

10/76

2ed

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER  
DEPARTEMENT ELECTRICITE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

THESE DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية  
المكتبة  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
BIBLIOTHEQUE

ETUDE DE L'EFFET DE COURONNE SOUS TENSION  
DE 50 Hz

PROPOSEE PAR :

: DOBARDZIC

ETUDIEE PAR :

Mr: LEULMI SALAH

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَقُلْ رَبِّيَ زِدْنِي عِلْمًا

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER  
DEPARTEMENT ELECTRICITE

---

# THESE DE FIN D'ETUDES

ETUDE DE L'EFFET COURONNE SOUS TENSION  
DE 50 Hz

PROPOSEE PAR :

Mr: DOBARDZIC

ETUDIEE PAR :

Mr: LEULMI SALAH

( PROMOTION 1976 )

**F-**

**T**OUS **L**ES **F**RERES

**F-**

**M**Ma **F**amille.

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

J'exprime ma vive gratitude envers tous les professeurs qui ont contribué à ma formation et plus particulièrement Mr DOBARDZIC pour avoir dirigé cette thèse et pour les précieux conseils qu'il m'a donnés.

Je remercie également tous les frères qui ont participé de loin ou de près à l'élaboration de cette thèse notamment Mr CHACHI Abdelkader. Je saisis cette occasion pour remercier tout le personnel du service de l'exploitation et transport d'énergie électrique du SONEGAS, en particulier Mr GUITA pour l'aide en équipement de mesure du champ perturbateur. Mes remerciements aussi à tout le personnel du service de documentation de la SONEGAS.

signé : SALAH LEULMI

- S O M M A I R E -

- INTRODUCTION.....

CHAPITRE 1

RAPPEL SUR LES DECHARGES ELECTRIQUES DANS LES GAZ

1.1 Généralités .....1  
1.2 Caractéristique  $i - u$  des décharges dans les gaz.....2  
1.3 Mécanisme de formation des pertes couronnes.....6  
1.4 Perturbations causées par l'effet couronne.....6  
1.5 Facteurs influençant sur la décharge couronne.....7

CHAPITRE 2

TENSION D'AMORCAGE DE L'EFFET COURONNE

2.1 Généralités.....17  
2.2 Calcul du champ dans divers systèmes d'électrodes.....17  
2.3 Champ critique - formule de PEEK.....17  
2.4 Tension d'amorçage de l'effet couronne.....19

CHAPITRE 3

METHODES DE DETERMINATION DES PERTES DUES A L'EFFET COURONNE

3.1 Généralités.....21  
3.2 Pertes aux tensions inférieures à la tension critique..21  
3.3 Pertes sous tensions supérieures à la tension critique.22  
3.4 Mesures des pertes dues à l'effet couronne.....25

CHAPITRE 4

PERTURBATIONS RADIOPHONIQUES DUES A L'EFFET COURONNE

4.1 Généralités.....27  
4.2 Principales caractéristiques du champ perturbateur dues à l'effet couronne sur les lignes H.T.....28  
4.3 Paramètres influençant le champ perturbateur.....29  
4.4 Perturbations dues à l'appareillage de poste et aux chaînes d'isolateurs.....31

4.5 Méthode et équipement pour la détermination des perturbations radiophoniques.....	32
4.6 Résultats des mesures du champ perturbateur dans le poste de ZAHANA et sur la ligne ZAHANA-TLEMCEN.....	34

## CHAPITRE 5

### ESSAIS AU LABORATOIRE DE L'E.N.P.A.

5.1 Généralités.....	36
5.2 Equipements du laboratoire utilisé pendant les essais..	36
5.3 Modèles expérimentés.....	38
5.4 Essais et résultats des mesures.....	40
-CONCLUSION.....	43

## INTRODUCTION

L'effet couronne est une forme de décharge dans les gaz qui apparait autour des conducteurs des lignes de H.T, lorsque la tension atteint une valeur correspondante.

Ces décharges peuvent être très nuisibles car elles sont liées avec les pertes d'énergie, le vieillissement de la surface et d'isolation ainsi que les perturbations radiophoniques.

L'intensité de ces décharges dépend de l'intensité du champ qui est en principe la plus grande à la surface du conducteur. C'est à cet endroit que ce phénomène prend naissance. L'intensité du champ dépend de la valeur de la tension appliquée et de la géométrie du système d'électrodes. Dans les conditions normales les décharges en couronne ne sont pas admissibles. De ce fait, le dimensionnement des lignes de haute tension ne se fait pas seulement en fonction de la tension de service et du courant nominal mais aussi en fonction des facteurs influençant l'apparition des décharges sous cette forme.

Parmi les facteurs les plus influençants sur la tension d'apparition de couronne sont le diamètre et l'état de surface du conducteur.

Dans notre pays, les conditions de pollution de surface des conducteurs sont très variées. Cependant, jusqu'à présent les recherches de décharges en couronne n'ont pas été abordées, malgré que le niveau de tension des lignes de transport d'énergie électrique est augmenté jusqu'à 220 Kv.

L'étude de la couronne dans le cadre de la présente thèse était consacrée en premier lieu sur les problèmes élémentaires pouvant intéresser SONELGAZ. C'est la raison pour laquelle on les a effectués avec une très proche collaboration avec cette société par l'aide d'un équipement de mesure du niveau du champ perturbateur dont j'ai bénéficié non seulement, au cours des recherches au laboratoire de H.T de l'E.N.P.A mais aussi pour certaines vérifications dans le poste de transformation 220/150/60 Kv de ZAHANA (ORAN) et sur la ligne ZAHANA-TLEMCEM.

La présente étude consiste à faire d'abord un bref rappel théorique sur les décharges dans les gaz ; ensuite de mesurer les tensions initiales d'apparition d'effet couronne et cela en fonction des paramètres des modèles choisis.

Les modèles utilisés au laboratoire étaient dans tous les cas des modèles cylindriques simples de longueur limitée à 7m et la hauteur de 2m du sol.

Les paramètres variables de ces modèles étaient le diamètre du conducteur et l'état de surface.

Parallèlement à la mesure de la tension initiale on a mesuré aussi le niveau de perturbation pour chaque cas de pollution de la surface de la tension appliquée.

On a constaté dans tous les cas de mesure que les considérations théoriques et les recherches des divers auteurs étaient en accord avec nos résultats.

## CHAPITRE 1

### RAPPEL SUR LES DECHARGES ELECTRIQUES

#### DANS LES GAZ

##### 1.1 GENERALITES :

Les principales formes de décharges électriques apparaissant entre deux électrodes dans les gaz en fonction de l'intensité du champ sont les suivantes : les effluves ou l'effet couronne, les aigrettes, les étincelles. Les dernières qui a des intensités de courant plus fortes se transforment en décharges sous forme d'arc.

Ces décharges sont définies par les normes U.T.E [1] comme suit :

"l'effluve est un phénomène de conduction électrique dans les gaz qui se manifeste par faible luminosité sans grand échauffement, sans bruit et sans volatilisation appréciable des électrodes, lorsque le champ électrique dépasse une certaine valeur"

"l'effet couronne est une forme particulière de l'effluve dans le cas des lignes à haute tension"

"l'aigrette est une décharge intermittente d'électricité qui sort d'un conducteur lorsque son potentiel dépasse une certaine valeur, mais reste insuffisante pour la formation d'une vraie étincelle. Elle est généralement accompagnée de sifflement ou de crépitement"

"l'arc est une décharge lumineuse et persistante d'électricité à travers un milieu isolant, habituellement elle s'accompagne de la volatilisation partielle des électrodes"

"l'étincelle phénomène lumineux, éclatant de courte durée caractérise la décharge disruptive"

La caractéristique  $i - u$  dépend du type de décharge.

Pour les décharges sous formes d'effluve, cette caractéristique est positive c'est à dire qu'une augmentation de la tension entraîne une augmentation du courant par contre elle devient négative pour les décharges sous forme d'étincelle et de l'arc.

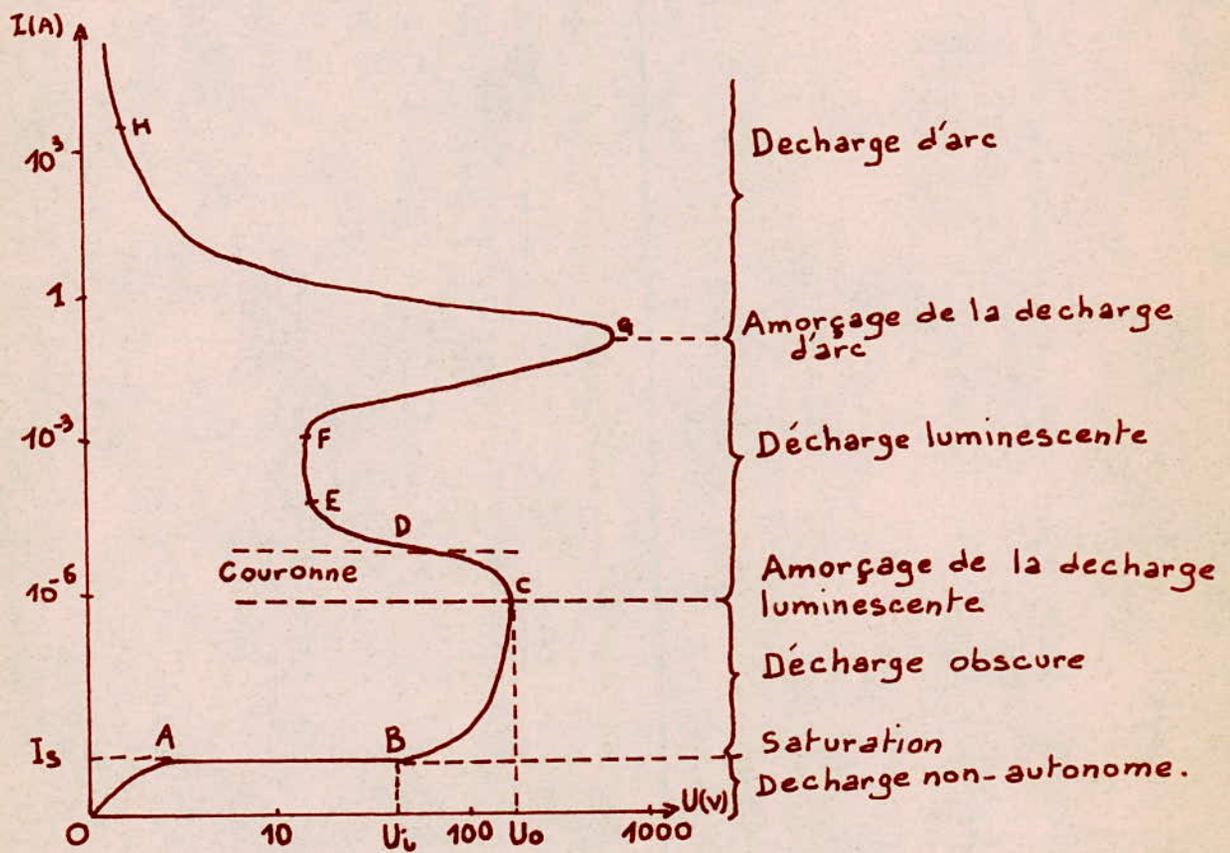


Fig 1.1. Caractéristique Complète de la Décharge dans les Gaz.

Dans ce chapitre, elles seront rappelées les conditions influençant l'apparition des diverses formes de décharges, ainsi que les mécanismes de formation des pertes et des perturbations radiophoniques causées par les décharges électriques.

A chaque forme de décharge correspond une tension, dont la plus petite valeur sera appelée tension initiale ; à cette valeur de la tension les décharges deviennent, dans l'obscurité totale, visibles.

## 1.2 CARACTERISTIQUE $i - u$ DES DECHARGES DANS LES GAZ

La Fig 1.1 représente une caractéristique courant-tension typique des décharges à basses pressions, entre deux électrodes isolées par un gaz quelconque ; cette caractéristique donne les ordres de grandeur des courants et des tensions qui interviennent dans les différentes formes de décharges.

Le courant augmente en fonction de la tension appliquée aux électrodes tout d'abord linéairement, tend ensuite vers une valeur constante, le courant de saturation  $I_s$  (portion de la courbe OAB). Dans tout ce domaine le courant est si petit que la charge d'espace demeure négligeable et la distribution du champ ne dépend que de la tension et de la géométrie des électrodes.

Pour des tensions,  $U_i \leq U < U_0$ , le courant commence de nouveau à s'accroître avec celles-ci au début lentement, puis de plus en plus rapidement ; la décharge correspondant à cette zone est dite décharge obscure, due au choc des corpuscules chargés avec les molécules neutres du gaz.

On définit  $U_i$  comme étant la tension nécessaire pour communiquer à un électron partant du repos l'énergie minimum lui permettant d'ioniser par choc une molécule ou un atome non excité. De même  $U_0$  est défini comme étant la tension nécessaire pour produire les premières décharges visibles entre deux électrodes quelconques dans l'obscurité totale.

Dépassant le point C, après avoir atteint la tension  $U_0$ , le rôle de la charge d'espace devient, en général, prédominant permettant une ionisation par choc beaucoup plus efficace du gaz.

Cela conduit à une grande diminution de la résistance électrique du gaz et, par conséquent, de la tension nécessaire au maintien de la décharge ; de façon correspondante, le courant devient intense et la décharge devient visible.

Nous mentionnons ici que, pour  $U = U_0$  dans certaines conditions la décharge couronne prend naissance. La charge d'espace dans la zone CD joue un rôle important et la lumière émise rend visible la décharge couronne étape initiale de la décharge lumineuse ; les phénomènes lumineux sont caractérisés d'une part, par l'émission électronique, et, d'autre part l'ionisation et l'excitation des atomes du gaz par un très grand nombre de collisions avec les électrons accélérés dans le champ électrique suffisamment intense.

Dans les conditions normales de l'air et une distribution uniforme du champ les premières décharges visibles apparaissent à une valeur très voisine de 30 KV/cm ; Le phénomène évolue jusqu'au claquage de l'intervalle entre les électrodes. Ce champ provoquant la rupture diélectrique de l'air, est appelé rigidité diélectrique de l'air ou champ disruptif.

Les phénomènes lumineux des décharges dans les gaz sont conditionnés par la distribution du champ. Dans un champ non uniforme, les premières décharges visibles se manifestent sous la forme d'effluves ou des aigrettes en fonction de l'état de surface des électrodes.

Les décharges sont toujours plus fortes aux endroits où le champ est plus intense c'est à dire autour de l'électrode à petit rayon de courbure. Si nous appliquons une tension croissante, par exemple, entre une plaque et une pointe, le champ électrique sera intense au voisinage de la pointe qui dans l'obscurité se manifeste par une gaine lumineuse.

Le champ autour d'un conducteur chargé atteint sa valeur maximale à la surface du conducteur, et décroît suivant une fonction hyperbolique de la distance. Pour les tensions suffisamment élevées le gradient de potentiel au voisinage de la surface du conducteur dépasse la valeur du champ disruptif.

Dés que la valeur du champ atteint la valeur critique, une décharge lumineuse se produit à la surface du conducteur. La présence de ces charges libres près du conducteur modifie la distribution du champ autour de celui-ci.

Il est à noter que pour les lignes à haute tension, le courant due à l'effet couronne est détectable; il est de l'ordre du milliampère par kilomètre.

Le mécanisme de la décharge couronne dépend de la polarité. Nous distinguons la décharge couronne positive et la décharge couronne négative par les phénomènes suivants :

-En polarité positive du conducteur le développement de l'ionisation du gaz par collisions électroniques commence à partir de l'espace voisin et se développe vers la surface du conducteur. Les électrons sont absorbés par celui-ci laissant derrière eux un nuage d'ions positifs, beaucoup moins mobiles. Les ions positifs ainsi engendrés se mettent en mouvement en sens inverse, traversent la zone d'ionisation et le domaine extérieur et tombent sur l'autre électrode.

-En polarité négative du conducteur, l'avalanche électronique se développe depuis le conducteur vers l'extérieur ; elle s'arrête à une certaine distance où le champ n'est plus suffisant pour assurer l'effet de l'avalanche électronique ; généralement ce champ est inférieur au champ disruptif. Le phénomène d'ionisation est alors limité à une couronne d'une épaisseur bien définie.

D'autres phénomènes peuvent se produire tels que la formation intermittente de la couronne pour des tensions entre les électrodes légèrement plus petites que la tension d'apparition de la couronne : ces impulsions ont un caractère régulier dans la décharge négative dans les gaz. Par contre, leur caractère est irrégulier dans le cas de la décharge positive [2].

Sur les conducteurs des lignes de transport H.T, l'effet couronne perd son aspect de gaine lumineuse ; il prend l'aspect d'émission continue impulsive du fait de la variation de l'état de surface. Toutes les aspérités créent un renforcement local du champ électrique et ont pour conséquence une réduction du niveau de la tension d'apparition de la couronne.

Le courant de couronne est généralement décomposé en trois composantes: une composante active, l'autre capacitive et enfin une troisième composante ayant les harmoniques supérieures dont les deux premières composantes ont une fréquence égale à celle de la tension, par contre la troisième composante peut atteindre des fréquences de l'ordre de quelques megahertz.

Le courant capacitif est lié avec le champ électrique, le courant actif aux pertes et les courants des harmoniques supérieures aux perturbations radiophoniques.

La décharge électrique correspondant au domaine C.D.E.F.G est dite décharge lumineuse caractérisée généralement par une déformation prononcée du champ par la charge électrique d'espace.

Pour une tension de plus en plus élevée, les faisceaux lumineux apparaissant entre les électrodes finissent par se rejoindre, et on a alors une décharge complète d'une électrode à l'autre. Cette décharge peut se produire sans apparition préalable d'effluve, notamment lorsque les électrodes ne présentent que des surfaces à grand rayon de courbure.

Cette décharge d'éclatement présente diverses formes, suivant les cas: lorsqu'elle est de courte durée, en forme de lignes brisées, avec des angles très marqués, on l'appelle l'étincelle. Lorsque l'intensité est <sup>suffisante</sup> ~~suffisante~~, la décharge qui, le plus souvent, doit commencer par une étincelle se transforme en arc électrique. Il a une forme moins angulaire que l'étincelle.

Les décharges sous forme d'arc sont de natures diverses, mais caractérisées par une forte émission d'électrons par la cathode, soit parce que celle-ci se trouve portée à haute température (effet thermocélectrique), soit parce qu'il existe tout près d'elle un champ assez intense pour arracher les électrons (effet de champ).

Malgré l'importance énorme des décharges sous la forme d'étincelle et sous la forme d'arc, celles-ci ne seront pas soulevées dans ce qui suit.

Dans la suite nous nous limiterons uniquement aux décharges dans les gaz sous la forme de couronne et spécialement dans l'air.

### 1.3 MECANISME DE FORMATION DES PERTES COURONNES

Ce mécanisme est bien expliqué par C. GARY [2]. Nous le résumons comme suit : le phénomène fondamental des divers modes d'émission est toujours la dissociation des atomes en électrons et en ions positifs. Ce phénomène libère donc des charges des deux signes ; ceux qui sont de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirés vers celui-ci et neutralisés ; alors que les charges de même signe sont entraînées vers l'extérieur par le champ électrique en agglomérant des molécules neutres pour former de gros ions. La migration de ces ions dans le champ électrique est la cause physique des pertes par effet couronne, l'énergie étant dissipée par frottement des ions contre les molécules neutres de l'air.

Les pertes d'énergie dues à l'effet couronne sont donc de deux sortes : l'énergie nécessaire à l'ionisation et celle nécessaire au déplacement de la charge d'espace ; cette 2<sup>o</sup> sorte de perte est en courant alternatif, bien supérieure à la 1<sup>o</sup> que l'on peut donc négliger.

Sur les lignes H.T en service, des manifestations d'ionisations locales apparaissent pour des tensions bien inférieures à la tension critique. Ces manifestations correspondent à l'apparition des premières pertes.

la tension

Si on augmente progressivement, sur de telles lignes, le nombre d'aigrettes augmente et la charge d'espace ainsi créée devient suffisamment dense pour réagir de façon sensible sur les charges portées sur les conducteurs. Ce régime correspond au régime des pertes aux tensions supérieures à la tension critique.

### 1.4 PERTURBATIONS CAUSEES PAR L'EFFET COURONNE

Les perturbations que nous soulevons ci-dessous sont largement détaillées dans les publications [2], [3], [4], [5], Nous nous basons en particulier sur celles de PELLISSIER [3].

La mise sous tension croissante d'un conducteur d'une ligne aérienne s'accompagne par une augmentation du champ électrique à la surface du conducteur jusqu'au moment où celui-ci dépasse la valeur du champ disruptif de l'air. L'ionisation qui apparaît alors dans l'air se manifeste par un crépitement que l'on entend à l'oreille d'une part et dans les postes récepteurs de radiophonie voisins d'autre part.

Le phénomène fondamental ici est le mode d'émission impulsionnelle au cours duquel les charges libres, ions et électrons, sont brusquement formés puis violemment entraînées par le champ électrique intense au voisinage immédiat du conducteur.

La formation et le déplacement rapide de ces charges dans l'espace voisin du conducteur provoquent une modification rapide de la distribution des potentiels électrostatiques d'où résulte l'émission d'une onde électromagnétique [2].

Ce sont généralement des impulsions irrégulières à large spectre (dues à la décharge positive) qui se propagent le long de la ligne et dont l'effet cumulatif produit un champ radioélectrique fortement perturbateur. Ces perturbations lorsqu'elles se produisent sont généralement limitées à une zone de 20 à 25 mètres de part et d'autre des lignes de 220 à 380 KV. Leur importance passe par un maximum au moment de la première mise en service des installations. Ce maximum s'alterne progressivement au bout de quelques semaines et la zone perturbée devient plus étroite et se rapproche de l'axe de la ligne.

### 1.5 FACTEURS INFLUENCANT SUR LA DECHARGE COURONNE

#### a- Influence de la forme de tension

L'effet couronne se manifeste différemment suivant que la ligne est à tension continue ou à tension alternative.

- En tension continue, la charge d'espace rejoint le sol (ou le conducteur de polarité opposée) sous l'influence du champ ; dans ce cas seul le conducteur positif émet un champ parasite sensible.

Le processus des pertes couronne sous tension continue diffère de celui des pertes sous tension alternative ; elles sont plus faibles pour les tensions continues que dans le cas des tensions périodiques. Le travail d'ionisation n'est plus négligeable devant l'énergie nécessaire au déplacement de la charge d'espace, car les ions libérés par choc sont très lents. La théorie sur les perturbations radiophoniques et les pertes couronne sous tension continue ne sont pas actuellement très développées, faute d'études expérimentales suffisantes.

- En tension alternative, l'ion s'éloigne de quelques dizaines de centimètres du conducteur, puis revient sur celui-ci à l'alternance suivante. Au cours de leur mouvement de retour vers le conducteur, les charges croisent des charges de signe opposé ; ils en résultent des combinaisons partielles.

Les perturbations radiophoniques émises pendant l'alternance négative restent faibles, mais les grandes aigrettes qui apparaissent pendant l'alternance positive engendrent un champ perturbateur intense.

Si le champ électrique n'est pas déformé par la présence des charges, le mouvement et la perte d'énergie correspondante sont calculables.

On constate donc une nette différence entre les lignes à tension alternative et les lignes à tension continue, du point de vue des pertes et des perturbations radiophoniques dues à l'effet couronne. Dans tout ce qui suit, on se limitera qu'aux tensions alternatives à 50 Hz.

#### b-Influence de la nature du gaz

Les gaz utilisés dans la technique de H.T sont de trois catégories : les gaz monoatomiques, les gaz diatomiques, et les gaz électronégatifs.

- Les gaz monoatomiques ont des performances très modestes. Ils sont d'une application très rares dans les appareils électriques.

- Les gaz diatomiques, tels que l'azote, présentent une rigidité électrique légèrement inférieure à celle de l'air. Ils sont utilisés comme isolants dans certains systèmes isolants fermés.

- Les gaz électronégatifs : de nombreuses études ont montré que beaucoup de composés gazeux, en particulier ceux qui contiennent du chlore, du fluor, du brome, de l'oxygène ou tout autre gaz électronégatif peuvent avoir un pouvoir isolant beaucoup plus important que l'air soumis à la même pression [6]. Ces composés qui ont, en général un poids moléculaire important et une structure complexe, offrent ainsi des collisions inélastiques ; ce qui diminue les décharges dues aux chocs. Les gaz électronégatifs sont ainsi caractérisés par de faibles pertes d'ionisation et sont utilisés dans les appareils électriques tels que les appareils de coupure.

Parmi les gaz électronégatifs, l'hexafluor de soufre ( $SF_6$ ) et le tétrachlorure de carbone sont considérés les plus importants; ces deux gaz offrent dans une large gamme de pressions, un pouvoir isolant environ trois fois supérieur à celui de l'air à la même pression.

Les caractéristiques i-u des gaz électronégatifs sont semblables à celles des autres gaz, mais les décharges se produisent pour des champs électriques plus élevés, à des pressions identiques. Sous des champs électriques élevés, les molécules de gaz électronégatifs se dissocient en des structures variées et simples, contenant des atomes libres de chlore et de fluor; ces derniers composés attaquent les métaux et de nombreux autres corps.

Les fluors de carbone tels que  $C_5F_8$  ont, d'après certains auteurs, un pouvoir isolant presque égal à celui du  $SF_6$ ; mais sont moins sujets à des dissociations car les liaisons carbone-fluor sont plus fortes.

Parmi les gaz électronégatifs l'héxafluor de soufre est le plus utilisé, actuellement dans les appareils électriques fermés; cependant même s'il est dilué il maintient une rigidité diélectrique très importante.

Le tableau suivant donne la rigidité diélectrique relative de certains gaz [7].

Gaz	$H_2$	Air	Nitrogène	30% $SF_6$ 70% Air	$SF_6$	$C_5F_8$
Rigidité diélectrique relative	0,5	1	1	2	2,5	5,5

La Fig 1.2 indique le pouvoir isolant des diverses variétés de gaz dans un champ électrique uniforme en fonction de la pression.

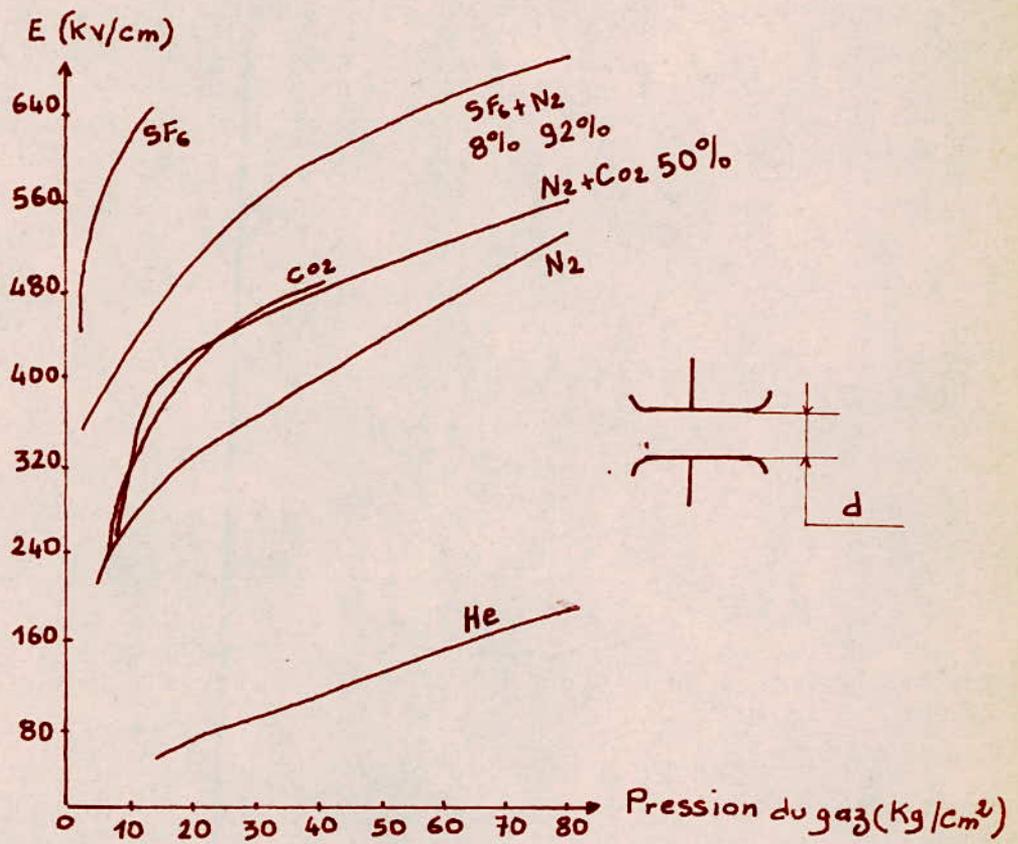
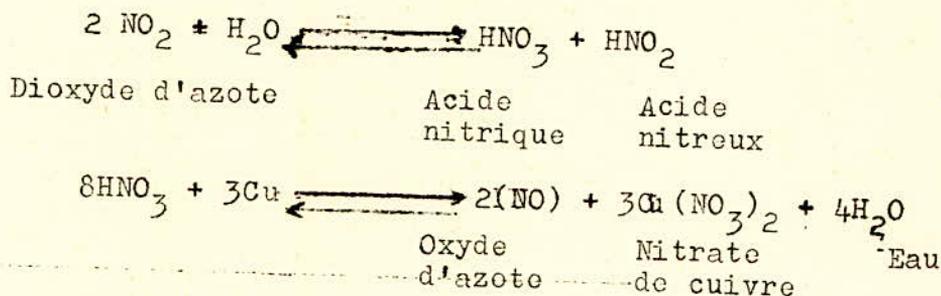


Fig: 1.2. Champ Disruptif Dans Différents Gaz en Fonction de la Pression Selon VON HIPPEL [6].

Tous les gaz cités sont généralement, employés dans les systèmes isolants fermés, cependant l'air est utilisé dans les moteurs fermés et ouverts et surtout l'isolation des lignes aériennes à H.T.

- L'air ionisé, sous l'influence des champs élevés, produit de l'ozone et plusieurs oxydes de l'azote. L'ozone agit très fortement sur l'oxydation dont les conséquences sont la détérioration de nombreux corps organiques ; par contre les oxydes de l'azote, en présence de l'humidité, forment des acides nitreux et nitriques qui attaquent les métaux et rendent fragile la cellulose et les autres matériaux organiques.



c- Influence de la pression sur la rigidité dielectrique des gaz  
Loi de PASCHEN

En champ uniforme la tension disruptive entre deux électrodes planes est pour chaque gaz à température constante une fonction du produit de la pression, p, par la distance d : c'est la loi de PASCHEN.

$$U = f(p.d) \quad (1.1)$$

Ainsi lorsque la pression du gaz est doublée par exemple, il est possible de réduire presque de moitié la distance entre les électrodes sans que la tension disruptive soit modifiée ; cependant la rigidité dielectrique ne croisse pas indéfiniment avec la pression.

Pour l'explication de l'allure de la courbe expérimentale, on considère un point A, à la droite du minimum, appartenant à la courbe et pour une distance fixée d, faisons décroître, au moyen d'un mécanisme quelconque la pression, la masse des molécules gazeuses diminue alors, d'après l'approximation de la loi Boyle-mariotte, d'une façon proportionnelle ( $m = k \frac{pd}{T}$ ).

Par conséquent le nombre de collisions d'un électron avec les molécules diminue ; comme chaque collision résulte en une perte d'énergie, il s'en suit qu'un faible champ électrique est suffisant pour donner aux électrons l'énergie cinétique requise pour ioniser par collision [8]. Quand le minimum est atteint, la densité du gaz sera faible et il y aura relativement peu de collisions ; dans ces considérations l'électron ne peut ioniser une molécule en entrant en collision avec elle, même si l'énergie de l'électron dépasse l'énergie d'ionisation. De là, on dit que l'électron a une chance finie d'ionisation qui dépend de son énergie.

Si la densité du gaz et de là le nombre de collisions diminuent, la rupture se manifeste seulement si la probabilité d'ionisation augmente et ceci explique l'augmentation de la tension à gauche du minimum [7]. Si la densité est fixée, la rupture à gauche du minimum, arrive plus volontairement au cours de grandes distances.

L'allure de la courbe  $U = f(p.d)$ , présentée par la Fig 1.3a pour une température donnée est générale ; quand le produit p.d croît à partir des valeurs très petites, la tension disruptive d'abord très grande (ceci correspond au fait que le vide serait un isolant parfait), passe par un minimum, puis augmente à peu près linéairement pour des valeurs suffisantes de p.d suivant la loi :

$$U = a + b(p.d) \quad (1.2)$$

Ainsi la tension disruptive de l'air entre deux plaques parallèles dans les conditions normales ( $p = 1 \text{ atm}$ ,  $T = 20^\circ \text{C}$ ) est approximativement :

$$U \approx 1500 + 3.10^4 d \quad (1.3)$$

où U est exprimée en volt et d en centimètres ; ce qui correspond bien à la rigidité diélectrique qui est de l'ordre de 30 KV/cm.

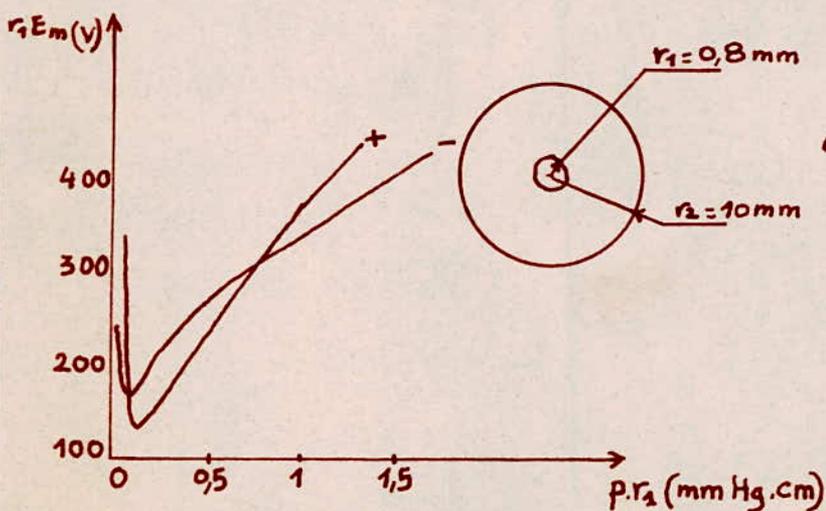
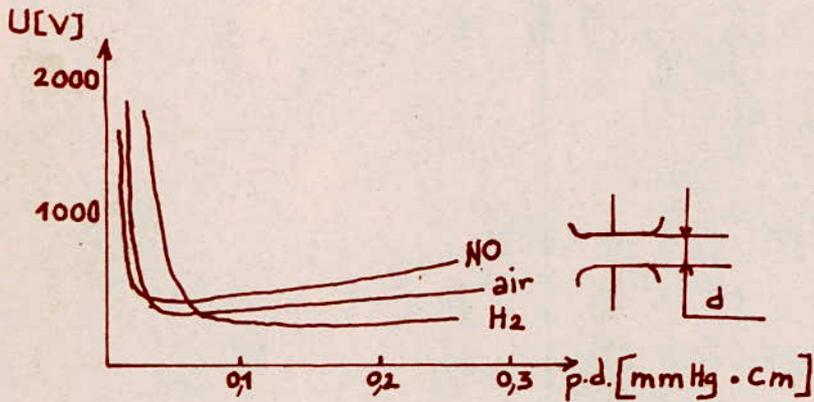
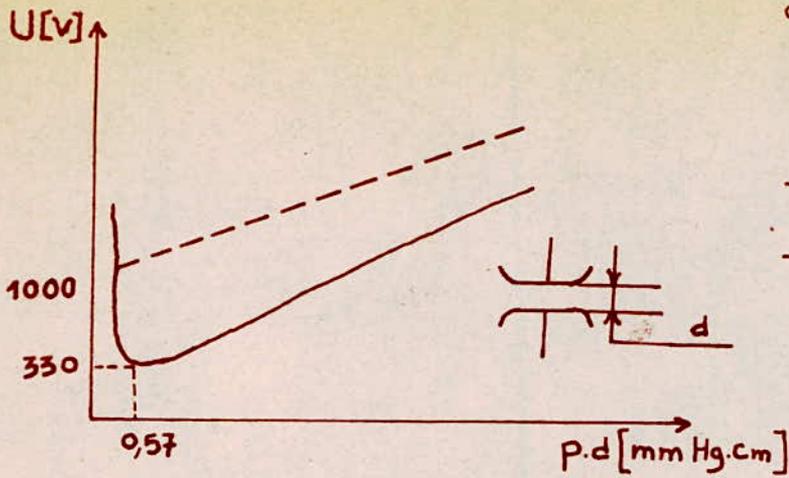


Fig 1.3 Courbes de PASCHEN

En champ non uniforme, on peut entreprendre une étude similaire à des systèmes plans pour laquelle est valable la courbe de la Fig 1.3c.

En supposant que la variation relative du champ non homogène sur un libre parcours moyen soit suffisamment petite et que la charge d'espace soit négligeable pour que le champ ne soit pas déformé par celle-ci, on arrive à démontrer que : la tension disruptive entre deux électrodes quelconques est fonction du produit de la pression  $p$  par une longueur caractéristique [9]. Cela est valable jusqu'à des valeurs de pression très grandes (50 atmosphères pour l'air).

La Fig 1.3c représente le graphique  $E_{\max} \cdot r_1 = f(p \cdot r_1)$  dans le cas des systèmes d'électrodes cylindriques coaxiales pour les ~~amalgames~~ <sup>amalgames</sup> négatifs (électrode intérieure négative) et positifs (électrode intérieure positive) dans l'air [9] ; le champ est maximum à la surface du cylindre intérieur et est donné par :

$$U = r_1 \cdot E_{\max} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (1.4)$$

où  $U$  : tension entre électrodes  
 $r_1$  : rayon du cylindre intérieur  
 $r_2$  : rayon du cylindre extérieur  
 $E_{\max}$  : champ maximum à la distance  $x = r_1$

L'allure de la courbe  $U = f(p \cdot r_1)$  sera donc similaire à celle représentée par la Fig 1.3c. Donc la décharge sous la forme de couronne dépend de la pression, puisque ce facteur influence la longueur du libre parcours moyen, donc la vitesse des corpuscules et par conséquent sur l'intensité du champ. Par exemple, les décharges seront plus grandes sur les hautes montagnes qu'à basse altitude, toutes autres conditions étant égales ; car la pression de l'air diminue avec l'altitude.

#### d- Influence de la température

La décharge électrique sous la forme de couronne croit avec la température, mais la rigidité diélectrique diminue. Cela est expliqué dans [7] et [10].

Une augmentation de la température entraîne l'échec de la loi de PASCHEN parce que l'ionisation thermique (au-dessus de 1500°C) ou l'émission thermoionique sont à la base de la distortion des électrodes par la chaleur ainsi le champ subira, lui aussi, une déformation. La rigidité diminue dans les endroits chauds et une fois que l'ionisation se produit ici le champ devient déformé et cela tend à causer une décharge complète.

La densité de l'air dépend de la température et de la pression. Elle est représentée par le facteur de la densité relative de l'air  $K_a$  :

$$K_a = \frac{293}{t+273} \cdot \frac{p}{760} \quad (1.5)$$

La rigidité diélectrique est proportionnelle au facteur  $K_a$  ; cependant les pertes sont inversement proportionnelles à celui-ci.

#### e- Influence de l'humidité

La formule 1.6 donne le facteur de correction de l'humidité  $K_h$  en fonction de l'humidité de l'air  $W$  :

$$K_h = 1 + (W-11) \cdot 0,012 \quad (1.6)$$

Dans les conditions normales de l'air ( $p=760$  mm Hg et  $t= 20^\circ\text{C}$ ) l'humidité absolue de l'air est de  $11 \text{ g/m}^3$ .

D'une façon générale, l'état hygrométrique de l'air n'exerce pas d'action appréciable sur les décharges, tant qu'il ne s'agit pas d'une humidité très importante.

#### f- Influence de la forme des électrodes sur la répartition du champ

Les systèmes d'électrodes sphériques ou planes conduisent à un champ à peu près uniforme si la distance entre électrodes est faible par rapport aux dimensions de ces électrodes.

Par contre, pour les systèmes dont les dimensions d'une électrode au moins sont faibles par rapport à la distance, le champ devient non uniforme et relativement très fort au voisinage de la petite électrode. la décharge sous la forme de couronne apparaît pour une tension inférieure à celle du premier cas.

IL est à noter que dans le cas des systèmes où le champ est uniforme, l'unique forme de la décharge visible correspondant à la tension  $U_0$  est l'étincelle. Cependant, dans le cas des systèmes d'électrodes où le champ est non uniforme, les décharges se manifestent sous formes très variées en fonction de la valeur de la tension. La couronne apparaît sous la tension  $U_0$  (Voir Fig 1.1).

#### g-Influence de l'état de surface

L'état de surface est très important sur la tension d'amorçage de décharge sous la forme de la couronne. Le calcul de cette tension est en principe empirique.

Il prend en considération des surfaces soit parfaitement polies et sans aucune aspérité même microscopique, soit non lisses et polluées par différents facteurs ( conditions climatologiques, aspérités, éraflures, graisses, poussières). Ces irrégularités de surface augmentent le champ électrique local et favorisent le développement des aigrettes à une tension inférieure à celle que l'on obtient en supposant le diamètre rigoureusement constant.

On tient compte de ces défauts de surface en corrigeant les résultats obtenus par un coefficient supplémentaire assez incertain  $m$  décomposé en deux coefficients, l'un  $m_g$  pour tenir compte de la présence des irrégularités de composition géométrique dont la valeur peut être prise égale à 0,9 pour des câbles constitués par des brins ronds en hélice et l'autre  $m_p$ , coefficient de propriété égal à 0,9 pour un câble propre ; 0,8 pour un câble neuf ; 0,7 pour un câble sale ou gras ; 0,5 à 0,3 en présence de pluie ou de brouillard [11] .

Il semble d'ailleurs qu'avec le temps, l'effet des défauts s'atténue assez rapidement, sans doute par le fait que les gouttes par exemple de graisse disparaissent par vieillissement une fois que le câble est mis sous tension permanente ; le conducteur se couvre d'une couche noirâtre qui finit par masquer les aspérités d'origine. Ce vieillissement, dont la durée est de l'ordre de quelques mois, entraîne une réduction de pertes qui se stabilisent au tiers environ des pertes à l'état neuf du conducteur.

Néanmoins lorsqu'il se produit des formations de gouttes d'eau tout le long du conducteur par temps de brouillard et de pluie, le gradient critique s'abaisse et on peut entendre tout le long de la ligne des crépitements dus aux effluves et aigrettes, dont le nombre augmente considérablement par rapport au temps sec.

Les pertes couronnes par mauvais temps dépassent si largement les pertes par beau temps et il est nécessaire d'en tenir compte lorsqu'on totalise les pertes annuelles des lignes de transport. Les expériences montrent que les pertes ne sont pas les mêmes, selon que la pluie a commencé lorsque le câble était sous tension ou lorsqu'il était hors tension. Au début d'une pluie tombant sur un câble sec, les pertes croissent très rapidement, passent par un maximum et reviennent à une valeur inférieure.

Le brouillard agit seulement en influant la surface du conducteur. Cependant, les pertes par temps de brouillard dépendent essentiellement de la température du conducteur.

#### b- Influence de l'armement des lignes

D'après POTTOHFF [13] on peut aisément transposer à une ligne triphasée les valeurs caractéristiques d'une ligne monophasée à l'aide de la relation suivante :

$$U_3 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \frac{C_1}{C_3} \quad (1.7)$$

- $U_3$ : représente la tension composée du système triphasé
- $U_1$ : la tension par rapport à la terre de la ligne d'essai
- $C_3$ : la capacité calculée de la ligne triphasée
- $C_1$ : la capacité mesurée de la ligne d'essai

Il faut noter que l'influence de la disposition des lignes (triangle, nappe), ou de la distance entre conducteurs est très complexe sur la décharge par conséquent sur les pertes et surtout sur le champ perturbateur du fait des irrégularités de l'état de surface de chaque conducteur.

--000--

## CHAPITRE 2

### TENSION D'AMORÇAGE DE L'EFFET COURONNE

#### 2.1 GENERALITÉS

On trouve chez K. KUPFMÜLLER une définition de la tension d'amorçage de décharge qui est la suivante : "la tension d'amorçage est celle pour laquelle un électron crée un nombre bien déterminé de paires d'ions le long de son trajet de la cathode à l'anode permettant la visibilité de la décharge."

Dans le présent chapitre, il sera étudié la tension d'apparition de l'effet couronne. Comme le champ est lié à la tension une étude sur le calcul du champ dans divers systèmes sera donnée en premier lieu.

Il faut noter que pour l'étude de l'effet couronne ou même pour l'estimation du danger de claquage d'une isolation, on adopte la valeur de crête (conditions plus défavorables) et non pas la valeur efficace du champ et par conséquent celle de la tension, qui est généralement la valeur la plus utilisée.

#### 2.2 CALCUL DU CHAMP DANS DIVERS SYSTÈMES D'ELECTRODES

Le champ n'est calculé que pour des systèmes d'électrodes sphériques et cylindriques qui sont généralement les plus rencontrés dans l'équipement de haute tension.

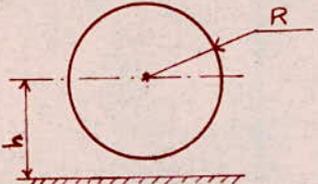
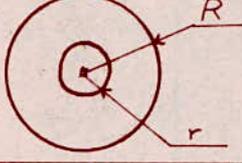
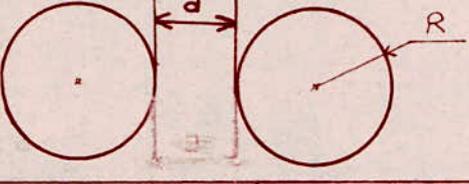
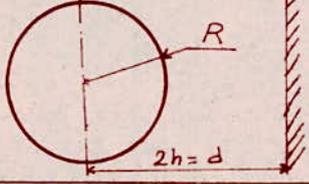
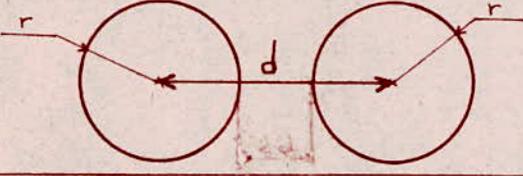
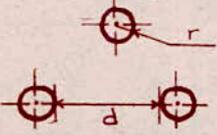
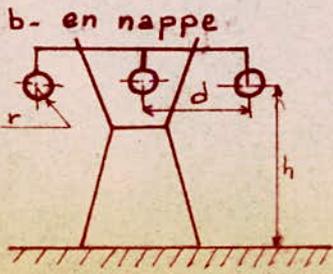
Le tableau 2.1 donne les formules de l'intensité maximale du champ pour différentes configurations.

Pour les lignes triphasées les coefficients 1,15 et 1,19 proviennent du fait qu'on tient compte de l'influence inter-conducteur.

#### 2.3 CHAMP CRITIQUE. - FORMULE DE PEEK

L'effet couronne apparaît lorsque l'intensité du champ électrique à la surface d'une électrode, exède une valeur critique qui, toutefois n'est pas liée seulement à l'état du gaz, mais varie avec la grandeur et la forme de l'électrode.

Tableau:2.1: Formules de l'intensité maximale du champ.

Configurations	Intensité Maximale du Champ
<p>a_ Sphère isolée</p> 	$E_R = E_{max} = \frac{U}{R}$
<p>b_ Sphères concentriques</p> 	$E_{max} = E_r = \frac{UR}{r(R-r)}$
<p>c_ Sphères égales excentriques</p> 	$E_{max} = E_r = K' \frac{U}{d}$ <p>avec <math>K' = f\left(\frac{d}{r}\right)</math></p>
<p>d_ Systeme cylindre-plan.</p> 	$E_{max} = E_R = \frac{U}{R \ln \frac{2h}{R}}$
<p>e_ Systeme cylindre-cylindre</p> 	$E_r = E_{max} = \frac{U}{2r \ln \frac{d}{r}}$
<p>f_ Lignes triphasées</p> <p>a. en triangle</p>  <p>b. en nappe</p> 	$E_r = E_{max} = 1,15U / 2r \ln \frac{d}{r}$ $E_r = E_{max} = 1,19U / 2r \ln \frac{2ha}{r}$

Les lois de l'effet couronne ont été étudiées par divers auteurs dont le plus connu est M. PEEK.

Pour la détermination du champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un système d'électrode quelconque, on emploie la formule générale de PEEK, qui est la plus connue. Elle a pour expression :

$$E_c = E_0 m \left( 1 + \frac{K_F}{\sqrt{K_a r}} \right) \quad (2.1)$$

$E_c$  : (Kv/cm) : valeur de crête du champ critique

$r$  : (cm) : rayon du conducteur

$K_a$  : densité relative de l'air

$K_F$  : constante prenant en considération la forme du système d'électrodes (pour champ homogène  $K_F = 0$ ).

$E_0$  : (Kv/cm) : rigidité du gaz dans le champ uniforme

$m$  : coefficient d'état de surface ( $m = m_v \cdot m_g$ )

Comme l'air est généralement l'isolant le plus utilisé dans l'exploitation des réseaux, dans ce qui suit on ne s'intéresse qu'aux paramètres caractéristiques de l'air. De ce fait, on note que dans le cas des lignes H.T, de nombreuses formules ont été données pour le calcul de  $E_c$ . L'expression (2.1) devient dans ce cas :

$$E_c = 30 m K_a \left( 1 + \frac{0,3}{\sqrt{K_a r}} \right) \text{ Kv/cm} \quad (2.2)$$

et celle établie empiriquement par pelissier pour les rayons compris entre 0,7 et 2,5 cm :

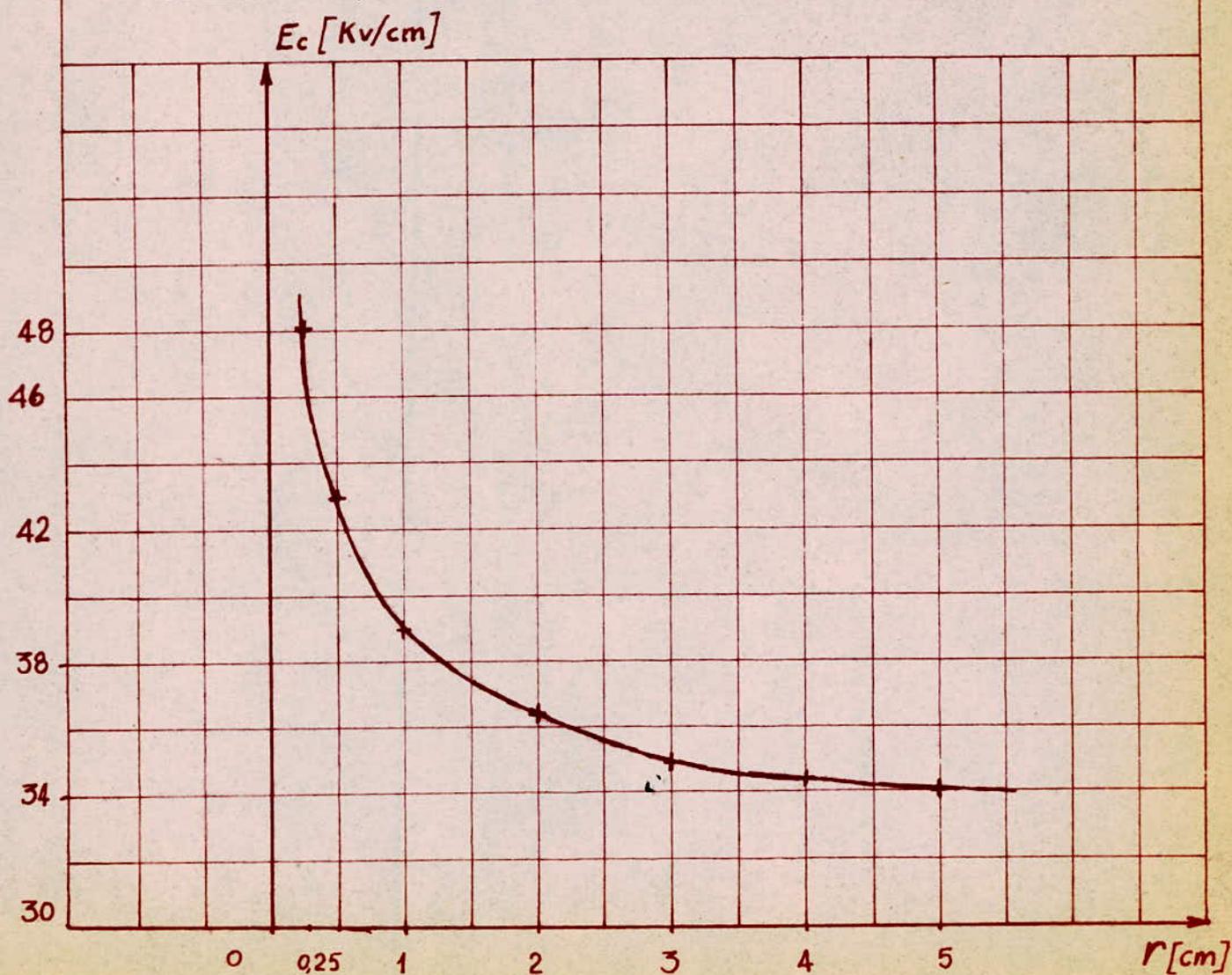
$$E_c = 30 K_a^{2/3} (1 - 0,007 r) \text{ Kv/cm} \quad (2.3)$$

la formule (2.2) a été établie seulement sur une base expérimentale de résultat par la visualité de la couronne.

Fig. 2.1

Variation du champ critique  
en fonction du rayon  
( $m=1$ ;  $K_a=1$ )

$r$ (cm)	0,25	0,5	1	2	3	4	5
$E_c = 30 \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r}}\right)$	48	43	39	36,4	35	34,5	34



La Fig 2.1 représente la variation du champ superficiel critique  $E_c$  dans l'air (exprimé en Kv/cm) en fonction du rayon du conducteur lisse et propre et dans les conditions atmosphériques normales ( $m = 1, K_a = 1$ ), la dépendance de la densité de l'air a été déterminée d'une façon empirique pour différentes valeurs de pression et de température de l'air.

Pour les systèmes cylindriques PEEK a démontré expérimentalement que le champ critique est indépendant de la distance des électrodes, si celle-ci n'est pas trop petite.

Mais les valeurs de  $E_0$  et  $K_F$  ne sont pas les mêmes pour les systèmes cylindriques parallèles et les systèmes cylindriques coaxiales comme le montre le tableau 2.2. La différence entre ces valeurs peut être expliquée par le fait que le champ dans les cylindres coaxiales est réparti uniformément sur la surface du conducteur par contre dans le cas des cylindres parallèles la valeur maximale du champ est localisée sur les côtés les plus proches.

L'intensité du champ est proportionnelle à la tension et dépend aussi du rayon du conducteur. Pour des tensions très fortes où l'intensité du champ est très grande, l'ionisation devient très forte autour du conducteur. La présence de la charge d'espace devient importante et influe sur la distribution du champ et le rend fortement non homogène. La non homogénéité dépend aussi du rayon de courbure.

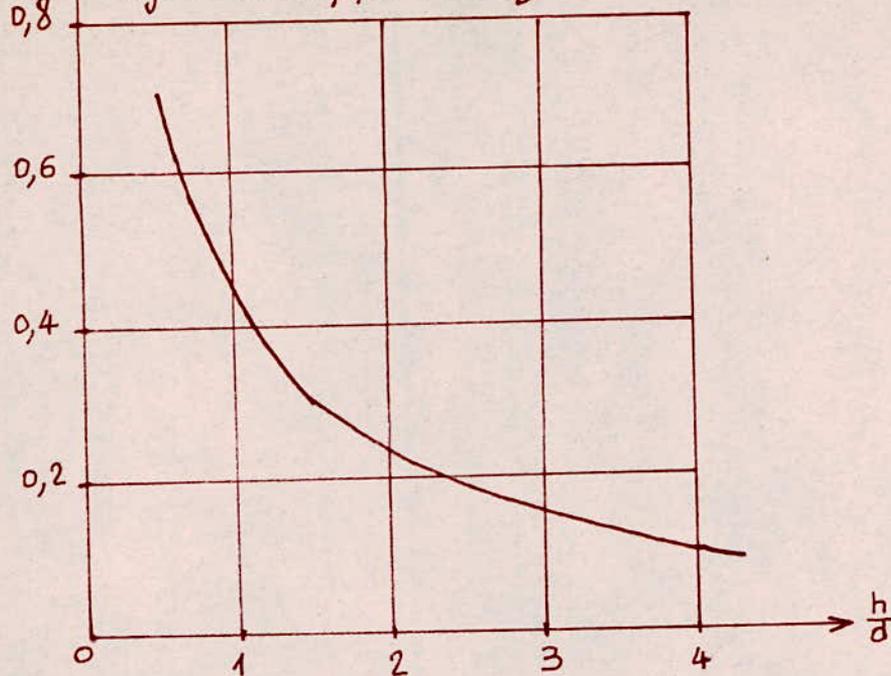
#### 2.4 TENSION D'AMORÇAGE DE L'EFFET COURONNE

L'apparition de décharge visible entre deux électrodes quand la tension appliquée dépasse une certaine valeur dite tension disruptive, oblige à écarter suffisamment les conducteurs H.T les uns des autres.

Comme l'intensité du champ à l'amorçage, n'est pas une constante caractéristique du gaz, mais dépend aussi des paramètres géométriques du système ; ceci entraîne que la tension d'amorçage dépend aussi des paramètres géométriques du système.

Fig 2.2 variation du coefficient  $\alpha$  en fonction de  $\frac{h}{d}$

$\alpha$  qu'il faut introduire dans les formules du champ d'une ligne en nappe horizontale



2.2. Tableau donnant les valeurs de  $E_0$ ,  $k_f$ ,  $k_r$   
Pour différents systèmes dans l'air

Systemes des électrodes	$E_0$ (kV/cm)	$k_f$	$k_r$
Deux spheres excentriques	27,2	0,54	$\frac{1}{(\frac{d}{r} + 1 + \sqrt{(\frac{d}{r} + 1)^2 + 8})} 0,25$
Spheres concentriques	29	0,41	$\frac{r}{R}$
Cylindres parallèles	30	0,301	$\frac{r}{d} \ln \frac{d}{r}$
Cylindres coaxiales	31	0,308	$\frac{r}{d} \ln \frac{d}{r}$

Pour déterminer la tension  $U_c$  correspondante à  $E_c$ , étant donné le peu de précision dû à la valeur de  $m$ , on peut utiliser une formule générale de la forme :

$$U_c = E_c \cdot d \cdot K_r$$

où  $K_r = f\left(\frac{d}{r}\right)$  : facteur de rendement du système

$U_c$  : tension critique (d'apparition de l'effet couronne) pour un système quelconque

$d$  : distance inter-electrodes

Le tableau 2.2 donne les valeurs de  $E_0$ ,  $K_r$ ,  $K_F$  pour différents systèmes d'électrodes placés dans l'air.

### CHAPITRE 3

#### METHODE DE DETERMINATION DES PERTES DUES A L'EFFET COURONNE

##### 3. 1 GENERALITES

Les pertes dues à l'effet couronne résultent de deux phénomènes physiques bien distincts : L'ionisation de l'air au voisinage des conducteurs et le mouvement des charges ainsi formées.

L'énergie nécessaire à l'ionisation est totalement négligeable par rapport à l'énergie nécessaire au déplacement de la charge d'espace.

Généralement le calcul des pertes dues à l'effet couronne, se ramène au calcul de la quantité de **charges produites** et de leur mouvement autour du conducteur.

Ce chapitre expose les méthodes de mesures des pertes utilisées par la plupart des chercheurs sur les lignes H.T.

##### 3.2 PERTES AUX TENSIONS INFERIEURES A LA TENSION CRITIQUE

La plupart des expériences effectuées sur les lignes expérimentales montrent que les pertes dues à l'effet couronne apparaissent à des tensions inférieures à la tension critique théorique.

Tous ces chercheurs ont affirmé qu'il est très difficile de donner les lois pour le calcul des pertes parce que l'état de surface varie très fortement suivant les cas.

Le champ superficiel influe d'une façon directe **sur les** pertes dues à l'effet couronne. Cette influence est due à des phénomènes assez complexes et multiples, qui correspondent à une combinaison des divers modes d'émission d'espace [2].

A mesure que le champ superficiel croît, des aspérités de plus en plus petites entrent en activité et émettent des charges; les aigrettes, dont elles sont le siège, sont de plus en plus intenses parce que se développant dans un champ plus fort fournissent d'avantage de charges.

De la combinaison de ces phénomènes résulte une loi de croissance des pertes, assez bien représentée par l'expression suivante [2].

$$P_2 / P_1 = 10^7 (E_2^{\circ} - E_1^{\circ}) \quad (3.1)$$

dans laquelle  $P_2$  et  $P_1$  sont les pertes engendrées par un conducteur soumis à 2 champs superficiels différents  $E_2^{\circ}$  et  $E_1^{\circ}$  ici exprimés en valeur relatives  $E^{\circ} = E / E_c$ ,  $E$  est la valeur de crête du champ appliquée et  $E_c$  le champ critique obtenu par la formule de PEEK.

PEEK a aussi établie une loi de la forme [12]:

$$P = n \exp(-q(U - U_0)) \quad (3.2)$$

avec  $P$ : perte linéique à la tension  $U$

$U_0$ : tension critique

$n$ : coefficient dépendant du nombre des aspérités

$q$ : coefficient de forme de ces aspérités.

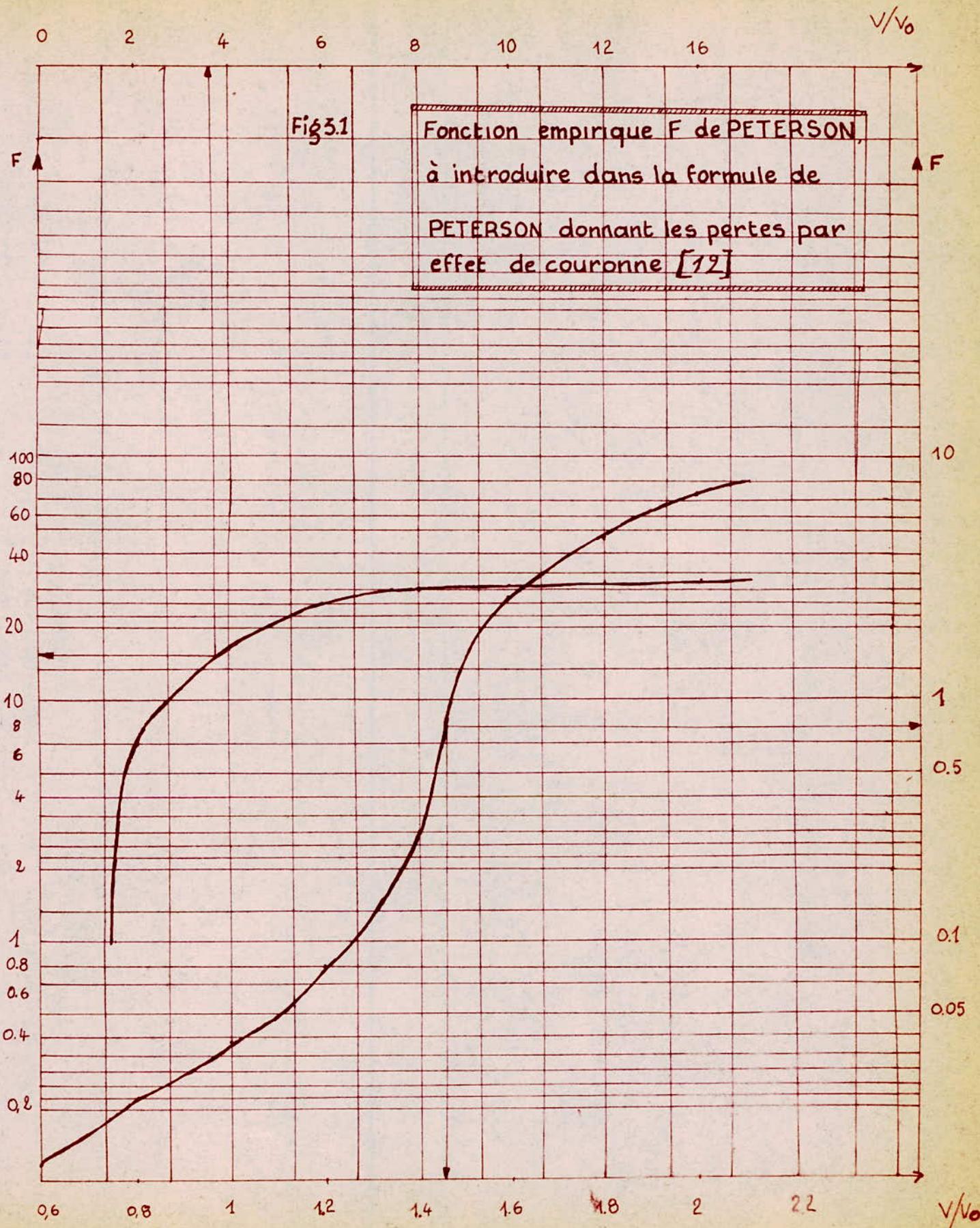
Cette formule n'est valable que si les aigrettes sont parfaitement indépendantes ; or cela n'est réalisé que pour des pertes extrêmement faibles ; donc la formule de PEEK n'est applicable qu'à un domaine de pertes, sans intérêts pratiques ;

### 3.3 PERTES SOUS TENSIONS SUPERIEURES A LA TENSION CRITIQUE

Dans ce regime de nombreuses formules ont été proposées. Comme il n'est pas possible de passer en revue toutes ces formules, on se limitera à celles les plus connues.

a- Détermination indirecte des pertes dues à l'effet de couronne.

Parmi les recherches de PETERSON, on mentionne la formule de ce dernier permettant le calcul des pertes par effet couronne à partir d'une courbe empirique  $F(U/U_0)$  donnée par Fig.3.1,  $U_0$  étant la tension critique simple.



A partir de cette fonction F, les pertes dues à l'effet couronne se calculent d'après la formule :

$$P = (21 \cdot 10^{-6} f U^2) F / \log(d/r) \quad (3.3)$$

avec, P : perte couronne en KW/Km par conducteur  
f : fréquence  
d : distance moyenne entre électrodes (d=2h)  
r : rayon du câble  
U : tension simple  
F : fonction de U/U<sub>0</sub> donnée par Fig.3.1.

Il existe d'autres formules indirectes se basant non seulement sur une courbe unique comme celle de PETERSON, mais sur une famille de courbes obtenues expérimentalement sur plusieurs échantillons.

b- Détermination directe des pertes dues à l'effet couronne

Les travaux de PEEK sont les plus connues et les premiers en date (1915).

La formule pour le calcul des pertes en fonction de la tension au-dessus de la tension critique de PEEK est la suivante :

$$P = \frac{241}{K_a} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} (U - U_0)^2 \cdot 10^{-5} \quad (3.4)$$

où : P : pertes couronne en KW/Km par câble  
K<sub>a</sub> : densité relative de l'air  
f : fréquence  
r : rayon du câble  
d : distance  
U<sub>0</sub> : tension critique

D'autres auteurs tels que : HOLM, RYAN et HELINE, KOSTKO et HESSELMAYER ont proposé d'autres formules semblables du type :

$$P = K(U - U_0)U \quad \text{KW/Km par câble} \quad (3.5)$$

Une autre formule simple et pratique permettant de calculer les pertes dues à l'effet couronne en fonction de la tension d'essai  $U$ , de la pulsation  $w = 2\pi f$ , du facteur de perte  $t_g$  et de la capacité  $C$  de la ligne suivante :

$$P = UCw^2 t_g \delta \quad \text{KW/Km par câble} \quad (3.6)$$

Sous cette dernière forme les pertes seront mesurables à l'aide du pont de Schering (Voir paragraphe 3.7).

Cependant la formule (3.6) donnant les pertes n'est valable qu'à partir d'une certaine valeur de  $\delta$  qui permet d'avoir avec une bonne approximation l'assimilation du sinus de l'angle avec sa tangente ( $\delta$  doit être petit).

Les deux méthodes de calcul des pertes (directe ou indirecte) sont valables dans les conditions idéales (conditions atmosphériques presque normales, surfaces propres et lisses).

Pour la détermination générale des pertes on doit tenir compte des paramètres tels que les conditions atmosphériques et l'état de surface. Ces paramètres sont pris en considération par le facteur  $m$ , correspondant à la diminution de la tension d'apparition de l'effet couronne.

De plus, il existe dans la littérature concernant les recherches faites sur l'effet couronne des courbes types permettant la détermination des pertes sous pluie pour chaque tronçon de ligne, dès l'on connaît la hauteur moyenne d'eau qui tombe dans les régions traversées. Dans les conditions atmosphériques défavorables, les pertes dues à l'effet couronne s'étendant sur un réseau **K.T.** peuvent être suffisamment élevées pour exiger l'adjonction d'une puissance supplémentaire destinée à compenser ces pertes. Ainsi on admet que le mauvais temps pourrait réduire la tension critique au  $1/3$  de celle relative à un conducteur sec. Cependant, on a tendance à estimer les pertes dues à l'effet couronne d'une ligne fonctionnant aux environs de sa puissance caractéristique de l'ordre du  $1/10$  des pertes par effet joule [14].

### 3.4 MESURE DES PERTES DUES A L'EFFET COURONNE

Les pertes d'une ligne haute tension peuvent varier de quelques centaines de watts à plusieurs dizaines de kilowatts par kilomètre.

La recherche de la plus grande précision utile dans la mesure des pertes point par point en fonction de la tension, surtout par beau temps, et la nécessité d'obtenir une indication continue des variations de ces pertes lors des perturbations atmosphériques ont entraîné l'emploi de deux méthodes de mesure distinctes, l'une par pont et l'autre par wattmètre enregistreur.

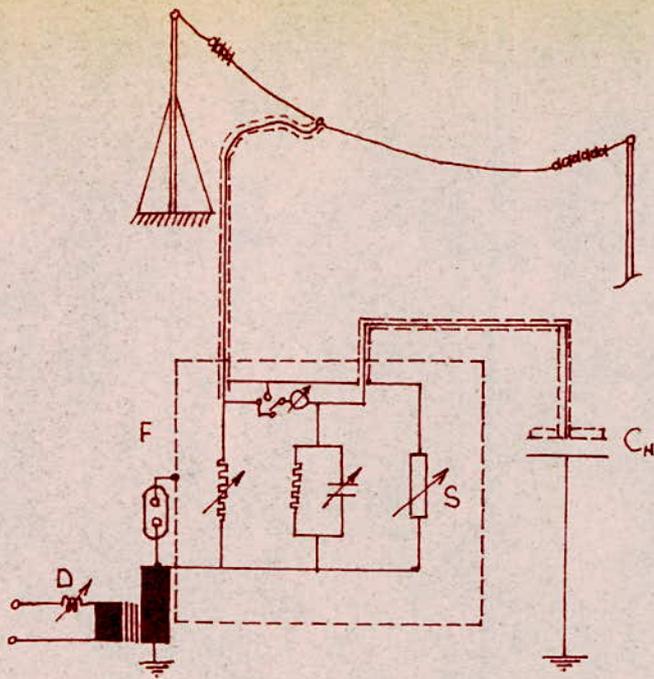
- La mesure à l'aide du pont de Schering (Fig 3.2a) est toujours effectuée au moyen d'une tension des conducteurs monophasés par rapport à la terre. ce dispositif n'est certes pas tellement approprié à la notation continue, mais convient très bien pour la mesure sur des lignes courtes et pour l'examen des phases initiales de la décharge couronne.

Tout l'appareil de mesure doit être placé dans une cage de Faraday ; ceci consiste à la protection de l'appareillage contre les effets des champs électrostatiques.

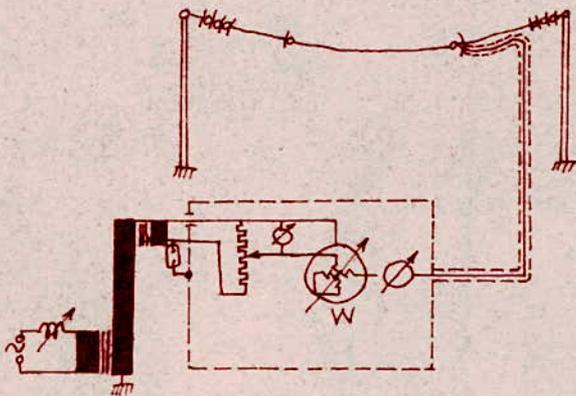
Dans ce type de mesure , le facteur de perte  $\text{tg}\delta$  et la capacité  $C$  sont donnés directement par les valeurs du pont après équilibrage du circuit. Ainsi les pertes seront données simplement par  $P = UCw^2\text{tg}\delta$  où  $U$  est la tension d'essai donnée généralement à l'aide d'un voltmètre de crête.

Il faut noter qu'il n'est pas facile de mesurer les pertes diélectriques résultant de l'effet couronne, et qu'il est nécessaire de prendre des dispositions permettant de s'assurer que les valeurs correspondent bien aux valeurs de la puissance dissipée.

- L'autre méthode de mesure des pertes dues à l'effet couronne consiste à l'utilisation du wattmètre. Les wattmètres sont en général munis d'un dispositif d'enregistrement photographique sans frottement permettant d'obtenir une indication continue des pertes tout en conservant la précision d'appareil à lecture directe. La Fig 3.3b représente le schéma de couplage du wattmètre pour la mesure des pertes par effet couronne d'un conducteur unique. La bobine du circuit de tension est alimentée par un enroulement auxiliaire du transformateur à haute tension.



a. Schéma de couplage du pont de Schering pour la mesure des pertes par effet couronne.



b. Schéma de couplage du wattmètre pour la mesure des pertes par effet couronne.

Fig 3.3 Appareils de mesure des pertes couronne [11].

### CONCLUSION

Les pertes dues à l'effet couronne ont été évaluées à l'aide de nombreuses formules empiriques qui, le plus souvent, ne sont applicables qu'au tension au-delà de la tension critique.

Parmi celles-ci, celle de PEEK est la plus connue, elle n'est cependant d'un intérêt pratique limité.

D'une façon générale, les formules proposées ne sont valables que pour évaluer les pertes par beau temps ; or, par mauvais temps, les pertes sont très fortement augmentées et dans le total des pertes annuelles, elles forment toujours la part prépondérante.

## CHAPITRE 4

### PERTURBATIONS RADIOPHONIQUES DUES A L'EFFET COURONNE

#### 4.1 GENERALITES

Les lignes de transport d'énergie à moyenne et haute tension dans lesquels apparaissent les décharges électriques peuvent être la source des harmoniques supérieures dont la fréquence correspond à celle du réseau de radio et de télévision.

Les ondes perturbatrices peuvent parvenir aux postes radio et télévision soit par propagation le long des lignes électriques de H.T ou B.T, soit par rayonnement direct autour de la ligne.

Dans le premier cas, le parasite entre dans le poste récepteur par le réseau d'alimentation. Cependant, grâce à l'amortissement suffisamment fort du réseau la niveau de telles perturbations ne soit pas très gênant ; même dans le cas où elles seront gênantes, il est facile de les annuler en plaçant aux bornes de l'appareil récepteur une capacité de l'ordre du microfarad qui constitue un court-circuit pour les courants de hautes fréquences.

Les parasites radiophoniques qui se propagent dans l'air seront captés par des antennes des postes récepteurs. ON les atténue très sensiblement par l'emploi des cadres blindés, ou par l'éloignement le plus possible des lignes H.T des zones agglomérées. Dans ce cas le nombre de récepteur gênés sera certainement très réduit .

Dans le présent chapitre seront étudiés les problèmes liés avec les perturbations radiophoniques dues aux décharges sous la forme de couronne.

Les perturbations dues aux décharges partielles se produisant dans les diélectriques solides ne seront pas étudiées ici.

Si on représente les impulsions d'effet couronne apparaissant dans l'air au cours d'un cycle de la fréquence fondamentale de 50 Hz, on constate que l'on a quelques impulsions de très grandes amplitudes pendant l'alternance positive et de nombreuses impulsions beaucoup plus petites pendant l'alternance négative.

Ce sont principalement les impulsions de grandes amplitudes qui engendrent dans l'appareil radiorécepteur des crépitements plus ou moins nombreux et plus au moins violents.

#### 4.2 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU CHAMP PERTURBATEUR DUES A L'EFFET COURONNE SUR LES LIGNES H.T.

Des études faites dans ce sens par de nombreux chercheurs ont montré que le champ perturbateur résulte de la composition des 2 phénomènes suivants :

##### a- Champ local parasite:

Les impulsions de courants engendrées dans les conducteurs par les aigrettes présentent un spectre propre qui dépend de leur forme. Ce champ est intense au voisinage de chaque aigrette, s'affaiblit à une très petite distance (quelques mètres).

Le champ local est très instable dans le temps comme les effluves eux-mêmes. Il est pratiquement amorti avant d'atteindre les récepteurs.

##### b- Champ parasite indirect

Il provient des ondes de choc engendrées par les effluves, qui se propagent, guidées par la ligne.

Pratiquement, c'est le seul à considérer, car c'est le seul qui peut atteindre le récepteur radiophonique sans être très considérablement atténué.

Le poste récepteur soumis à de telles ondes subit des oscillations à la fréquence pour laquelle il est accordé. D'autre part l'atténuation de propagation de ces ondes augmente la fréquence. Cet effet modifie le spectre propre des impulsions en accélérant la baisse du niveau vers les fréquences croissantes.

Enfin, ces ondes de choc peuvent se propager suivant deux modes différents, selon qu'elles soient guidées entre phase (propagation directe) ou entre phase et sol (propagation homopolaire).

##### c- Spectre du champ perturbateur:

Le calcul théorique conduit à un spectre du champ perturbateur constant pour les basses fréquences, et décroissant ensuite en sens inverse de la fréquence.

Le spectre de fréquence a l'allure donnée par la Fig. 4.4. La décroissance commence à partir de la fréquence de 1MHz; cela signifie que les perturbations dues à l'effet couronne seront surtout gênantes pour la radiodiffusion en ondes longues et moyennes; mais il est probable que l'intensité du phénomène soit tel que l'on ait encore un effet perturbateur notable pour les fréquences élevées, utilisées pour les émissions de télévision.

Les spectres mesurés sont généralement assez irréguliers, à cause des fluctuations continuelles de niveau du champ perturbateur au cours d'une mesure.

Les discontinuités de la ligne (pylônes, irrégularités de la conductivité du sol, rotation des phases, hauteur de la ligne) expliquent les irrégularités du spectre mesuré [2].

#### 4.3 PARAMETRES INFLUENCANTS LE CHAMP PERTURBATEUR

##### a- Influence de la distance

La loi théorique d'amortissement du champ parasite en fonction de la distance horizontale à la ligne  $x$  est donnée par [2]

$$\frac{E}{E_0} = \frac{h^2}{x^2 + h^2} \quad (4.1)$$

où  $E$  : est le champ au point d'abscisse  $x$

$E_0$  : est le champ maximum au niveau du sol

$h$  : la hauteur moyenne de la ligne au dessus du sol.

On constate donc que le champ parasite devient faible pour des distances  $x$  suffisamment grandes (pratiquement de l'ordre de 30 m).

Le calcul ou la mesure du champ en fonction de la distance s'effectue pour une fréquence dite fréquence de référence qui est de l'ordre de 0,5 MHz.

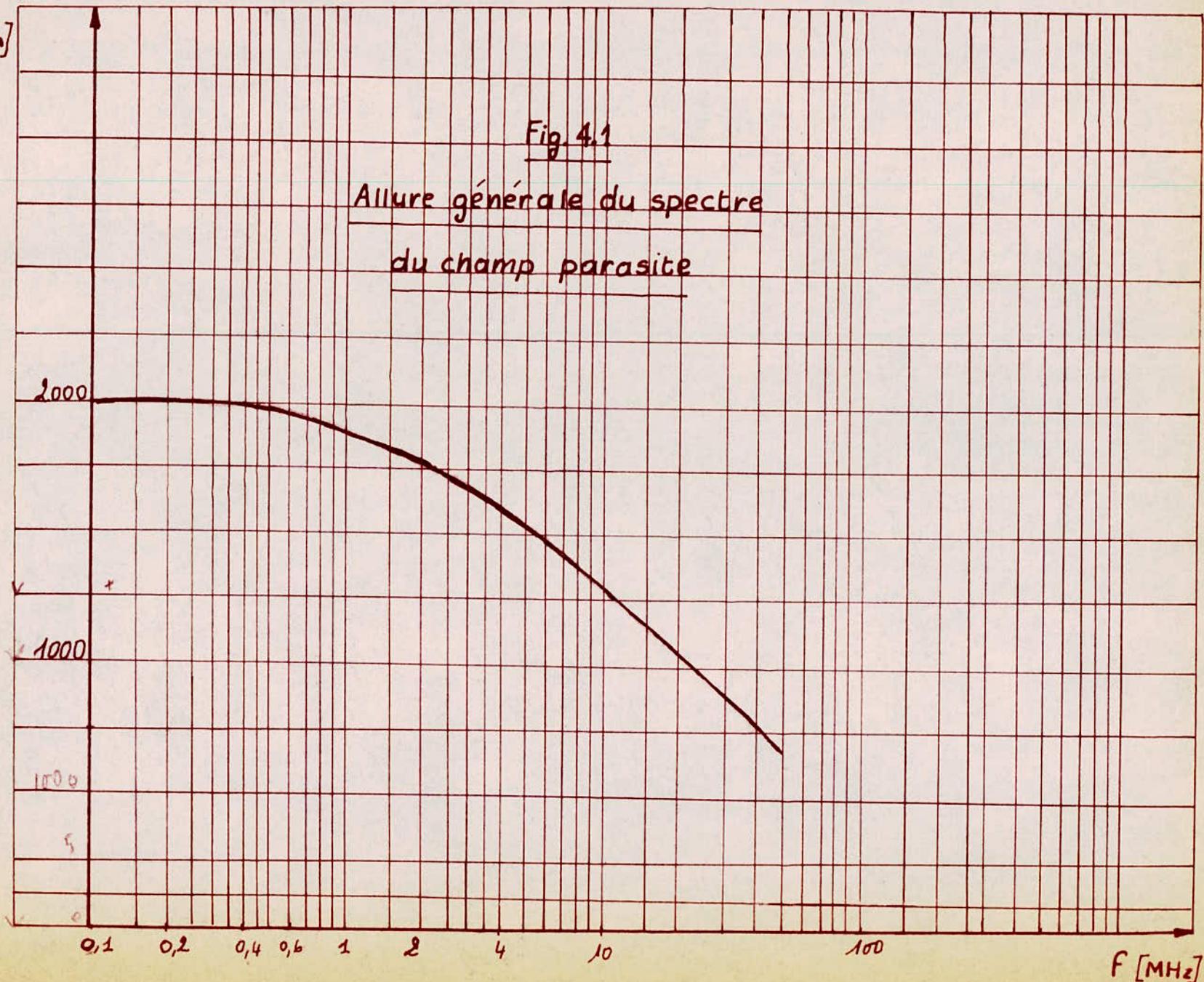
##### b- Influence de la tension

Les aigrettes plus ou moins intenses; localisées sur les aspérités des conducteurs, apparaissent pour des tensions très inférieures à la tension critique.

$E_p [\mu V/m]$

Fig. 4.1

Allure générale du spectre  
du champ parasite



Selon Pellissier [4], si l'on augmente progressivement la tension d'une ligne, l'effet couronne se manifestera par des perturbations radiophoniques lorsque l'on atteindra une tension voisine de 0,6 à 0,8  $U_0$ , alors que les pertes ne deviennent sensibles que pour des tensions de l'ordre de 0,8  $U_0$  (par beau temps).

Si la tension croît, le champ parasite croît, d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, et tend vers une limite supérieure lorsque la tension atteint sa valeur critique  $U_0$ .

Ce phénomène s'explique par le blindage de la charge d'espace; lorsque celle-ci englobe toute la surface du conducteur (processus d'ionisation par choc n'étant plus discontinu) les parasites tendent à disparaître.

De ce fait, la limitation des perturbations radiophoniques à un niveau acceptable dans le cas des lignes à très haute tension est l'un des facteurs déterminant dans le choix du rayon du conducteur.

### c- Influence des conditions atmosphériques

De nombreux chercheurs ont effectué des mesures par enregistrement permanent du champ sous les lignes pendant au moins une année et sont arrivés aux conclusions suivantes : les conditions des niveaux dépend du type de climat où est situé la ligne ; un climat très humide ou pluvieux augmentera les pourcentages des niveaux élevés, un climat sec au contraire le réduira. Pour tirer des renseignements utiles des différentes distributions obtenues, on les sépare en trois catégories de temps : beau temps, pluie et temps humide.

Les deux premières sont parfaitement définies ; la troisième est une catégorie intermédiaire qui regroupe des conditions météorologiques mal définies ; tels : que la rosée, le brouillard, la neige, et le givre.

La pluie augmente l'effet couronne ; on peut donc s'attendre à une augmentation des parasites radiophoniques en corrélation avec l'augmentation des pertes d'énergie. En fait ces deux phénomènes ne sont pas directement liés. En particulier, sous pluie, les effluves positifs apparaissant sur les gouttes d'eau sont une source intense des perturbations radiophoniques.

Mais la charge d'espace, plus importante, forme un blindage plus efficace. Par ailleurs, la pellicule d'eau qui recouvre les conducteurs augmente l'amortissement des ondes qui se propagent le long de la ligne. [4].

Cependant on peut dire que le champ parasite est nettement plus fort sous pluie que par beau temps.

Si la tension augmente, il apparait aussi un phénomène de saturation pour une valeur généralement du même ordre que celle observée par beau temps. La dispersion des niveaux parasites est toujours beaucoup plus importante par beau temps que par forte pluie.

#### d- Influence de l'altitude

La raison physique de l'influence de l'altitude est l'abaissement du champ critique lorsque la densité de l'air décroît, comme le met en évidence la formule de PEEK. La variation du niveau perturbateur en fonction de l'altitude assez bien représentée selon GARY [2] par l'expression empirique suivante :

$$E_h(\text{dB}) = E_o(\text{dB}) + \frac{h}{100} \quad (4.2)$$

où :

$E_h$  : champ perturbateur à l'altitude h(m)

$E_o$  : champ perturbateur au niveau de la mer.

#### e- Influence de l'état de surface

L'état de surface des conducteurs a une influence prépondérante sur la tension d'amorçage d'effluves et sur les perturbations radiophoniques. L'influence est importante sur les pertes d'énergie et sur le vieillissement de la ligne; les lignes à haute tension ne créent pas de parasite lorsque les surfaces de conducteurs sont lisses et propres.

#### 4:4 PERTURBATIONS DUES A L'APPAREILLAGE DE POSTE ET AUX CHAINES D'ISOLATEURS

L'équipement des lignes, tel que les isolateurs sont aussi à l'origine, soit à l'effet couronne proprement dit, soit aux petits arcs entre le métal et le matériau isolant.

En mesurant à l'aide d'un récepteur associé à une antenne ( Voir paragraphe 4.5) le champ perturbateur (entre 0,5 et quelques MHz) il n'est pas possible de séparer l'effet des perturbations produit par les chaînes de celui des conducteurs car les deux effets se propagent le long de la ligne. Selon les cas la contribution des chaînes d'isolateur au niveau perturbateur de la ligne sera négligeable (conducteur de faible section polué avec chaînes de bonne qualité et avec anneau de garde) ou importante (conducteur de forte section mais chaînes avec cornes).

La seule façon de s'assurer que la contribution de l'équipement auxiliaire d'une ligne (chaînes d'isolateurs) sera faible en projet par exemple, est d'effectuer des essais en laboratoire ; on déterminera non pas le champ perturbateur dû à la chaîne mais le courant de haute fréquence qu'elle produit.

Dans le cas des chaînes longues, la répartition de la tension s'effectue très mal entre les éléments successifs, de sorte que les éléments les plus contraints peuvent supporter une certaine valeur de tension (15%) et engendrent des perturbations importantes. En utilisant un anneau de garde convenablement dimensionné, on arrivera à diminuer les perturbations radiophoniques.

En ce qui concerne l'appareillage de poste (sectionneurs, disjoncteurs, raccords des conducteurs divers), les phénomènes en jeu sont tout à fait identiques.

Les perturbations sont cependant en général essentiellement engendrées par les aspérités des pièces métalliques sous tensions que par les supports isolants. On y remédie par l'emploi des anneaux pare-effluve.

#### 4.5 METHODE ET EQUIPEMENT POUR LA DETERMINATION DES PERTURBATIONS RADIOPHONIQUES

Il existe de nombreuses méthodes de prédéterminations empiriques des niveaux perturbateurs des lignes.

Leur principe commun consiste à comparer à une ligne dont on veut estimer le niveau perturbateur.

Le niveau de référence est corrigé en fonction des différents paramètres électriques et géométriques qui différencient la ligne étudiée de la ligne de référence.

La mesure des tensions et des champs peut être faite par un montage au laboratoire, dont le schéma de principe est recommandé par C.I.S.P.R (Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques). Ce schéma est représenté sur la Fig 4.2.

Les méthodes de mesure sont très différentes selon la caractéristique mesurée et la gamme de fréquence.

Quelque soit la méthode employée et la quantité mesurée, l'organe final de la chaîne de mesure est constitué par un millivoltmètre sélectif comportant généralement un amplificateur à haute fréquence, un chargeur de fréquence, un amplificateur à fréquence intermédiaire, un détecteur et un dispositif de mesure de la tension à la sortie du détecteur.

Les mesures radioperturbations que nous avons employées dans le cadre des recherches sur l'influence de la couronne ont été effectuées à l'aide de l'appareillage décrit ci-après :

- Récepteur de mesure de bande de 0,135 - 3MHz : il est équipé uniquement de transistors et alimenté par une batterie ; c'est un appareil portatif doté d'une antenne ferrite permettant de mesurer le champ perturbateur dans la gamme de fréquence 0,135 - 3MHz. Ce récepteur permet, aussi en liaison avec l'appareil de localisation de déterminer à une grande distance (quelques Km) la direction d'où parviennent de telles perturbations.

L'appareil de localisation est alimenté par une batterie de 13,5v et la fréquence de son fonctionnement est de 2,30 MHz  $\pm 5\%$ .

- Récepteur de mesure de 30 à 300 MHz : c'est un appareil muni d'une antenne dipôle permettant de détecter et de mesurer les niveaux perturbateurs de haute fréquence. Cet appareil permet aussi en liaison avec une antenne directionnelle de localiser les causes des perturbations pour des fréquences de 100 à 300 MHz dans les postes de transformation.

- Le sonomètre permet de mesurer le bruit acoustique en dB suivant différentes échelles (linéaires, logarithmiques) sous des constantes de temps différentes (lente, rapide, impulsionnelle).

Fig 4.2a Schémas de mesure des perturbations [2]

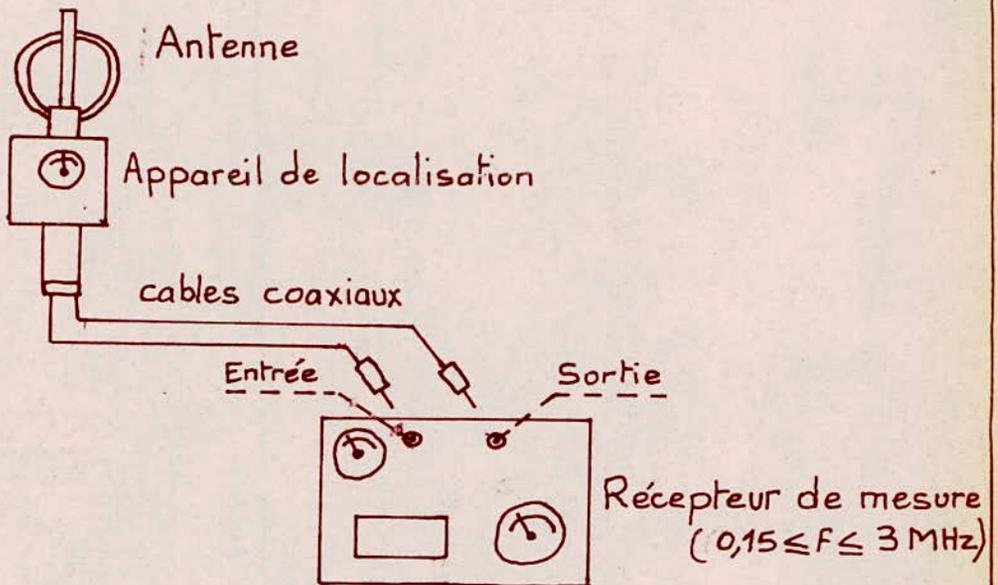
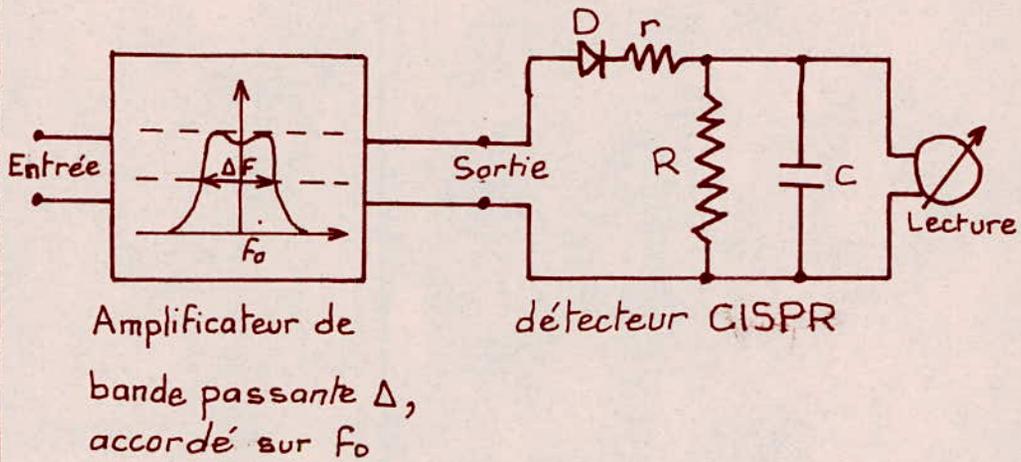


Fig 4.2b Appareils de mesure des perturbations utilisés au cours des essais

#### 4.6 RESULTATS DES MESURES DU CHAMP PERTURBATEUR DANS LE POSTE DE ZAHANA ET SUR LA LIGNE ZAHANA - TLEMCCEN

Les tableaux 4.1a, b, c, d, e, et 4.2a, b, c donnent respectivement les résultats de mesure du champ perturbateur et du bruit acoustique en décibel à l'intérieur du poste 220/150/60 Kv de ZAHANA et sur la ligne ZAHANA-TLEMCCEN.

Le tableau 4.1f représente les conditions et situations des mesures.

a- Les valeurs du champ perturbateur à l'intérieur du poste sont plus ou moins modérées sous la tension de 150 Kv ; certains crépitements ont été détectés ; mais ces derniers restent relativement faibles. Cependant lors du passage en 220 Kv, le champ perturbateur a augmenté et les crépitements sont devenus plus nets qu'en 150Kv.

Les parties ou accessoires du poste qui ont donné des crépitements assez marqués sont :

- éclateur de protection du transformateur 220/150/20 (TR1)
- chaînes d'isolateur
- câbles de la travée du transformateur (TR1)
- extrémités des sectionneurs ouvertes (non armées d'un anneau de garde suffisant pour réduire les effets).
- éclateur de protection du départ de la ligne ZAHANA-TLEMCCEN.

Les graphes 4.1a, b, c donnent l'allure du champ perturbateur en fonction de la fréquence.

On a noté aussi un faible écart de niveau entre le temps chaud et nuageux (couvert) et le temps chaud et sec ; ceci confirme que la pollution atmosphérique influe sur le niveau du champ perturbateur.

Le bruit acoustique dans le poste de transformation est presque faible ( $< 60\text{dB}$ ) sauf en face des transformateurs.

b- La mesure du champ perturbateur sur quelques portées de la ligne ZAHANA-TLEMCCEN a été effectuée sous trois niveaux de tension 160-225-245 Kv.

Pour la tension  $U = 160$  Kv, la ligne présente un effet couronne mais faible (Voir tableau 4.2a). Le bruit acoustique a été dans l'ensemble très faible.





Tab: 4.1c. MESURE DU CHAMP PERTURBATEUR  
A L'INTERIEUR DU POSTE DE ZAHANA

<u>TOPS</u> <u>de Mesure</u>	Recepteurs (Siemens) 0.15- 3 MHz				Recepteurs (Rhd. Shwatz) 30-300 MHz					Sonomètre	
	Frequence en Megahertz (MHz)									Constante de Temps	
	0.49	1	1.7	2.6	30	60	100	200	250	Slow	Fest
	Champ Perturbateur en decibel (dB)									Bruit en (dB)	
A	34	30	35	31	-	-	-	-	-	-	-
A'	41	38	47	40	24	31	33	31	34	52	52
B	34	33	39	33	19	3	8	15	16	-	-
B'	48	37	47	33	-	-	31	33	38	52	52
C	41	35	36	34	-	-	30	33	27	48	48
H	54	50	47	51	-	-	-	33	32	46	46
G	35	34	40	39	-	-	36	35	46	50	50
F	36	32	45	42	-	-	40	39	41	48	48
E	73	57	74	66	-	-	42	36	43	-	-
D	60	56	64	51	-	-	36	32	40	67	67
I	35	30	31	36	-	-	23	21	22	52	52
J	32	29	32	32	-	-	-	-	-	47	47
K	50	36	51	42	-	-	-	-	-	-	-

Tab: 4.1d

Mesure du champ perturbateur  
à l'intérieur du poste de ZAHANA

$f$ (MHz)	A	A'	B	B'	C	H	G	F	E	D	I	J	K
0.49	60.5	68.5	60.5	65.5	61	78.5	41.5	49.5	84.5	70.5	57	48.5	46.5
1.0	41	48	42	46	50	67	40	41	69	62	42	40	50
1.7	49	56	47	51	51	66	49	49	68	60	40	36	46
2.6	37	43	38	42	42	51.5	41	47	79	55	39	35	47

Tab: 4.1e

Mesure du champ perturbateur  
à l'intérieur du poste de ZAHANA

$f$ (MHz)	A	A'	B	B'	C	H	G	F	E	D	I	J	K
0.49	64	73	66	72	67	80	44	54	92	75	62	54	53
1.0	59	64	53	61	55	44	50	50	77	72	49	48	50
1.7	57	63	57	62	44	73	46	51	64	70	50	43	47
2.6	47	52	44	47	46	70	46	53	67	71	50	45	45

Tab: 4.1f

Tableau donnant les conditions et situations des mesures

Tab	Conditions Atmosphérique	TLEMCEM	RELIZANE	RAVIN BLANC	Jeu de Barres B <sub>1</sub>	Jeu de Barres B <sub>2</sub>	Transfo TR.1	Transfo TR.2
5.1a	Chaud et sec	150 KV	150 KV	150 KV	150 KV	150 KV	Coupé	150 KV
5.1b	Chaud et sec	Coupée	" "	" "	" "	" "	Coupé	" "
5.1c	Nuageux	150 KV	" "	" "	225 "	" "	225 KV	" "
5.1d	Couvert	225 "	" "	" "	225 "	" "	225 "	" "
5.1e	Chaud et sec	250 "	" "	" "	250 "	" "	250 "	" "

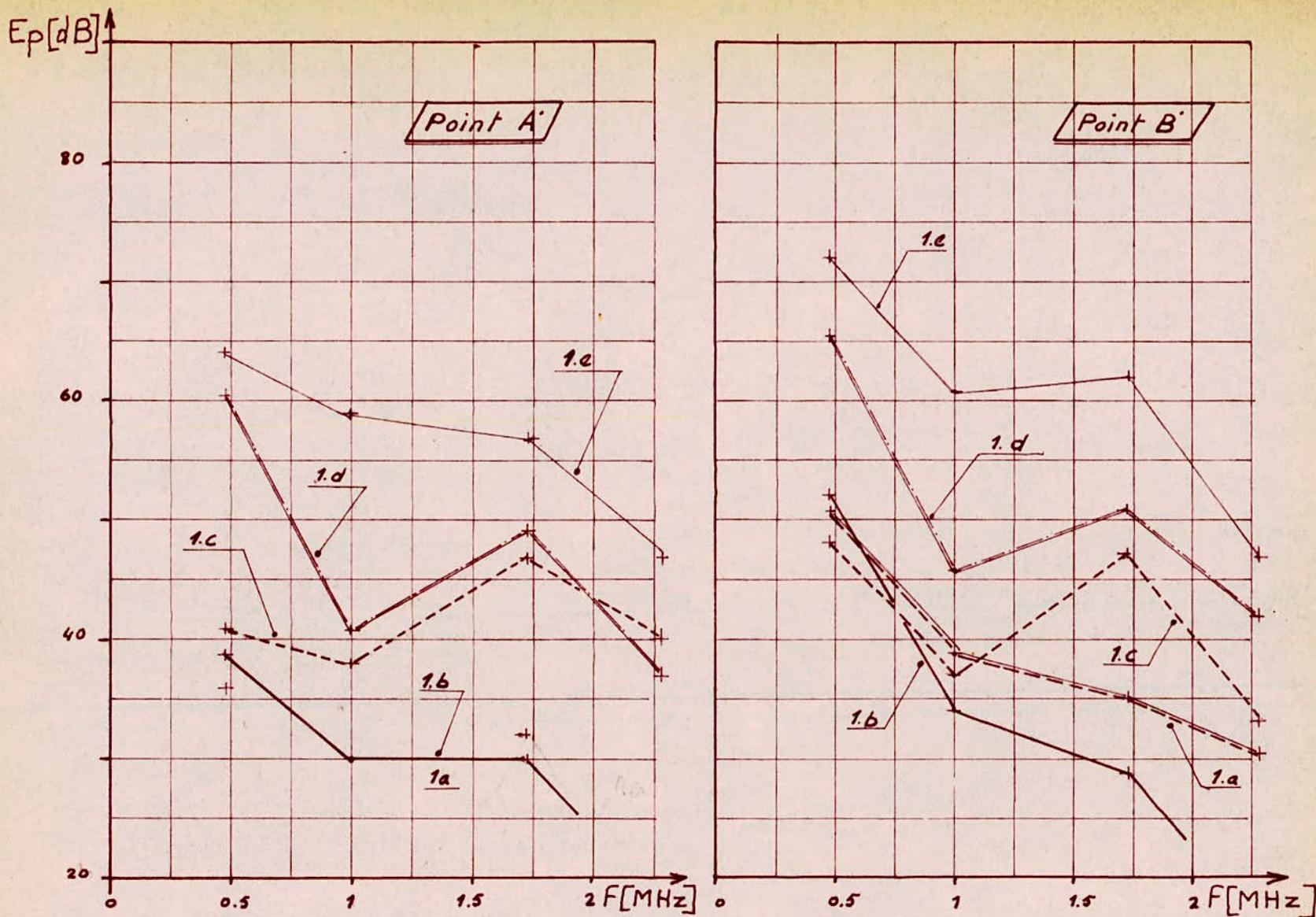


Fig 4.3a Perturbations radiophoniques en dB en fonction de la Fréquence (poste 220/150/60kv de ZAHANA)

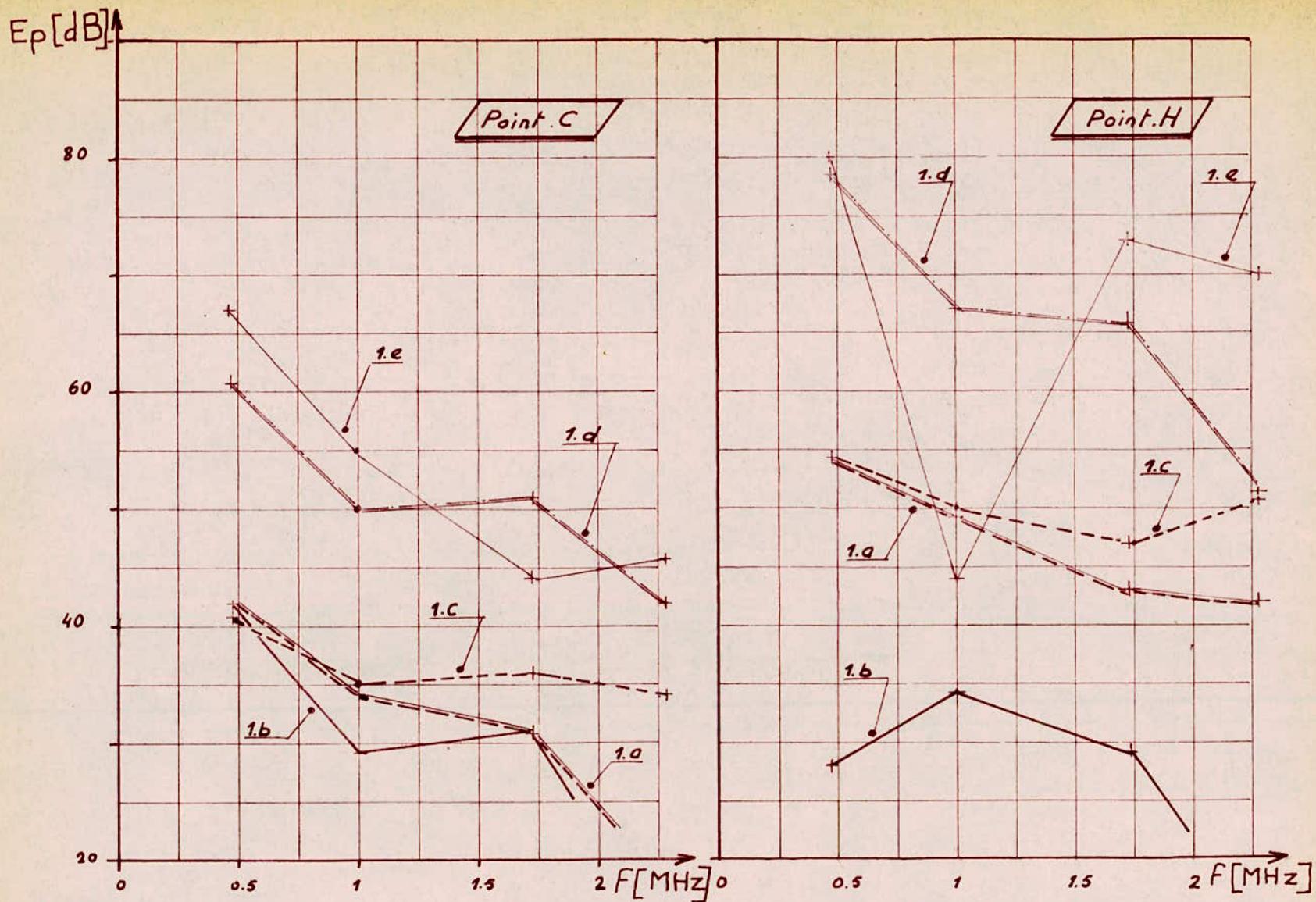


Fig 4.3b Perturbations radiophoniques en dB en Fonction de la Fréquence (poste 220/150/60kv de ZAHANA)

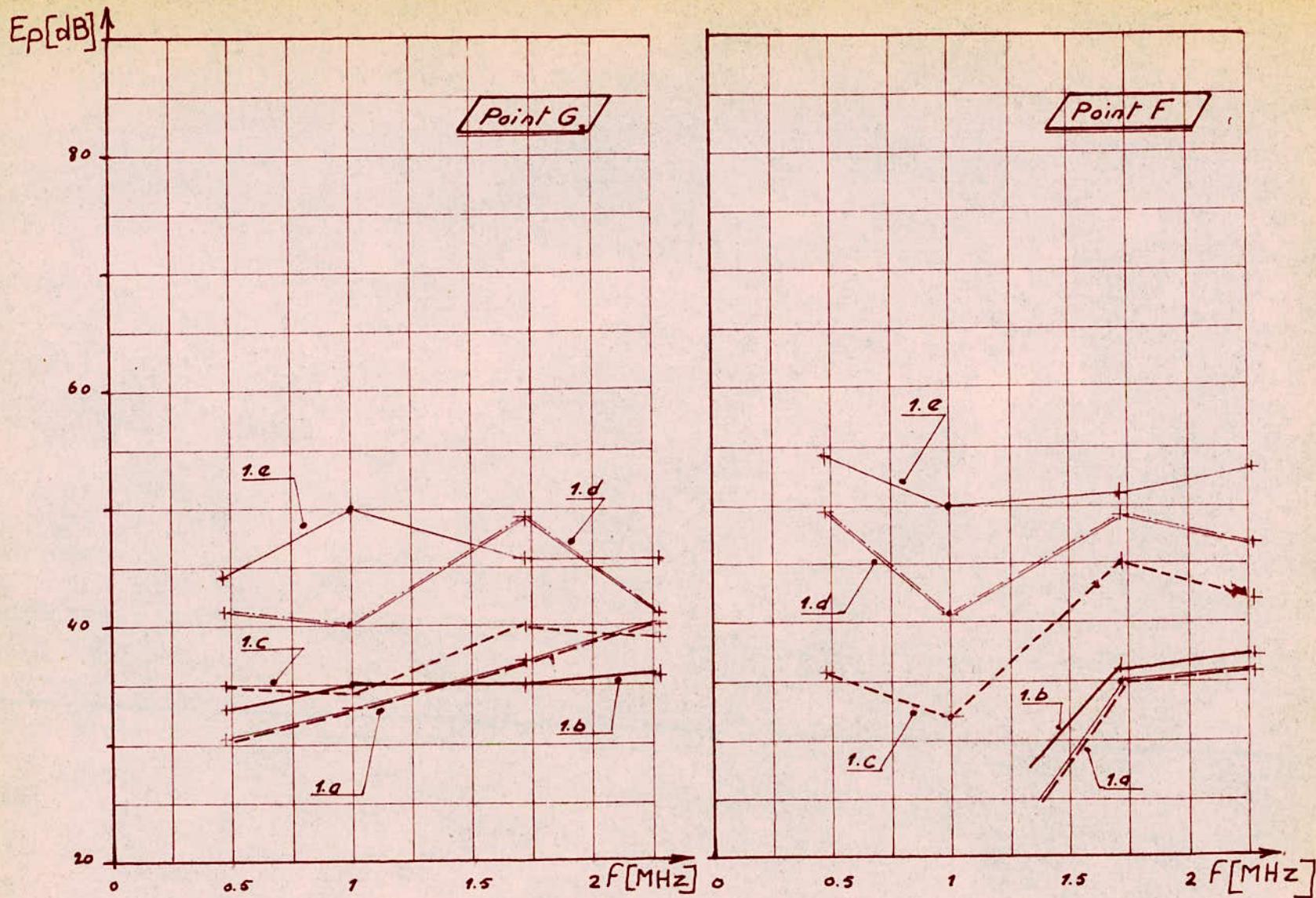


Fig 4.3c Perturbations radiophoniques en dB en fonction de la fréquence (poste 220/150/60 kv de ZAHANA)

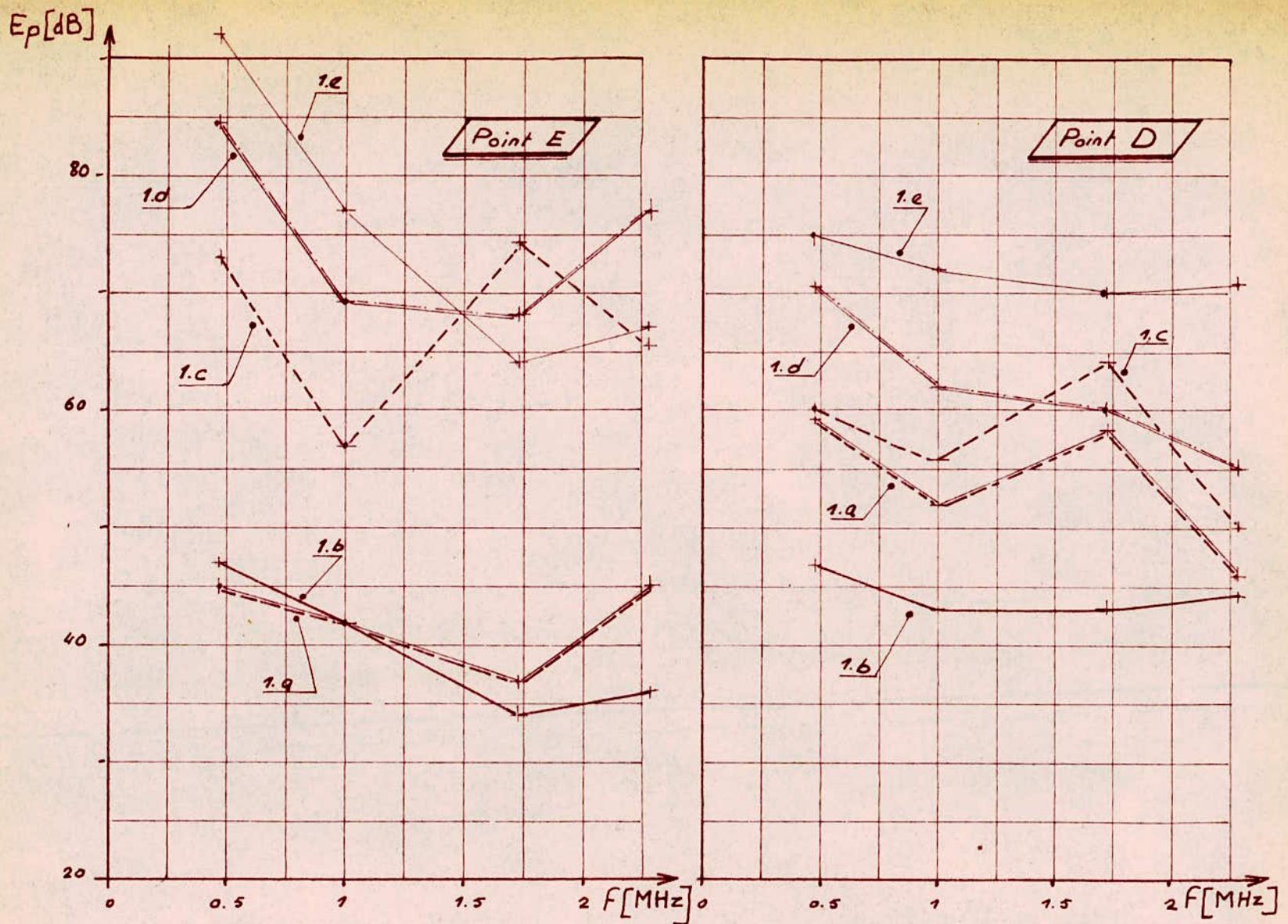


Fig. 4.3d Perturbations radiophoniques en dB en fonction de la  
Fréquence (poste 220/150/60 kv de ZAHANA)

Tableau 4.2a: Résultats des mesures du champ perturbateur sur la ligne ZAHANA\_TLEM CEN

$U = 160 \text{ kV}$

		Sonomètre		Récepteur 0,15 - 3 MHz (Siemens)				Récepteur 30 - 300 MHz (Rhd - Schwarz)						
N° Pylone	Distance (m)	C <sup>te</sup> du temps		FREQUENCE EN MEGAHERTZ										
		Slow	Fast	0,49	1	1,7	2,6	30	60	100	200	250		
		Bruit en dB		CHAMP EN DECIBEL (dB)										
9-10	0	45	45	-	50	48	48	43	14	0	0	0	0	
	10			54	52									
	20			47	45									
	30			40	38									
	40			35	32									
16-17	0	36	37	-	52	51	57	43	10	0	0	0	0	
	10			53	53									
	20			50	53									
	30			44	49									
	40			41	44									
	50			38	40									
18-19	0	-	-	-	51	47	41	33	-	-	6	-	-	
	10			51	51									
	20			42	42									
	30			34	34									
34-35	0	-	-	-	50	46	41	41	19	1	7	-	-	
	10			50	49									
	20			43	42									
41-42	0	-	-	-	50	51	42	36	47	72	46	33	41	
42-43	0	-	-	-	-	-	-	-	-	51	-	-	-	
50-51	0	-	-	-	47	45	40	36	-	9	-	-	-	
59-60	0	-	-	-	45	43	33	34	19	3	8	-	-	

Tableau 4.2b: Résultats des mesures du champ perturbateur sur la ligne ZAHANA-TLEMCEM

$U = 225 \text{ kV}$

N° Pylône	Distance (m)	Sonomètre		Récepteur 0,15 - 3 MHz (Siemens)					Récepteur 30 - 300 MHz (Rhd - Schwarz)					
		C <sup>te</sup> du temps		FREQUENCE EN MEGAHERTZ										
		Slow	Fast	0,49	1	1,7	2,6	30	60	100	200	250		
Bruit en dB		CHAMP EN DECIBEL (dB)												
9-10	0	45	—	—	72	66	62	49	—	28	9	10	17	18
	10				61	61,5								
	20				54	55								
	30				49	49								
	40				45	44								
16-17	0	44	—	—	69,5	66	62	59	—	26	12	9	17	—
	10				71,5	71								
	20				69	70								
	30				64	66,5								
	40				61	63								
	50				58	59								
18-19	0	45	—	—	71,5	71	61	63	—	28	12	9	14	15
	10				73	72,5								
	20				65	64,5								
	30				58	57								
	40				52	51								
34-35	0	—	—	—	71	66	65,5	59	—	28	14	8	17	—
	10				72	73								
	20				65	66								
	30				59	59								
41-42	0	48	—	—	71	69	66	58	—	51	51	47	44	42
59-60	0	—	—	—	75	68	67	70	—	30	13	10	15	—
75-76	0	—	—	—	74	69	66	58	—	33	25	28	21	21
	10				74	74								
	20				65	66								
	30				60	62								
	40				55	57								
108-109	0	44	—	—	70	65,5	57	53	—	22	14	8	17	—
112-113	0	44	—	—	75	73	69	85	—	27	15	8	15	—

Tableau 4.2c: Résultats des mesures du champ perturbateur sur la ligne ZAHANA\_TLEMCEN

$U = 245 \text{ kV}$

		Sonomètre		Récepteur 0,15- 3 MHz (Siemens)				Récepteur 30-300 MHz (Rhd - Schwarz)							
N° Pylone	Distance (m)	Cste du temps		FREQUENCE EN MEGAHERTZ											
		Slow	Fast	0,49	1	1,7	2,6	30	60	100	200	250			
		Bruit en dB		CHAMP EN DECIBEL (dB)											
9-10	0	51	—	—	77	71	70	65		29	16	8	16		
	10				82	80									
	20				76	73									
	30				69	66									
	40				64	61									
16-17	0	51	—	—	78	75	70	64		29	18	7	13		
	10				76	75									
	20				73	75									
	30				69	70									
	40				66	66									
18-19	0	50	—	—	77	71	70	69		30	16	9	14		
	10				79	77									
	20				70	71									
	30				63	64									
	40				57	59									
34-35	0	52	—	—	76	73	70	66		31	22	9	17	15	
	10				78	79									
	20				72	72									
	30				66	65									
	40				60	60									
41-42	0	—	—	—	76	69	68	62		27	22	14	14		
59-60	0	54	—	—	77	74	67	64		24	19	10	13		
75-76	0	—	—	—	78	74	70	64		33	16	7	13		
	10				77	78									
	20				73	71									
	30				66	65									
	40				64	60									
108-109	0	49	—	—	74	72	59	60		24	19	9	14		
112-113	0	57	—	—	82	74	72	73		29	21	11	13		

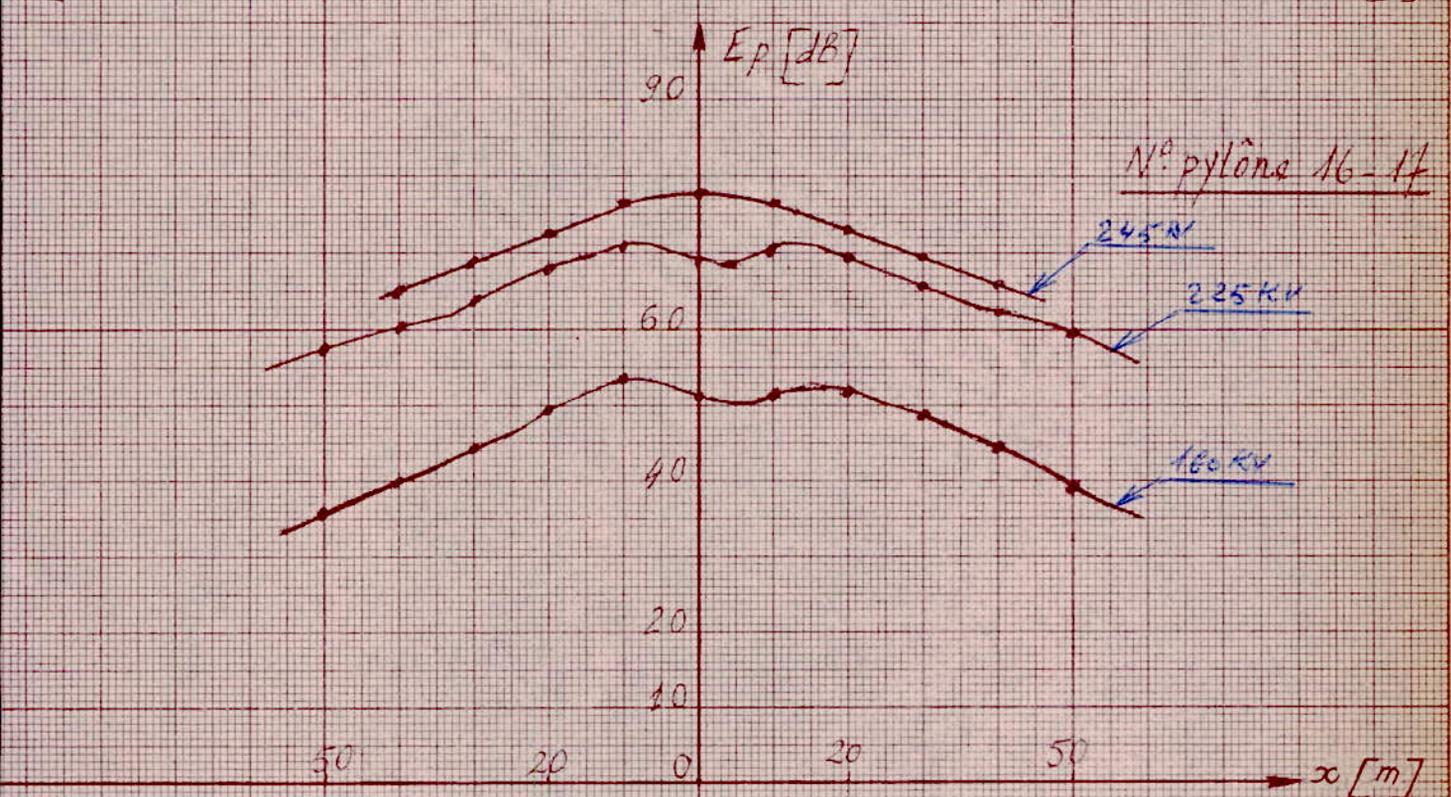
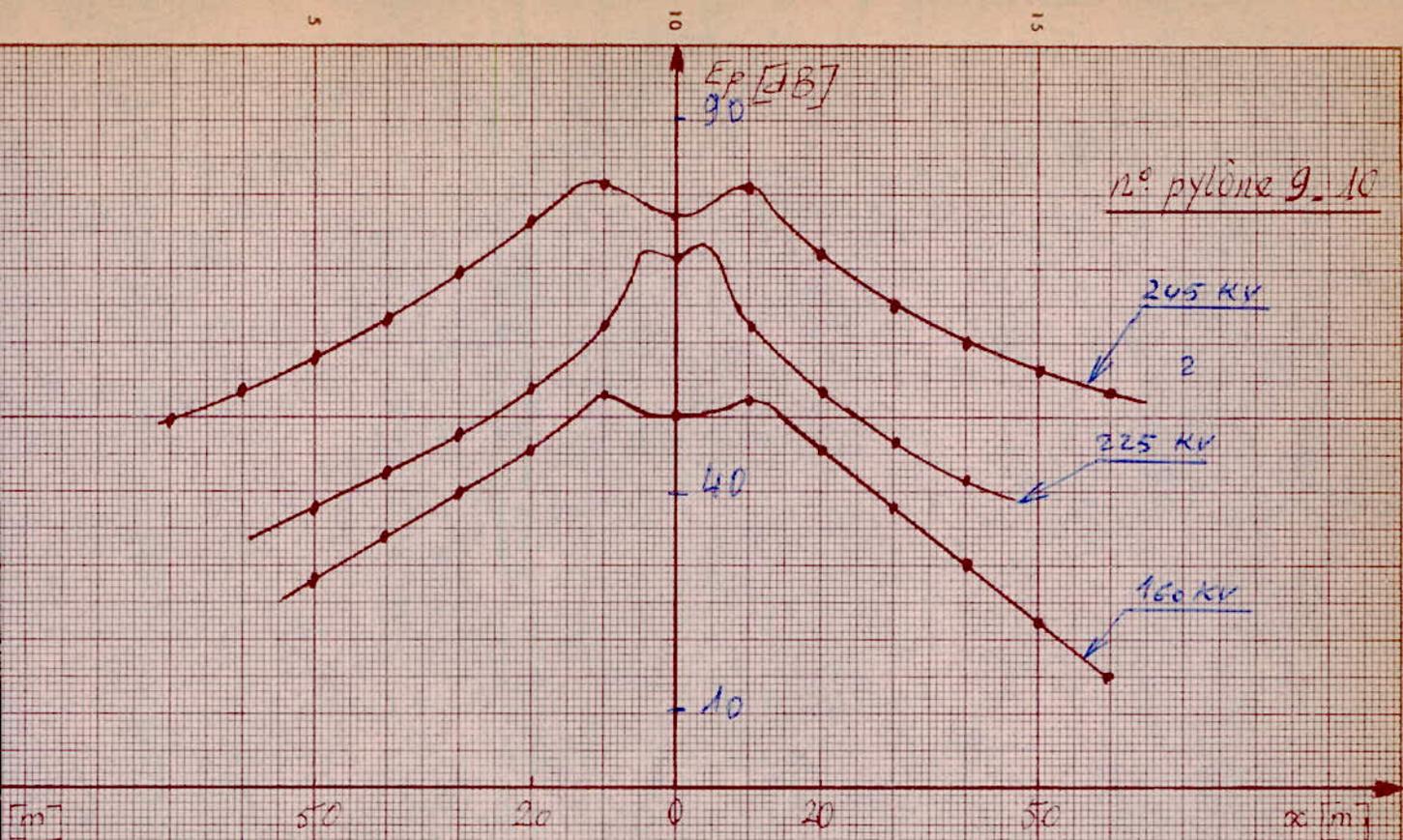


Fig 4.4 - Variation du champ perturbateur en fonction de la distance transversale (Ligne 220kV ZAHANA-TLEMCEN)

Cependant pour les tensions 225 et 245 Kv ; le bruit est devenu nettement audible et le niveau de perturbations a augmenté d'une façon très nette ; on peut déduire que la ligne est mal dimensionnée ; on a aussi constaté que la ligne était trop polluée (graisse et poussière).

A l'aide de l'appareil de localisation on a pu détecter la déféctuosité du pylône n° 42.

La mesure du champ perturbateur en fonction de la distance à l'axe de la ligne a été effectuée sur certaines portées sous la fréquence de 0,49 MHz. Le graphe 4.4 représente la variation du champ en fonction de la distance transversale  $x$  ; la décroissance du champ perturbateur en fonction de  $x$  est plus ou moins rapide (ce qui vérifie la formule 4.1).

La connaissance des perturbations radiophoniques engendrées par les lignes à très Haute tension est nécessaire pour la détermination de l'armement des lignes.

Cependant ces perturbations ne semblent pas constituer un problème bien grave, car généralement la zone située en dessous de la ligne où les parasites sont sensibles, est étroite et de plus généralement le nombre de maisons situées dans cette zone est actuellement très faible en Algérie.

## CHAPITRE 5

### ESSAIS AU LABORATOIRE DE L'E.N.P.A

#### 5.1 GENERALITES

L'effet couronne est une forme de décharge dans les gaz dont l'intensité et l'énergie qui l'accompagnent dépendent surtout des facteurs géométriques du système des électrodes.

Dans ce chapitre, seront donnés les résultats de mesure de la tension d'apparition de l'effet couronne en fonction de la forme des électrodes ainsi que les niveaux de bruit causant les perturbations radiophoniques que nous avons obtenues au laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique d'Alger.

Dans tous les cas de nos mesures, on a utilisé la tension alternative de fréquence industrielle égale à 50 Hz.

La mesure de la tension a été effectuée par l'intermédiaire d'un diviseur capacitif.

Les modèles de recherches ont été choisis selon les possibilités actuelles du laboratoire de l'E.N.P.A.

La détection des perturbations radiophoniques utilisée au cours des essais de l'effet couronne est effectuée par un appareillage spécialement destiné pour ces recherches que j'ai pu trouver dans la direction d'exploitation et transport d'énergie de la Société Nationale d'Electricité et du Gaz d'Algérie (SONELGAZ).

Les modèles utilisés au cours des essais étaient dans tous les cas des systèmes cylindriques simples représentant le cas le plus simple des lignes de haute tension.

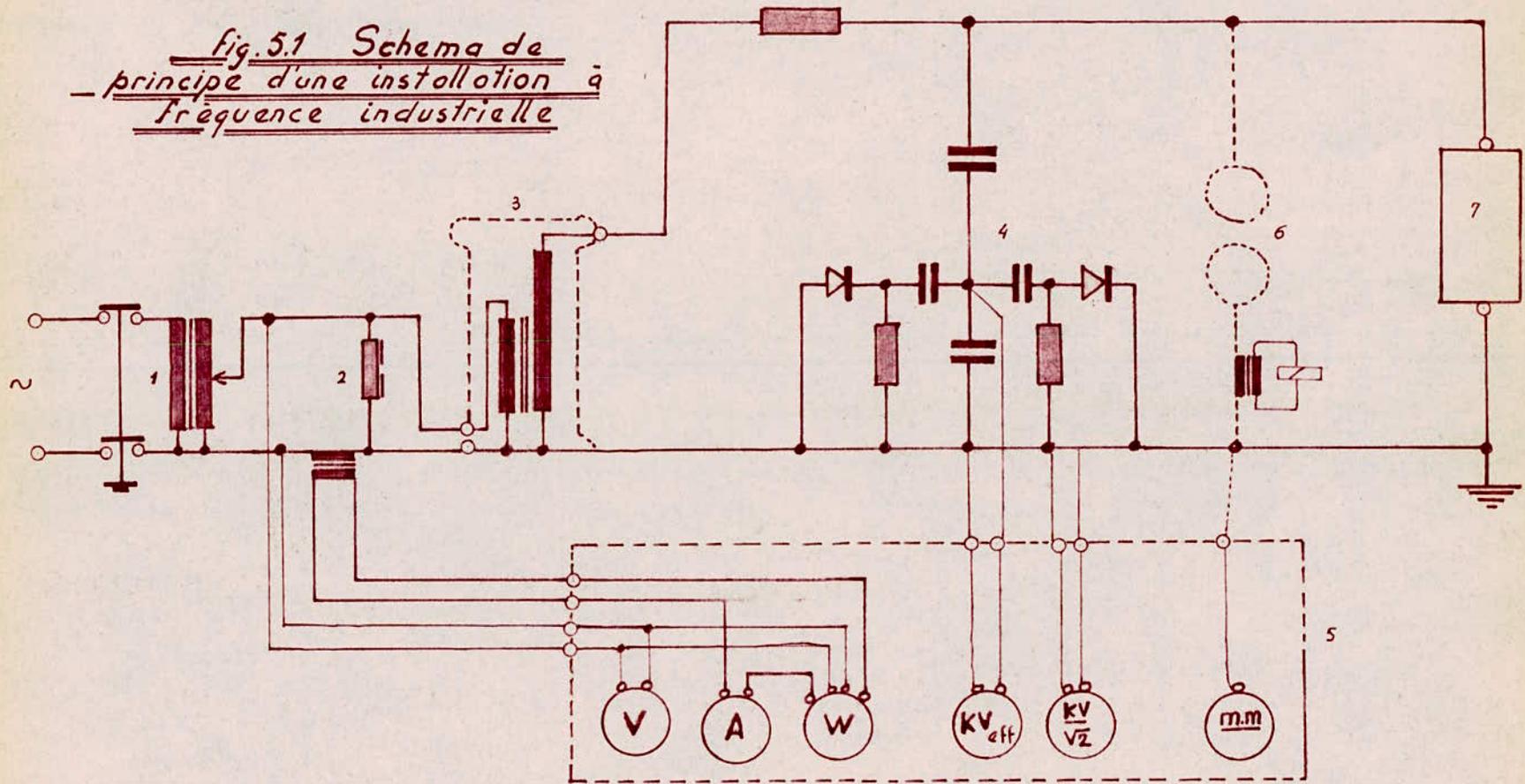
#### 5.2 EQUIPEMENT DE LABORATOIRE UTILISE PENDANT LES ESSAIS

L'équipement de haute tension de 50 Hz du laboratoire de l'E.N.P.A que nous avons utilisé au cours des essais est le suivant :

- a- Transformateur d'essai 300 Kv, 50Hz avec son régulateur de tension 0-500v.
- b- Diviseur capacitif 300 Kv d'une précision de 1%.
- c- Armoires d'alimentation et de protection, pupitre de commande et de mesure.

Cet appareillage est représenté dans le schéma général de la Fig 5.1.

fig. 5.1 Schema de  
principe d'une installation à  
fréquence industrielle



- 1\_ Transformateur de réglage " avec groupe convertisseur "
- 2\_ Bobine " Self de compensation "
- 3\_ Transformateur d'essai
- 4\_ Voltmètre de crête indiquant simultanément la Valeur efficace
- 5\_ Pupitre de Commande
- 6\_ "Branchement du Spintermètre" avec résistance d'amortissement
- 7\_ Objet à essayer

#### a- Transformateur d'essai et régulateur

Le transformateur d'essai 300 Kv, 50 Kva type monophasé à un rapport de transformation de 300 Kv/0,5 Kv.

Les enroulements B.T et H.T de ce transformateur ont les impédances respectives suivantes : 0,0365  $\Omega$  et 4895  $\Omega$ .

La partie supérieure du transformateur est recouverte d'un écran anti-effluve permettant une répartition convenable du champ et réduisant les décharges électriques sous forme d'effluve qui risquent de perturber les mesures des niveaux des bruits causés par l'échantillon de câbles à essayer. Un dessiccateur d'air au silicagel et un bouchon de remplissage muni d'une tige de contrôle du niveau d'huile sont montés sous cet écran.

Le transformateur de réglage 0-500v, 50hz et de 50Kva est directement lié avec l'enroulement B.T du transformateur d'essai. La tension secondaire variable est obtenue grâce à un curseur qui se déplace soit manuellement par un volant soit automatiquement à l'aide d'un moteur d'entraînement. La variation de la tension s'effectue en échelon de 1% de la tension maximale. Le temps de montée ou de descente du curseur est de 103s.

#### b- Diviseur capacitif de tension

Ce diviseur est constitué par un condensateur H.T et de quatre condensateurs B.T dont le mode de connexion (de ces derniers) permet d'obtenir les plages de mesure jusqu'à 75, 150 et 300Kv.

Il est destiné à la mesure de la tension efficace et de la tension de crête respectivement par l'intermédiaire du voltmètre statique et du voltmètre de crête.

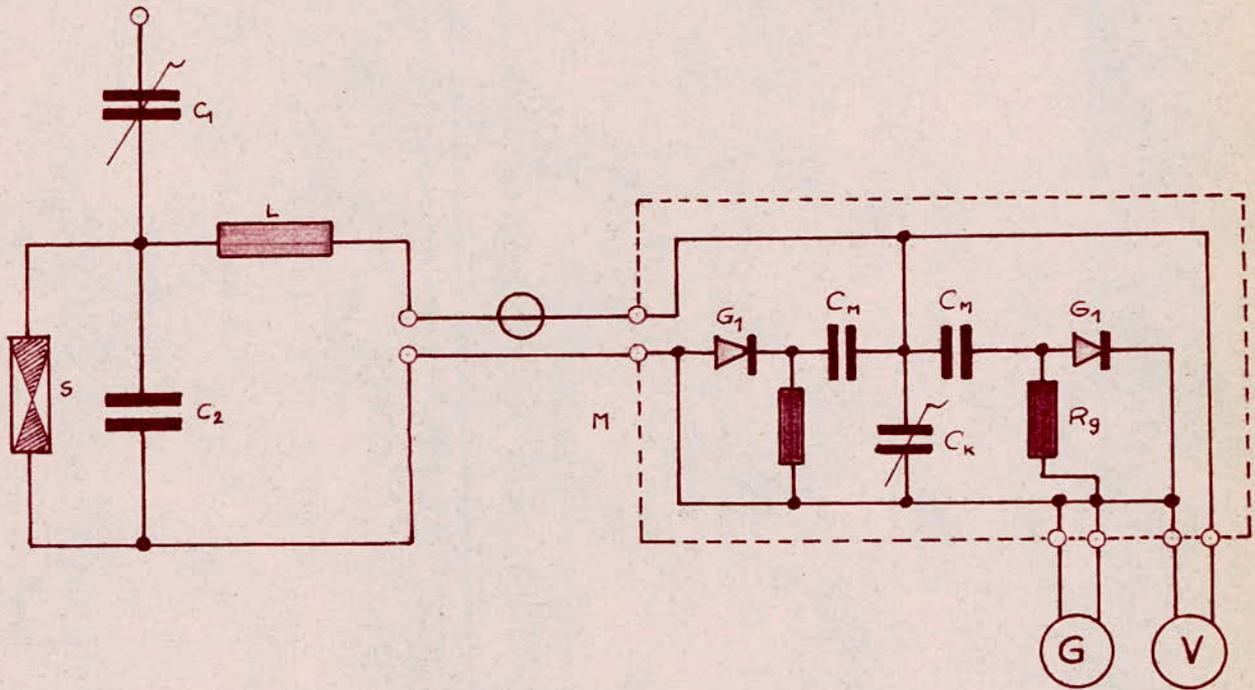
Le voltmètre de crête (Fig 5.2) est constitué d'un condensateur à H.T, d'un socle avec condensateur B.T, d'un écran anti-effluve et enfin d'un écran destiné à recouvrir les brides des condensateurs.

La précision de mesure du diviseur est de 1%.

#### c- Armoires d'alimentation et de protection, pupitre de commande et de mesure

L'alimentation de la station d'essai à fréquence industrielle de l'E.N.P.A se fait à partir d'un tableau général situé dans l'atelier de menuiserie.

Fig. 5.2 Voltmètre de crête



- M. Bloc de mesure
- C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> Condensateurs formant le diviseur capacitif
- S Fusible (nāon)
- L Self de protection
- V Voltmètre statique mesurant la valeur efficace
- G Galvanomètre

Le tableau est alimenté par un transformateur dont les principales caractéristiques sont : Puissance 400 Kva, rapport de transformation  $\frac{10 \text{ Kv}}{0,4 \text{ Kv}}$ , fréquence 50 Hz.

Ce transformateur assure aussi l'alimentation d'autres bâtiments ; ainsi lors des essais, il est risqué de créer des perturbations dans les autres circuits.

La plate-forme du laboratoire a une surface de 15m.15m et est recouverte par un grillage galvanisé à maille carrée 15mm.15mm.

La résistance de terre est de l'ordre de 0,2 .

Tout autour de la plate-forme d'essai, est monté un grillage relié à la terre (cage de FARADAY) pour la protection des installations et aussi écran électrostatique afin d'éviter des perturbations à l'extérieur du laboratoire pendant les essais.

Par mesure de sécurité, il existe aussi dans le circuit de commande un interrupteur dans la chaîne délimitant la plate forme d'essais à fréquence industrielle ; de même deux lampes de signalisation sont installées sur la porte d'accès au laboratoire et qui s'allument dès que le sectionneur du circuit de puissance est fermé.

Le pupitre de commande est alimenté par une tension de 220v sous la fréquence industrielle de 50Hz . Il est constitué d'organes nécessaires au contrôle et à la commande du contacteur automatique et du transformateur de régulation. Il mesure le courant et la tension au secondaire du transformateur de réglage ainsi que les tensions de crête et efficace du diviseur capacitif.

### 5.3 MODELES EXPERIMENTES

Les modèles expérimentés utilisés au cours des essais dans l'air étaient du type cylindrique simple. Il représente le cas le plus simple des lignes de H.T ; il est schématisé dans le tableau 2.1d.

Les paramètres de ce modèle en fonction desquels la couronne et les perturbations radiophoniques ont été essayées sont les suivants :

- rayon du conducteur variant de 0,023 à 1,65 cm
- l'état de surface ( lisse et propre, polué par l'eau, polué par graisse et sable)

- la hauteur a été conservée constante à 200 cm.

Vu les dimensions du laboratoire on a été contraint de conserver la longueur des câbles constante et égale à 7m.

De la même façon, les essais sur trois conducteurs en parallèle ou en triangle ne sont pas possibles afin de constater l'influence inter-conducteur ; cela provient du fait que l'équipement du laboratoire est du type monophasé.

Les raccordements de chaque conducteur à ses extrémités sont conçus de telle sorte à réduire au maximum la présence des décharges à ces endroits, qui peuvent être gênantes au cours des mesures.

Pour cela on a choisi le raccordement représenté par la Fig 5.3.

Les raccords sont formés par un cylindre creux de cuivre de 120mm de diamètre intérieur et de 200mm de longueur. Aux extrémités de ce cylindre sont soudés deux tores également en cuivre de 16mm d'épaisseur afin de réduire le champ dû à l'effet du bord du premier cylindre.

Les deux plaques de plexiglas servent d'une part pour la fixation mécanique des raccords sur les supports et d'autre part pour augmenter le niveau d'isolement.

L'état de surface de ces modèles était d'abord pollué naturellement (poussière, graisse, dépôt des oxydes) ; dans nos essais on a commencé par le nettoyage des conducteurs par la suite on a procédé à la pollution artificielle avec des dispositifs plus ou moins appropriés pour mettre en évidence l'influence de l'état de surface (eau, sable + graisse) sur la tension et les perturbations radiophoniques.

- Conducteur propre et pratiquement lisse : le nettoyage des câbles est une opération délicate. Le nettoyage s'est déroulé comme suit : après lavage à l'eau et du savon, les câbles ont été frottés avec une brosse de nylon (pour ne pas avoir des aspérités), séchés, frottés une deuxième fois avec la toile émurée, lavés à l'essence et enfin essuyés à la peau de chamois et cela plusieurs fois afin d'éliminer toute présence de poussière sur les câbles.

RACCORD UTILISE

DANS LES ESSAIS

- ①② plaques plexiglas
- ③④ tores en cuivre
- ⑤ tube en cuivre

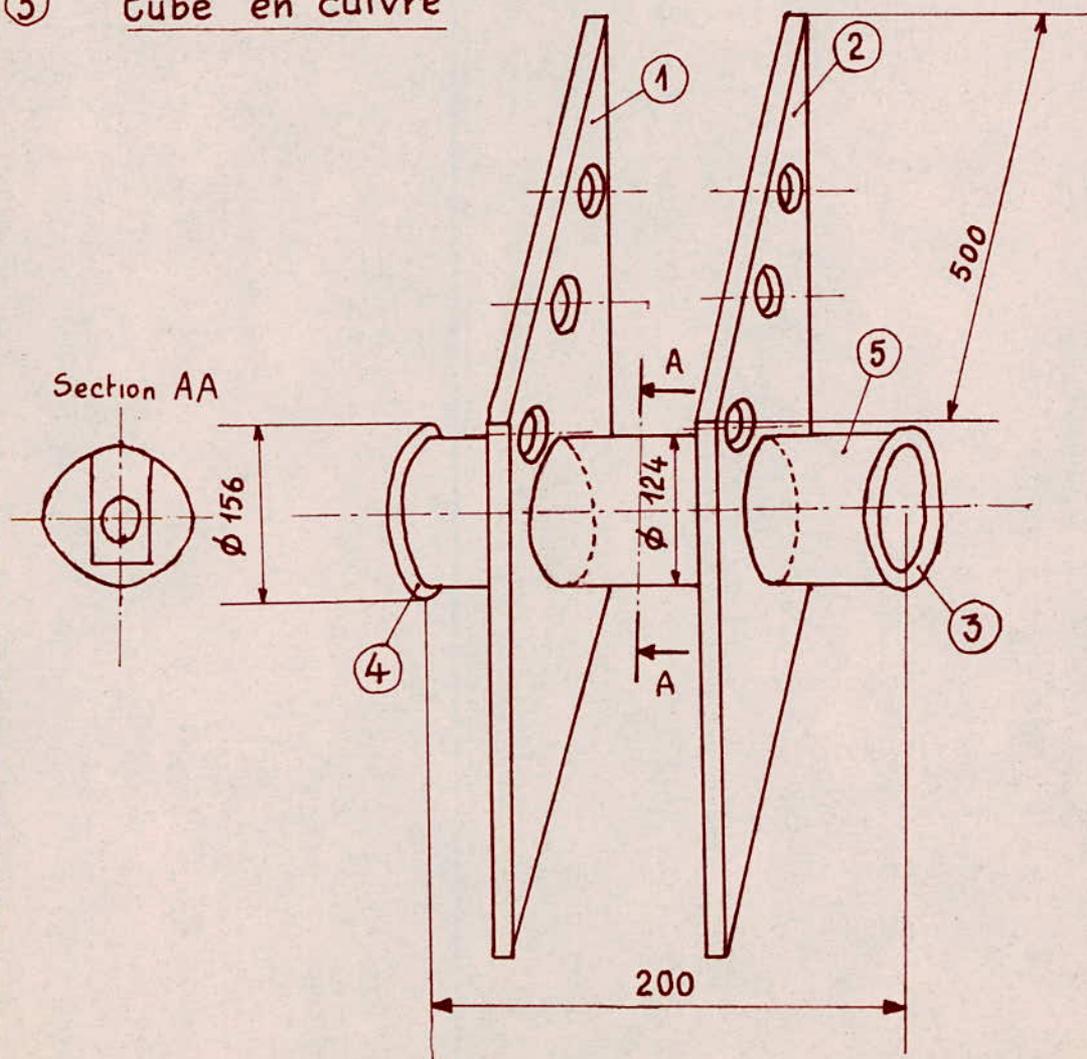
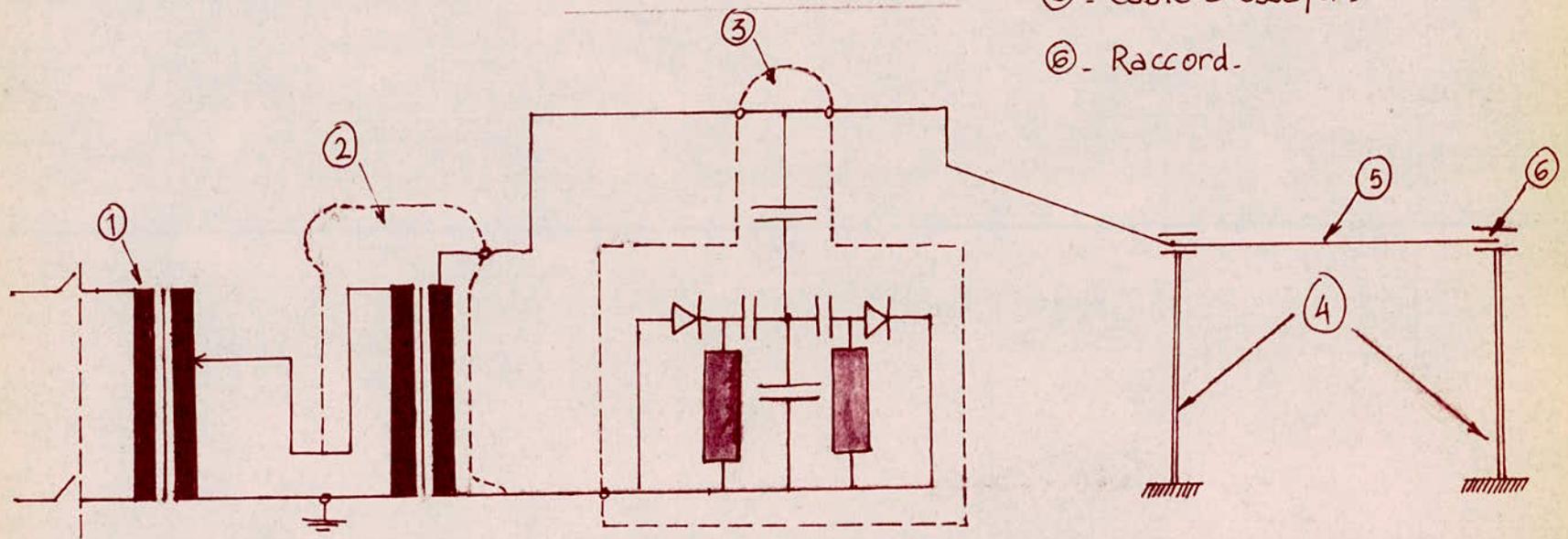


Fig 5-3.

Fig 5.4 - Montage utilisé pour les essais.



- ① Transformateur de réglage.
- ② Transformateur d'essais.
- ③ - Diviseur capacitif.
- ④ - Supports en bois.
- ⑤ - Câble à essayer.
- ⑥ - Raccord.

- Pollution par l'eau : Pour compléter l'étude de l'influence de l'état de surface d'un câble sur la tension d'apparition de la couronne et sur les perturbations radiophoniques, on a examiné le cas où les irrégularités de la surface sont constituées par des gouttes d'eau déposées artificiellement sur le câble sec.

Ces essais peuvent prévoir d'une façon grossière les résultats des mesures sur des câbles sous la pluie.

Les gouttes sont obtenues grâce à un pulvérisateur manuel. Pour obtenir une couche uniformément répartie sur tous les câbles on doit placer le pulvérisateur à une distance de 40 à 50cm du câble dans différentes positions pour éviter la chute de grosse gouttelettes sur la surface du câble.

De plus la pulvérisation est faite en déplaçant et en tournant le pulvérisateur le long du câble. Le nombre de pulvérisations doit être le même pour chaque position du pulvérisateur et pour chaque câble.

- Pollution par le sable fin : Après avoir fixé le câble entre deux supports, on l'impregne avec une mince couche de gas-oil pour que les grains de sable puissent se coller dessus. Ainsi on aura un état de surface graissé et poussiéreux.

#### 5.4 ESSAIS ET RESULTATS DES MESURES

a- essais : après avoir pris en considération toutes les consignes de sécurité, on a mis successivement sous tension chaque câble. Le schéma de montage des essais est représenté par la Fig 5.4.

Ensuite on a élevé lentement et uniformément la tension à l'aide du transformateur de réglage, jusqu'à l'apparition des premières décharges visibles au voisinage de chaque échantillon; à ce moment la on a prélevé la tension  $U_0$ .

On a prélevé, sur un même conducteur, le champ perturbateur pour différents niveaux de tension.

Les mesures ont été effectuées dans les conditions atmosphériques ambiantes suivantes :

- |                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| - température $t = 30^{\circ}C$    | $K_a = 0,95$ |
| - pression $p = 745\text{mmhg}$    |              |
| - humidité relative de l'air : 60% | $K_h = 0,95$ |

b- résultats des mesures : le tableau 5.1 donne les résultats de mesure de la tension en fonction du rayon et de l'état de surface du câble.

Pour faire une étude comparative, on a calculé le champ critique par la formule de PEEK et par la suite la tension d'apparition de la couronne dans le cas où l'état de surface est propre et lisse mais en tenant compte des conditions atmosphériques ( $K_a=0,95$  et  $K_h=0,95$ ) on a noté dans ce cas un léger écart qui croit en fonction de l'augmentation du rayon ; cela est dû au fait que l'état de surface n'était pas lisse et qu'il présente des aspérités d'origine géométrique (les câbles ont été utilisés maintes fois par l'école). Cette considération est appuyée par le fait que durant les essais on a constaté l'apparition des aigrettes localisées dans certains endroits du conducteur avant l'apparition de la couronne.

D'après les résultats, on a constaté que l'influence de l'eau sur la tension d'apparition de la couronne est plus importante que celle du sable. Ceci concorde bien avec les résultats obtenus par divers chercheurs.

Il faut noter, que pour les rayons compris entre 0,5 et 1,65cm, des décharges visibles ont apparu sur les raccords bien avant les conducteurs. Ces décharges visibles ont été transformées en étincelle dans l'essai du conducteur de rayon 1,65cm ; cependant, on a été limité pour faire des essais sur des câbles de rayon supérieur à 1,65cm puisque le niveau de tension est devenu, d'une part très important et d'autre part l'isolation (support en bois) et les raccords n'ont pas été conçus pour supporter de telles tensions. Ceci nous a appris l'importance du raccordement des conducteurs dans les essais et par conséquent sur les lignes.

En ce qui concerne les résultats de mesure du champ  $E_p$  en fonction de la tension pour chaque conducteur on a tiré les conclusions suivantes :

- des crépitements audibles ont apparus bien avant la tension d'apparition de la couronne
- le champ perturbateur augmente avec la tension pour un rayon donné.

Tableau 5.1: Résultats de mesure de la tension d'apparition de l'effet couronne

Etat de surface	Rayon du conducteur (cm)	0,023	0,25	0,7	1,65	2	3	4
Lisse et propre	$E_c = 30k_a \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r k_a}}\right)$ (Kv/cm)	82	43	37	34	33	32	31
Lisse et propre	$U_c = E_c \cdot \ln \frac{2h}{r}$ (KV)	18	79	164	308	350	470	571
Lisse et propre	$U_c$ : mesurée et corrigée (KV)	22	66	125	—	—	—	—
poluée par l'eau		13	51	83	—	—	—	—
poluée par le sable		14	52	94	—	—	—	—

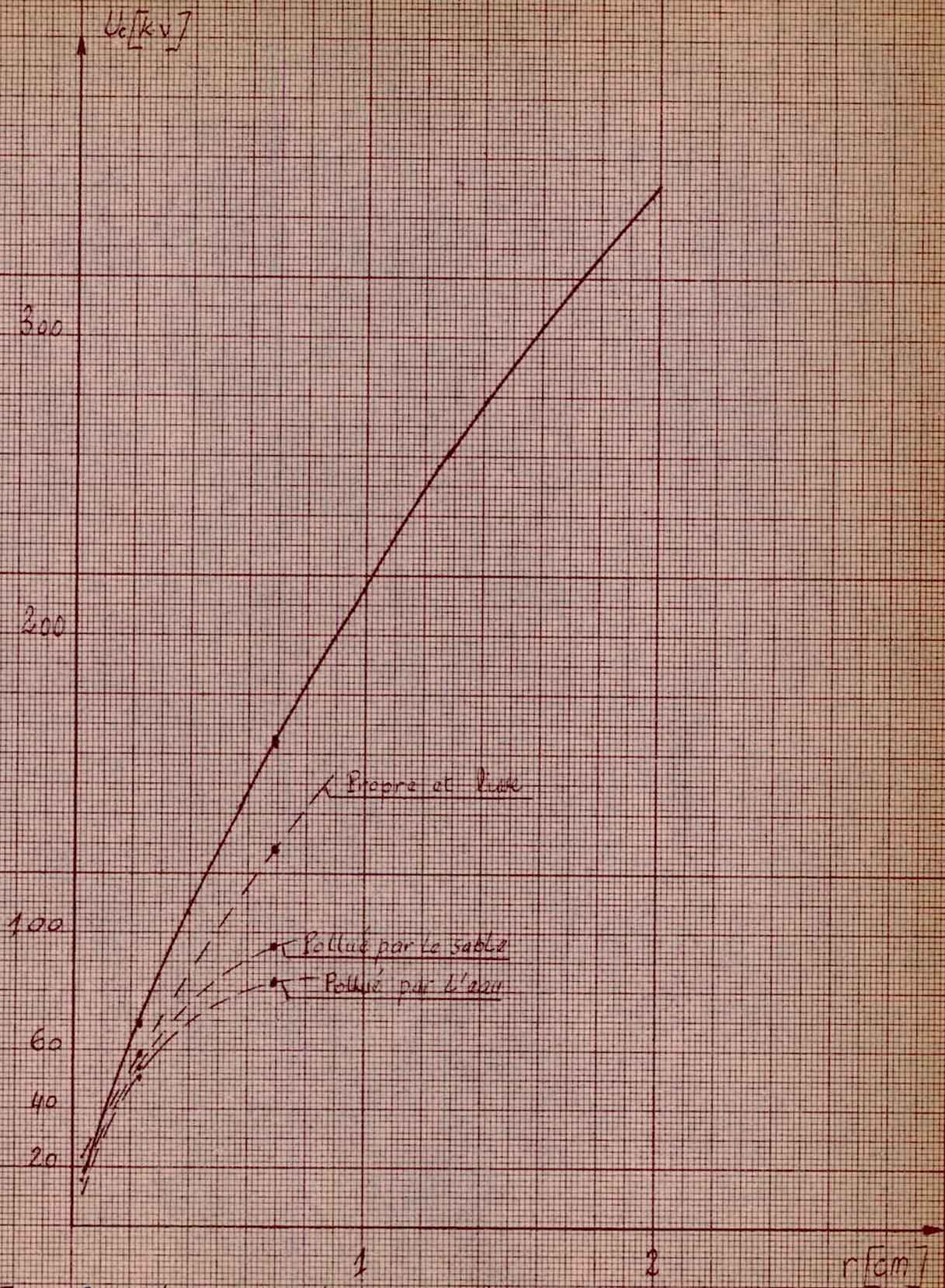


Fig 55 - Variation de  $U_c$  en fonction du rayon

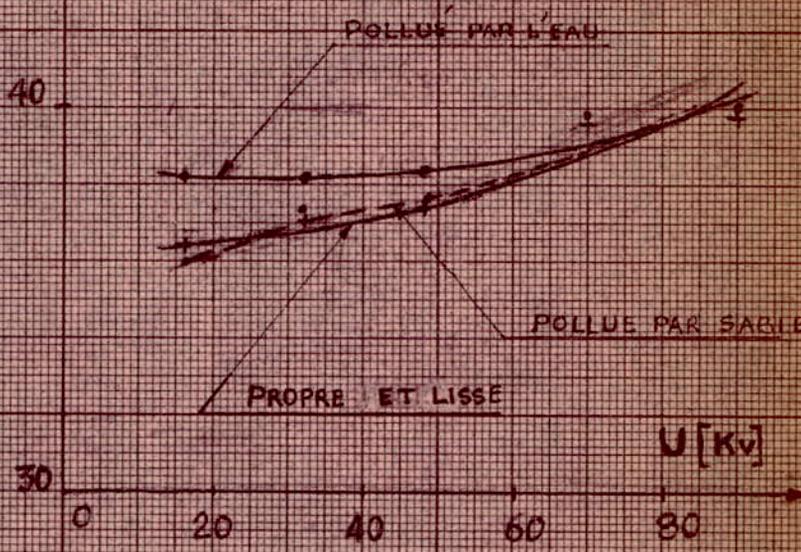
—  $U_c$  calculée et corrigée  
 ---  $U_c$  mesurée



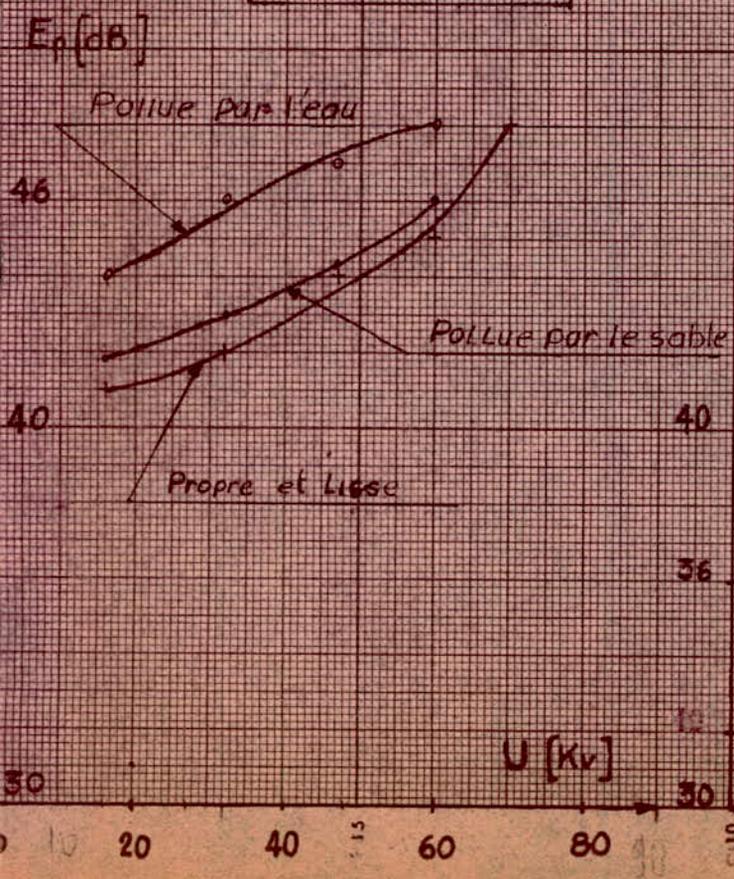
$E_p [dB]$

Fig 5.6 Variations du Champ en fonction de la tension 44

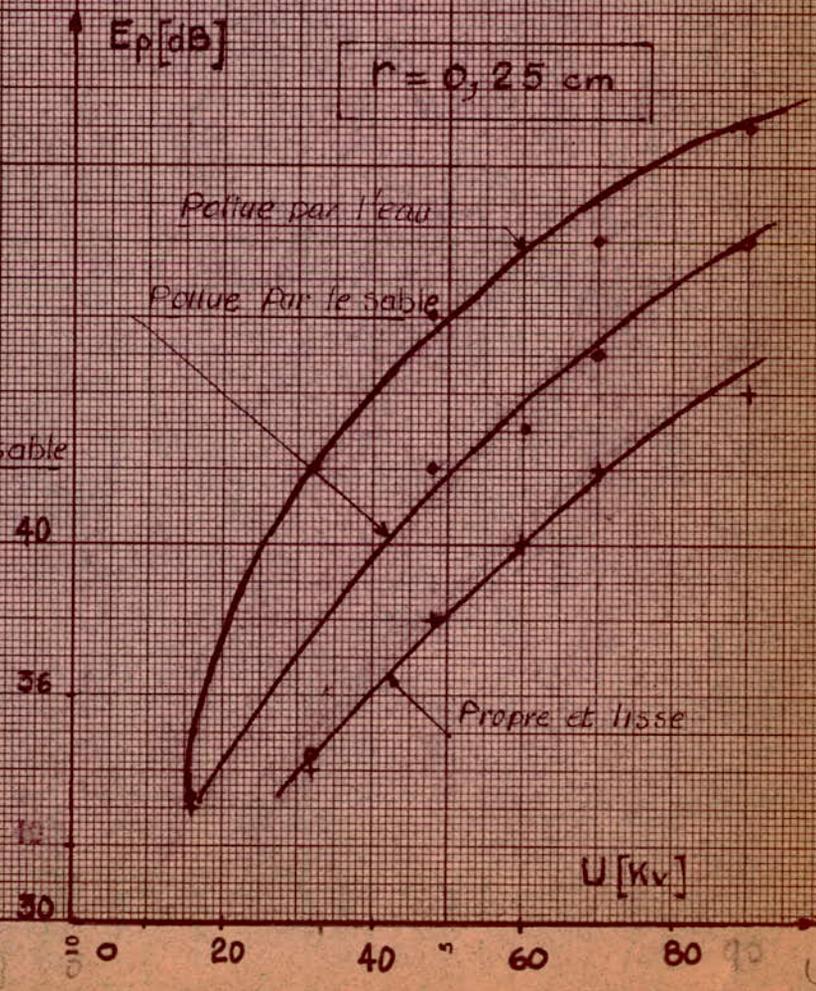
$r = 0,7 \text{ cm}$



$r = 0,023 \text{ cm}$



$r = 0,25 \text{ cm}$



- à rayon du conducteur croissant et pour une tension donnée, le champ perturbateur diminue

- le champ est bien supérieur dans les cas des conducteurs pollués par l'eau que dans les deux autres états de surface ; cela convient avec les expériences effectuées par d'autres chercheurs dans ce domaine.

La valeur du champ pour  $U = 0$  Kv a été de 29 dB ; ceci provient des perturbations dues à l'équipement du laboratoire tels que l'armoire d'alimentation, le pupitre de commande, le régulateur et l'enroulement primaire du transformateur d'essai.

Toutes les mesures du champ ont été effectuées à la fréquence de 2,1 MHz.

Les pertes dues à l'effet couronne ont été calculées par la formule (3.4) de PEEK aux tensions supérieures à la tension critique de chaque conducteur. Ces pertes augmentent avec la tension pour un conducteur donné et diminuent avec l'augmentation du rayon pour une tension fixée.

## CONCLUSION /

1) L'étude théorique a montré les principaux facteurs influençant l'apparition des décharges sous la forme de couronne autour des électrodes à faible rayon et en particulier autour des conducteurs des lignes de H.T, 50 Hz. Ces facteurs sont les suivants :

- forme et état de surface des électrodes
- conditions atmosphériques
- nature et état du gaz

2) L'étude expérimentale a confirmé l'influence de certains facteurs choisis sur la tension d'apparition de la couronne et sur le niveau de perturbations et est qualitativement en accord avec les recherches précédentes.

3) La tension d'apparition de la couronne augmente avec l'augmentation du rayon et diminue pour un conducteur donné, suivant que l'état de sa surface est respectivement propre et lisse, polluée par le sable ou polluée par l'eau.

4) Les perturbations radiophoniques diminuent avec l'accroissement du rayon pour un niveau de tension et un état de surface donné.

- à rayon constant, l'augmentation de la tension s'accompagne d'une augmentation du champ perturbateur pour un état de surface donné ;
- pour une tension et un rayon fixé, la pollution par l'eau influence beaucoup plus sur le champ perturbateur que le sable.

5) Le niveau de perturbation mesuré à l'intérieur du poste 220/150/60 Kv de ZAHANA et sur la ligne 220 Kv de ZAHANA-TLEMCEM était le suivant :

- plus ou moins modéré sous la tension de 150 Kv
- un peu élevé pour les tensions 225 et 245 Kv.

6) Les principales remarques sur les mesures effectuées au laboratoire de l'E.N.P.A sont :

- moyens de pollution artificielle très réduits loin de la réalité)
- limité par les dimensions de la station d'essai de 50 Hz

- dispositif de mesure des pertes couronne pour des tensions élevées inexistant à l'école
- tension limitée

Par conséquent le nombre de paramètres a été réduit

7) A cet effet on suggère l'extension du laboratoire de H.T de l'E.N.P.A par l'installation des dispositifs permettant la reproduction de pollution et certains dispositifs de mesure des pertes couronne des récepteurs de mesure du champ perturbateur.

8) Il est indispensable d'élargir ces mesures non seulement dans le cadre du laboratoire mais aussi sur les lignes expérimentales qui doivent être construites dans les régions représentatives ; cela donnera, aux projecteurs de lignes, un nombre de renseignements suffisant pour le dimensionnement optimale des lignes à haute tension.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 NORMES FRANCAISES      NFC 05-15 et NFC 05-20
- 2 TECHNIQUE DE L'INGENIEUR Tome 1, D640 "Effet couronne en tension alternative" par : C. GARY.
- 3 RENE PELISSIER      "Les réseaux d'énergie électrique", Tome 1  
Dunod Paris 1971.
- 4 TECHNIQUE DE L'INGENIEUR Tome 4 E3230 "Perturbations radiphoniques ayant leur source dans les lignes de transport d'énergie" par RENE PELISSIER.
- 5 TECHNIQUE DE L'INGENIEUR Tome 4 E3220 "Perturbations radioélectriques" par JEAN BLOUET.
- 6 VON HIPEL      "Les diélectriques et leurs applications"  
édition Dunod Paris 1961
- 7 L. L. ALSTON      "High voltage technology", Oxford University  
Press 1968.
- 8 FLEURY et J.P. MATHIEU : "Electrostatique, courants continus magnétisme", 4<sup>e</sup> édition, Eyrolles Paris 5<sup>e</sup>, 1967
- 9 E. BADAREU et I. POPESCU : "Gaz ionisés, décharges électriques dans les gaz", édition Dunod Paris.
- 10 K. KUPFMULLER : "Electricité théorique et appliquée",  
édition Dunod, Paris, 1959.
- 11 A. MAUDUIT      "Installations électriques à haute et basse tension"  
Tome 1, Dunod, Paris, 1956.
- 12 TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, Tome 1, D160 "L'effet de couronne sur les lignes aériennes" par RENE PELISSIER.
- 13 CIGRE 1948, Tome 3, rapport n° 408.
- 14 CHARLES AVRIL      "Construction des lignes aériennes à haute tension"  
Eyrolles, Paris, 1974.