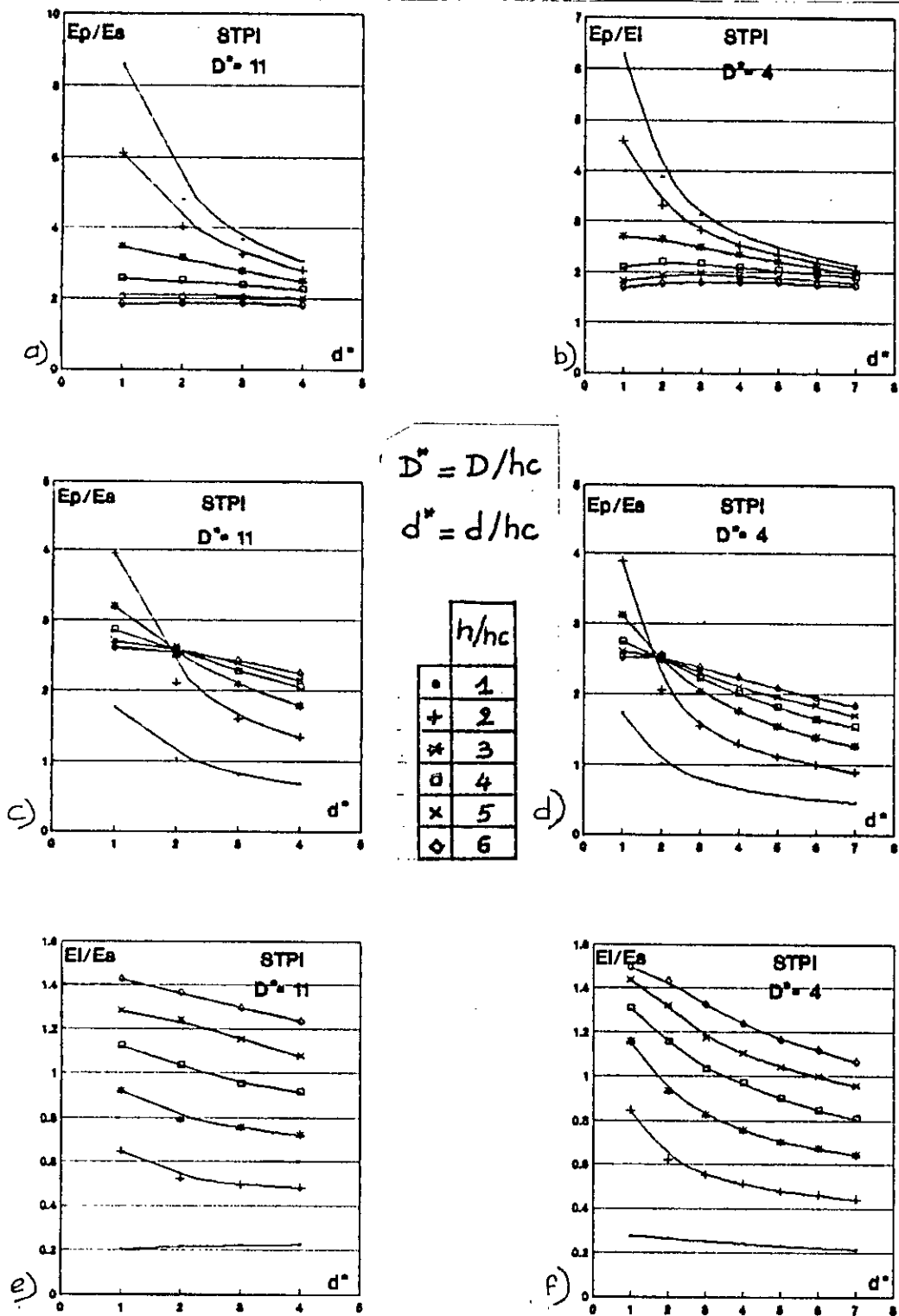


Figure 4.19: Configuration (S-T-P-I); évolution du champ pour $e_r=1$.

4.5 Critiques du modèle.

4.5.1 Limites physiques.

La foudre est par essence un phénomène dynamique; son initiation et sa progression jusqu'au saut final sont très complexes donc mal connues. elle présente dans toutes ses étapes un exemple impressionnant de combinaisons et d'interpénétration de facteurs faisant appel à des sphères de connaissances physiques très étendues, à savoir : la thermodynamique, la physique des plasmas, l'électromagnétisme etc...C'est pourquoi la compréhension de la foudre dans tous ses aspects est utopique. On ne peut que se limiter à l'étude de l'une de ses étapes, au prix d'hypothèses plus ou moins valables sur le reste.

En ce qui nous concerne, nous avons essayé de simuler la situation au moment du saut final avec comme critère de choix du point d'impact probable, l'intensité de champ la plus élevée.

Les écarts par rapport à la réalité ne peuvent être qu'importants lorsqu'on sait qu'on a négligé une part considérable de facteurs dont nous citerons: les fluctuations des charges dans la nuage, la charge d'espace, la conductivité du sol, la forme du précurseur et ses ramifications etc...

4.5.2 Limites numériques

4.5.2.1 Erreurs dues à la discrétisation.

Il est établi [11],[14] que l'approximation faite par la méthode des éléments finis mène à la solution exacte quand la taille h des éléments tend vers zéro.

Cependant, la question capitale de la détermination pratique de l'erreur pour une discrétisation donnée n'est pas résolue à part quelques comparaisons quand la solution exacte est connue.

Généralement, pour économiser du temps de calcul, on utilise les techniques de maillage adaptatif qui se basent sur un maillage préliminaire sur lequel on fait un "refinement" soit par

rapetissage du pas de maillage (h-refinement), soit par augmentation du degré des polynômes d'interpolation (p-refinement), soit enfin par combinaison des deux.

4.5.2.2 Erreurs dues à l'utilisation de l'ordinateur.

Les algorithmes de résolution des systèmes linéaires, ne permettent de trouver la solution exacte d'un système linéaire que s'ils sont exécutés avec une arithmétique à précision infinie.

S'ils sont exécutés sur ordinateur, ils peuvent fournir des résultats peu précis et parfois même totalement erronés.

Un calcul sur ordinateur doit nécessairement inclure une vérification de la dégénérescence du système, un contrôle de la validité de la solution fournie par l'algorithme utilisé, et enfin une évaluation de la précision de cette solution.

L'estimation de la précision consiste généralement à calculer le résidu défini par :

$$p_i = (a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{iN}x_N - b_i)_{\text{machine}}$$

Suivant les valeurs des N résidus, la solution peut être soit acceptable, soit mauvaise mais améliorable, soit enfin mauvaise et non améliorable [15].

CHAPITRE -5-

CONFRONTATION DES RESULTATS DE SIMULATION

A CEUX DU LABORATOIRE.

5.1 Introduction :

Dans le laboratoire, la zone d'attraction d'un conducteur cylindrique horizontal mis à la terre de hauteur h_c , est définie par les positions de la tige de haute tension qui donnent une probabilité de décharge sur le conducteur, supérieure ou égale à 90% .

La décharge en un point donné étant supposée produite par l'intensification du champ en ce point, nous baserons notre comparaison entre les résultats de la simulation et ceux du laboratoire sur le critère du champ.

5.2. Récapitulation des résultats de simulation.

Les résultats de simulation sont regroupés ci-dessous:

- Influence négligeable de la permittivité relative du sable dans la plage $\{1,90\}$, sur les valeurs du champ au points considérés.
- Similitude globale des courbes du champ sur le sable ou sur l'acier, pour les mêmes dispositions de la tige et du paratonnerre.

* Protection comprise entre la tige et l'interface:

grande distance relative interface-protection $D/h_c = 11$	faible distance relative interface-protection $D/h_c = 4$
- $E_p > E_i$ pour tout h/h_c et d/h_c	- $E_p > E_i$ pour tout h/h_c et d/h_c
- $E_p > E_s$ sauf pour : - $h/h_c = 1$ pour tout d/h_c - $h/h_c = 2$ pour $d/h_c > 2$ - $h/h_c = 3$ pour $d/h_c > 3$	- $E_p > E_s$ sauf pour : - $h/h_c = n$ et $d/h_c < n$ $n = 2, 3, \dots, 6.$
- $E_s > E_i$ pour tout h/h_c et d/h_c	- $E_s > E_i$ sauf pour : - $d/h_c = 1$ et $h/h_c = 5, 6.$

* Tige comprise entre l'interface et la protection:

grande distance relative interface-protection $D/hc = 11$	faible distance relative interface-protection $D/hc = 4$
- $E_p > E_i$ pour tout h/hc et d/hc	- $E_p > E_i$ sauf pour: - $h/hc = 1$ et $d/hc = 3$
- $E_p > E_s$ sauf pour : - $h/hc = 1$ pour tout d/hc - $h/hc = 2$ et $d/hc > 2$ - $h/hc = 3$ et $d/hc > 4$ - $h/hc = 4$ et $d/hc > 5$	- $E_p > E_s$ sauf pour : - $h/hc = 1$ pour tout d/hc - $h/hc = 2$ et $d/hc > 2$
- $E_s > E_i$ pour tout h/hc et d/hc	- $E_s > E_i$ sauf pour : - $h/hc > 5$ et $d/hc > 2$

5.3 Comparaison simulation-laboratoire

5.3.1 Paratonnerre situé au dessus du sable.

Pour cette configuration, les résultats du laboratoire sont exposés à la figure 5.1.

Les courbes (m) et (s) représentent respectivement les zones d'attraction du paratonnerre pour un sol homogène conducteur (acier) et pour un sol homogène mauvais conducteur (sable).

Les zones d'attraction pour le paratonnerre sur la partie mauvaise conductrice du sol, sont situées au delà de la zone définie par le modèle électrogéométrique (courbe m), ce qui signifie que la protection joue convenablement son rôle, dans la mesure où elle est le point d'impact le plus probable de la décharge de foudre.

La conclusion n'est pas aussi nette en ce qui concerne les résultats de simulation car on constate que pour les mêmes distances relatives tige-protection d/hc et les mêmes hauteurs

relatives de la tige h/h_c , on peut trouver des situations où le champ sur la protection n'est pas prépondérant. C'est le cas notamment pour les faibles h/h_c , et les grands d/h_c , où on remarque que le champ sur le sol l'emporte, surtout quand le paratonnerre est compris entre la tige et l'interface (fig 4.8) et (fig 4.10).

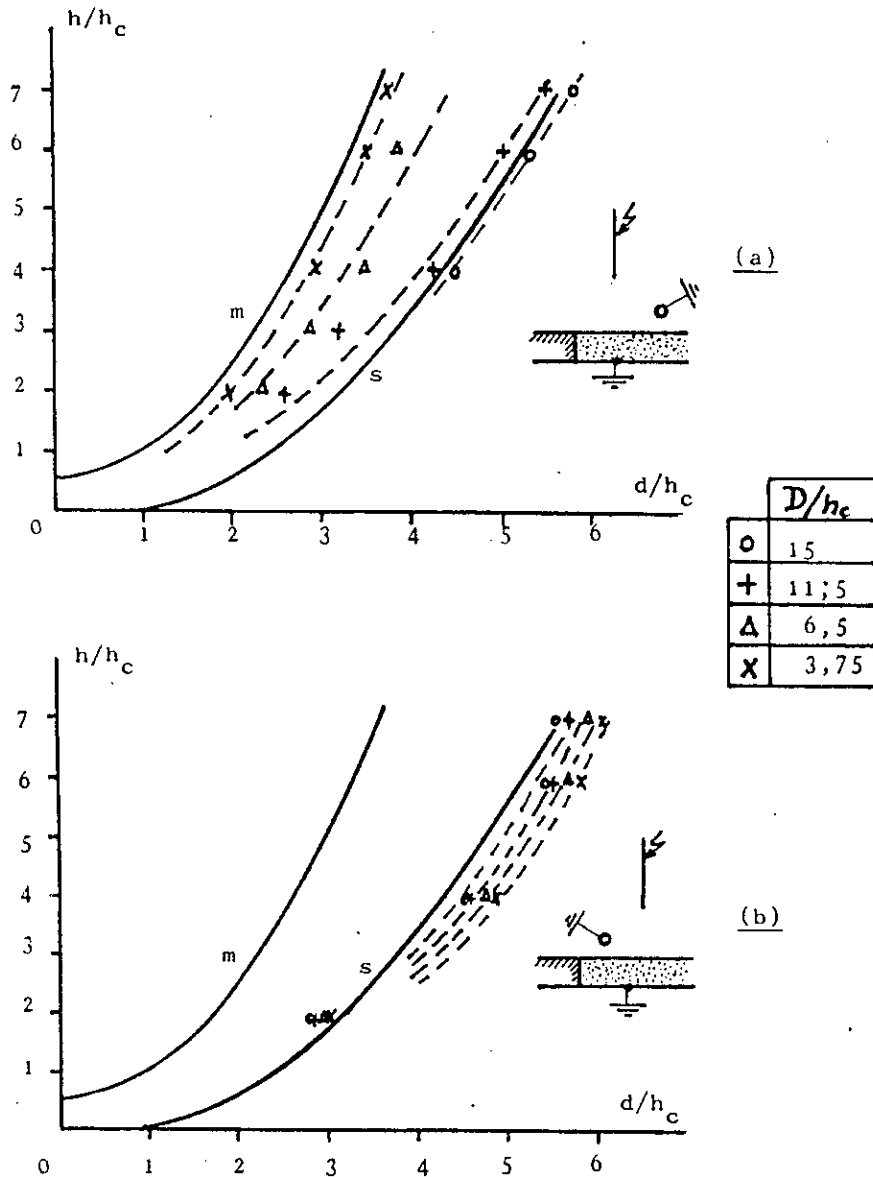


figure 5.1: Zone d'attraction au dessus du sable

a: Tige comprise entre le conducteur et l'interface.

b: Conducteur compris entre la tige et l'interface.

5.3.2 Paratonnerre situé au dessus de l'acier.

Les résultats obtenus au laboratoire sont présentés (fig 5.2). La courbe en trait gras représente la zone d'attraction sur un sol homogène conducteur.

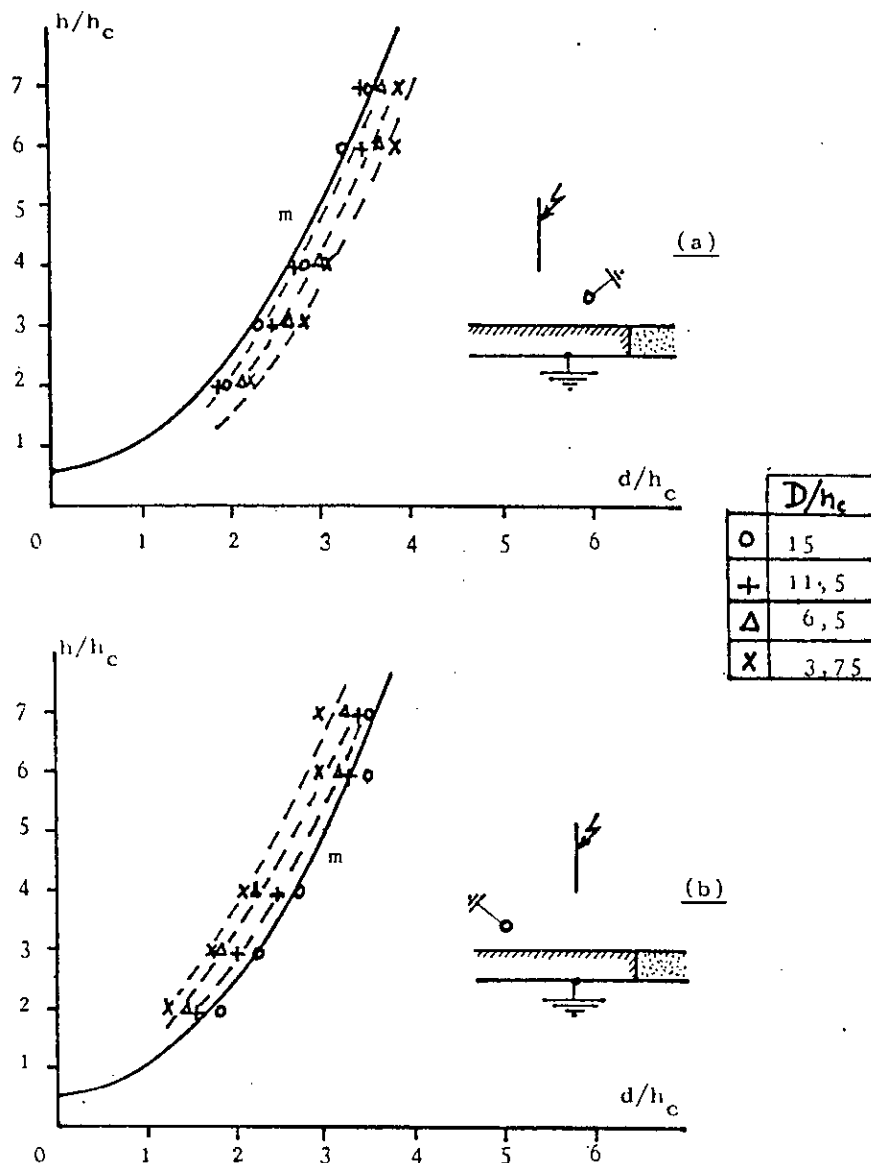


figure 5.1 Zone d'attraction au dessus de l'acier.

a: Conducteur compris entre la tige et l'interface.

b: Tige comprise entre le conducteur et l'interface.

Pour cette configuration on note que la zone d'attraction du paratonnerre sur un sol hétérogène empiète légèrement sur celle définie par le modèle électrogéométrique quand la protection est comprise entre la tige et l'interface, et se situe carrément à l'intérieur de celle-ci quand la tige est comprise entre la protection et l'interface.

Ceci signifie que la zone d'attraction dans ce cas est plus rétrécie donc qu'il peut y avoir défaillance de la protection dimensionnée à l'aide du modèle électrogéométrique.

La simulation numérique elle, ne confirme que partiellement cette constatation. En effet, la défaillance de la protection ne se produit que pour les faibles hauteurs de la tige et les grandes distances tige-protection quand la tige est comprise entre la protection et l'interface (fig 4.12 -c,-d), ou bien pour toutes les hauteurs de la tige et les grandes distances tige-protection quand la protection est comprise entre la tige et l'interface (fig 4.14 -c,-d).

Commentaires :

Les résultats du laboratoire montrent clairement que la distribution du champ diffère suivant que la protection est sur le sable ou sur l'acier et diffère aussi suivant la disposition relative de la protection par rapport à l'interface et à la tige.

Les résultats de simulation quant à eux, montrent la différence de la distribution du champ suivant les dispositions relatives de la protection par rapport à l'interface et à la tige, mais ne semblent pas être influencés par la nature du sol.

Pour confirmer cette constatation, nous avons balayé la plage de variation de la permittivité du sable utilisé au laboratoire, ce qui nous a permis de voir le peu d'influence de ce paramètre sur la distribution du champ dans les configurations étudiées, et quand cette influence existe, elle se manifeste par une atténuation du champ sur l'interface quand la permittivité augmente.

Ceci s'interprète selon nous, par le fait que du point de vue statique, l'hétérogénéité du sol joue un rôle négligeable sur la distribution du champ donc sur la détermination du point d'impact de la décharge de foudre. Seule compte la disposition relative des conducteurs (interface compris), leurs distances respectives et les conditions aux limites.

Nous avons calculé des distributions statiques, et la différence remarquable entre les résultats de simulation et ceux du laboratoire montre, malgré la similitude géométrique, que ce sont les effets dynamiques qui sont prépondérants.

les effets dynamiques sont vraisemblablement ceux dûs aux distributions de charges sur le sol et/ou dans l'espace inter-électrodes. Ces distributions de charges évoluent avec la progression du traceur et créent à un moment donné les conditions d'établissement du saut final.

5.4 Extension à la foudre réelle.

A la lumière de ce qui a été vu au chapitre 2 concernant les similitudes qui existent entre la foudre réelle et sa simulation au laboratoire, et en tenant compte des limites physiques et numériques de notre modèle de simulation numérique, toute extrapolation à la foudre réelle est hasardeuse. On peut dire néanmoins qu'on retrouve dans notre simulation certains faits expérimentaux. En effet, il est établi [2] que les particularités du sol ne jouent un rôle dans la détermination du point d'impact qu'aux alentours des dernières centaines de mètres du cheminement du traceur par bonds. Cette constatation est faite dans nos résultats, car plus la hauteur de la tige augmente, plus le rapport des champs du conducteur et de l'interface tend vers l'unité.

Une autre constatation, confirmée par les observations de foudroiement de structures protégées, est la défaillance de la protection pour les faibles distances d'amorçage c'est à dire en ce qui nous concerne, pour les faibles hauteurs de la tige. Ainsi on remarque que pour toutes les configurations étudiées, le champ

au sol est prédominant par rapport à l'interface et même à la protection pour les faibles hauteurs de la tige .

5.5 Conclusions:

L'étude de la foudre par le biais du calcul du champ électrostatique montre de manière explicite, le rôle important des phénomènes dynamiques sur la détermination du point d'impact de la décharge de foudre.

Ainsi, malgré la similitude géométrique notable entre les configurations étudiées au laboratoire et celles utilisées pour la simulation numérique, on a constaté un grand écart entre leurs résultats. Ceci provient sûrement du fait qu'on a négligé les différentes distributions de charges et ... leurs évolution au cours du temps séparant l'initiation du traceur par bond du saut final.

Concernant enfin l'extension des résultats de simulation à la foudre réelle, nous pensons qu'elles sont loin de la refléter, vues les différences aussi bien géométriques que physiques qui existent entre les deux phénomènes.

La simulation n'est pas pour autant inutile, dans la mesure où elle nous permet d'avoir une idée sur la contribution statique au phénomène global.

CONCLUSIONS GENERALES

Mother nature is fortunately a lady of "infinite variety"; she cannot be constricted within a strait jacket tailored by modelers.

E.T. PIERCE
Stanford Research Institute [18]

La foudre, de par la multitude de facteurs qu'elle fait intervenir est un phénomène complexe. Une étude englobant tous ces facteurs est encore à un stade embryonnaire. Cependant, le coût économique des dégâts qu'elle cause, a imposé un développement accéléré des recherches portant sur la protection contre ses effets directs et indirects.

Le modèle électrogéométrique qui est l'aboutissement de ces travaux, présente encore beaucoup d'insuffisances. L'une d'elle est le fait qu'il ne tient pas compte des particularités électrogéologiques du sol.

Nous avons présenté les travaux effectués sur ce sujet au laboratoire de Haute Tension de l'E.N.P. Ces travaux qui se sont intéressés à l'attraction des décharges de foudre sur un sol hétérogène, puis sur un sol hétérogène en présence d'une protection, ont permis l'acquisition de résultats expérimentaux non négligeables.

La volonté de mieux connaître le rôle de l'hétérogénéité du sol sur l'attraction des décharges de foudre, nous a mené à simuler numériquement les configurations étudiées au laboratoire. La méthode numérique qui nous a paru la plus appropriée pour cela, est la méthode des éléments finis.

Nous avons à ce stade, le choix entre l'utilisation de véritables "boîtes noires" que sont les logiciels éléments finis développés ailleurs, si on les trouve, ou le développement de nos propres programmes.

Nous avons fait le second choix afin de mieux cerner toutes les étapes de calcul numérique du champ et de disposer d'un outil de calcul adapté à nos configurations et développable en fonction de nos contraintes propres.

Dans sa première implémentation, le programme "PROC2D" est

très limité, mais il intègre dès à présent les principales étapes de la méthode des éléments finis et surtout, l'exigence de convivialité que requièrent les opérations de maillage et de visualisation des résultats de calcul.

Une des multiples limites de notre outil de calcul, donc de notre simulation, est le fait qu'il résout des problèmes stationnaires, or le problème auquel on s'intéresse est dynamique.

La tentative de simuler le dynamisme par une succession d'états stationnaires avec des conditions aux limites modifiées en conséquence, a donné des résultats globalement différents de ceux du laboratoire.

Ceci est dû selon nous au fait d'avoir négligé la présence des densités de charges dans l'air et dans les matériaux utilisés, ainsi que leur évolution spatiale et temporelle.

Faire intervenir les densités de charges, nécessite la connaissance de leur localisation et des lois physiques régissant leur évolution dynamique. Leur simulation exige donc, des outils numériques puissants qui dépassent largement les possibilités actuelles de "PROC2D".

L'extrapolation de nos résultats de simulation à la foudre réelle introduit des complications supplémentaires. En effet, si les configurations utilisées pour la simulation numérique sont similaires géométriquement à celles du laboratoire, ce n'est pas le cas pour la foudre réelle; nous ne citerons que le traceur par bonds dont la forme est loin d'être une tige verticale.

Une autre limite de taille de notre programme, réside dans l'absence d'une évaluation de la précision des résultats de calcul, qui empêche une étude quantitative sérieuse du phénomène auquel on s'intéresse.

Mais il faut dire à l'avantage de notre travail, qu'il nous a permis d'évaluer, ne serait-ce que qualitativement, la contribution statique au phénomène global.

Cette contribution nous a permis de constater la faible influence de la permittivité relative de la composante non conductrice du sol, dans la plage de variation étudiée au laboratoire, ainsi que la défaillance de la protection pour les grandes et les faibles hauteurs de la tige simulant le traceur par bonds.

Un autre avantage et non des moindres, réside dans la familiarité acquise avec les méthodes numériques, qui nous permettrait nous l'espérons, de nous doter dans le futur, d'outils de calculs beaucoup plus performants, à même de nous permettre d'entamer une simulation plus adéquate de la foudre.

B I B L I O G R A P H I E

- 1- R.FEYNMAN: Le cours de Physique de FEYNMAN. Electromagnétisme 1
Chap 9 : L'électricité dans l'atmosphère. Inter-editions, Paris,
1979.
- 2- GARY - LEROY : Propriétés diélectriques de l'air et les très
hautes tensions. Deuxième partie : La foudre; éditions
EYROLLES, Paris, 1984.
- 3- C. GARY : La foudre et les phénomènes orageux. RGE N 3,
Mars 1989, pp 3-11.
- 4- A.J.ERIKSSON : Surtensions de foudre sur les lignes de
transport à haute tension, Electra N 47, 1975, pp 87-110.
- 5- L.THIONE : Rapport spécial du groupe 33 (surtension et
coordination de l'isolement). CIGRE 1980.
- 6- B.HUTZLER : L'étincelle de laboratoire, un moyen d'étude de
la foudre ?, RGE N°3 Mars 1989, pp 12-17.
- 7- R. CORTINA, E.GARBAGNATI, W. SERVALLI, L. DELLERA, A.PIGINI,
L. THIONE . Quelques Aspects de l'évaluation des performances
des réseaux électriques vis à vis de la foudre, CIGRE, Rapport
N°33-13, 1980.
- 8- C.GARY, B. HUTZLER : Simulation au laboratoire de l'impact au
sol. RGE N°3, Mars 1989, pp 18-24.
- 9- J. FERRAS : Influence des propriétés électrogéologiques du
sol sur le point d'impact de la décharge de foudre. Thèse de
Magister, E.N.P.Alger, 1987.
- 10- A. ATEK, S. CHEMLAL : Zones d'attraction d'un paratonnerre
horizontal dans le cas d'une terre hétérogène, Projet de fin
d'études, E.N.P.Alger, Juin 1988.
- 11- A.J. DAVIES : The finite element method, a first approach,
Clarendon press Oxford, 1980.
- 12- Bulletin de liaison de la recherche en informatique et en
automatique I.N.R.I.A N° 125 / 1989.
- 13- K. NACEREDDINE ; A. BOUBAKEUR : Simulation numérique de la
foudre, 3^{ème} Colloque Maghrebin sur les modèles numériques de
l'ingénieur, Tunis, 1991.

- 14- O.C. ZIENKEWICZ : The finite element method in engineering science, Mc Graw-Hill, London, 1971.
- 15- M.LAPORTE, J.VIGNES : Algorithmes Numériques analyse et mise en oeuvre, tome 1. Technip, 1980.
- 16- R.B. ANDERSON, A.J. ERIKSSON: Récapitulation des paramètres de la foudre en vue des applications techniques. CIGRE , rapport N° 33-06, 1980.
- 17- K. BERGER, R.B. ANDERSON et H. KRONINGER : Paramètres des coups de foudre. Electre N°41, 1975, pp 23-37.
- 18- R.H. GOLDE : Lightning Tome II. Academic press, London, 1977.
- 19- G. DHATT, G.TOUZOT : Une présentation de la méthode des éléments finis, Maloine S.A, 1984.
- 20- T.J.R. HUGUES : The finite element method, linear static and dynamic Finite Element Analysis. Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1987.
- 21- J.C. SABONNADIÈRE, J.L. COULOM : Elements finis et C.A.O. Hernès, Paris, 1986.
- 22- BOUMAH RAT, GOURDIN : Méthodes numériques appliquées. OPU, Alger, 1983.
- 23- R.L. BURDEN, J.D. SAIRES, A.C. REYNOLDS : Numerical Analysis; Weber and Schmidt, July 1979.
- 24- A. BOUBAKEUR ; J. FERRAS : Negative lightning breakdown of rod-plane air gaps with heterogeneous earth; 5th I.S.H, paper 14.26, Braunschweig, 1987.
- 25- A. BOUBAKEUR ; J. FERRAS : Décharge de foudre dans les intervalles d'air tige-plan avec terre hétérogène, 8èmes J.T.E.A, rapport N° 7, Tunis, 1987.
- 26- A. BOUBAKEUR ; J. FERRAS : Negative lightning breakdown of rod-conductor air gaps with heterogeneous earth, MEPCON 89, paper EE05-025, Cairo-Assiut, 1989.
- 27- A. BOUBAKEUR ; A. ATEK et S. CHEMLAL : Zones d'attraction d'un paratonnerre horizontal dans le cas d'une terre hétérogène, 1er colloque sur l'électrotechnique et l'automatique, Alger, 1990.