

20

**PERTURBATIONS ENGENDREES PAR L'EFFET
DE COURONNE DES RESEAUX DE TRANSPORT**

**DESCRIPTION DES PHENOMENES
GUIDE PRATIQUE DE CALCUL**

***INTERFERENCES PRODUCED BY CORONA
EFFECT OF ELECTRIC SYSTEMS***

**DESCRIPTION OF PHENOMENA
PRATICAL GUIDE FOR CALCULATION**

1974



**PERTURBATIONS ENGENDREES PAR L'EFFET DE
COURONNE DES RESEAUX DE TRANSPORT**

**DESCRIPTION DES PHENOMENES
GUIDE PRATIQUE DE CALCUL**

***INTERFERENCES PRODUCED BY CORONA EFFECT
OF ELECTRIC SYSTEMS***

***DESCRIPTION OF PHENOMENA
PRACTICAL GUIDE FOR CALCULATION***

**Groupe de Travail 01 du Comité d'Etudes 36 (Perturbations)
*Working Group 01 of Study Committee 36 (Interferences)***

1974

Ce document a été établi par le Groupe de Travail 36.01, composé de :
This document was prepared by Working Group 36.01, composed of :

Mme/Mrs D. KOHOUTOVA (Tchécoslovaquie./Czechoslovakia)

MM./Messrs C. GARY (Chef de File/Convener - France)
F. HIRSCH (Allemagne/Germany)
N. KOLCIO (Etats-Unis/United States)
W. KOLLEWIJN (Pays-Bas/Netherlands)
J. LOOMS (Grande-Bretagne/Great Britain)
M. MOREAU (Secrétaire/Secretary - France)
P. PIROTTE (Belgique/Belgium)
M. SFORZINI (Italie/Italy)

SOMMAIRE

SUMMARY

INTRODUCTION

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE

PART I

PROPRIETES GENERALES DE L'EFFET DE COURONNE

GENERAL PROPERTIES OF CORONA

Pages

Pages

CHAPITRE 1 – <i>Aspects théoriques – Phénomènes fondamentaux</i>	11
1.1 – Avalanches de TOWNSEND	11
1.2 – Développement d'une aigrette	11
1.3 – Différents types de décharge par effet couronne	13
1.4 – Spectres de fréquences des impulsions ...	16
1.5 – Calcul du champ superficiel critique et conditions d'apparition de l'effet couronne sur les lignes aériennes	18

CHAPTER 1 – Theoretical aspects – Fundamentals	
1.1 – TOWNSEND avalanche	11
1.2 – Development of a discharge	11
1.3 – Different types of corona discharge	13
1.4 – Impulse spectra	16
1.5 – Calculation of the critical surface voltage gradient and conditions for the onset of corona on overhead lines	18

DEUXIEME PARTIE

PART 2

PERTURBATIONS EN COURANT ALTERNATIF AUX FREQUENCES RADIOPHONIQUES

AC LINES – INTERFERENCE IN RADIO-FREQUENCY RANGE

CHAPITRE 2 – <i>Formation et mesure du champ perturbateur</i>	23
2.1 – Mécanismes de formation des perturbations dans la gamme 0,15-30 MHz	23
2.2 – Propagation modale des courants H.F. ...	23
2.3 – Définition et mesure du champ perturbateur	25

CHAPTER 2 – Origin and measurement of interference field	23
2.1 – Mechanism of radio interference: 0.15 – 30 MHz	23
2.2 – Modal propagation of H.F. currents	23
2.3 – Definition and measurement of R.I. field	25

CHAPITRE 3 – <i>Principales caractéristiques du champ perturbateur</i>	31
3.1 – Définitions	31
3.2 – Spectre de fréquence du champ perturbateur	32
3.3 – Profil transversal du champ perturbateur .	34
3.4 – Distributions statistiques des niveaux perturbateurs	37
3.5 – Conclusions	42

CHAPTER 3 – Main characteristics of the noise field	31
3.1 – Definitions	31
3.2 – Frequency spectrum of the noise field ...	32
3.3 – The radio noise lateral profile	34
3.4 – Radio noise distributions	37
3.5 – Conclusions	42

CHAPITRE 4 – <i>Méthodes de prédétermination du Niveau Perturbateur dû aux conducteurs d'une ligne de transport</i> .	45
4.1 – Historique	45
4.2 – Méthodes empiriques et semi-empiriques .	46
4.3 – Méthodes analytiques	47
4.4 – Conclusion	49

CHAPTER 4 – Prediction methods of R.I. due to transmission line conductors	45
4.1 – History	45
4.2 – Empirical and semi-empirical methods ...	46
4.3 – Analytical methods	47
4.4 – Conclusions	49

CHAPITRE 5 – Niveau perturbateur dû à l'appareillage de poste et de ligne	51
5.1 – Généralités	51
5.2 – Essais en laboratoire	52
5.3 – Perturbations dues à l'appareillage	55
5.4 – Niveaux perturbateurs dus aux isolateurs et aux chaînes d'isolateurs	57
5.5 – Le problème des niveaux admissibles	63
CHAPITRE 6 – La pratique du calcul et de la mesure des niveaux perturbateurs.	69
6.1 – Le problème des limites – lignes à perturbations minimales	69
6.2 – Établissement d'une formule CIGRE pour la prédétermination du niveau perturbateur des lignes de transport	72
6.3 – Méthode de calcul du gradient superficiel des conducteurs	79
6.4 – Mesures sur le terrain	84

TROISIEME PARTIE

PERTURBATIONS AUTRES QUE RADIOPHONIQUES

Avertissement	88
CHAPITRE 7 – Perturbations en courant alternatif aux fréquences radiophoniques FM et de Télévision	89
7.1 – Généralités	89
7.2 – Perturbation active	89
7.3 – Perturbation passive	94
CHAPITRE 8 – Bruit acoustique des lignes à courant alternatif	99
8.1 – Considérations générales	99
8.2 – Niveau du bruit acoustique – Relations empiriques	100
CHAPITRE 9 – Perturbations en courant continu.	105

CHAPTER 5 – Radio interference from substation equipment and line fittings	51
5.1 – General	51
5.2 – Laboratory testing	52
5.3 – Interference caused by equipment	55
5.4 – Interference caused by insulators and insulator strings	57
5.5 – The problem of admissible levels	63

CHAPTER 6 – Interference level measurement and calculation methods	69
6.1 – Limits – Lines producing minimum interference	69
6.2 – Establishment of a CIGRE formula for predicting transmission line interference level	72
6.3 – Conductor surface gradient calculation method	79
6.4 – Field measurements	84

PART 3

INTERFERENCES OTHER THAN RADIO (NOISE)

Foreword	88
CHAPTER 7 – AC interference with FM and TV	89
7.1 – General	89
7.2 – Active interference	89
7.3 – Passive interference	94
CHAPTER 8 – AC audible noise	99
8.1 – General considerations	99
8.2 – Audible noise levels : empirical relations	100
CHAPTER 9 – DC interference	105

INTRODUCTION

Alors que l'effet de couronne fait depuis longtemps déjà l'objet d'études théoriques détaillées, sous l'angle de la formation des pertes (les travaux de Peek datent de 1920), ce n'est qu'après la dernière guerre mondiale, soit 25 ans plus tard, que l'étude des perturbations radioélectriques produites par les lignes de transport fut systématiquement entreprise. Ce décalage entre l'étude des deux aspects de l'effet de couronne n'a rien d'étonnant, car si les considérations énergétiques apparurent très tôt, les perturbations n'intervenaient pas, aux tensions inférieures à quelque 250 kV, dans le choix des conducteurs. Avec l'avènement des hautes tensions à 400 kV par contre, les perturbations radioélectriques devinrent une contrainte dont la conception et le tracé des lignes de transport eurent à tenir compte : ce sont les recherches de limitation des perturbations en effet qui imposèrent la technique des faisceaux de conducteurs. L'apparition de tensions de transport encore plus élevées, comprises entre 500 et 800 kV, et la prévision d'emploi, dans un proche futur, de tensions supérieures à 1000 kV ne pourront qu'accentuer encore l'influence de cette contrainte.

L'appareillage de poste, les accessoires de ligne, les chaînes d'isolateurs sont également des sources de perturbations radioélectriques, dont le spectre peut, dans certaines conditions, s'étendre jusqu'aux fréquences utilisées en télévision.

Plus récemment, l'étude expérimentale des gros faisceaux de conducteurs destinés aux lignes à très hautes tensions a mis en évidence une gêne acoustique, due au bruit d'effet couronne directement rayonné par les conducteurs. Alors que cette gêne était restée négligeable jusqu'à présent, elle devra vraisemblablement être prise en considération pour les lignes de l'avenir.

Enfin, l'avènement probable, dans certains pays, de transports à courant continu a conduit à étudier les perturbations radioélectriques dues à l'effet de couronne et aux installations de conversion en tension continue.

Les recherches effectuées dans ces divers domaines surtout depuis une vingtaine d'années, ont permis d'analyser et d'assez bien comprendre les différents mécanismes physiques mis en jeu pour produire ces perturbations radioélectriques. Les efforts des chercheurs pour obtenir des relations quantitatives ont abouti à établir des formules de prédétermination du niveau perturbateur en fonction des principaux paramètres de dimensionnement des lignes. Cependant, les phénomènes liés à l'effet de couronne sont également sensibles à un grand nombre de paramètres variables et difficilement mesurables, responsables de fluctuations dont le calcul ne peut pas rendre compte : seul l'aspect statistique permet alors de les appréhender.

Although line-corona has been the subject of detailed theoretical study for many years, from the point of view of power-losses, (the work of Peek dates from 1920), it is only since the 1939-45 war, 25 years later, that radio-interference caused by overhead lines has been systematically investigated. This interval between the study of the two aspects of line-corona is not surprising since considerations of interference, at voltages less than some 250 kV, had no influence on the choice of conductor, whereas power-losses were already being taken into account. With the advent of voltages as high as 400 kV, on the other hand, interference assumed an influence both on the design and choice of route of transmission lines : it was with the aim of reducing interference that bundled conductors were introduced. The appearance of still higher voltages, ranging from 500 to 800 kV and the prospect, in the near future, of UHV transmission, are further emphasising the importance of this parameter.

Substation equipment, line fittings and insulators are also possible sources of radio interference, the spectrum of which in certain conditions can extend as far as the frequencies used in television.

More recently, the experimental study of large bundles of conductors for very high voltage lines has shown that acoustic interference can be caused by corona and radiated directly from the conductors. While this type of interference has been insignificant in the past, it will most likely have to be taken into consideration for future lines.

Finally, the probable advent in certain countries of direct current transmission has led to the study of radio interference caused by d.c. corona and by d.c. convertor stations.

Research in these different sectors over the last twenty years in particular has enabled the different physical mechanisms brought into play to produce radio interference to be analysed and better understood. The efforts of researchers to find quantitative relationships have resulted in the working out of formulae predicting the interference level as a function of the main parameters of line dimensions. However, the phenomena connected with the corona effect are also sensitive to a large number of variable parameters which are both difficult to measure and responsible for fluctuations which calculation is unable to take into account : only the statistical aspect permits them to be understood.

Le guide présenté ici se propose de résumer l'état actuel des connaissances permettant d'expliquer et de calculer l'effet perturbateur des ouvrages à haute tension. Les deux premiers chapitres sont consacrés à un exposé des mécanismes fondamentaux qui sont à l'origine des perturbations radioélectriques, ainsi qu'à la définition des diverses notions et quantités utilisées dans leur étude. Les trois chapitres suivants traitent avec quelque détail des diverses caractéristiques des champs perturbateurs, présentent diverses méthodes de prédétermination existant actuellement, et étudient les perturbations dues à l'appareillage et notamment aux chaînes d'isolateurs.

Le chapitre 6 constitue le guide pratique proprement dit : il donne toutes les indications nécessaires à la prédétermination aussi précise que possible du niveau perturbateur d'une ligne donnée ou projetée, ainsi qu'à sa vérification à posteriori, sur le terrain. Il donne les règles de bonne pratique qui doivent être respectées pour que le niveau réel d'une ligne soit réduit à la valeur minimale compatible avec les lois de l'effet de couronne, et donne quelques indications relatives au délicat problème des niveaux admissibles.

Les trois derniers chapitres fournissent quelques éléments sur les gênes actuellement marginales, telles que perturbations aux fréquences télévision, bruit acoustique, perturbations dues aux transports à courant continu.

L'espoir du Groupe de Travail 36.01 est de faire de ce guide, tel qu'il est conçu, un utile instrument de travail, aussi bien pour les ingénieurs de construction des lignes et ouvrages à haute tension que pour leurs utilisateurs.

The purpose of this guide is to summarize the present state of knowledge and to enable the interference effect of high-voltage installations to be explained and calculated. The first two chapters are devoted to a description of the basic mechanisms which are at the origin of radio interference, together with definitions of the different concepts and quantities. The three following chapters deal in some detail with the different characteristics of interference fields, with interference caused by equipment and particularly by insulators, and with different current methods of prediction.

Chapter 6 constitutes the practical guide proper : it gives all the information necessary for the best possible prediction of the interference level of a given or projected line, together with its ultimate verification in the field. It gives rules for good practice, which must be respected for the actual level of a line to be reduced to the minimum value compatible with the laws of the corona effect, and gives some information relative to the question of admissible levels.

The last three chapters give some details of subsidiary types of interference, such as interference on television frequencies, acoustic noise and interference due to direct current transmission.

The hope of Working Group 36.01 is to make this guide a useful working instrument, both for designers and for users of lines and high-voltage installations.

PREMIÈRE PARTIE

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE L'EFFET DE COURONNE



PART 1

GENERAL PROPERTIES OF CORONA

CHAPITRE 1

ASPECTS THÉORIQUES PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX

1.1 – Avalanche de TOWNSEND

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation, que l'on explique de la façon suivante.

Il existe toujours dans l'air un certain nombre de paires ions⁺ -électrons libres, créés par exemple par le rayonnement cosmique ou la radio-activité naturelle. On peut noter qu'à la surface du sol, les radiations naturelles libèrent en moyenne 7 à 20 électrons libres par cm³ et par seconde. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc).

Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite. D'autres processus tel que la photo-ionisation, vont alors intervenir.

Le nombre d'électrons libres produits au cours d'une avalanche, le long d'une ligne de force du champ électrique, s'exprime par :

$$N = \exp. \int_{E_1}^{E_2} (\alpha - \eta) dl$$

où α désigne le coefficient multiplicateur d'électrons, ou premier coefficient de Townsend, et η le coefficient d'attachement aux molécules neutres ; α et η sont fonction du champ local E . L'avalanche ne peut progresser que dans les régions où α l'emporte sur η , c'est-à-dire là où le champ électrique excède une valeur critique, E_{\min} , qui en pratique est proche de 30 kV/cm.

Or au voisinage d'un conducteur d'une ligne électrique, les surfaces équipotentiellles ont une très forte courbure, et le champ électrique décroît très rapidement en fonction de la distance au conducteur. L'avalanche électronique ne peut donc se produire que dans un espace limité autour de celui-ci.

1.2 – Développement d'une aigrette

Mais pour qu'une avalanche puisse donner lieu à une aigrette suffisamment intense pour être détectable, il faut en outre qu'elle atteigne une certaine taille critique, selon un critère qui dépend de la polarité du conducteur.

CHAPTER 1

THEORETICAL ASPECTS FUNDAMENTALS

1.1 – TOWNSEND avalanche

The term "corona" is used here to cover all the phenomena connected with the appearance of conductivity in the gas surrounding a conductor at high-voltage. This conductivity is due to the phenomenon of ionization, which is explained as follows.

There is always a certain number of ion-electron pairs in the air from such causes as cosmic radiation and natural radio activity. It may be noted that at the surface of the earth natural radiation liberates an average of 7 to 20 free electrons per cm³ per second. When electrons are subjected to an electric field they are accelerated and, if the field is intense enough, the energy which they acquire becomes sufficient to cause the ionization of neutral molecules with which they collide (ionization by collision).

New free electrons are created, which, subjected to the same field, likewise ionize molecules, and lead to progressive multiplication ; other processes, including photo-ionization, become very important.

The number of free electrons produced in the course of such an avalanche along an electric field line l is expressed by :

where α is the electron multiplier coefficient or first Townsend coefficient, and η the attachment coefficient to neutral molecules. α and η are functions of the local field E . The avalanche can only progress in regions where α exceeds η , i.e. where the electric field is greater than a critical value, E_{\min} , which in practice approaches 30 kV/cm.

Close to a conductor of small radius the equipotentials have small radii of curvature and the electric field falls off rapidly away from the conductor. The volume of air in which a primary avalanche can occur is therefore limited.

1.2 – Development of a discharge

Before an avalanche can develop into a discharge with significant interference-generating properties it must reach a critical magnitude, the criterion for which is polarity-dependent.

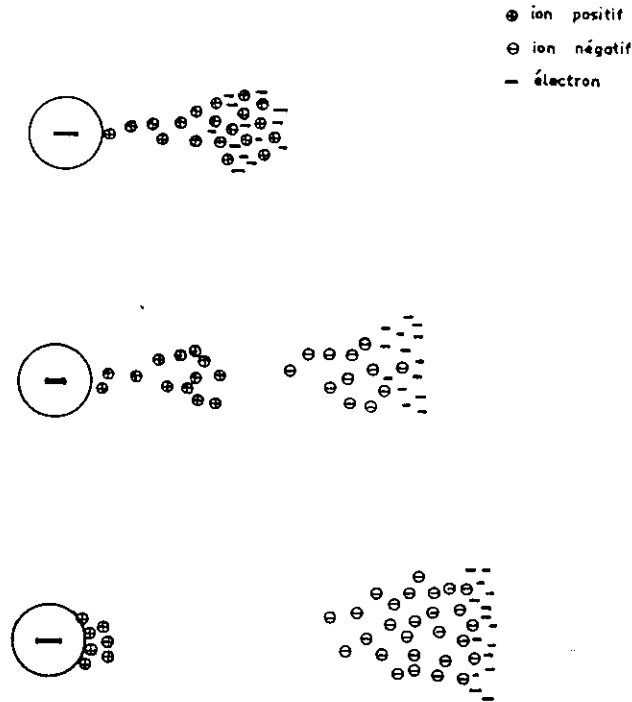


Figure 1.1.a

Développement en 3 stades de l'effluve négatif
Development in 3 steps of a negative discharge.

1.2.1 – Polarité négative (figure 1.1 a)

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 multiplicateur.

Le phénomène d'ionisation primaire est alors limité à un volume bien défini autour du conducteur.

La taille critique N_c de l'avalanche sera atteinte lorsque celle-ci pourra s'auto-entretenir, c'est-à-dire lorsqu'elle pourra créer, sous l'effet de processus secondaires de nouveaux électrons ionisants. Soit alors γ (second coefficient de Townsend) la probabilité pour qu'une collision ionisante crée au moins un tel électron. Comme l'avalanche contenant N_c électrons a été formée au cours de $(N_c - 1)$ collisions, on voit aisément que le critère d'auto-entretien peut s'écrire

$$\int_{E_0}^{E_{min}} (\alpha - \eta) dl = \ln(1 + 1/\gamma)$$

On peut en déduire, connaissant la configuration du champ électrique, la valeur E_0 que doit présenter le champ superficiel de l'électrode.

Le champ E_0 est appelé *champ superficiel critique*.

1.2.2 – Polarité positive (figure 1.1 b)

En polarité positive du conducteur, l'avalanche électronique prend au contraire naissance dans l'espace voisin, et se développe vers le conducteur. Les électrons sont absorbés par celui-ci, laissant derrière eux un nuage d'ions positifs, beaucoup moins mobiles ; tout se passe comme si le conducteur était prolongé par une pointe positive, qui permet ensuite la formation d'une nouvelle

1.2.1 – Negative conductor (Fig. 1.1.a)

With a negative conductor, the electronic avalanche develops away from the conductor ; it stops at a certain distance where the field is no longer sufficient to provide the multiplying effect.

The phenomenon of primary ionization thus occurs within a well-defined volume of air.

When a secondary process operates, which creates an additional activating electron, with probability γ per ionizing collision, then a criterion for self-maintenance can be written, where γ is the second Townsend coefficient.

This relation is based on $(N_c - 1)$ ionizing collisions in an avalanche containing N_c , the critical number of electrons.

The value E_0 , which the surface voltage gradient of the conductor must attain, can be deduced from this relation, if the field configuration is known.

The field E_0 is called the critical surface voltage gradient.

1.2.1 Positive conductor (Fig. 1.1.b)

With a positive conductor, the electronic avalanche has its origin in the air around the conductor and develops towards it. The electrons are absorbed by the conductor, leaving behind a cloud of much less mobile positive ions ; the result is a positively charged protrusion, from the conductor, which leads to the formation of a new avalanche ahead of the preceding one. This process of

avalanche un peu en avant de la précédente. Ce processus d'ionisation se propage autour du conducteur nettement plus loin que les avalanches de polarité négative, et est appelé "streamer" (la traduction française qui paraît s'imposer actuellement est "dard").

La taille critique de l'avalanche est ici la condition de propagation de ce streamer : elle est de l'ordre de 10^8 électrons.

Cependant, seule la présence d'un phénomène auxiliaire, tel la photoionisation, permet d'expliquer la grande vitesse de développement des streamers ainsi que leur propagation dans des régions où l'intensité du champ électrique est relativement modérée (1).

ionization propagates away from the conductor much further than the avalanches of negative polarity, and is called a streamer.

Here the critical magnitude of the avalanches is the condition for the propagation of this streamer : it is in the order of 10^8 electrons.

The fact that the streamer extends, at high velocity, far beyond the region of large electric field intensity is explicable on the basis that secondary processes, such as photoionization, operate at its head (1).

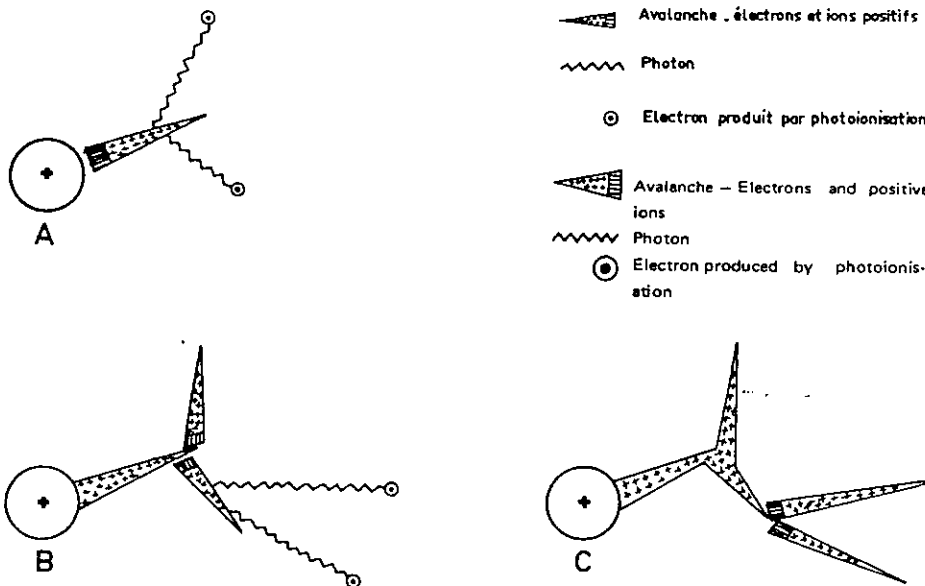


Figure 1.1.b

Développement schématique de l'effluve positif en 3 stades
Schematic development in 3 steps of a positive discharge.

Malgré des différences fondamentales existant entre les phénomènes d'ionisation décrits ci-dessus et les avalanches autour d'une électrode négative, le champ superficiel critique est sensiblement le même.

In spite of the fundamental differences existing between positive and negative ionization phenomena the critical surface voltage gradient is approximately the same for both.

1.3 – Différents types de décharge par effet de couronne

1.3 – Different types of corona discharge.

Sur un conducteur de dimension réelle, différents modes d'effet de couronne apparaîtront successivement dans l'hypothèse où la tension appliquée croît progressivement. Si tous les modes d'émission présentent un caractère lumineux et contribuent aux pertes par effet de couronne, seulement quelques-uns de ceux-ci produisent des parasites radioélectriques.

With a conductor of realistic dimensions, assuming that the voltage is progressively increased, numerous different discharge processes occur. Only some of these are able to generate interference but all are luminous to some extent and contribute to the corona losses.

(1) Des molécules d'azote, excitées par collision électronique, peuvent émettre des photons d'énergie supérieure à 13 eV en retombant au niveau fondamental. Comme l'énergie d'ionisation de l'oxygène est de 12,2 eV, on peut admettre qu'il existe une intense photoionisation dans l'air, mélange d'azote et d'oxygène. Un processus de cette nature crée un flux d'électrons bien supérieur à celui dû aux radiations naturelles ce qui favorise évidemment la formation d'avalanches en tête du streamer.

(1) Nitrogen molecules, previously excited by electron-collisions, can emit photons of 13 eV or more in falling to ground state. Since the ionization potential of oxygen is 12.2 eV it can be assumed that photoionization occurs from this cause in air, which is a mixture of nitrogen and oxygen. A process of this kind is able to generate a much larger flux of electrons, where they are most likely to multiply, than is natural ionizing radiation.

En pratique l'apparition des décharges visibles ne signifie pas nécessairement qu'il y a production de parasites : selon le type de décharge considéré, les interférences radioélectriques produites ne présentent ni la même amplitude, ni la même distribution spectrale.

The occurrence of visible discharges in practice does not, therefore, necessarily mean that interference is arising, neither do all noise generating discharges give rise to the same distribution of frequencies and amplitudes.

Tableau 1-1 -- Table 1-1
 Modes de décharges observées sur des lignes de transport
 Corona discharges on transmission lines

Emission	Mode Discharge - type	Impulsions-pulses		Influence		Apparition Occurrence	Aspect physique - Physical appearance
		Amplitude Repetition	Front Spectr.	Pertes Losses	N.P R I		
NEGATIVE	Impulsions de TRICHEL TRICHEL Pulses ①	≈ 10 mA 10-100 kHz	≈ 10 ns Etendu large	Faible Low	Faible Low	Fréquente common	
	Lueur négative Negative glow ②	Mode continu Continuous avalanche process		Importante Very high	Non No	Peu fréquente uncommon	
	Décharges prédisruptives Pre breakdown streamers ③	≈ 100 mA ≈ 1kHz	Moyen Average	Importante Very	High	pour (UsUn for)	
	Impulsions positives Onset streamers ④	≈ 100 mA ≈ 1kHz	≈ 30ns étroit narrow	Faible Low	Importante High	Fréquente common	
POSITIVE	Lueur d'HERMSTEIN HERMSTEIN glow ⑤	Mode continu Continuous avalanche process		Importante Very high	Non No	Peu fréquente uncommon	
	Décharges prédisruptives Pre breakdown streamers ⑥	Très grande Very high Faible low		Importante Very high		pour (UsUn for)	

Les différents types de décharge sont rassemblés dans le tableau 1-1 de même que leurs principales conséquences du point de vue électrique.

Le mode impulsionnel des décharges, tant négative que positive est dû à un mécanisme de relaxation (accumulation de charges d'espace, blocage de l'avalanche, dissipation des charges d'espace) dont nous donnons ci-dessous une brève description.

The various relevant discharges are summarized, together with their likely electrical consequences, (Table 1.1.).

The transient and repetitive nature of the discharges, both negative and positive, arises from a relaxation process (space-charge formation, blocking of the avalanche, space-charge decay) which is briefly described below.

1.3.1 - Impulsions négatives (impulsions de Trichel) (figure 1.2.a)

On a montré en (1.2) que les avalanches se développant à partir d'un conducteur négatif restaient confinées, du fait de la décroissance du champ électrique, dans un volume relativement restreint autour du conducteur. Les électrons s'attachent ensuite aux molécules gazeuses pour

1.3.1 - Trichel (Negative) Pulses (Fig. 1.2.a)

It has been stated (1.2) that avalanches propagating from a negative conductor are confined within a relatively restricted volume adjacent to the conductor because of the fall-off in the field. Electrons thus attach to gaseous molecules to form negative ions while the posi-

former des ions négatifs, pendant que les ions positifs, également fournis par l'avalanche, se concentrent au voisinage immédiat du conducteur.

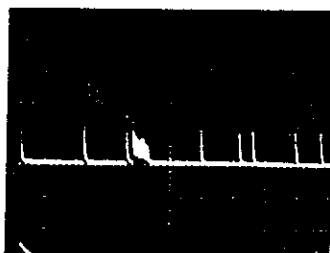
On est donc en présence d'un nuage d'ions des deux polarités qui, compte tenu de leur faible mobilité, s'accumulent devant le conducteur.

tive ions, also formed by the avalanche, concentrate close to the conductor.

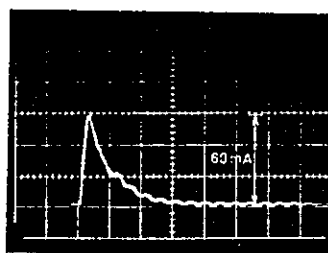
A cloud of ions of both polarities accumulates around the conductor because of the low mobilities of the ions.



a) Visual aspect of Trichel pulses (negative discharges) on the surface of a stranded conductor



b) Pulse train (sweep speed 0.2 ms/c)



c) Detail of a pulse (sweep speed 50 ns/c)

Figure 1.2.a

Oscillogramme d'impulsions de Trichel

- a) Aspect visuel des impulsions de Trichel (aigrettes négatives) à la surface d'un conducteur toroné
- b) Train d'impulsions (vitesse de balayage : 0,2 ms/c)
- c) Détail d'une impulsion (vitesse de balayage 50 ns/c)

Visual aspect and oscillogrammes of Trichel pulses.

Cependant, comme les ions positifs seront rapidement neutralisés (par restitution d'électrons au contact du conducteur), on observe un excès d'ions négatifs, et par conséquent une réduction du champ électrique entre le conducteur et le nuage négatif. Cette réduction bloque la décharge, jusqu'au moment où les ions négatifs, emportés suffisamment loin du conducteur, permettront à nouveau le démarrage d'un nouveau processus d'avalanche.

L'intensité du champ électrique agit sur la quantité des charges libérées et sur la durée de dispersion du nuage négatif.

Ceci explique que lorsque la différence de potentiel appliquée au dispositif augmente, on observe un accroissement de l'intensité de courant et une élévation du taux de répétition des impulsions de Trichel.

Au-delà d'une fréquence de répétition dite "fréquence critique" le mode impulsionnel fera place à un mode continu d'ionisation.

However, as the positive ions will be rapidly neutralized by their contacts with the conductor, the excess negative ions reduce the electric field around the conductor. This reduction quenches the discharge up to the time when the negative ions are repelled sufficiently far from the conductor, to allow the development of a new avalanche.

The field intensity determines the amount of charge liberated and the time taken for the negative cloud to disperse.

This explains the increases in current and in repetition frequency of the Trichel pulses with the potential difference between the electrodes.

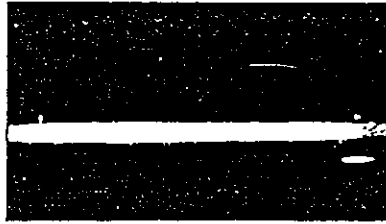
Above the "critical" repetition frequency the pulsating mode gives way to continuous ionization.

Impulsions positives (figure 1.2 b)

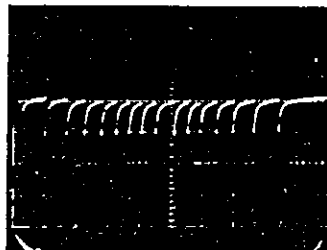
Dans le cas des impulsions positives, où l'avalanche se développe depuis l'extérieur vers le conducteur, les électrons sont en grande majorité directement absorbés par ce dernier, et peu d'ions négatifs sont formés.

1.3.2 – Positive Pulses. (Fig 1.2.b)

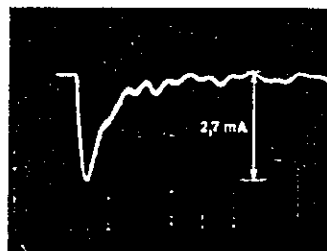
In this case the avalanche develops towards the conductor and most of the electrons are directly absorbed, few negative ions consequently being formed.



a) Visual aspect of large positive discharges on the surface of a stranded conductor



b) Pulse train (sweep speed 0.2 ms/c)



c) Detail of a pulse (sweep speed 200 ns/c)

Figure 1.2.b

Oscillogramme des grandes aigrettes positives

- a) Aspect visuel de grandes aigrettes positives à la surface d'un conducteur toroné
 b) Train d'impulsions (vitesse de balayage 0,2 ms/c)
 c) Détail d'une impulsion (vitesse de balayage 200 ns/c)

Visual aspect and oscillogrammes of prebreakdown streamers.

Les ions positifs qui s'accumulent le long d'un streamer forment par contre un important nuage de charges d'espace positives. Ici encore, les charges réduisent suffisamment l'intensité du champ électrique aux environs immédiats du conducteur pour arrêter l'ionisation jusqu'au moment où le nuage emporté loin du conducteur permet à nouveau le démarrage d'un processus d'avalanche.

Les charges libérées par chaque impulsion positive sont beaucoup plus nombreuses, mais le taux de répétition de ces impulsions est nettement plus petit que dans le cas des effluves de Trichel.

On the other hand, the positive ions, which accumulate along a streamer, constitute a substantial positive space-charge. Here again the charge reduces the field intensity immediately around the conductor sufficiently to stop ionization up to the time where dispersion of the ion cloud allows the onset of a new avalanche.

Each positive pulse liberates many more ions than in the Trichel pulse case, but the repetition rate is noticeably less.

1.4 – Spectres de fréquences des impulsions

La brusque formation et le déplacement rapide des charges libres au voisinage du conducteur provoquent

1.4 – Impulse spectra

The abrupt formation and rapid displacement of free charges around the conductor cause a current-pulse to

dans celui-ci un appel de courant, dont la nature est impulsionnelle. L'expression analytique suivante représente correctement une telle impulsion :

$$i(t) = I_0 (e^{-t/t_q} - e^{-t/t_f})$$

I_m , valeur de crête, vaut pour ce type d'impulsions environ $0,6 I_0$.

t_f est la constante de temps de front

t_q est la constante de temps de queue.

Pour les impulsions représentées à la figure 1.2, ces paramètres prennent les valeurs suivantes :

Impulsion	t_f (ns)	t_q (ns)	I_m (mA)
Négative	6	45	2,7
Positive	30	180	60

Pulse polarity	t_f (ns)	t_q (ns)	I_m (mA)
Negative	6	45	2,7
Positive	30	180	60

flow in it. The following analytical expression represents correctly such a pulse :

I_m pulse amplitude, is about $0.6 I_0$ for this type of pulse.

t_f is the front time-constant.

t_q is the tail time-constant

For the pulses shown in Figure 1.2 the above parameters are approximately :

On remarquera que, pour ce type d'impulsion, la durée jusqu'à la crête vaut environ $2,3 t_f$.

Selon l'analyse de Fourier, ces impulsions sont représentables par un spectre de fréquence ; l'intensité spectrale $S(\omega)$ est liée à la forme de l'impulsion $i(t)$ par l'expression

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} i(t) e^{-j\omega t} dt$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation de la fréquence considérée f .

La figure (1.3) indique alors l'allure et la valeur relative des spectres de fréquence attachés à une impulsion positive (courbe 1) et à une impulsion négative (courbe 2). On constate en particulier que, si le spectre de l'impulsion négative présente une intensité spectrale environ 80 fois plus faible (soit -38 dB) que celle de l'impulsion positive, il s'étend davantage vers les fréquences plus élevées : la "fréquence de coupure" (fréquence pour laquelle l'intensité spectrale est à -3 dB par rapport à l'asymptote horizontale) est de l'ordre de 1 MHz pour les impulsions positives, mais atteint $3,5$ MHz pour les impulsions négatives.

En mesure CISPR, la différence entre le bruit engendré par les impulsions positives d'une part, négatives d'autre part, est de l'ordre de 15 à 20 dB au lieu des 38 dB théoriques ; la raison en est que les impulsions négatives sont beaucoup plus nombreuses, comme le montre clairement la comparaison des figures 1.2a et 1.2b.

Ainsi, aux fréquences radiophoniques ($f < 3$ MHz) on voit que ce sont bien les impulsions positives qui sont responsables de l'effet perturbateur des conducteurs. Vers

It can be noticed that for such pulses, the duration up to the maximum amplitude is about $2.3 t_f$.

The pulses may be represented by a Fourier frequency spectrum : The spectral intensity $S(\omega)$ is related to the pulse shape $i(t)$ by the expression :

where $\omega = 2\pi f$ is the angular frequency.

Figure 1.3 shows the frequency spectra and relative amplitudes relevant to positive (Curve 1) and negative (Curve 2) pulses respectively. It is seen that, although the spectral intensity of the negative pulse is some 80 times less than that of the positive (-38 dB), nevertheless it contains much higher frequency components. The "cut-off" frequency (defined as that for which the spectral intensity is 3 dB below the horizontal asymptote) is about 1 MHz for positive, but extends to 3.5 MHz for negative pulses.

When measured, according to CISPR recommendations, the difference between interferences caused by positive and negative pulses is only 15 to 20 dB instead of 38 dB as stated before. The reason is that the negative pulses are far more numerous, as can be seen on Figures 1.2.a and 1.2.b.

Thus it is seen that positive impulses are responsible for conductor-generated interference at broadcast frequencies ($f < 3$ MHz). Towards 10 MHz the relative

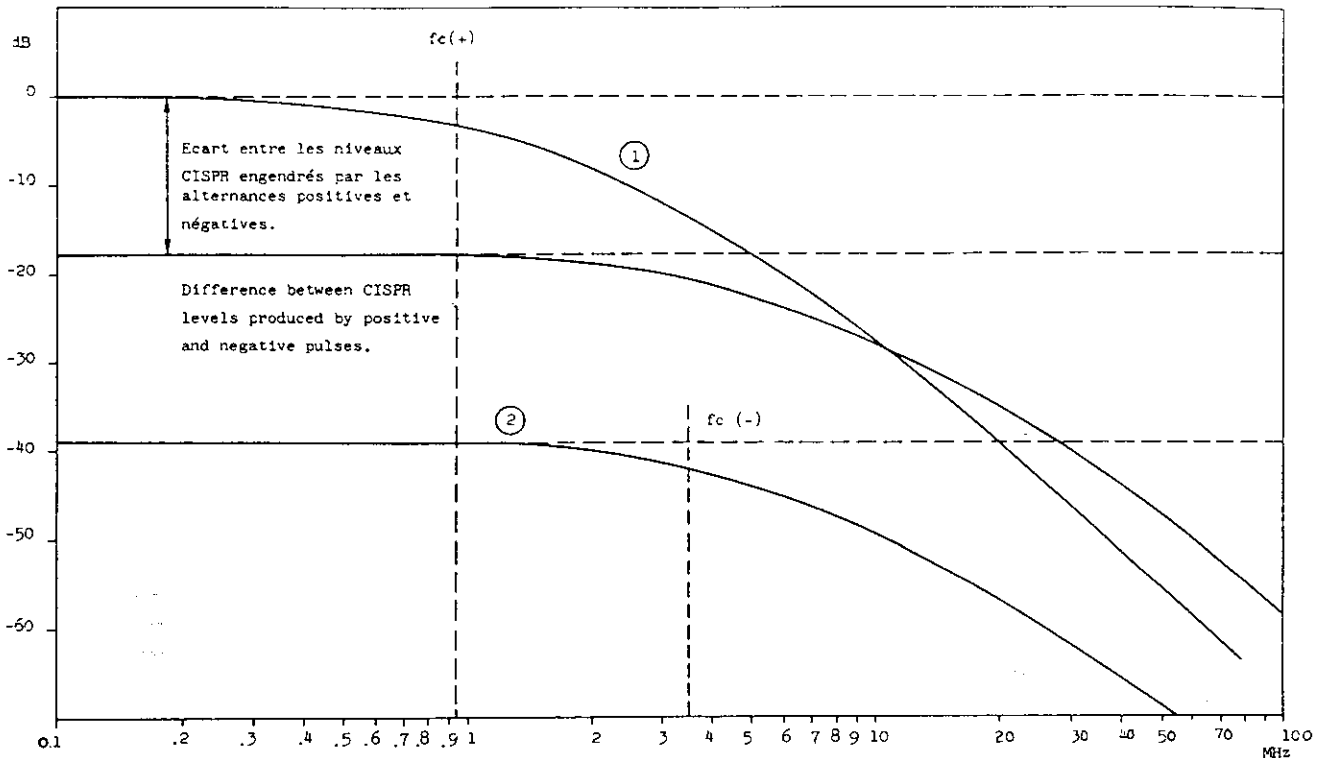


Figure 1.3
Spectre de fréquence des impulsions (+) (courbe 1) et (-) (courbe 2)
Frequency spectra of positive pulses (curve 1) and negative pulses (curve 2).

10 MHz, l'intensité spectrale relative des spectres positifs et négatifs s'inverse, et aux fréquences FM et TV, ce sont par conséquent les impulsions négatives qui deviennent les plus perturbantes. On s'explique alors certains cas de perturbations de réception TV par le seul effet couronne des conducteurs.

spectral intensities reverse and it is therefore negative pulses which are most troublesome at frequencies relevant to FM and TV. This is a possible explanation of the TV interference generated by conductor-corona alone.

1.5 – Calcul du champ superficiel critique et conditions d'apparition de l'effet de couronne sur les lignes aériennes.

Pour déterminer le champ critique d'un conducteur cylindrique, on peut employer la formule de Peek, qui est la plus connue. Elle a pour expression :

$$E_c \text{ (kV/cm)} = 31 \delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right)$$

(en tension alternative, E_c est la valeur de crête du champ critique) r est le rayon du conducteur, en cm.

$$\delta = \frac{3,92 p}{273 + t} \text{ est la densité relative de l'air.}$$

($\delta = 1$ pour $p = 76 \text{ cm Hg}$ et $t = 25^\circ \text{C}$).

L'état de surface du conducteur est très important : la relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces polies.

Sur les lignes aériennes on est cependant loin de cette situation idéale. A la périphérie d'un conducteur multibrins, le champ électrique varie de façon très sensible, passant par un maximum le long des génératrices extérieures des brins et diminuant fortement dans les angles rentrants.

1.5 – Calculation of the critical surface voltage gradient and conditions for the onset of corona on overhead lines.

To determine the onset gradient E_c of a cylindrical conductor, Peek's well-known formula may be used. It is expressed as :

For AC voltages E_c is the peak value of the field intensity, r is the radius of the conductor, in cm.

$$\delta = \frac{3,92 p}{273 + t} \text{ is the relative air density.}$$

($\delta = 1$ for $p = 76 \text{ cm Hg}$ and $t = 25^\circ \text{C}$).

The surface state of the conductor is very important : the preceding relationship is only true for smooth surfaces.

On overhead lines this ideal situation is far from being the case. At the circumference of a stranded conductor the electric field varies quite appreciably, passing through a maximum along external generators of the strands and decreasing greatly in re-entrant angles.

Les imperfections de surface constituent le facteur déterminant en pratique. On constate, en effet, sur les lignes en exploitation et sur les lignes expérimentales que le champ critique est beaucoup plus faible que celui des conducteurs parfaits. Cela est dû à des irrégularités inévitables de surface, se produisant lors de la fabrication des câbles, et de leur mise en place sur les pylônes. Tous ces défauts conduisent à des concentrations locales du champ électrique et, par conséquent, à un champ critique plus faible. Ces influences sont difficilement chiffrables et on ne peut en tenir compte que par l'introduction d'un coefficient moyen d'état de surface déduit d'essais expérimentaux.

Les conditions atmosphériques jouent également un rôle prépondérant. Par temps de pluie, de brouillard, de rosée, il y a formation de gouttes d'eau à la surface du conducteur ; elles ont également pour effet de réduire la valeur du champ critique.

On peut définir un coefficient d'état de surface ou coefficient de réduction du champ électrique d'apparition de l'effet de couronne ($m < 1$). Compte tenu des multiples facteurs qui peuvent influencer la valeur de ce coefficient m , sa détermination est très malaisée et requiert de nombreuses expériences et résultats d'exploitation.

Le toronage d'un conducteur de ligne aérienne par exemple, introduit un coefficient d'état de surface de l'ordre de 0,9. La pluie réduit ce coefficient à environ 0,6 ou même moins dans certains cas.

Surface imperfections constitute the decisive factor in practice. It is found, in general, on operational lines and on experimental lines that the onset gradient is much lower than that of ideal conductors. This is due to inevitable surface irregularities produced during the manufacture of the conductors and during stringing. All these defects lead to local concentrations of the electric field and, consequently, to a lower onset voltage. These influences are difficult to quantify and are usually taken into account by the introduction of an average coefficient for the surface state, deduced from experimental tests.

Atmospheric conditions likewise play a leading part. In rainy weather, fog and dew, drops of water form on the surface of the conductor. Their effect is also to reduce the onset voltage of the line.

A surface state coefficient ($m < 1$) for the induction of the onset voltage can be defined. This coefficient is difficult to determine, other than from experiments and operational results, because of the numerous factors which influence it.

A typical value of m , caused by stranding alone, is 0.9 ; rain may reduce this to 0.6 or even below.

DEUXIÈME PARTIE

PERTURBATIONS EN COURANT ALTERNATIF
AUX FRÉQUENCES RADIOPHONIQUES

PART 2

A C LINES - INTERFERENCE IN RADIO-FREQUENCY RANGE

CHAPITRE 2

FORMATION ET MESURE DU CHAMP PERTURBATEUR

Ce chapitre se propose de définir les principales notions et quantités utilisées dans l'étude des perturbations aux fréquences radiophoniques. Son but est d'éviter les ambiguïtés dans l'interprétation et la présentation des résultats, et de faciliter, pour les lecteurs non avertis, la compréhension des textes de ce guide.

2.1 – Mécanisme de formation des perturbations dans la gamme de fréquence 0,15 – 30 MHz.

Le rayonnement électromagnétique direct des aigrettes elles-mêmes ne contribue pratiquement pas au niveau perturbateur dans cette gamme de fréquences. Ce sont les impulsions de courant produites par ces décharges (voir 1.3) qui, en se propageant le long du conducteur, causent les perturbations. Les composantes spectrales des impulsions auront un comportement différent, selon la longueur d'onde qui leur est associée.

Tant que cette longueur d'onde est grande devant les dimensions transversales de la ligne, on peut négliger la propagation transversale des potentiels : on peut alors considérer qu'à la composante spectrale de courant est associé un système de deux champs orthogonaux, l'un électrique et l'autre magnétique, qui se propagent ensemble le long de la ligne ; ils forment une onde plane guidée, dont le vecteur-énergie de Poynting est parallèle à la ligne. Compte tenu de l'atténuation, relativement faible, de cette propagation, la part dominante du champ perturbateur est due à la superposition des effets de toutes les aigrettes réparties sur plusieurs dizaines de kilomètres de part et d'autre du point de mesure et non à l'effet direct des aigrettes proches.

En ce qui concerne les composantes spectrales dont les "longueurs d'onde" se rapprochent des dimensions transversales de la ligne, le mécanisme de propagation s'apparente au rayonnement des antennes. Il n'y a pratiquement pas de propagation guidée.

2.2 – Propagation modale des courants H.F.

On sait que, dans le cas d'une ligne monophasée au-dessus du sol, il y a propagation simultanée d'une onde de tension $u(t)$ et d'une onde de courant $i(t)$. En régime sinusoïdal, l'amplitude et la phase de ces deux grandeurs sont liées par l'expression :

$$U(\omega) = Z I(\omega) \quad (1)$$

où Z , également fonction de la pulsation ω , est l'impé-

CHAPTER 2

ORIGIN AND MEASUREMENT OF INTERFERENCE FIELD

The purpose of this chapter is to outline the main concepts and quantities used in the study of radio interference. The intention is to avoid ambiguity in the interpretation and presentation of results, and to provide a straightforward explanation of the terms, for non specialist readers.

2.1 – Mechanism of radio interference : 0.15 – 30 MHz.

The direct electromagnetic radiation from the coronaplumes themselves in practice does not contribute to the interference-level, in this range of frequencies. The interference is caused by the propagation, along the conductor, of the current-pulses caused by the discharges (1.3). Each spectral component of the pulses will behave differently, depending on its associated wavelength.

When this wavelength is long in comparison with the clearances the lateral propagation of the potentials can be neglected. A system of two orthogonal fields, associated with this spectral current component, one electrical and the other magnetic, can be considered to propagate along the line. This constitutes a guided plane wave, the Poynting energy vector of which is parallel to the line. Taking into account the relatively low attenuation of this propagation, the interference field is dominated by the aggregation of the effects of all the discharges spread over some tens of kilometres on both sides of the measuring point and not by the direct effect of local discharges.

With regard to spectral components the wavelengths of which are close to, or less than, line clearance, the propagation mechanism is explicable by antenna radiation theory. There is practically no guided propagation.

2.2 – Modal propagation of H.F. currents.

In the case of a single-phase line mounted above ground there is simultaneous propagation of a voltage wave, $u(t)$ and a current wave, $i(t)$. For pure sinusoids, the amplitudes and phases of the two quantities are related by the expression

$$U(\omega) = Z I(\omega) \quad (1)$$

where Z , also a function of ω , is the surge impedance of

dance d'onde de la ligne. Au cours de leur propagation, les deux ondes subissent une atténuation, exprimée par un coefficient d'atténuation commun α , tel que

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_0 e^{-\alpha x} \\ I_x &= I_0 e^{-\alpha x} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

x étant la distance de propagation.

Dans le cas d'une ligne polyphasée; il est encore possible de définir des impédances d'ondes, mais l'expression (1) prend la forme matricielle.

$$\{U\} = [Z] \{I\} \quad (3)$$

où $\{U\}$ et $\{I\}$ sont les matrices unicolonnes d'un système de tension quelconque et du système de courants correspondant, et $[Z]$ est la matrice des impédances d'onde. Les termes diagonaux de cette matrice sont les impédances d'onde propres, les termes non diagonaux sont les impédances de couplage ou impédances mutuelles.

L'expérience montre alors qu'un système quelconque de tensions ou de courants se propage en se déformant, c'est-à-dire que l'atténuation varie le long de la distance de propagation, et ceci de façon différente sur les différents conducteurs. Pour rendre l'étude de la propagation possible, on est conduit à admettre qu'il existe certains systèmes particuliers de tensions et de courants qui se propagent sans se déformer, avec une atténuation constante et bien définie : ce sont les modes. Un système quelconque peut être considéré comme une combinaison linéaire de ces modes, et c'est l'atténuation propre à chacun d'eux qui rend compte de la distorsion du système initial.

La théorie complète des modes est assez difficile à établir et à mettre en oeuvre, et plusieurs approches, plus ou moins complètes, ont été faites. Le principe général en est toujours le suivant : les équations de propagation que l'on obtient pour une ligne polyphasée sont des équations différentielles à plusieurs variables, dans lesquelles les courants ou tensions attachés aux divers conducteurs sont couplés, de façon semblable à ce que montre l'équation (3). On cherche alors à obtenir l'équation différentielle à une seule variable d'un schéma équivalent monophasé, c'est-à-dire une équation différentielle qui exprime de façon identique les conditions de propagation le long de chaque phase. En analyse matricielle, ce résultat est obtenu par la technique de la diagonalisation et de la recherche des valeurs propres des matrices d'impédances.

Les difficultés proviennent de ce qu'on a affaire, lorsqu'on veut tenir compte des pertes en ligne, à des matrices complexes, et qu'il n'est pas toujours aisé d'écrire les termes complexes de ces matrices. Il n'est pas question dans le cadre de ce guide, d'entrer dans le détail de ces méthodes, mais nous allons tenter de donner, dans le cas simple de la propagation sans pertes, une notion approximative de la signification physique des modes.

Dans le cas d'une ligne triphasée par exemple, ondes de tension V_i et ondes de courant I_i des conducteurs sont liés par le système d'équation suivant, qui n'est autre que l'équation (3) développée :

the line. The waves are attenuated, during propagation, by a common coefficient α , where

x being the distance propagated.

For polyphase lines, it is still possible to define surge-impedances, but (1) takes the matrix form.

$$\{U\} = [Z] \{I\} \quad (3)$$

where $\{U\}$ and $\{I\}$ are the column matrices of any voltage and corresponding current system $[Z]$ is the matrix of surge impedances. The diagonal terms of this matrix are the self surge impedances and the non-diagonal terms are the coupled impedances.

Experience shows that any system of voltages or currents becomes distorted in propagation, i.e. the attenuation varies with the distance propagated and differently for each conductor. To simplify calculation of the propagated signal certain special systems of voltage and current are assumed which propagate without distortions, i.e. with constant attenuation : these are the modes. Any system can be treated as a linear sum of these modes and the separate modal attenuations used to take account of the distortion from the initial system.

The complete theory of modes is somewhat difficult to apply and several approaches, more or less rigorous, have been made. The general principle is as follows : the equations of propagation for a polyphase line are differential equations with several variables in which the currents and voltages related to different conductors are linked, by equation (3). The object is to derive the differential equation with single variable of an equivalent single-phase system, i.e. which expresses identically the propagation conditions for each phase conductor. By matrix analysis this is obtained by diagonalization and calculations of eigenvalues from the impedance matrices.

The principal difficulties are caused, when taking account of line-losses, by the fact that the matrix terms become complex. The details will not be stated here but an attempt will be made to give a rough idea of the physical meaning of the modes in the simplified case of lossless propagation.

For example, in a 3-phase line, voltage waves V_i and current waves I_i on the conductors are related by the following development of equation (3).

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 + Z_{13} i_3 \\ V_2 &= Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2 + Z_{23} i_3 \\ V_3 &= Z_{31} i_1 + Z_{32} i_2 + Z_{33} i_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Nous dirons alors qu'un mode est un système tel que les impédances apparentes d'onde soient les mêmes pour chaque conducteur, c'est-à-dire, tel que :

$$\frac{V_1}{i_1} = \frac{V_2}{i_2} = \frac{V_3}{i_3} = Z_0$$

Si nous portons ces valeurs dans le système d'équations (4) nous obtenons le nouveau système :

$$\left. \begin{aligned} (Z_{11} - Z_0) i_1 + Z_{12} i_2 + Z_{13} i_3 &= 0 \\ Z_{21} i_1 + (Z_{22} - Z_0) i_2 + Z_{23} i_3 &= 0 \\ Z_{31} i_1 + Z_{32} i_2 + (Z_{33} - Z_0) i_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

On voit que ce système peut être résolu à condition de considérer Z_0 comme la valeur propre de la matrice des impédances ; les modes ne sont alors autre chose que les vecteurs propres de cette matrice. Il y a autant de modes que de conducteurs en présence, soit 3 modes pour une ligne triphasée.

L'expérience a bien mis en évidence les propriétés de conservation et de constance de l'atténuation de ces modes, donc leur réalité physique.

Dans le cas d'une ligne en nappe horizontale on peut caractériser ces modes par les valeurs suivantes :

<ul style="list-style-type: none"> - mode homopolaire (+ 1, + 1, + 1) : 2 à 4 dB/km - mode bipolaire (+ 1, 0, - 1) : 0,2 à 0,4 dB/km - mode interphase (+ 1, - 2, + 1) : 0,05 à 0,15 dB/km 	}	Atténuation pour un sol de 100 $\Omega \cdot m$ de résistivité et une fréquence de 0,5 MHz
<ul style="list-style-type: none"> - homopolar mode (+ 1, + 1, + 1) : 2 - 4 dB/km - bipolar mode (+ 1, 0, - 1) : 0.2 - 0.4 dB/km - interphase mode (+ 1, - 2, + 1) : 0.05 - 0.15 dB/km 	}	Attenuation for 100 $\Omega \cdot m$ earth-resistivity and frequency of 0.5 MHz

It is then stated that a mode is a system such that the apparent surge impedances are the same for each conductor, thus

Substituting into (4) we obtain

This is soluble on consideration of Z_0 as the eigenvalue of the impedance matrix : the modes are the eigenvectors of this matrix. There are as many modes as conductors, e.g. 3 for a 3-phase line.

Experiment confirms the constant attenuation, i.e. the conservation, of these modes, and thus their physical reality.

In the case of a horizontal configuration the modes are

2.3 - Définition et mesure du champ perturbateur.

2.3.1 - Réponse des appareils de mesure.

L'effet perturbateur dépend essentiellement du rapport entre les intensités respectives du signal et du bruit (on dit "rapport signal sur bruit"). Cette notion reste valable quelle que soit la nature de leur grandeur ; champ électromagnétique, champ acoustique, etc.

Afin de caractériser correctement ce rapport signal sur bruit, il convient de définir le bruit par une quantité mesurable. En général, l'intensité instantanée $s(t)$ d'un bruit varie continuellement et de façon erratique ; mais si son énergie moyenne, relevée pendant une durée T quelconque suffisamment longue (par exemple une seconde), est constante, on dit de ce bruit qu'il est *aléatoire stationnaire*. Utilisant l'analyse spectrale, on peut alors passer de l'espace temporel $s(t)$ à l'espace fréquentiel $h(\omega)$. Le théorème de Parseval donne l'équivalence énergétique entre les deux représentations du bruit :

2.3. - Definition and measurement of R.I. field

2.3.1 - Response of receivers.

The quality of reception depends basically on the ratio between the respective intensities of the signal and of the noise, the "signal/noise ratio". This concept remains valid whatever the nature of the signal and noise, and covers both electromagnetic and acoustic fields.

To characterize this signal/noise ratio correctly, it is necessary to define the noise by means of a measurable quantity. In general, the instantaneous intensity $s(t)$ of a noise varies continually and in an erratic manner ; but if its average energy plotted for any sufficiently long time T (e.g. one second), is constant this noise is called stationary random. Using spectral analysis, one can then pass from the temporal space $s(t)$ to the frequential space $h(\omega)$. Parseval's theorem gives the energy equivalence between the two noise representations :

$$\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h^2(\omega) d\omega \quad (1)$$

$h^2(\omega)$ est la densité spectrale du bruit à la fréquence $f = \frac{\omega}{2\pi}$

$h^2(\omega)$ is the spectral density of the noise at the frequency $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Ce théorème montre en particulier que la valeur efficace b de la partie du bruit contenue dans une bande de fréquence étroite $\Delta\omega$, centrée sur une fréquence $\omega_0/2\pi$, s'exprime par :

This theorem shows in particular that the r.m.s. value b of the part of the noise contained in a narrow frequency band $\Delta\omega$, centred on a frequency $\omega_0/2\pi$, is expressed by :

$$b = \sqrt{\frac{h^2(\omega) \Delta\omega}{2\pi}} \quad (2)$$

Un appareil de mesure de bruit est essentiellement un voltmètre sélectif, caractérisé par une bande passante $B = \frac{\Delta\omega}{2\pi}$ et que l'on peut accorder sur une fréquence centrale $f = \omega_0/2\pi$ quelconque.

A noise measuring set is basically a selective voltmeter, characterized by a pass band $B = \frac{\Delta\omega}{2\pi}$, which can be tuned to a centre-frequency $f = \omega_0/2\pi$.

Raccordé à une antenne ou à un cadre, cet appareil devient sensible à la composante électrique ou magnétique d'un bruit de nature électromagnétique.

When connected to either a rod or to a loop antenna, this set measures respectively the electric and the magnetic component of a noise of electromagnetic nature.

Pour mesurer un bruit, il suffit de remarquer que la valeur efficace de ce bruit, relative à la bande passante de l'appareil, doit être égale à la valeur efficace d'un signal sinusoïdal pur, de fréquence $\omega_0/2\pi$, donnant la même déviation de l'appareil de lecture.

To measure a noise it is convenient to express the r.m.s. value of the noise contained in the pass-band of the receiver in terms of the r.m.s. value of a sine-wave, of frequency $\omega_0/2\pi$, which gives the same meter-deflection.

Ceci est la définition énergétique d'un bruit.

This defines the noise in terms of energy.

L'équation (2) montre alors que deux mesureurs du bruit dont les bandes passantes sont respectivement B_1 et B_2 , donneront du même bruit deux valeurs efficaces b_1 et b_2 telles que :

Equation (2) shows then that two noise meters, the pass bands of which are B_1 and B_2 respectively, will give from the same noise two r.m.s. values b_1 and b_2 such that :

$$\frac{b_1}{b_2} = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad (3)$$

2.3.2 – La mesure du bruit en valeur quasi-crête.

De nombreux bruits d'origine industrielle, et également le bruit dû à l'effet de couronne, sont, en outre, constitués par une succession d'impulsions brèves, dont la fréquence de répétition est plus ou moins stable. Aussi, dans les appareils généralement utilisés et répondant d'ailleurs à des normes internationales, on préfère exprimer, plutôt que la valeur efficace, la valeur "quasi-crête". Cette définition conduit à des dispositifs de mesure plus simples et plus sensibles ; elle représente mieux l'effet psychologique de la gêne ressentie par un auditeur, parce qu'elle varie avec la fréquence de répétition des impulsions à peu près de la même manière que l'effet de gêne. La valeur quasi-crête est obtenue par un détecteur constitué essentiellement par une diode chargeant un condensateur, et caractérisé par une constante de temps de charge et une constante de temps de décharge ; lorsque l'on applique à ce dispositif le bruit, filtré par la bande passante du récepteur et convenablement amplifié, la tension du condensateur s'établit à une valeur un peu inférieure à la valeur de crête du signal de bruit, d'où son nom. Le principe de l'équivalence avec un signal sinusoïdal pur est cependant maintenu pour l'étalonnage de l'appareil de mesure.

2.3.2 – Quasi-peak measurement.

Many cases of noise of industrial origin, as well as the noise due to corona, are made up of a succession of brief pulses, the repetition frequency of which is more or less stable. Thus, in the apparatus generally used and complying with international standards, it is preferred to express the "quasi-peak" value rather than the r.m.s. value. This definition leads to simpler and more realistic measuring devices ; it better represents the psychological effect of the interference experienced by the listener because it varies with the repetition frequency of the pulses almost in the same way as does the perceived noise. The quasi-peak value is obtained from a detector made up basically of a diode charging a capacitor, with given charge and discharge time constants. When noise is applied to this device, after filtration by the pass band of the receiver and suitable amplification, the voltage on the capacitor floats at a value a little lower than the peak value of the noise signal, hence the name "quasi-peak". The principle of equivalence with a pure sinusoidal signal is however maintained for the calibration of the measuring set.

La figure 2.1 montre les transformations successives que subit, à travers les divers étages d'un mesureur de quasi-crête, un train d'impulsions appliqué à son entrée.

Figure 2.1 shows the successive transformation undergone by a pulse train applied at the input through the different stages of a quasi-peak meter.

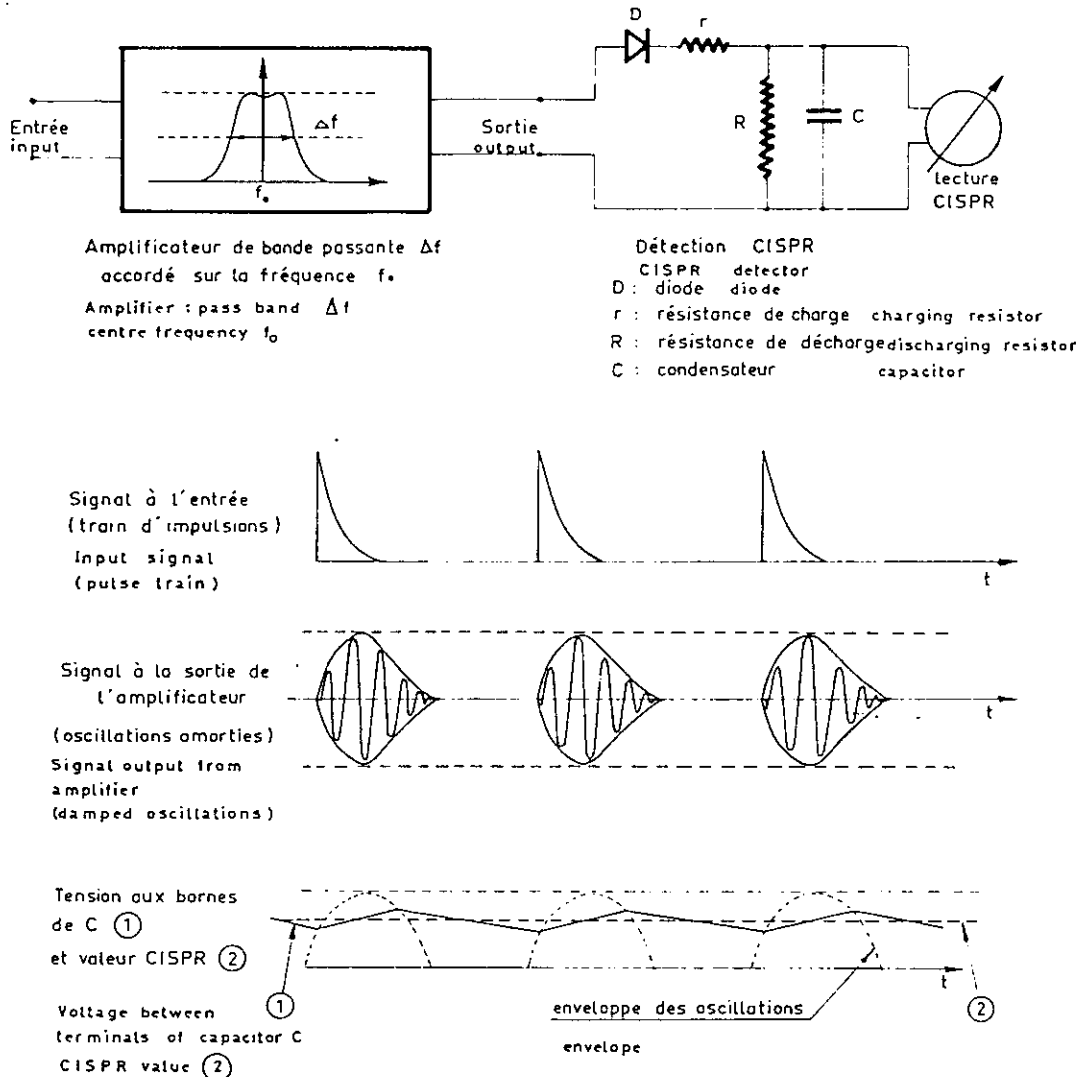


Figure 2.1

Transformation des impulsions à travers un mesureur CISPR
Transformation of pulses through a CISPR receiver.

Les spécifications internationales auxquelles il est recommandé de se tenir, sont publiées par le CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radio-électriques). Pour les fréquences utilisées en radiodiffusion à modulation d'amplitude (0,15 à 30 MHz), les caractéristiques principales des mesureurs ont été fixées comme suit :

Bande passante : 9 kHz
Constante de temps de charge : 1 ms } pour la détec-
Constante de temps de décharge : 160 ms } tion quasi-crête

On notera que la bande passante est sensiblement la même que celle des récepteurs de radiodiffusion courants. La valeur du bruit perturbateur qui résulte des caractéristiques précédentes n'est pas directement transposable à la réception en modulation de fréquence ou en télévision, car ces récepteurs présentent des bandes passantes très différentes (respectivement 120 kHz et environ 10 MHz).

Recommended international specifications are published by CISPR (Special International Committee on Radio Interference). For the frequencies used in AM radio broadcasting (0.15 to 30 MHz), the main characteristics of meters have been specified as follows :

*Pass band : 9 kHz
Charge time constant : 1 msec } for
Discharge time constant : 160 msec } quasi-peak detection*

It will be noticed that the pass band is a commonly used one in radio-broadcast receivers. The interference noise level resulting from the preceding characteristics cannot be directly transposed to frequency modulation reception or television reception, since these receivers have quite different pass bands (120 kHz and approximately 10 MHz respectively).

Il existe d'autres spécifications de mesureurs pour ces fréquences.

Remarque : Bien que des spécifications CISPR aient une valeur internationale, on utilise fréquemment, et notamment aux Etats-Unis et au Canada, la norme ANSI (American National Standards Institute), qui a fixé les caractéristiques suivantes :

Bande passante : 5 kHz

Constante de temps de charge : 1 ms } pour la détec-
Constante de temps de décharge : 600 ms } tion quasi-crête

Il résulte de ces définitions un niveau de bruit, mesuré à une fréquence donnée, d'environ 2 dB supérieur au niveau CISPR, toutes choses égales par ailleurs.

2.3.3 – Niveau perturbateur et qualité de la réception.

Les champs électromagnétiques, y compris les champs perturbateurs, sont généralement exprimés soit en microvolts par mètre (μ V/m) ou millivolts par mètre (mV/m), soit en décibels, suivant la relation :

$$\text{Champ en décibel} = 20 \log (\text{champ en } \mu \text{ V/m})$$

Lorsque l'on mesure la composante magnétique H du champ à l'aide d'un cadre, on l'exprime cependant en champ électrique équivalent E, en raison du rapport constant $E/H = 120 \pi$ ohms (impédance du vide) existant entre les deux composantes du champ électromagnétique.

Ainsi, un niveau perturbateur de 46 dB signifiera que le champ mesuré à l'aide d'un appareil CISPR vaut 200μ V/m, même si la mesure a été effectuée avec un cadre.

La définition du champ perturbateur que nous venons de donner permet de préciser les relations entre le rapport signal sur bruit et la qualité subjective de la réception. On peut admettre les correspondances suivantes :

Other specifications are in existence for meters appropriate to these frequencies.

Remark – Although CISPR specifications are internationally recognized, the ANSI (American National Standards Institute) standard is frequently used, particularly in the United States and Canada, which gives the following characteristics :

Pass band : 5 kHz

Charge time constant : 1 msec } for
Discharge time constant : 600 msec } quasi-peak detection

The result of these definitions is a noise level measured some 2 dB higher than the CISPR level, other conditions being maintained unchanged.

2.3.3 – Interference level and quality of reception.

Electromagnetic fields, including interference fields, are generally expressed either in microvolts per metre (μ V/m), in millivolts per metre (mV/m), or in decibels, according to the relationship :

$$\text{Field in decibels} = 20 \log (\text{field in } \mu \text{V/m}).$$

When the magnetic component H of the field is measured using a loop antenna it is, however, expressed in the equivalent electric field E, on account of the constant ratio $E/H = 120 \pi$ ohms (vacuum impedance) existing between the two components of the electromagnetic field.

Thus, an interference level expressed as 46 dB corresponds to an electric component of 200μ V/m as measured by a CISPR receiver, even though the actual measurement may have been made with a loop antenna.

This definition of the interference field permits the relations between the signal/noise ratio and the subjective reception quality to be specified. The following analogies can be assumed :

Echelles du rapport signal/bruit		Code	Qualité de réception Impression subjective
logarithmique (dB)	Linéaire		
30	32	5	perturbations non audibles
24	16	4	perturbation juste perceptible
18	8	3	perturbation audible mais perception parfaite de la parole
12	4	2	mauvais pour la musique mais parole intelligible
6	2	1	compréhensible seulement avec effort de concentration
0	1	0	parole inintelligible : brouillage total

Remarque 1 : Ce tableau est établi pour des auditions de qualité courante fournies par des récepteurs à modulation d'amplitude. L'audition de très haute qualité (haute fidélité, musique classique, programmes culturels) exige des niveaux de bruit nettement plus faibles (–40 à –60 dB)

Note 1. This table relates to the reception of broadcasts of present day quality with amplitude modulated receivers. Very high quality reception ("hi-fi", classical music, cultural programmes) requires much lower noise levels (–40 to –60 dB).

<i>Signal/noise ratio Scales</i>		<i>Code</i>	<i>Reception quality Subjective impression</i>
<i>Logarithmic (dB)</i>	<i>Linear</i>		
30	32	5	<i>Interference not audible.</i>
24	16	4	<i>Interference just perceptible.</i>
18	8	3	<i>Interference audible but speech perfectly received.</i>
12	4	2	<i>Unacceptable for music but speech intelligible</i>
6	2	1	<i>Speech understandable only with great concentration</i>
0	1	0	<i>Spoken word unintelligible : noise swamps speech totally.</i>

Remarque 2 : Les codes de qualité 5 et 4 sont définis par des rapports signal/bruit assez précis. Les codes 3 à 0 sont par contre de plus en plus subjectifs et les rapports signal/bruit correspondants ne sont donnés ici qu'à titre tout à fait indicatif.

Note 2. In practical terms, Codes 4 and 5 are definable quite precisely in terms of signal-to-noise ratio. On the other hand, the lower Codes, 3 to 0, become increasingly subjective and are given here largely as suggestions.

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU CHAMP PERTURBATEUR

3.1 – Définitions.

Pour rationaliser la mesure du niveau perturbateur d'une ligne de transport et faciliter les comparaisons entre diverses lignes, il est souhaitable de normaliser les conditions dans lesquelles la mesure doit être effectuée. Il faut, pour cela, choisir la position de l'appareil de mesure par rapport à la ligne, la fréquence de mesure et les conditions atmosphériques. (Voir chapitre 6.4 "Mesures sur le terrain").

Ensuite, pour compléter cette mesure de référence, on sera conduit à étudier les variations du niveau perturbateur en fonction de trois paramètres :

- fréquence de mesure : étude du spectre de fréquence
- distance à la ligne : étude du profil transversal du champ
- conditions atmosphériques : étude des distributions statistiques des niveaux.

Ceci revient à admettre, en première approximation, que ces paramètres sont indépendants les uns des autres.

Le spectre de fréquence représente la variation du niveau perturbateur en fonction de la fréquence de mesure, jusqu'à environ 10 MHz. Le champ perturbateur est produit par le courant à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Ce courant résulte de la sommation, sur plusieurs kilomètres, des impulsions produites par les aigrettes élémentaires. L'allure de ce courant est relativement indépendante du nombre des impulsions élémentaires ainsi que du diamètre des conducteurs. On peut donc admettre que le spectre de fréquence du champ perturbateur est le même à différentes distances de la ligne et pour diverses conditions météorologiques.

Le profil transversal est la variation du champ perturbateur en fonction de la distance à la ligne. Il est souvent mesuré et calculé à la fréquence de référence de 500 kHz, jusqu'à des distances de 100 ou 200 mètres de la ligne.

On admet qu'il ne se déforme pas en fonction de la fréquence, bien que cette propriété ne soit pas vraie en toute rigueur (influence du rayonnement direct et des phénomènes de propagation). Il subit une translation pratiquement sans déformation sous l'influence des conditions météorologiques et des variations de l'état de surface des conducteurs.

L'étude systématique des *fluctuations annuelles du niveau perturbateur* d'une ligne permet de définir certaines conditions climatiques bien caractérisées : pluie forte et

MAIN CHARACTERISTICS OF THE NOISE FIELD

3.1 – Definitions.

To rationalize the measurement of radio noise from a transmission line and facilitate comparisons between different lines, it is desirable to standardize the conditions under which the measurement is to be carried out. For this, the position of the measuring set must be chosen in relation to the line, the measuring frequency and the atmospheric conditions. (See Chapter 6.4 "Field measurements").

To complete this reference measurement, variations in radio noise are studied in terms of the three parameters :

- *measuring frequency: hence obtaining the frequency spectrum*
- *distance from line: hence determining the Radio Noise lateral profile*
- *weather conditions: studying noise level distributions.*

The prior assumption is that these parameters are mutually independent.

The frequency spectrum gives the variation of RI level as a function of frequency, up to some 10 MHz. The noise field is produced by the high frequency current circulating in the conductors. This current results from the summation, over several kilometres, of the pulses produced by the different discharges: its form is relatively independent of the shape and number of pulses and of the diameter of the conductor. It can therefore be assumed that the frequency spectrum of the noise field will be the same at different distances from the line and in different weather conditions.

The RI lateral profile is the variation of the noise field as a function of the distance from the line. It is usually measured and calculated at the reference frequency of 500 kHz, up to distances of 100 or 200 metres from the line.

It is assumed that the profile is frequency-independent although this is not strictly true (influence of direct radiation and propagation phenomena). Under the influence of meteorological conditions and variations in the surface state of the conductors the form of the profile is little changed although the amplitudes vary widely.

The systematic study of annual fluctuations of the radio noise from a line enables certain characteristic climatic conditions to be identified, i.e. heavy rain and

beau temps sec, qui peuvent servir de références pour définir des niveaux-types. La connaissance des distributions statistiques permet de prévoir la probabilité d'apparition de ces valeurs-types ainsi que la dispersion possible des niveaux autour d'une valeur moyenne caractéristique de conditions climatiques définies

3.2 – Spectre de fréquence du champ perturbateur.

Le spectre est la variation du niveau perturbateur, mesuré en un point donné au voisinage d'une ligne, en fonction de la fréquence. Il résulte de la composition de deux phénomènes.

a) Les impulsions de courant engendrées dans les conducteurs par les aigrettes présentent un spectre propre, qui dépend de leur forme. Dans la gamme des fréquences radiophoniques, où les aigrettes positives ont un effet prépondérant, le spectre a une allure sensiblement indépendante du diamètre du conducteur. (Voir 1.4 et Fig. 1.3).

On démontre d'autre part que le spectre d'un signal complexe résultant de la superposition aléatoire stationnaire de nombreuses impulsions de forme donnée est le même que celui de l'impulsion élémentaire. Il résulte de ces propriétés que les variations de niveau du champ perturbateur, dues aux variations des conditions météorologiques et de l'état de surface des conducteurs, se traduisent par une translation verticale du spectre tout entier (si les niveaux sont exprimés en dB).

b) L'atténuation de propagation augmente avec la fréquence. Cet effet modifie le spectre propre des impulsions en accélérant la baisse de niveau vers les fréquences croissantes.

Les spectres mesurés sont généralement assez irréguliers, tant à cause des fluctuations continues de niveau du champ perturbateur au cours d'une mesure que pour des raisons plus subtiles, telles que des réflexions de propagation dues à des discontinuités de la ligne (pylônes d'ancrage, variations du terrain, etc.). La figure 3.1 donne quelques exemples de spectres réels, qui mettent ces irrégularités en évidence. Pour les besoins des calculs de prédétermination, on en a tiré des "spectres-types" assez bien représentatifs. L'expérience a montré que l'ensemble des spectres pouvait être regroupé en deux familles, l'une s'appliquant aux lignes en "nappe horizontale", et l'autre aux lignes à deux ternes et aux lignes à configuration "triangle" ou "verticale". La différence entre ces deux familles provient du phénomène relaté ci-dessus en b), la propagation étant légèrement différente selon le type de ligne.

Les spectres types sont donnés en valeurs relatives sur la figure 3.2. Le point de référence est pris à 500 kHz. Le tableau 3.1 indique en regard les moyennes des valeurs mesurées à diverses fréquences sous un grand nombre de lignes différentes et les valeurs calculées à partir de deux formules expérimentales.

fair, dry weather, which can be used as references to define standard noise levels. The probability of these standard values can be forecast statistically together with the possible dispersion of the noise around a characteristic average value of the defined climatic conditions.

3.2 – Frequency spectrum of the noise field.

The spectrum is the variation of the radio noise, measured at a given point in the vicinity of a line, as a function of frequency. Two phenomena are involved :

a) The current pulses generated in the conductors by the discharges show a particular spectrum dependent on their shape. In the range of broadcasting frequencies, where the positive discharges have a preponderant effect, the spectrum has a behaviour quite independent of the conductor diameter, (see 1.4 and Fig. 1.3).

In another respect it can be seen that the spectrum of a complex signal resulting from the superposition of many stationary random pulses of given form is the same as that of a single pulse. The result is that the variations in radio noise, due to the variations in meteorological conditions and in the surface state of the conductors, are shown by a vertical translation of the complete spectrum (if the interference is expressed in dB).

b) The attenuation of propagation increases with frequency. This effect modifies the pulse spectrum by reducing the noise level with increase in frequency.

The measured spectra are generally fairly irregular both because of the continual fluctuations in the level of radio noise during measurement and for more subtle reasons such as propagation-reflection due to line discontinuities (anchor towers, ground variations, etc). Figure 3.1 gives some examples of actual spectra which show these irregularities. For purposes of prediction calculations, "standard spectra" that are fairly representative have been chosen. Experience has shown that all spectra can be put into two families, one applying to horizontal configurations the other to double-circuit and triangle or vertical lines. The difference between these two families originates from the phenomenon mentioned in (b) above, the propagation differing slightly according to the type of line.

The standard spectra are given in relative values in Figure 3.2. The reference point is taken as 500 kHz. Table 3.1 shows side-by-side the averages of values measured at different frequencies under a large number of different lines – and the values calculated using the two experimental formulae.

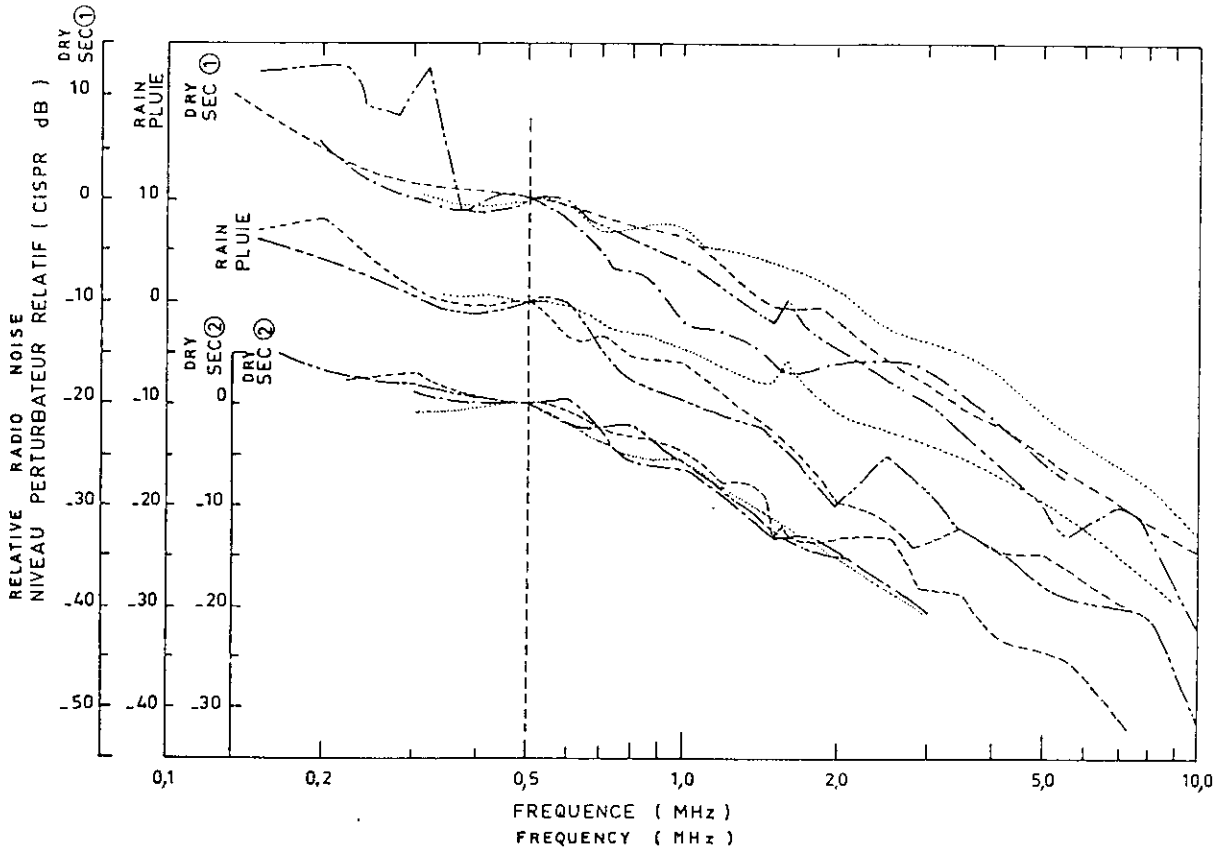


Figure 3.1
Spectres de fréquence mesurés sous des lignes réelles
Frequency spectra measured under actual lines.

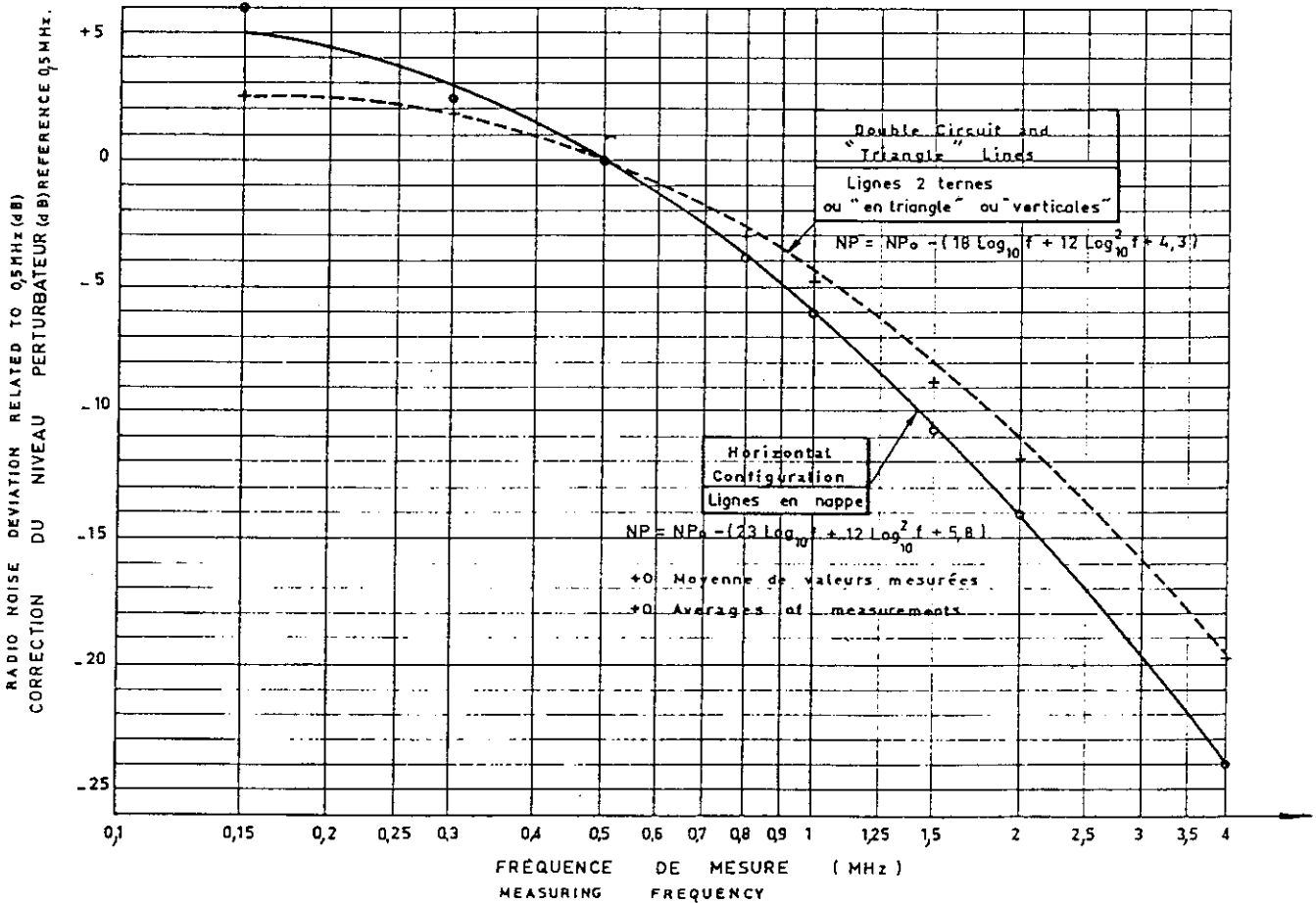


Figure 3.2
Spectres types de fréquence. Référence 0,5 MHz
Typical frequency spectra. Reference 0.5 MHz

Tableau 3.1 – Table 3.1

Spectres-types de fréquence (Voir figure 3.2)

Typical Frequency Spectra (See figure 3.2)

Lignes en nappe horizontale <i>Horizontal configuration lines</i>			Lignes à deux ternes, ou en triangle <i>Double-circuit or triangle lines</i>		
NP = NP ₀ - (23 Log ₁₀ f + 12 Log ₁₀ ² f + 5,8)			NP = NP ₀ - (18 Log ₁₀ f + 12 Log ₁₀ ² f + 4,3)		
Fréquence MHz	Moyenne des mesures dB	Valeurs calculées dB	Fréquence MHz	Moyenne des mesures dB	Valeurs calculées dB
<i>Frequency</i>	<i>Average of Measurements</i>	<i>Calculated values</i>	<i>Frequency</i>	<i>Average of Measurements</i>	<i>Calculated values</i>
0,15	+ 6,0	+ 5,0	0,15	+ 2,5	+ 2,4
0,3	+ 2,3	+ 2,9	0,3	+ 1,8	+ 1,8
0,5	0	0	0,5	0	0
0,8	- 3,9	- 3,7	0,8	- 3	- 2,7
1,0	- 6,0	- 5,8	1,0	- 4,8	- 4,3
1,5	- 10,7	- 10,3	1,5	- 8,8	- 7,8
2	- 14,0	- 13,9	2	- 11,9	- 10,8
4	- 24,0	- 24,0	4	- 19,7	- 19,5

3.3. – Profil transversal du champ perturbateur

La variation du champ perturbateur en fonction de la distance à la ligne est caractérisée par une décroissance rapide. Les mesures sont effectuées le long d'une perpendiculaire au milieu d'une portée se rapprochant autant que possible de la portée moyenne caractérisant la ligne considérée. Il faut éviter la proximité des postes de transformation ou d'interconnexion, les angles prononcés, les lignes voisines et les fortes dénivellations du terrain.

Le profil est déterminé à une hauteur de deux mètres au-dessus du sol, depuis l'aplomb d'un conducteur extérieur jusqu'à une distance maximale n'excédant pas 200 mètres. Au-delà l'effet perturbateur des lignes devient en général négligeable. En pratique la mesure devient imprécise au-delà de 80 mètres. La fréquence de mesure choisie est le plus souvent 500 kHz (recommandations CISPR) ou 1 MHz (ANSI – Standards).

Les profils mesurés sont souvent irréguliers, voir figure 3.3, tant à cause des fluctuations continues du niveau du champ perturbateur au cours d'une série de mesures que des imperfections de la portée et du site choisis : pylônes d'angles ou d'arrêt, variation du terrain, etc.

De nombreuses mesures effectuées sous une cinquantaine de lignes diverses ont permis d'acquérir une bonne connaissance expérimentale du phénomène, connaissance confirmée par les calculs théoriques.

On peut ainsi proposer un profil transversal moyen valable pour tous les types de lignes, de 220 à 750 kV. De plus une analyse plus fine a permis de tracer des profils en fonction des classes de tension des lignes et de leur type d'armement (Voir tableau 3.2).

3.3. – The radio noise lateral profile.

The variation of the noise field as a function of distance from the line is characterized by a rapid decrease. Measurements are taken along a perpendicular to a midspan which is as close as possible to an average span of the line under consideration. The proximity of substations or interconnections, sharp angles, neighbouring lines and great variations in level of terrain must be avoided.

The profile is determined at a height of two metres above the ground from a point immediately beneath an outside conductor over a distance not exceeding 200 metres. Beyond this distance the interference effect of the lines generally becomes negligible. In practice the measurement becomes inaccurate beyond 80 metres. The measuring frequency chosen is usually 500 KHz (CISPR) or 1 MHz (ANSI).

The measured profiles are often irregular (see Figure 3.3) both because of the continual fluctuations of the radio noise during a series of measurements and because of irregularities such as angle or anchor towers, terrain variations, etc.

Numerous measurements carried out under some fifty different lines have enabled a good experimental knowledge of the phenomenon to be acquired, which has been confirmed by theoretical calculations.

In this way a lateral noise profile can be given which is valid for all types of line, from 220 to 750 kV. In addition, a more accurate analysis has enabled profiles to be plotted as functions of classes of line voltage and configuration : (See Table 3.2).

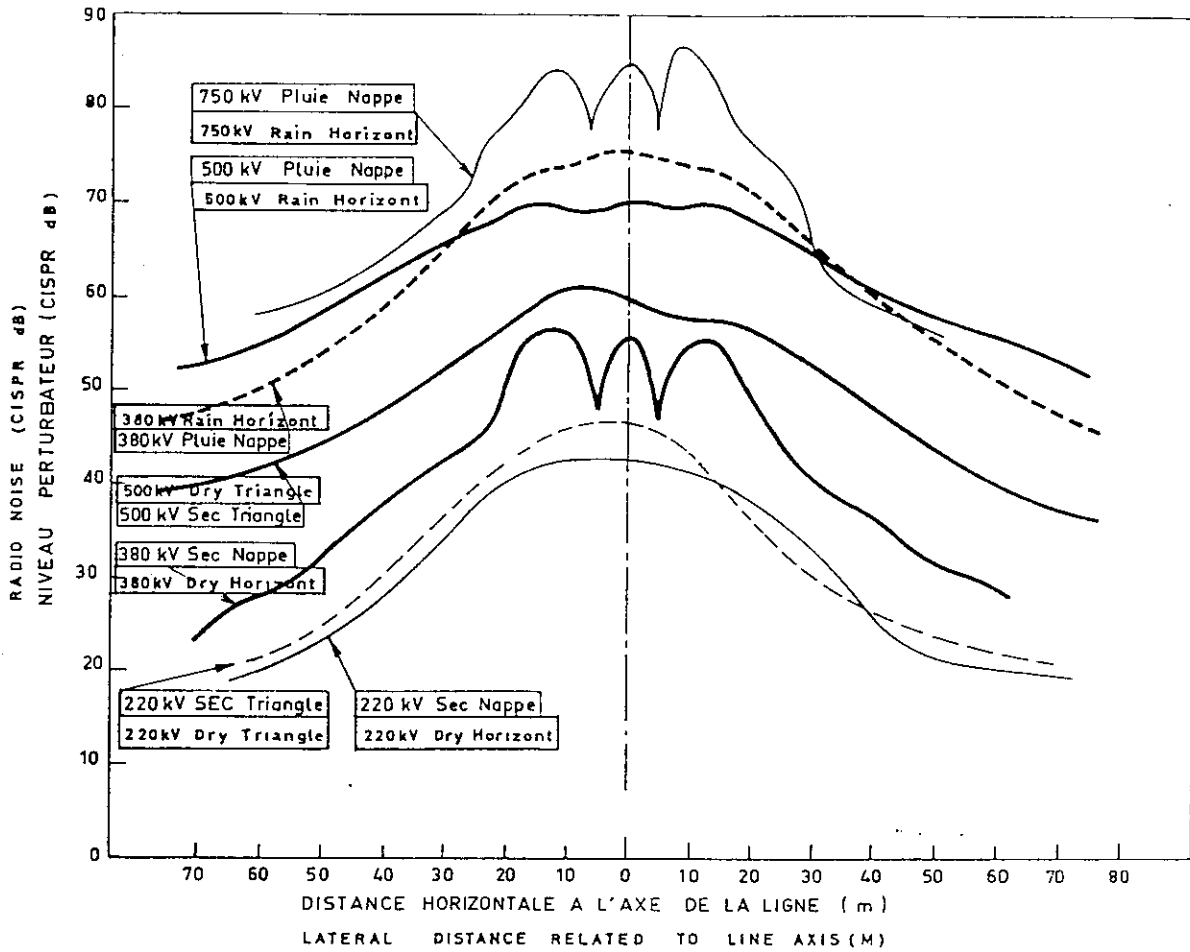
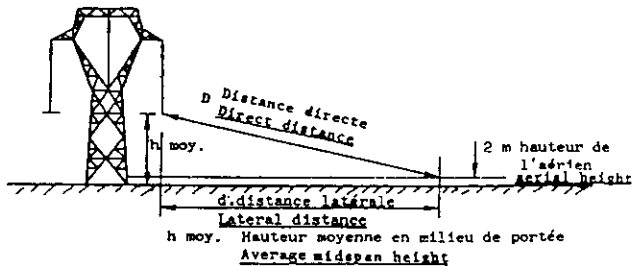


Figure 3.3

Exemples de profils réels
Examples of actual lines lateral profiles.

Tableau 3.2 – Profils latéraux – types (Voir figures 3.4 & 3.5)
Table 3.2 – Typical lateral profiles (See figures 3.4 & 3.5)

Distance Latérale Lateral Distance d (m)	Toutes lignes } 225-750 kV All lines } H _{moij} = 13 m		Lignes en nappe } 220-275 kV Horizontal lines } h _{moij} = 11 m		Lignes en nappe } 300-400 kV Horizontal lines } h _{moij} = 12 m		Lignes en nappe } 500-750 kV Horizontal lines } h _{moij} = 14 m		Lignes triang. vert. Triang. vert. lines 2-oct. 200-400 kV h _{moij} = 11,5	
	Moyenne des mesures Average of Measurements	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1,65}$ Calcul	Moyenne des mesures Average of Measurements	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1,9}$ Calcul	Moyenne des mesures Average of Measurements	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1,75}$ Calcul	Moyenne des mesures Average of Measurements	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1,4}$ Calcul	Moyenne des mesures Average of Measurements	$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1,4}$ Calcul
0	7,3	7,5	11,0	11,0	7	8,9	4,6	6,5	9,9	8,1
5	6,2	6,2	9,2	8,7	5,8	7,2	4,9	5,4	6,7	6,4
10	3,6	3,2	4,6	4,3	3	3,7	3,0	2,9	3,7	3,2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	- 5,2	- 5,5	- 6,5	- 6,9	- 5,7	- 6,1	- 5,0	- 5,1	- 4,7	- 5,1
35	- 9,5	- 9,7	- 11,3	- 12,0	- 10,2	- 10,7	- 9,1	- 9,1	- 8,9	- 8,8
50	- 14,3	- 14,5	- 17,5	- 17,6	- 15,5	- 15,8	- 13,4	- 13,7	- 13,3	- 13,0
75	- 20,5	- 20,1	- 24	- 24,1	- 21,8	- 21,8	- 19,8	- 19,1	- 18,2	- 17,8



Loi de décroissance du champ en fonction de la distance (formule de calcul)
Attenuation law related to lateral distance (calculation formula)

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^k \text{ ou en dB } NP = NP_0 + 20.K.Log_{10} D_0/D$$

Toutes les valeurs du tableau sont en dB/1µV/m
All the data given in the table are in dB/1µV/m

La loi de décroissance du champ perturbateur peut être exprimée simplement en fonction de la distance D entre l'antenne de mesure et le conducteur le plus proche par la formule :

The attenuation law of the noise field can be expressed simply as a function of the distance D between the measuring aerial and the closest conductor by means of the formula :

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^K \quad \text{ou en décibels} \quad NP = NP_0 + 20.K.Log_{10} D_0/D$$

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{D_0}{D}\right)^K \quad \text{or, in decibels,} \quad NP = NP_0 + 20 K.log_{10} D_0/D$$

Le coefficient K est compris entre 1,4 et 1,9 selon les types d'armements, et est légèrement influencé par la résistivité du sol.

The coefficient K lies between 1.4 and 1.9 according to the line configuration, and may be influenced by the resistivity of the soil.

Ces profils-types sont tracés en prenant comme référence une distance de 15 mètres, horizontalement à partir de l'aplomb du conducteur (Fig. 3.4) et également avec une échelle logarithmique des distances, en se référant à une distance directe au conducteur égale à 20 m. (Recommandations CISPR). (Voir Fig. 3.5). La première présentation est plus utile pour déterminer la largeur d'un couloir perturbé, la seconde met mieux en évidence la loi physique de décroissance du champ perturbateur en fonction de la distance au conducteur le plus proche.

These standard profiles are traced either by taking a distance of 15 metres as reference, laterally from a point directly below the conductor (Fig. 3.4), or with a logarithmic scale of distances referring to a direct distance to the conductor equal to 20 m. (CISPR recommendations). (See Fig. 3.5). The first presentation is most useful for predicting the width of the lane subject to interference; the second shows the physical law of noise field decrease as a function of the distance from the nearest conductor.

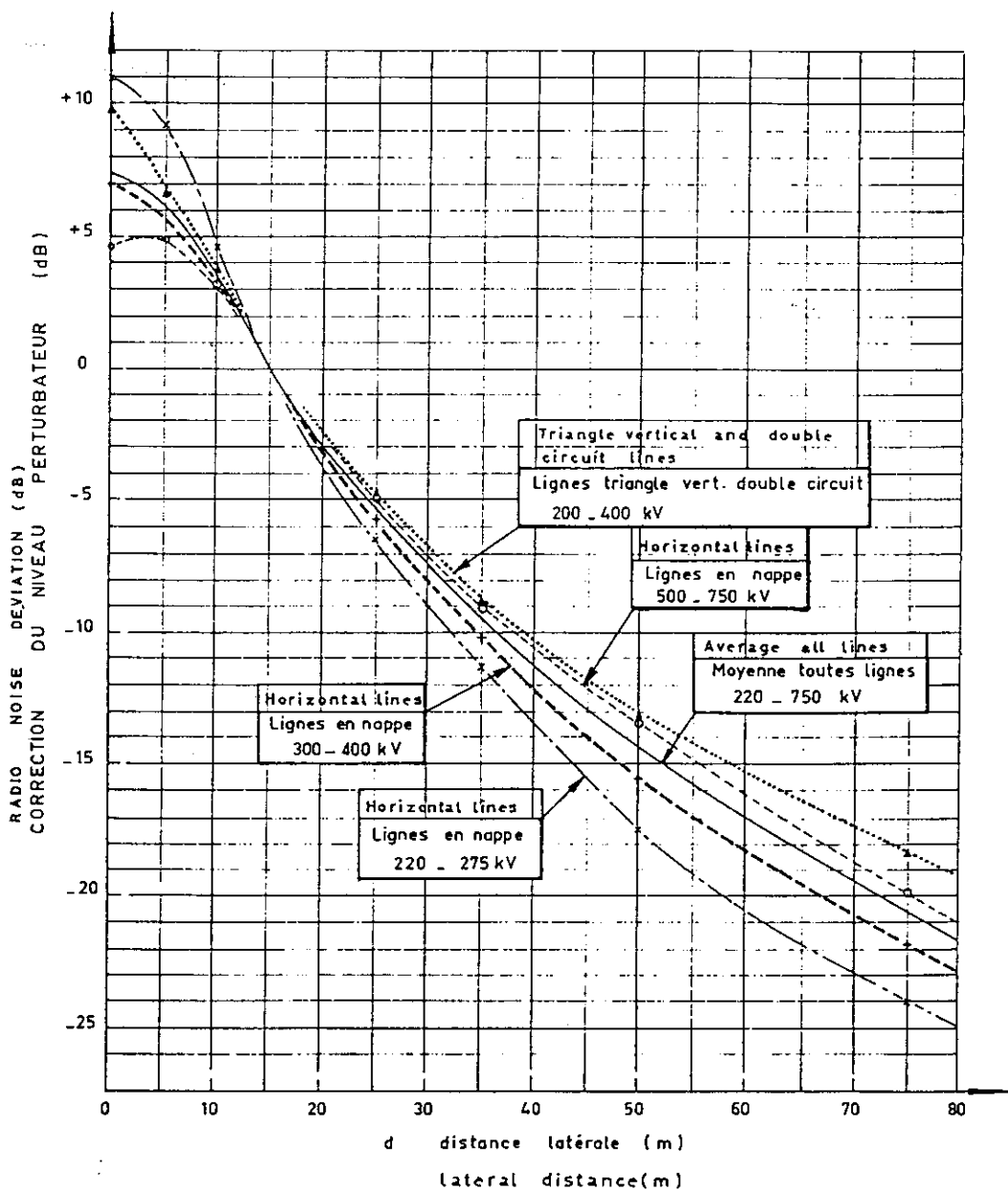


Figure 3.4.

Profils latéraux types du champ perturbateur des lignes très haute tension. Référence 15 m en distance latérale.
 Typical lateral profiles. Related to 15 m, lateral distance.

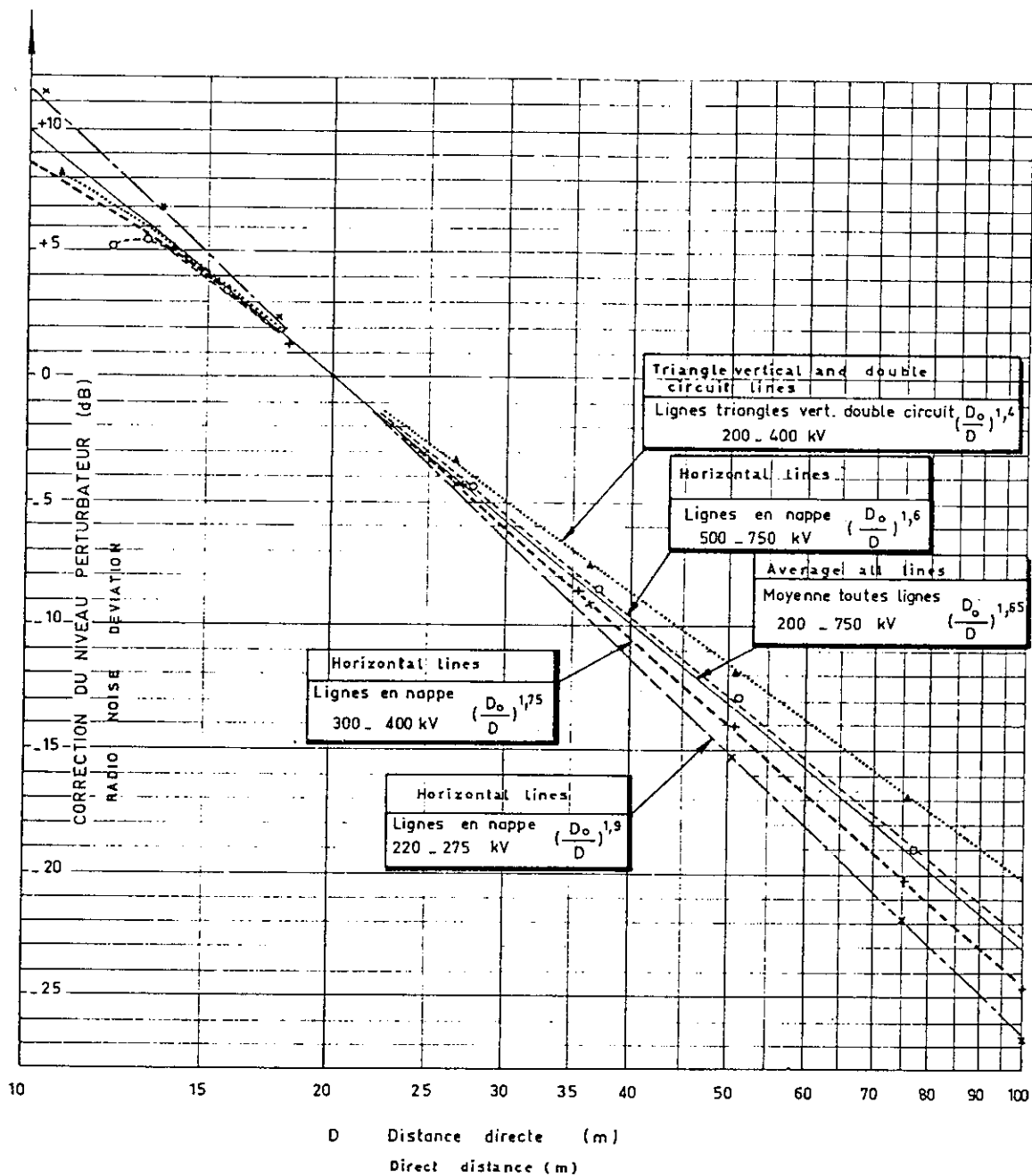


Figure 3.5

Profils latéraux types du champ perturbateur des lignes très haute tension. Référence 20 m en distance directe
 Typical lateral profiles. Related to 20 m, direct distance.

3.4 – Distributions statistiques des niveaux perturbateurs.

L'étude systématique des fluctuations du niveau perturbateur d'une ligne nécessite l'enregistrement permanent du champ perturbateur sous cette ligne pendant 1 an au moins, à une distance de la ligne et à une fréquence de mesure fixe. De nombreux chercheurs, dans de nombreux pays, ont effectué de telles mesures, de sorte que l'on possède maintenant des données assez solides sur les variations annuelles ou saisonnières du niveau perturbateur. On présente souvent ces résultats selon les méthodes de l'analyse statistique c'est-à-dire sous forme d'histogrammes ou sous forme de distribution cumulées. Ces dernières expriment le pourcentage de temps, pendant lequel le niveau perturbateur a été inférieur à une valeur donnée.

3.4 – Radio noise distributions.

The systematic study of fluctuations in radio noise of a line necessitates the permanent recording of the field under this line over at least one year, at a fixed distance from the line and with a fixed measuring frequency. Numerous researchers, in many countries, have carried out such measurements, with the result that there is in existence fairly solid data on the annual or seasonal variations in radio noise. These results are often presented according to statistical analysis methods, i.e. in the form of histograms or as cumulative distributions. The latter express the percentage of time during which the radio noise was less than a given value.

3.4.1 – Dispersion minimale.

Les causes des fluctuations du niveau perturbateur enregistré sont nombreuses. On peut citer :

- la fidélité de la réponse de l'appareil de mesure et la nature aléatoire même du phénomène.

- les variations de la tension d'alimentation de la ligne.

- l'irrégularité des conditions météorologiques le long des quelques dizaines de kilomètres de ligne qui contribuent au niveau local.

- les variations des conditions météorologiques au point de mesure.

- l'état de surface des conducteurs, sensible non seulement aux conditions météorologiques : pluie, givre, etc. mais également aux dépôts de poussières, d'insectes et autres particules.

Certains de ces paramètres sont très difficiles, voire même pratiquement impossibles, à chiffrer. La mesure du niveau perturbateur sera donc affectée d'une dispersion minimale inévitable caractérisée par un écart-type variant de 0,5 à 2,5 dB selon la précision des appareils de mesure utilisés.

3.4.2 – Dispersion tous temps annuelle. (Voir figures 3.6 et 3.7).

La fluctuation globale du niveau perturbateur qui résulte de la combinaison des effets énumérés ci-dessus, peut s'exprimer sous forme de distribution annuelle "tous temps". Bien que cette distribution ne soit pas gaussienne, on peut la caractériser par un écart-type compris entre 6 et 10 décibels, selon les climats. Ceci revient à dire qu'une mesure isolée effectuée dans des conditions climatiques non précisées, aurait une probabilité de 5 % d'être éloignée de plus ou moins 12 à 20 dB, soit $\pm 2\sigma$ de la valeur la plus probable.

D'autre part, la forme de la distribution des niveaux perturbateurs dépend également du type de climat où est située la ligne : un climat très humide, pluvieux ou avec givre ou neige abondant augmentera le pourcentage de niveaux élevés, un climat très sec au contraire le réduira.

Aussi, pour pouvoir tirer des renseignements utiles des différentes distributions obtenues, on les sépare en trois catégories de temps : beau temps (conducteurs secs) – pluie – temps humide. Les deux premières catégories sont parfaitement définies et permettent la recherche de certaines corrélations ; la troisième est une catégorie intermédiaire dans laquelle on regroupe des conditions météorologiques mal définies, telles que rosée, brouillard, neige ou givre.

3.4.3 – Catégorie pluie.

La catégorie pluie permet de tirer des renseignements particulièrement intéressants lorsqu'on en extrait une sous-catégorie dite "fortes pluies", dans laquelle on ne retient que les niveaux perturbateurs apparaissant lors des débits de pluie supérieurs à quelque 1 mm/heure. Cette sous-catégorie est sensiblement gaussienne et son écart-type est de 2 à 3 dB, soit très voisin de la dispersion minimale.

Le niveau perturbateur fortes pluies est défini comme étant la moyenne des mesures effectuées sous une pluie

3.4.1 – Minimum dispersion.

The causes of fluctuations in recorded radio interference are numerous, e.g. :-

- reliability of the measuring set and the random nature of the phenomenon.*

- variations of the applied line voltage.*

- irregularities of meteorological conditions along the few tens of kilometres of the line which contribute to the local interference.*

- variations of the meteorological conditions at the measuring point.*

- changes in the surface state of the conductors, which is affected not only by weather conditions such as rain, frost, etc. but also by deposits of dust, insects and other particles.*

Some of these parameters are very difficult, even impossible, to measure systematically. The measurement of the radio noise will therefore exhibit a minimum dispersion characterized by a standard deviation varying from 0.5 to 2.5 dB according to the accuracy of the measuring devices.

3.4.2 – Annual all-weather dispersion (See Figures 3.6 and 3.7)

The total fluctuation of interference level resulting from the combined effects, above mentioned, can be expressed as an annual, "all-weather" distribution. Although not perfectly Gaussian, this can be characterized by a standard deviation varying from around 6 to 10 dB according to the climate. This amounts to saying that an isolated measurement made under non-specified climatic conditions would have a 5 % probability of being more than 12 to 20 dB $\pm 2\sigma$ away from the most probable value.

The shape of the distribution of the interference levels likewise depends on the type of climate : a very humid climate, a rainy one, or one with abundant snow or frost will increase the percentage of high levels whereas a very dry climate will reduce it.

Also, to glean useful information from the different distributions, they are separated into three categories of weather : fair weather (dry conductors) : rain ; humid weather. The first two categories are defined precisely and allow correlations to be sought, the third is an intermediate category in which badly defined meteorological conditions are grouped together, such as dew, fog, snow or frost.

3.4.3 – Rain category.

The rain category permits particularly interesting information to be collected when a sub-category, "heavy rain", is extracted, in which only the interference levels appearing during rainfalls of intensities greater than 1 mm/hour are retained. This sub-category is essentially Gaussian and its standard deviation is from 2 to 3 dB, i.e. very close to the minimum dispersion.

The "heavy rain" level is defined as the average value in conditions of steady rain heavier than 1 mm per hour.

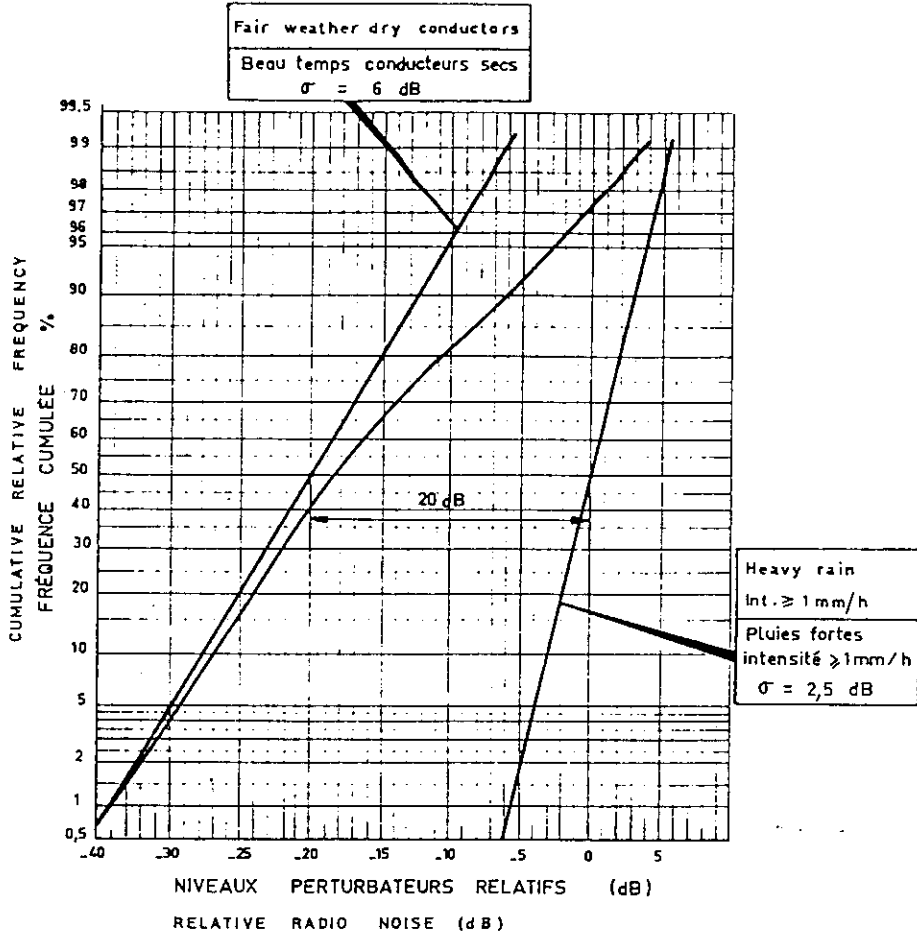


Figure 3.6

Diagramme type des fréquences cumulées d'apparition des niveaux perturbateurs. Climat tempéré.
Typical radio noise distribution curves. Temperate climate.

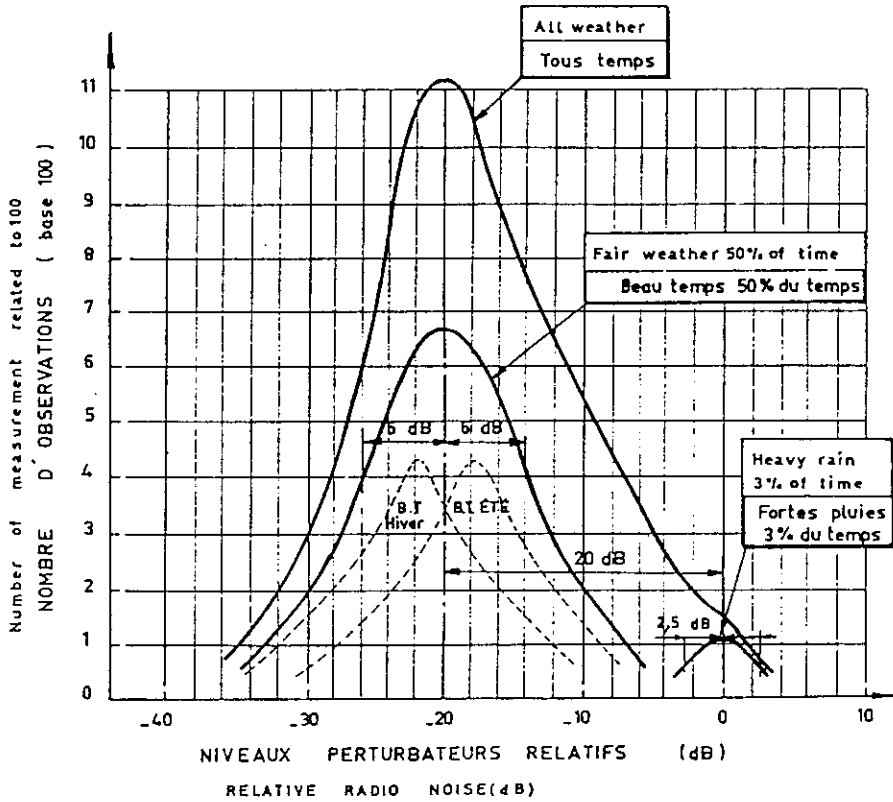


Figure 3.7

Histogramme type des niveaux perturbateurs. Climat tempéré
Typical radio noise histogram. Temperate climate.

bien établie d'intensité supérieure à 1 mm/heure. Cette valeur mesurée dans des conditions météorologiques bien précises ne dépend que des caractéristiques géométriques et électriques de la ligne. Elle est indépendante de l'état de surface des conducteurs et du climat local. En outre, comme l'écart-type indiqué ci-dessus englobe également les fluctuations de tension, on peut encore réduire la dispersion en relevant celle-ci pendant les mesures. Le niveau perturbateur sous forte pluie possède de remarquables propriétés de stabilité et de reproductibilité ce qui fait qu'on peut le considérer comme le niveau le plus caractéristique d'une ligne. Cependant dans un climat sec, la probabilité d'obtenir une forte pluie sur une longueur de ligne suffisante (10-11 km) peut être assez faible.

Le niveau fortes pluies ne doit pas être confondu avec le niveau perturbateur maximal de la ligne. Ce dernier qui peut être défini comme la valeur du niveau perturbateur qui n'est dépassée que pendant 1 % du temps (N.P. 99 %) est obtenu à partir de la distribution statistique tous-temps des niveaux. Le niveau maximal dépend du type de climat local et dans une faible mesure de l'état de surface des conducteurs. Pour un type de climat moyennement pluvieux, le niveau perturbateur 99 % est supérieur de 2 à 3 dB au niveau perturbateur "fortes pluies".

3.4.4 – Catégorie beau-temps.

La dispersion des niveaux est toujours plus importante par beau temps que sous forte pluie. L'écart-type de cette distribution est de l'ordre de 6 dB. La moyenne est voisine ou inférieure de quelques dB à la moyenne tous temps annuelle.

L'analyse de la répartition temporelle des niveaux, au cours d'une année, montre que l'on peut obtenir deux populations saisonnières plus ou moins séparées selon le climat, l'une à moyenne plus élevée au cours des mois d'été, l'autre à moyenne plus faible en hiver.

De plus, à ces variations saisonnières s'ajoutent des variations journalières avec des niveaux moyens en général plus élevés en début d'après-midi que la nuit.

La cause prépondérante de ces variations est l'état de surface des conducteurs, paramètre non mesurable directement. Les conducteurs d'une ligne peuvent être caractérisés à l'état neuf par un état de surface intrinsèque, fonction du toronnage, des éraflures du métal au cours des manipulations et des poussières ou débris collés sur la surface du câble.

Pendant les premiers mois de mise sous tension, les conducteurs vieillissent : ils se recouvrent d'une couche noirâtre, poreuse, qui atténue les aspérités du métal et qui améliore leur état de surface permanent ; leur niveau perturbateur baisse de 6 dB environ pendant cette période.

Ensuite cet état de surface des conducteurs vieillis peut fluctuer au cours du temps, sans que cette fluctuation soit toujours en relation avec les conditions climatiques. On a essayé de schématiser les diverses fluctuations du niveau perturbateur d'une ligne, dans le tableau 3.3.

On définit un niveau perturbateur beau-temps, comme étant la moyenne ou la médiane (en général très voisines) des mesures effectuées lorsque les conducteurs sont

This value, measured in well-defined meteorological conditions, depends only on the geometry and electrical characteristics of the line. It does not vary either with the surface state of the conductors or with the local climate. Furthermore, since the standard deviation mentioned above comprises voltage variations, the dispersion can be still further reduced by determining the line-voltage at the time of measurement. It follows that the "heavy-rain" level is remarkably stable and reproducible, enabling it to be treated as the most characteristic interference level of a line. Against this, the probability of obtaining, in a dry climate, heavy rain over a sufficient length of line (10-15 km) may well be small.

The "heavy-rain" level should not be confused with the maximum level from a line. This, definable as the level which is only exceeded for 1 % of the time, or the "99 % level", is obtained from the all-weather distribution. The maximum level is influenced by the climate and, although relatively little, by the surface state of the conductors. For average-rain conditions the 99 % level is 2 to 3 dB higher than the "heavy-rain" level.

3.4.4 – Fair weather category.

The dispersion of interference levels is always greater in fair weather than in heavy rain. The standard deviation of this distribution is around 6 dB. The average is within a few dB of the annual all-weather average.

Analysis of the variation with time of interference levels, in the course of a year, shows that two seasonal populations, which may be separable or not, depending on the climate, can be obtained. The summer population has a higher average than the winter.

In addition to these seasonal variations of level, daily variations are observed with average interference levels generally higher at the beginning of the afternoon than at night.

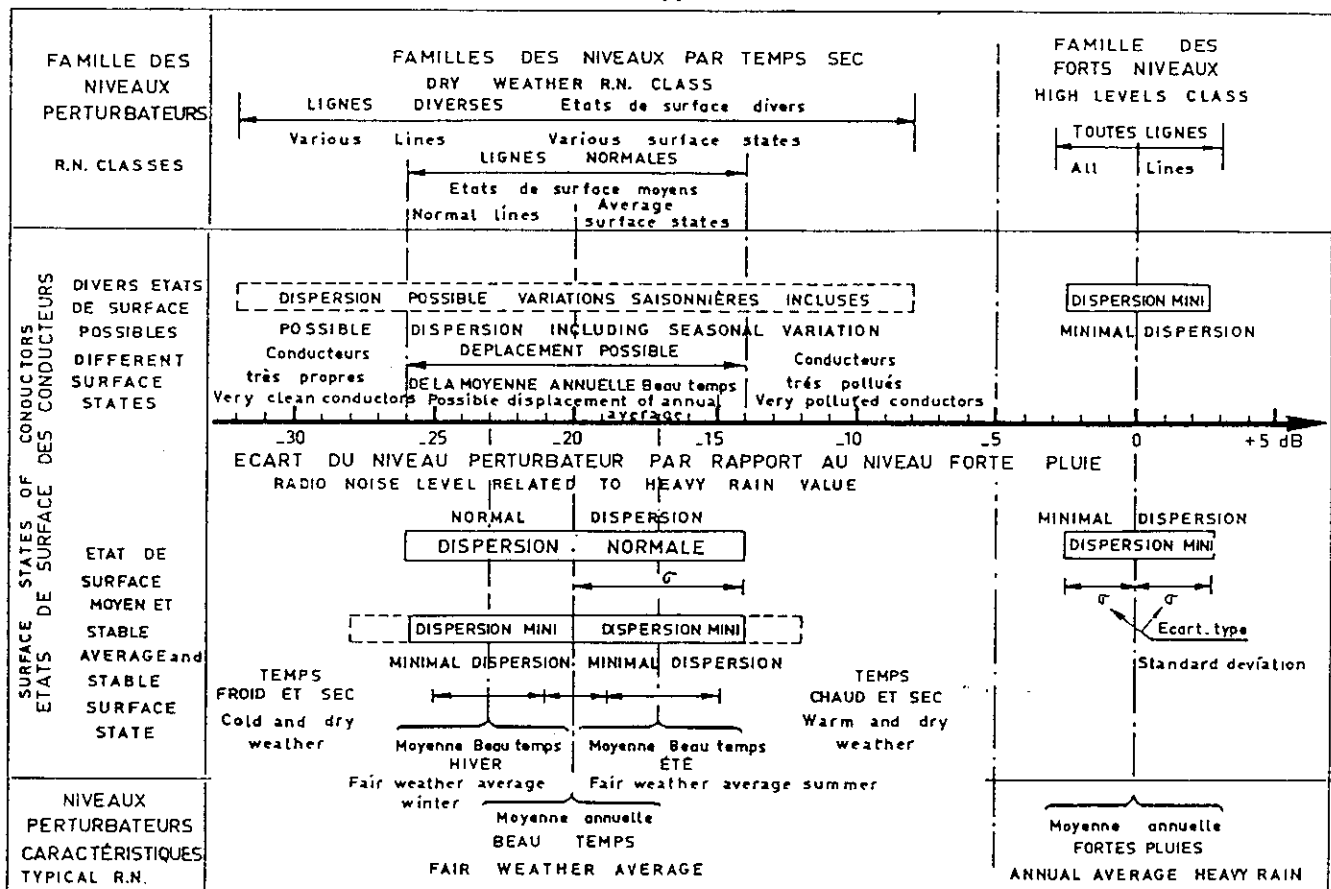
The main cause of these variations is the surface state of the conductors, a parameter that cannot be measured directly. The conductors of a line can be characterized in the brand new condition by an intrinsic surface state, a function of the stranding, mechanical abrasion during handling and of the amount of dust or debris stuck to the surface of the conductor.

The conductors age during their first few months of energization becoming coated with a blackish porous deposit. This masks roughnesses and improves their long-term surface-state, giving some 6 dB improvement.

Again, the surface state of the aged conductors may change in the course of time, not always because of climatic conditions. The different fluctuations in radio noise of a line have been tentatively shown diagrammatically in Table 3.3.

A fair-weather level can be defined as either the average or the median (generally close to each other) of the values measured when the conductors are free of de-

Tableau 3.3 – Table 3.3
 Estimation du niveau perturbateur d'une ligne de transport
 dans diverses catégories de temps.
 Prediction of radio noise level of a transmission line
 for various types of weather



N.B. The R.N. daily variations in fair weather are not included in this graph.
 Les variations journalières par temps sec ne sont pas incluses dans ce graphique.

exempt de dépôt humide. Cette valeur, lorsqu'elle est mesurée sur une année complète, est en principe indépendante du climat, mais elle dépend de l'état de surface intrinsèque des conducteurs. C'est en général la valeur la plus probable du niveau perturbateur d'une ligne.

3.4.5 – Niveaux perturbateurs caractéristiques – Conditions de leur mesure.

Pour déterminer le niveau perturbateur d'une ligne il n'est évidemment pas toujours possible d'effectuer des mesures permanentes pendant au moins une année. Il faut donc, compte tenu des connaissances acquises, chercher une méthode de mesure plus rapide.

On peut faire une remarque importante concernant les distributions statistiques annuelles : les moyennes beau temps et fortes pluies sont séparées par un intervalle moyen de 20 décibels (écart-type de cet intervalle, pour 30 lignes diverses = 3,5 dB).

Cette constatation permet de connaître le niveau beau-temps à partir du niveau fortes pluies et vice-versa.

Mesure pratique du niveau fortes pluies.

Compte tenu d'un écart-type de 3 dB pour cette catégorie, on montre que la moyenne de 10 mesures du niveau perturbateur effectuées dans ces condi-

posited moisture. Since this level is measured over a complete year, it is generally independent of the weather but dependent on the intrinsic surface state of the conductors. Usually it is the most probable interference-level of a line.

3.4.5 – Characteristic radio interference levels and their measurement.

When it is required to obtain the interference level of a line it is not always possible to take permanent measurements covering at least a year. Taking into account the available experience a quicker measuring method may be found.

An important point concerning annual statistical distributions is that the fair weather and heavy rain levels are separated on average by 20 dB (standard deviation of this interval, for 30 different lines = 3.5 dB)

This permits the fair weather level to be deduced from the heavy rain level and vice versa.

Practical measurement of the heavy rain interference level.

Taking into consideration a standard deviation of 3 dB for this category, the average of 10 measurements of radio noise effected under these meteorological condi-

tions météorologiques (intensité de pluie bien établie ≥ 1 mm/heure) a une probabilité de 95 % d'être comprise dans un intervalle de ± 2 dB centré sur la vraie moyenne des niveaux sous pluie. De plus ces mesures peuvent être effectuées à n'importe quelle saison de l'année. Cependant dans un climat sec les conditions strictes de pluie forte peuvent être difficiles à obtenir. Si l'intensité de la pluie est trop faible, ou la pluie irrégulière sur une partie de la ligne, on ne se trouve plus rigoureusement dans la catégorie "fortes-pluies". Dans ce cas l'écart-type peut se trouver augmenté et il sera prudent d'augmenter le nombre de mesures pour conserver la précision mentionnée ci-dessus.

Mesure pratique du niveau beau-temps.

Un calcul identique au précédent montre qu'à cause de l'écart-type de 6 dB de cette catégorie, on a une probabilité de 95 % que la moyenne de 10 mesures soit dans l'intervalle de $\pm 3,8$ dB autour de la vraie moyenne. Pour obtenir la même précision que sous fortes pluies il faudrait donc effectuer, en principe, au moins 55 mesures réparties sur l'année et à différentes heures de la journée.

Il faut cependant remarquer que ces mesures par beau temps sont évidemment plus faciles à effectuer et que pratiquement leur nombre peut être réduit par un choix judicieux des conditions atmosphériques au moment de la mesure, en tenant compte des variations saisonnières et diurnes connues du niveau perturbateur.

De plus ces mesures fournissent directement le niveau perturbateur le plus fréquent, ce qui peut présenter un intérêt certain lorsque le beau temps est prépondérant (dans la plus grande partie de l'Europe, les conducteurs sont secs, dans la journée, pendant 70 à 80 % du temps).

3.4.6 – Dispersion du niveau perturbateur due au manque d'homogénéité tout au long des lignes.

Si l'on considère une longue ligne de transport, il faut admettre une dispersion supplémentaire des valeurs due au manque d'homogénéité des conditions locales et des réflexions, tout au long de la ligne. La valeur moyenne du niveau perturbateur, mesurée dans des conditions climatiques définies (à sec ou sous pluie) varie selon les points de mesure choisis. La distribution de ces niveaux moyens est gaussienne, avec un écart-type identique à sec et sous pluie. La valeur de cet écart-type peut même être supérieure à l'écart-type admis pour la catégorie climatique considérée.

La variance totale du niveau perturbateur est exprimée par la relation suivante :

$$\sigma_t^2 = \sigma_a^2 + \sigma_l^2$$

où les indices a et l se rapportent aux variances climatique (a) et géographique (l).

3.5 – Conclusions.

Il s'avère qu'il est pratiquement impossible de connaître le niveau perturbateur d'une ligne de transport avec une précision meilleure que ± 2 dB environ. Cette remarque est valable aussi bien pour le calcul que pour la mesure.

tions (intensity of steady rain ≥ 1 mm/hour) has a 95 % probability of lying within an interval of ± 2 dB centred on the true average of the levels under rain. In addition, these measurements can be made at any time of the year. However, in a dry climate the strict conditions of heavy rain may be difficult to obtain. If the intensity of rainfall is too low, or if the rainfall is irregular over a part of the line, the "heavy rain" category does not rigorously apply. In this case, the standard deviation may be increased and it will be advisable to increase the number of measurements if the above-mentioned accuracy is to be maintained.

Practical measurement of the fair weather interference level.

A calculation identical to the preceding one shows that, because of the standard deviation of 6 dB for this category, there is a 95 % probability that the average of 10 measurements will lie within an interval of ± 3.8 dB around the true average. To obtain the same accuracy as under heavy rain at least 55 measurements must be taken, at different times throughout the year and at different times during the day.

These measurements are clearly easier to make in fair weather and in practice their number can be reduced by means of well-chosen atmospheric conditions at the moment of taking the measurements, taking into account seasonal and daily variations of the radio noise level.

Furthermore, these measurements immediately give the most common level of radio noise, which is certainly of interest when fair weather is preponderant. (In the major part of Europe conductors are dry during the day for 70 to 80 % of the time).

3.4.6 – Dispersion of radio noise due to non-uniformity along the lines.

If a long transmission line is considered, an additional dispersion of values due to lack of uniformity of local conditions and reflections along the line must be assumed. The average value of radio noise measured under the defined weather conditions (dry or rainy) varies according to the measuring points chosen. The distribution of these average interference levels is Gaussian, with the same standard deviation whether wet or dry. The value of this standard deviation may even be greater than the standard deviation assumed for the climatic category under consideration.

The total variance of the radio noise is expressed by the following formula :

where the indices a and l refer to the weather and local variances, respectively.

3.5 – Conclusions.

In practice the interference level of a transmission line cannot be found with an accuracy better than around ± 2 dB. This applies both to calculated and to measured levels.

Compte tenu des variations annuelles du niveau perturbateur on peut définir deux valeurs caractéristiques : sous fortes pluies et par beau temps sec. La différence entre ces deux valeurs est d'environ 20 dB.

Lorsqu'on se contente de relever le niveau perturbateur en un seul point, la mesure s'effectue à une distance latérale de 15 m d'un conducteur extérieur ou à 20 mètres en distance directe de ce conducteur, en milieu de portée, à 2 mètres au-dessus du sol et à une fréquence de 500 kHz.

Des profils latéraux et des spectres de fréquence types permettent de déterminer les niveaux à des distances ou des fréquences différentes.

En pratique, le choix des conditions climatiques pour effectuer la mesure du niveau perturbateur caractéristique d'une ligne pourra dépendre du type du climat local.

Taking into account annual variations of radio noise, two characteristic values can be defined, viz. in heavy rain and in fair, dry weather. The difference between these two values is around 20 dB.

If it is sufficient to make a measurement at one point only, this point is chosen either at a horizontal distance of 15 m from an outside conductor, or 20 m directly from it, at mid-span. The height above ground is 2 m and the measuring frequency 500 kHz.

Lateral noise profiles and standard frequency spectra permit noise levels to be determined at different distances and frequencies.

In practice, the choice of weather conditions in which to make the measurement of the characteristic radio noise of a line may depend on the type of local climatic conditions.

MÉTHODE DE PRÉDÉTERMINATION DU NIVEAU PERTURBATEUR DÛ AUX CONDUCTEURS D'UNE LIGNE DE TRANSPORT

4.1. Historique.

Vers la fin des années 50, les chercheurs, dans différents pays, s'efforcèrent d'établir des méthodes de prédétermination du niveau perturbateur des conducteurs d'une ligne, afin de permettre un choix correct des sections à utiliser sur les lignes 400-500 kV. A cause de la complexité des méthodes analytiques, les premières méthodes de prédétermination furent empiriques ou plus exactement semi-empiriques. En effet, ces méthodes n'étaient pas seulement fondées sur des résultats expérimentaux, mais prenaient en compte certains aspects théoriques du phénomène couronne. D'autre part, à cause de l'instabilité du phénomène couronne, et du fait que peu de mesures statistiques systématiques avaient été réalisées, ces premières méthodes étaient essentiellement comparatives. Elles s'appliquaient à des mesures isolées du niveau perturbateur et ne fournissaient que la différence des niveaux entre un conducteur connu choisi comme référence et un conducteur étudié, dans les mêmes conditions atmosphériques et d'état de surface. Cette différence de niveau n'était due qu'aux variations des paramètres constructifs principaux.

La notion de limite relative des niveaux perturbateurs se trouva ainsi introduite : une ligne projetée ne devait pas avoir un niveau perturbateur supérieur à celui d'une ligne réelle ayant un comportement acceptable.

Lorsque des mesures de longue durée eurent été réalisées sous des lignes en service, les méthodes de prédétermination furent complétées et améliorées. Bien qu'étant toujours intrinsèquement comparatives, elles furent transformées pour donner directement le niveau perturbateur d'une ligne quelconque, en incluant dans les formules comparatives, le niveau perturbateur de la ligne choisie une fois pour toutes comme référence. Ce niveau perturbateur était en général défini par beau temps ou mauvais temps et forte pluie.

Parallèlement, les études théoriques sur la génération de la perturbation et sa propagation le long des conducteurs et perpendiculairement à ceux-ci, progressèrent au cours de cette période. Ceci permit l'élaboration de méthodes de prédétermination analytiques, comportant néanmoins certaines bases expérimentales. Par principe même les méthodes analytiques sont des méthodes absolues donnant directement le niveau perturbateur d'une ligne quelconque dans des conditions atmosphériques bien définies, en général sous plus forte pluie.

PREDICTION METHODS OF R.I. DUE TO TRANSMISSION LINE CONDUCTORS

4.1. History

By the end of the 1950's, the practical requirement to design and install 400-500 kV transmission systems was adding emphasis to previous studies of corona effects.

Particularly in relation to radio noise, engineers were concentrating on the establishment of methods for predetermining the noise level from conductors, to guide their selection. Because of the greater difficulties involved in analytical methods initial predetermination methods were mainly empirical or, rather, semiempirical in character. They were based not only on experimental data but also on theoretical assumptions connected with the general nature of corona. In addition, because of the essentially statistical nature of radio noise and in the absence of adequate data, from long term recordings, on the distribution of absolute interference levels in service, the above methods, being mostly based only on data of instantaneous measurements, were initially of only comparative character. They supplied only the variations in the RI level between that of the conductor under consideration and of a reference conductor, arising from variations in the main design parameters, but for the same atmospheric and surface state conditions.

The notion of relative design limits of interference-levels was thus introduced ; a projected new line should not produce a higher level than that from an existing line of acceptable behaviour.

As more complete data of long term recordings from test or operating lines became available the predetermination methods were completed and improved. While maintaining their intrinsically comparative nature, they were developed to permit absolute evaluation of the noise level of a line. This was achieved by the inclusion, in the comparative formulae, of the absolute level of the reference line. This level was generally referred to an average condition of fair, foul or heavy rain weather.

At the same time progress was made with theoretical studies both on noise generation and on propagation along the conductors and transversally to the line. This allowed the evolution of predetermination methods mainly analytical in nature. Although these were called analytical, in fact they had an experimental content. Even analytical methods are, in essence, "absolute" since they lead directly to the prediction of the absolute level of conductor noise, with reference to a well-defined atmospheric condition, generally heavy rain.

On peut remarquer que la plupart des méthodes de prédétermination actuelles paraissent être extrapolables aux lignes de transport à très haute tension. Cependant cette extension reste à vérifier avec précision.

Many of the available predetermination methods are also apparently applicable to the UHV transmission field. This extrapolation is still to be verified.

4.2. Méthodes empiriques et semi-empiriques

4.2. Empirical and semi-empirical methods

Ces formules de prédétermination sont en général relativement simples et peuvent être utilisées facilement par le projeteur. Un certain nombre de formules, parmi les plus connues, sont présentées sous une forme comparative dans la partie gauche du tableau 4.1. Ces formules donnent le niveau perturbateur d'un conducteur unique ou d'un faisceau par rapport au niveau d'un

These predetermination methods are generally quite simple and easy for the line-designer to apply. Some of the best known are compared in Table 4.1. The comparative formulae shown on the left give the noise level of a single conductor or bundle as a function of the noise level of a reference conductor and of the variations in the main design parameters, (subconductor gradient

Tableau 4.1 – Méthodes empiriques. Formules de calcul
Table 4.1 – Empirical methods. Predetermination formulae

Méthodes Empiriques - Formules de Calcul - Empirical Methods - Predetermination Formulae							
Méthode Method	Formules comparatives Comparative formulae E - E ₀ (dB)	NF d'une ligne triphasé Three phase line levels Coefficients numériques Numerical coefficients Limites de validité Limits of validity	Formules absolues Absolute formulae E (dB/1 µV/m)	E ₀ (dB/1 µV/m)			Méthode Method
				50 % Beau temps fair weather	Moy. Mauvais temps Mean foul weather	Moy. Fortes pluies Mean heavy rain	
1 400 kV FG (Germany)	$K_g(9m - 9m_0) + 40 \lg \frac{d}{d_0} + 10 \lg \frac{n}{n_0} + K_D \lg \frac{D_0}{D} + 20 \lg \frac{1+i_0^2}{1+i^2}$	U = 785 kV ⇒ K _g = 3 U < 700 kV ⇒ K _g = 0.5 15 kV/cm < 9m < 19 kV/cm K _D = 32 ± 2 - 0.5 < i < 1 MHz E ₁ - E ₂ > 3 dB ⇒ E ₁ = E ₂ E ₁ - E ₂ < 3 dB ⇒ E ₁ = $\frac{E_1 + E_2}{2} + 1.5$ dB	$E_0 - K_g(9m - 16.95) + 40 \lg \frac{d}{3.93} + 10 \lg \frac{n}{4} + K_D \lg \frac{20}{D} + 20 \lg \frac{1+0.5^2}{1+i^2}$ f ₀ = 0.5 MHz	56.7 ± 5	-	73.7 ± 3	400 kV FG (Germany)
2 ENEL (Italy)	$3.8(9m - 9m_0) + 40 \lg \frac{d}{d_0} + 10 \lg \frac{n}{n_0} + 30 \lg \frac{D_0}{D} + 20 \lg \frac{1+i_0^2}{1+i^2} + \frac{q-40}{300}$	E ₁ = E ₂ E ₁ d0 à des conduct de même phase s'ajoutent quadratiquement E ₁ from conduct. of same phase are added quadratically	$E_0 + 3.8(9m - 15) + 40 \lg \frac{d}{5.0} + 10 \lg \frac{n}{30} + 30 \lg \frac{20}{D} + 20 \lg \frac{1+0.5^2}{1+i^2}$ f ₀ = 1 MHz	53	64	68	ENEL (Italy)
3 Shiobara (Japan)	$F(f) - F(9m) + 40 \lg \frac{d}{d_0} + 20 \lg \frac{h}{h_0} \frac{D_0^2}{D^2} + 17 \lg \frac{f_0 - 1910 f}{f_0 - 1910} + 12 \lg \frac{f_0 - 1910 f}{f_0 - 1910}$	Beau temps - Fair weather F(f) - F(9m) = 3.7(9m - 9m ₀) F(f) = 3.7 9m - 14.2 Mauvais temps - Foul weather F ₀ = Vior [] F ₀ = See []	$F(f) + 40 \lg \frac{d}{2.33} + 20 \lg \frac{h}{D^2} - 17 \lg \frac{f - 12 \lg \frac{f}{f_0}}$ f ₀ = 1 MHz	-	-	-	Shiobara (Japan)
4 Westinghouse (USA)	$3.5(9m - 9m_0) + 30 \lg \frac{d}{d_0} + 20 \lg \frac{h}{h_0} \left(\frac{D_0}{D}\right)^x + 10(f_0 - f) + 40(1 - \frac{\delta}{\delta_0})$	0.2 < i < 1.6 MHz D < 80 m ⇒ x = 2 D > 60 m ⇒ x = 1	$E_0 + 3.5(9m - 17.5) + 30 \lg \frac{d}{3.51} + 20 \lg \frac{h}{13} \left(\frac{20}{D}\right)^x + 10(1 - \eta) + 40(1 - \delta)$ f ₀ = 1 MHz	46	-	78	Westinghouse (USA)
5 EGU (Czechoslovakia)	$4.5(9m - 9m_0) + 34 \lg \frac{D_0}{D} + 22 \lg \frac{f_0 - 1910 f}{f_0 - 1910} + 15 \lg \frac{f_0 - 1910 f}{f_0 - 1910}$		$E_0 + 4.5(9m - 18) + 34 \lg \frac{28}{D^2} + 22 \lg \frac{f_0 - 1910 f}{f_0 - 1910} + 15 \lg \frac{f_0 - 1910 f}{f_0 - 1910}$ f ₀ = 1 MHz	37	47	-	EGU (Czechoslovakia)
6 Ontario Hydro (Canada)	$K_g(1910 9m - 1910 9m_0) + 40 \lg \frac{d}{d_0} + K_D \lg \frac{D_0}{D} + 20 \lg \frac{C+i_0^2}{C+i^2}$	Beau temps - Fair weather ⇒ K _g = 148 Mauvais temps - Foul weather ⇒ K _g = 120 Lignes en nappe - Horizontal lines ⇒ K _D = 40 Lignes verticales - Vertical lines ⇒ K _D = 32 f > 1 MHz ⇒ C = 1 f < 1 MHz ⇒ C = 0.5	$E_0 + K_g(1910 9m - 1910 18.8) + 40 \lg \frac{d}{2.54} + K_D \lg \frac{30.5}{D} + 20 \lg \frac{C+1}{C+i^2}$ f ₀ = 1 MHz	32 lignes en nappe (horizontal lines) 36 lignes verticales (vertical lines)	-	61* (max foul : weather horizontal lines) 64** (max foul : weather vertical lines)	Ontario Hydro (Canada)
7 A E P test line method (USA)	3.5(9m - 9m ₀)	Pour ligne 500 ou 750 kV ayant même configuration que les lignes test, f ₀ = 1 MHz. Only for 500 or 750 kV lines with same configuration as test lines, f ₀ = 1 MHz. ① 500 kV - 2 X 4.07 cm 9m ₀ Ph.1 et 3 : 16.78 kV/cm Ph.2 : 17.82 kV/cm ② 750 kV - 4 X 3.15 cm 9m ₀ Ph.1 et 3 : 17.10 kV/cm Ph.2 : 18.62 kV/cm ③ 750 kV - 4 X 3.037 cm 9m ₀ Ph.1 et 3 : 19.21 kV/cm Ph.2 : 20.95 kV/cm	$E_0 + 3.5(9m - 9m_0)$	38.7	56.7	62.7	A E P test line Method (USA)
8 GE Project EHV Base Case (USA)	Cette méthode donne le NP moyen par beau temps de quelques lignes-types. Une série d'abaques donne des corrections en fonction des différents paramètres. (Reference Book - Edison Electric Institute - 1968 - Chapter V pages 173 - 214).						GE Project EHV Base Case (USA)

E = NP d'une phase dB - RI level of one phase, dB
 E₁ = NP d'une ligne triphasé, dB - RI level of a three-phase line, dB
 E₁ E₂ = NP des 2 phases prépondérantes au point de mesure (E₁ > E₂)
 RI levels of the two highest contributing phases at the measuring point (E₁ > E₂)
 d = diamètre du conducteur, cm - (sub) conductor diameter, cm
 n = Nb de conducteurs du faisceau - Number of subconductors in a bundle
 m = Dist. antenne - conducteur m - Conductor to antenna distance, m
 h = Hauteur de la ligne, m - Line height, m
 f = Fréquence MHz - Frequency, MHz
 s = Espacement des cond. du faisceau, cm - Bundle separation, cm
 δ = Densité relative de l'air - Relative air density
 q = Altitude (m) - Elevation above sea level, m
 9m = Gradient moyen, kV_{eff}/cm - Average gradient, kV_{eff}/cm
 9m₀ = Gradient max, kV_{eff}/cm = 9m(1 + βd/2S)
 Maximum gradient, kV_{eff}/cm = 9m(1 + βd/2S)
 9₀ = Gradient inférieur du conducteur inférieur = 9m(1 + βd/2S)
 Bottom gradient of the bottom subconductor, kV_{eff}/cm = 9m(1 + βd/2S cos γ)
 β = Facteur de distribution du gradient = 2(n - 1) sin (π/n)
 Distribution factor of the gradient = 2(n - 1) sin (π/n)
 γ = Angle entre 9₀ et 9m - Angle between bottom and maximum

* 61 - Max. mauvais temps, lignes en nappe
 ** 64 - Max. mauvais temps, lignes verticales

conducteur de référence et en fonction des variations des principaux paramètres constructifs : gradient et diamètre des conducteurs élémentaires, nombre de conducteurs par phase. Les conditions atmosphériques et l'état de surface des conducteurs sont supposés identiques. Dans le cas d'un faisceau, le gradient considéré est généralement le gradient maximal, sauf dans la formule italienne qui se rapporte au gradient moyen. La précision de la prédétermination par ces méthodes est d'autant meilleure que les caractéristiques du conducteur de référence sont plus proches de celles du conducteur étudié.

Les formules de prédétermination empiriques et semi-empiriques sont données sous leur forme absolue dans la partie droite du tableau 4.1. Ces formules furent obtenues à partir des formules comparatives par l'incorporation d'une ligne de référence unique, dont les niveaux perturbateurs moyens par beau temps et mauvais temps ou fortes pluies furent déterminés par des mesures de longue durée.

Des compléments d'information sur les méthodes de prédétermination empiriques et semi-empiriques (historique, support théorique, paramètres de base et limites d'application) sont donnés dans le rapport de l'enquête CIGRE-IEEE sur les niveaux perturbateurs des lignes de transport ainsi que dans les publications présentant ces méthodes.

Il faut remarquer que toutes les méthodes ci-dessus se réfèrent au champ électromagnétique au point de mesure ou au courant perturbateur injecté dans les conducteurs. De ce fait, à côté d'autres approximations, ces méthodes comportent une cause intrinsèque d'imprécision due au fait que le champ électromagnétique et le courant perturbateur ne dépendent pas seulement des caractéristiques des conducteurs mais également du système de capacités de la ligne. Pour éliminer cette imprécision il faut rapporter le calcul à une grandeur intrinsèquement caractéristique de la perturbation produite par un conducteur ou un faisceau. Cette grandeur est la fonction excitatrice définie par les méthodes analytiques.

4.3. Méthodes analytiques

A cause de l'extrême complexité du phénomène couronne, qui est à l'origine de la perturbation il n'existe en pratique aucune méthode totalement analytique. Les méthodes dites analytiques comportent également un support expérimental qui permet essentiellement d'adopter en connaissance de cause certaines simplifications des calculs. Néanmoins la partie expérimentale de ces méthodes reste limitée devant l'analyse du phénomène prise en compte.

Deux méthodes analytiques sont connues : l'une présentée par EdF, France, l'autre par les Etats-Unis (Project UHV). Toutes deux utilisent le concept de la fonction excitatrice comme grandeur caractéristique du niveau perturbateur d'un conducteur ou d'un faisceau. La fonction excitatrice définit mieux la génération de la perturbation due à un conducteur que le courant injecté, qui n'est en fait qu'une quantité dérivée, dépendant du système de capacités de la ligne. La fonction excitatrice est définie par la relation matricielle ci-après, valable pour une ligne multifilaire :

and diameter, number of subconductors per phase). The atmospheric conditions and surface state are assumed the same. In the case of a bundle the maximum gradient is generally considered ; the exception is the Italian formula which refers to the average gradient. The highest precision of predetermination is obtained by choosing a reference conductor of characteristics close to those of the conductor or bundle being studied.

The characteristics of the absolute empirical and semi-empirical formulae are illustrated in Table 4.1. On the right hand side these formulae were mostly obtained from the comparative ones by reference to a line whose average noise levels, for fair and foul weather and for heavy rain, were well established by long-term measurements.

Further details on the empirical and semiempirical predetermination methods (history, theoretical background, basic requirements and limits of application) can be obtained from reports related to a CIGRE/IEEE Survey on transmission line radio noise, as well as from the publications dealing specifically with each method.

It is worth noting that all the previously discussed methods refer either to the electromagnetic field at the measuring point or to the radio noise current injected in the conductors. In this sense they contain, apart from other approximations, an intrinsic inaccuracy since the electromagnetic field or radio noise current do not depend only on the conductor characteristics, but also on the system of line capacitances. For greater precision the calculation should be related to a quantity uniquely expressing the interference produced by a given conductor or bundle. This quantity is the Excitation Function defined by analytical methods.

4.3. Analytical methods

Because of the extreme complexity of the corona phenomena which cause noise, no purely analytical predetermination method exists, in practice. Even the so-called analytical methods have a certain experimental content : this however is small in comparison with the complex analyses which are involved.

The analytical methods are basically two : the French (EdF) method and the American (Project UHV) method. Both use the concept of an Excitation Function characteristic of a given conductor or bundle. This better defines the interference-generation than does the injected current, which is merely a derived quantity which depends on the system of line capacitances. The Excitation Function is defined by the following matrix relation, valid for a multi-conductor line :

$$\{I\} = \frac{l}{2\pi\epsilon} \times [C] \times \{\Gamma\} \tag{1}$$

où $\{I\}$ est la matrice unicolonne des courants injectés en $\mu A/m^{1/2}$

où $[C]$ est la matrice des capacités de la ligne

où $\{\Gamma\}$ est la matrice unicolonne des fonctions excitatrices en $\mu A/m^{1/2}$

La fonction excitatrice est mesurée dans des "nasses" monophasées, de dimensions relativement réduites, pour différents types de faisceaux de conducteurs, dans des conditions d'état de surface connues des conducteurs. En général ces mesures sont effectuées sous forte pluie, condition où le niveau perturbateur est stable et reproductible.

Les courants perturbateurs injectés par unité de longueur des conducteurs sont calculés, à partir de ces fonctions excitatrices, par l'équation (1). La théorie de la propagation modale permet d'obtenir les courants de mode dans une section de la ligne, en fonction des atténuations modales et des couplages entre phases. Les courants perturbateurs totaux sont obtenus, dans la même section, par addition quadratique étendue à toute la longueur de la ligne. Finalement, on calcule à partir de ces courants totaux le champ perturbateur au voisinage de la ligne. Ce calcul peut être effectué pour d'autres points à des distances croissantes de la ligne et l'on obtient ainsi le profil latéral du champ perturbateur. Des programmes de calcul sur ordinateur existent pour ces opérations.

Pour la méthode EdF (France), les fonctions excitatrices sous fortes pluies, pour des faisceaux comportant jusqu'à huit conducteurs, sont données par la figure 4.1 ; les corrections proposées pour obtenir le niveau perturbateur dans d'autres types de temps sont indiquées sur le tableau 3.3.

where $\{I\}$ is the matrix of injected currents in $\mu A/m^{0.5}$, $[C]$ the matrix of line capacitances and $\{\Gamma\}$ the matrix of Excitation Functions in $\mu A/m^{0.5}$.

The Excitation Function can be measured in single-phase test cages of reduced dimensions for different conductor arrangements and in known conductor surface conditions: for these, heavy rain is generally chosen, since the level of noise then generated by a conductor or bundle, at a given gradient, is stable and reproducible.

Starting with the Excitation Function as obtained from cage tests and the system of line capacitances, the injected noise currents per unit conductor length are calculated using equation (1). The theory of modal propagation is applied to obtain the modal currents flowing in a given cross-section of the line, as functions of the attenuation along the line and mutual coupling between phases. The total noise currents, in the same cross-section, are then obtained by quadratic summation over the whole line length. Finally, based on the total noise currents the noise fields in the vicinity of the line are calculated. This calculation can be made for points at increasing distances from the line and the lateral noise profile thus derived. Computer programs to perform this calculation have been written.

For the EdF method (France), the heavy rain Excitation Functions of different conductor bundles of up to 8 subconductors can be derived from Figure 4.1, while Table 3.3 gives corrections proposed for different weather conditions.

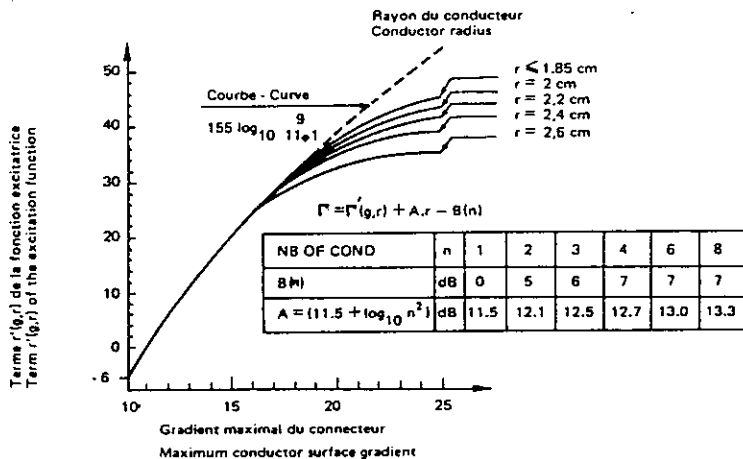


Figure 4.1
Abaque des fonctions excitatrices EdF (Fortes pluies)
Graph of excitation functions under heavy rain (EdF Method).

Les fonctions excitatrices sous fortes pluies utilisées dans la méthode du "Project UHV (U.S.A.) sont données par la figure 4.2 pour des faisceaux de conducteurs symétriques. Ces fonctions ont été mesurées sur des faisceaux comportant jusqu'à 16 conducteurs. Les niveaux perturbateurs par beau temps sont inférieurs de 20 dB aux niveaux sous fortes pluies.

As regards the Project UHV method (USA), the Excitation Functions of symmetrical conductor bundles under heavy rain are given in Figure 4.2. These functions were obtained from tests on bundles of up to 16 subconductors. A 20 dB reduction for fair weather average levels should be applied to the heavy rain levels.

Le principal avantage des méthodes analytiques est dû à leur important support théorique qui permet leur application à des lignes de configurations très variées. L'extrapolation de ces calculs à des lignes projetées, qui peuvent être fort différentes des lignes existantes, paraît possible tant que les simplifications de calcul adoptées restent valables.

L'exposé complet de ces méthodes est fait dans les publications citées en référence.

The principal advantage of analytical methods is that their theoretical basis allows their application to a wide range of configurations. Extrapolation to projected future lines, of widely different form from existing ones, appears possible within the validity-limits imposed by the simplifications.

Further details on the analytical methods can be obtained from references dealing specifically with each method.

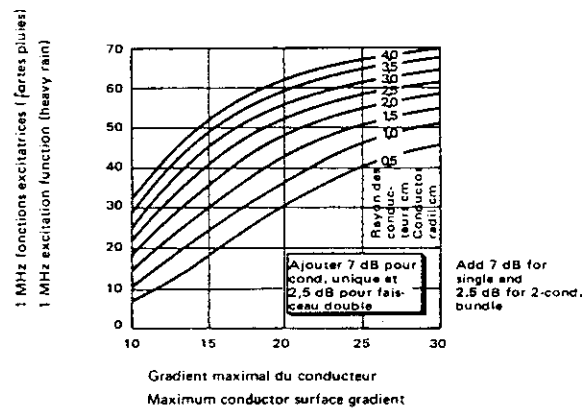


Figure 4.2

Fonctions excitatrices (Project UHV)
Graph of excitation functions under heavy rain (Project UHV)

4.4. Conclusion

Une première vérification des méthodes de prédétermination a été faite en 1966, à l'aide des résultats de mesures (mesures isolées pour la plupart) disponibles à l'époque. Cette analyse, limitée aux méthodes empiriques et semi-empiriques sous leur forme comparative, montra un bon accord entre les valeurs mesurées et calculées par la plupart des formules.

Une analyse plus complète des méthodes de prédétermination empiriques avec des formules absolues et des méthodes analytiques a été faite tout récemment à partir des résultats obtenus au cours de l'enquête mondiale CIGRE-IEEE. La plupart de ces résultats étaient des valeurs obtenues par des mesures de longue durée. Les résultats de cette analyse peuvent être résumés comme suit :

- Plusieurs des méthodes empiriques et semi-empiriques, sous leur forme absolue conduisent à une prédétermination satisfaisante des niveaux perturbateurs des lignes de transport dans la gamme des tensions allant de 220 à 750 kV. Ces résultats sont comparables aux résultats obtenus à partir des méthodes analytiques.

- Non seulement le niveau perturbateur sous forte pluie, mais également les niveaux moyens par beau temps peuvent être calculés par diverses méthodes avec une approximation satisfaisante.

Une analyse de ces méthodes de prédétermination a conduit à dériver une nouvelle méthode unique qui consiste en une formule de calcul très simple et qui est présentée dans le chapitre 6 de ce guide.

4.4. Conclusions

A first analysis of the predetermination methods was made in 1966 on the basis of the test results (mainly of instantaneous measurements) then available. This analysis was limited to empirical and semiempirical methods in their relative formulation, and substantially showed a satisfactory agreement, for most methods, between predicted and actually measured levels.

A more complete analysis of the different predetermination methods with both absolute and analytical bases was made recently using the data collected by the CIGRE/IEEE Survey. Many of these data resulted from long-term recording on both test and operating lines. The details of this analysis, may be summarized as follows :

- Several empirical and semiempirical methods of the absolute type can give satisfactory predictions of the RI levels of transmission lines for 220-750 kV. These are comparable with those obtained using the analytical methods.

- Not only the heavy rain levels, but also the RI levels for average fair weather conditions can be predicted to a satisfactory approximation using the different predetermination methods.

From a critical analysis of the different prediction methods, a new method has been derived that can be considered optimal. This method is expressed by a fairly simple formula, which is presented in Chapter 6 of this Guide.

NIVEAU PERTURBATEUR DÛ A L'APPAREILLAGE DE POSTE ET DE LIGNE

5.1. Généralités

Alors que les conducteurs ont leurs sources perturbatrices élémentaires réparties sur de très grandes longueurs, l'appareillage peut être considéré comme générateur de perturbations bien localisé, ce qui permet la mesure de son niveau à l'aide d'un montage de laboratoire. Il est généralement admis que cette mesure peut s'effectuer en local fermé, ce qui revient à ne pas tenir compte des conditions atmosphériques réelles. Bien plus, du fait de l'incertitude de leur effet, et notamment de l'effet de pollution, les spécifications actuelles se limitent à du matériel sec et propre, pratiquement à l'état neuf. Si cette procédure est acceptable pour l'appareillage et ses accessoires métalliques, nous verrons plus loin qu'elle l'est moins pour les chaînes d'isolateurs ; des travaux récents ont en effet montré que la pollution surtout combinée avec un dépôt d'humidité pouvait profondément modifier les caractéristiques perturbatrices des isolateurs.

La conséquence de ces difficultés relatives aux accessoires et aux isolateurs est que ni la technique des essais ni même les principes énoncés ci-après ne sont encore pleinement et universellement standardisés. Les pratiques varient d'un pays à l'autre mais sont généralement tout à fait rudimentaires : elles comportent l'observation de la tension requise pour provoquer un effet couronne visible sur les accessoires, et aussi la détection visuelle ou la mesure du niveau perturbateur et de la tension d'apparition des aigrettes sur des isolateurs individuels ou des chaînes complètes.

Une pratique, suivie dans plusieurs pays, consiste à choisir des tensions d'essai élevées, c'est à dire supérieures à celles normalement appliquées en service aux objets essayés, dans le but de fournir une marge de sécurité pour prendre en compte les variations causées par des éraflures survenues lors de l'installation ou le vieillissement.

Nous montrerons dans ce chapitre qu'une analyse quantitative de l'effet perturbateur des objets considérés ici est cependant possible ; et que, grâce aux connaissances théoriques acquises ces dernières années, on peut faire la part exacte de chacun des éléments d'une ligne, dans le bruit radio-électrique global qu'elle produit.

RADIO INTERFERENCE FROM SUBSTATION EQUIPMENT AND LINE FITTINGS

5.1. General

Although overhead line-conductors have their elementary sources of interference distributed over very great lengths, a piece of substation equipment can be considered as a localized generator of interference, which permits its level to be measured by means of a laboratory set-up. It is generally assumed that this measurement can be made indoors, which amounts to disregarding atmospheric conditions. In addition, because of the uncertainty of the effects of atmospheric changes and in particular the effect of pollution, present specifications are limited to dry, clean equipment, in new condition. Even if this procedure is acceptable for equipment and metal fittings it will be shown later that it is less acceptable for strings of insulators ; recent work has in effect shown that pollution, especially when humid, may profoundly alter the interference characteristics of insulators.

As a consequence of these difficulties in relation to equipment and insulators, neither the testing technique nor even the underlying principles are yet fully agreed internationally. The practice varies from country to country but is generally quite rudimentary, amounting to observation of the voltage required to cause visible corona, on equipment, and to measurement of R.I. level and of inception voltage, both visible and instrumental, of single insulator units and complete strings.

A practice followed in several countries has been to specify elevated test-voltages, i.e. above those normally applied to the tested objects in service, with the object of providing a safety-margin to cope with variations caused by minor damage during installation or, for instance, by ageing.

In this chapter it is shown that a quantitative analysis of the interference effect of the objects considered here is possible, and that, thanks to the theoretical knowledge acquired in the last few years, the contribution made by each element in a line can be determined as a fraction of the total radio noise.

5.2. Essais en laboratoire

5.2.1. Dispositions de l'essai en laboratoire

Comme on l'a dit, il est possible de mesurer le niveau perturbateur de l'équipement de postes et de lignes de transport à haute tension (appareillage, accessoires, chaînes d'isolateur, etc.) en laboratoire. Le circuit général de mesure a été préconisé par le CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) avec couplage capacitif de l'appareil de mesure. Ce schéma est représenté à la figure 5.1. et s'inspire des considérations suivantes : lorsqu'un appareil ou une chaîne d'isolateurs sont raccordés à une ligne, ils injectent dans celle-ci un courant perturbateur qui va s'y propager. La ligne est donc vue par le générateur de perturbations sensiblement comme une résistance, égale à son impédance caractéristique Z dans le cas d'un appareillage de poste ou à sa demi-impédance $Z/2$ dans le cas d'une chaîne d'isolateurs.

5.2. Laboratory testing

5.2.1. Laboratory test arrangement

It is possible to measure the R.I. of equipment for substations and transmission lines (apparatus, fittings, insulator strings, etc.) in the laboratory. The general measuring circuit was recommended by CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radiophoniques) with capacitive coupling to the measuring set. This diagram, Figure 5.1, is based on the following considerations : when a piece of apparatus or a string of insulators is connected to a line, it injects an R.I. current into it which propagates. The line is therefore seen by the interference generator more or less as a resistance, equal to its characteristic impedance Z in the case of station fittings or to $Z/2$ in the case of a non-terminal string of insulators.

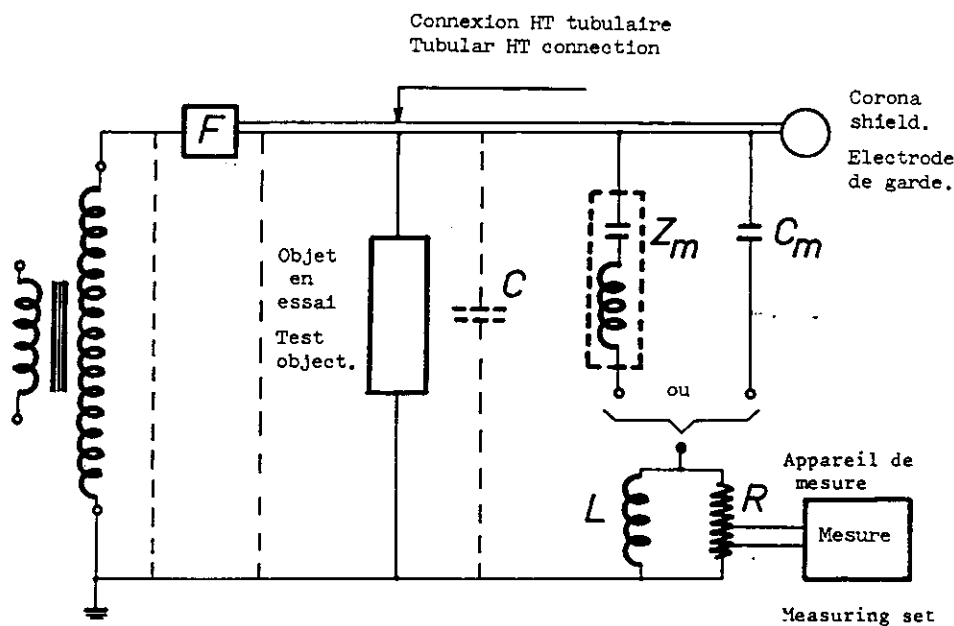


Figure 5.1

Schéma d'essai en laboratoire recommandé par le CISPR
Measuring circuit recommended by CISPR.

L'impédance de ligne est représentée dans le schéma CISPR par la résistance $R = 300 \Omega$. Les courants à haute fréquence engendrés par l'appareil en essai empruntent la partie du circuit de mesure tracé en gras.

Le courant perturbateur est conduit vers le circuit de mesure par le circuit de couplage Z_m ou le condensateur de couplage C_m . Le circuit comportant l'impédance Z_m permet des mesures exactes mais seulement à une fréquence fixe f . De ce fait, il est préférable d'employer un condensateur simple C_m (sans inductance interne). Si $C_m \geq 5 C$, l'erreur de mesure est inférieure à 2 dB. C représente la capacité totale de l'objet essayé et des connexions haute tension en aval du filtre F . Ce filtre découple le circuit de mesure de la source de tension pour les hautes fréquences. La publication CEI 437 recommande que l'impédance de F soit d'au moins 10 à 20 $K\Omega$ à la fréquence de mesure. La fréquence recommandée est de 0,5 ou 1,0 MHz.

En parallèle sur la résistance R , on branche l'inductance L , qui shunte la résistance R pour la fréquence de

The line impedance is represented in the CISPR diagram by the resistance $R = 300 \Omega$. The high-frequency currents generated by the test apparatus follow the part of the measuring circuit drawn with thick lines.

The R.I. current is fed to the measuring circuit through the coupling circuit Z_m or coupling capacitor C_m . The circuit with impedance Z_m allows exact measurements but only at a fixed frequency, f . It is thus preferable to use a simple capacitor C_m (without internal inductance). If $C_m \geq 5 C$ the error in the measured value is less than 2 dB. C represents the total capacity of the test object and the HV connections behind the filter F . This filter separates the measuring circuit from the voltage source for high frequencies. Values recommended by IEC Publication 437 are from 10 to 20 $K\Omega$ for the impedance at the measured frequency. Recommended frequencies are 0.5 or 1.0 MHz.

R is shunted by an inductor L at 50 Hz. L is required to obey the relation $2\pi f_0 L \gg R$ for the measured

50 Hz. Sa valeur doit vérifier : $2\pi f_0 L \gg R$ pour la fréquence mesurée f_0 (pour $\omega_0 L = 3 \text{ k}\Omega$, l'erreur est inférieure à 1 %).

R doit être telle que – vue du côté de la ligne – sa valeur soit égale à 300Ω , et du côté de l'appareil de mesure, sa valeur s'accorde avec son impédance d'entrée.

Dans d'autres cas, on utilise un circuit de courant (Fig. 5.2.). Celui-ci présente quelques inconvénients techniques mais on le préfère parfois car il économise les frais d'un condensateur de couplage de bonne qualité.

Ce circuit n'est utilisé que dans le cas où la capacité interne de l'appareil en essai est beaucoup plus forte que ses capacités parasites (par exemple dans le cas d'essais d'isolateurs élémentaires) et si la capacité parasite C_s du transformateur d'essai, des bornes de traversées et autres pièces du circuit d'essai est plus importante que la capacité interne de l'objet en essai.

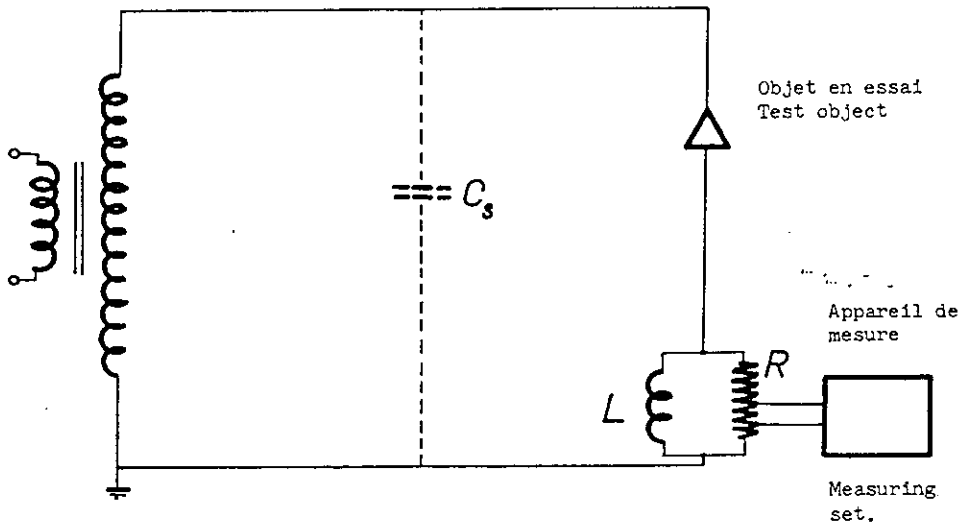


Figure 5.2

Variante du schéma d'essai utilisable pour des objets compacts
Variant of measuring circuit used for compact objects.

Cette méthode peut se révéler utile pour un examen sommaire du niveau perturbateur de l'un des différents objets de même type essayés simultanément en parallèle.

Pour mesurer des niveaux perturbateurs très faibles, il convient d'utiliser un circuit coaxial adapté entre la résistance R et l'instrument de mesure (Fig. 5.3).

5.2.2. Méthode d'essai

Il n'est pas suffisant de mesurer le niveau perturbateur à la seule tension nominale du réseau. On trace en général la courbe complète de variation du niveau perturbateur, depuis le seuil mesurable jusqu'à une tension nettement supérieure (de l'ordre de 1,2 fois la tension nominale phase-terre). On vérifie ainsi qu'au voisinage de la tension de fonctionnement il n'existe pas d'accroissement brutal du niveau perturbateur ; un coude brusque indique en effet que le seuil d'allumage d'une nouvelle source perturbatrice est atteint, ce qui correspond à une zone d'instabilité du niveau.

Le conditionnement est généralement permis, c'est-à-dire qu'on alimente l'objet en essai avec une tension supérieure à la tension de référence, pendant un certain temps avant l'essai, pour obtenir une mesure stable.

frequency f_0 (for $\omega_0 L = 3 \text{ k}\Omega$, the error is less than 1 %).

R must be chosen such that, seen from the line side, its value equals 300Ω and from the side of the measuring set, it should match the input impedance.

Alternatively a current circuit may be used (Fig. 5.2.). It has some technical disadvantages but is sometimes preferred as saving the costs of a high-quality coupling capacitor.

This circuit is appropriate only in cases where the internal capacity of the test-object is much higher than its stray capacities (e.g. it is useful for testing single unit insulators) and if the total stray capacity C_s of the test transformer, bushings and other parts of the test circuit is significantly larger than the internal capacity of the test-object.

This method may be useful for a rough examination of the interference level of one of several objects of the same type tested simultaneously in parallel.

For measurements of very low interference levels, it is convenient to use a balanced screened line between the resistance R and the measuring instrument (Fig. 5.3.).

5.2.2. Test method

It is not sufficient to measure the interference level at the nominal network voltage alone. In general, a complete curve of interference level variation is plotted, starting from inception and rising to a specified higher voltage, about 1.2 times the nominal phase-ground voltage. This checks that there is no sudden increase of R.I. level close to the operating voltage ; a sharp bend indicates, in fact, that the inception threshold of a new source of interference has been reached, which corresponds to an unstable R.I. level.

Conditioning is generally permitted i.e. to pre-energize the object to a voltage in excess of the expected reference voltage with the aim of producing a stable measurement. The test voltage is then reduced in steps, with the R.I.

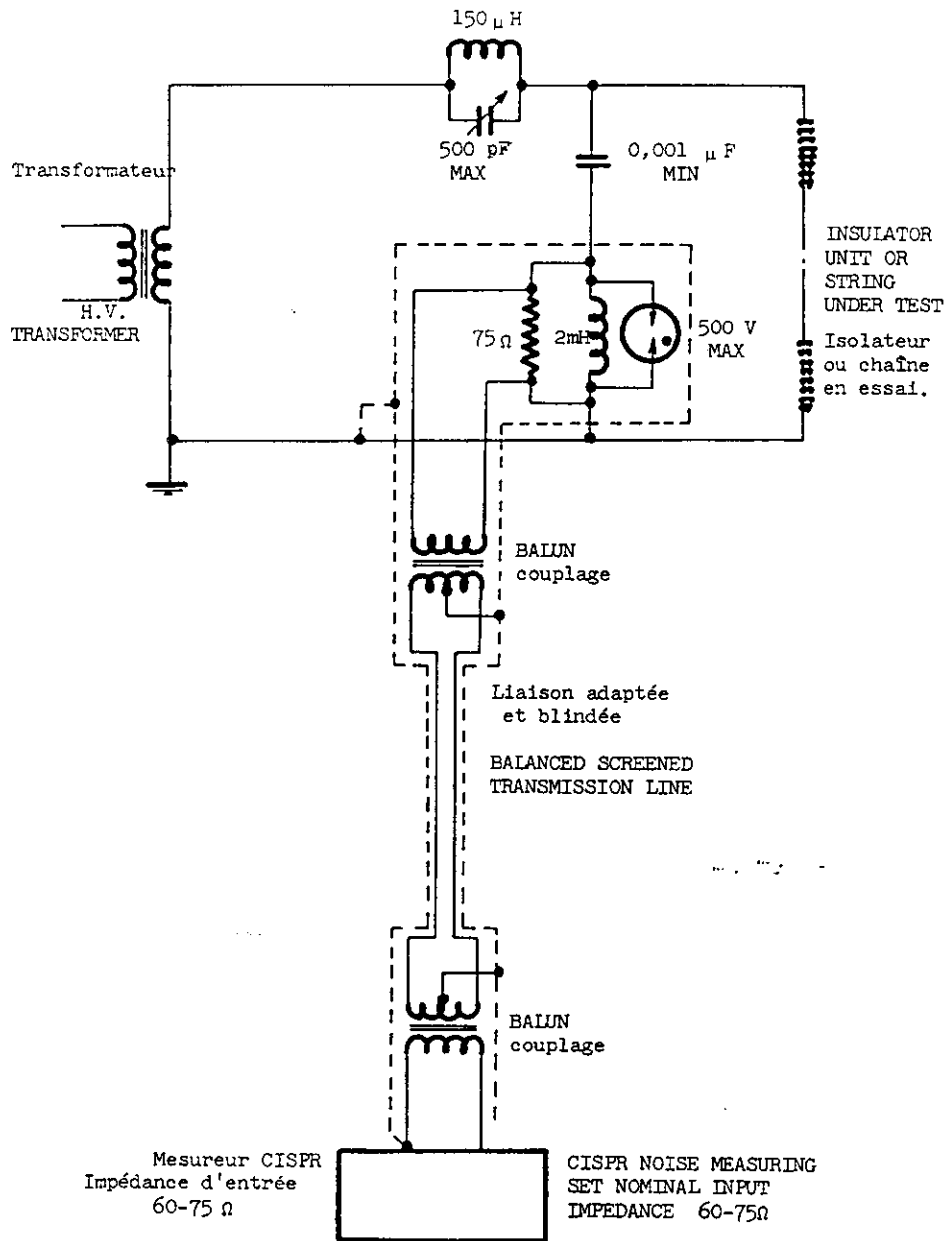


Figure 5.3

Circuit compensé et blindé pour la mesure des très faibles niveaux
Balanced screened circuit for measurement of very low levels.

La tension d'essai est ensuite réduite par paliers, et on enregistre le niveau de perturbation à chaque palier, jusqu'à ce qu'on atteigne soit le seuil de sensibilité de l'appareil de mesure, soit le bruit de fond du laboratoire. Actuellement, les essais ne sont généralement pratiqués que dans des conditions d'humidité relative comprises entre 15 % et 80 %.

Une fois la courbe tracée, on retiendra, comme niveau perturbateur nominal de l'objet essayé, celui qu'on relève à une tension de référence définie comme suit : c'est la tension qui reproduit, sur les parties métalliques de l'objet, $(1 + k)$ fois le gradient superficiel existant en fonctionnement normal. (On notera que cette tension peut légèrement différer de $(1 + k)$ fois la tension simple du réseau pour tenir compte du couplage électrostatique entre les phases du système réel).

Le coefficient k , généralement compris entre 0,05 et 0,15, tient compte à la fois des fluctuations de la tension

level recorded at each decrement, until either the instrumental threshold or laboratory background level is reached. At present, tests are generally made only in relative humidities below 80 %, and above 15 %.

Once the curve is plotted, the chosen nominal R.I. level of the test object is that corresponding to a reference voltage defined as follows: the voltage which reproduces $(1 + k)$ times the surface gradient existing in normal duty on the metallic parts of the object. (It will be noted that this voltage may differ slightly from $(1 + k)$ times the phase to ground voltage, to take account of the electrostatic coupling between the phases of the actual system).

The coefficient k , generally lying between 0.05 and 0.15, takes into account both the fluctuations of net-

du réseau et d'un éventuel vieillissement des pièces métalliques. En fait, il semblerait que le vieillissement, y compris l'effet de la pollution, ne soit pas très important dans le cas de l'effet de pointe des pièces métalliques.

Des recherches expérimentales limitées semblent montrer que, au moins pour la pollution marine et la corrosion résultante, entraînant une augmentation de la rugosité superficielle, etc., le seuil d'apparition des perturbations peut même être augmenté lorsque les objets en essai ont été exposés pendant quelques mois. (La rugosité contrôlée de surfaces métalliques, telles que des conducteurs de lignes, est maintenant un procédé admis pour l'amélioration marginale de leur effet perturbateur). Une raison supplémentaire d'amélioration du rendement est le shuntage, — du fait que la pollution offre une appréciable conductivité électrique dans les conditions humides —, des intervalles entre les pièces métalliques qui autrement seraient isolées l'une de l'autre.

5.3. Perturbations dues à l'appareillage

Par appareillage, nous entendons ici les sectionneurs et les disjoncteurs qui sont la cause principale des perturbations enregistrées dans les postes. Mais les extrémités de barres, les parafoudres, les entretoises, peuvent être sources perturbatrices et sont quelquefois soumis à des mesures de laboratoire.

Pour cette catégorie d'appareil, les perturbations sont en général localisées sur des aspérités ou des angles vifs, où le champ électrique atteint la valeur critique et engendre des aigrettes.

Remarque : La mesure du niveau perturbateur de l'appareillage ne doit pas être confondue avec la mesure dite "des décharges partielles". Ce dernier phénomène est mesuré en raison de son effet nocif sur les isolants composites, mais les perturbations qu'il produit ne sont, en général, pas gênantes.

5.3.1. Analyse du mécanisme de transmission des perturbations

Bien que ce guide soit pratique, il peut être intéressant de présenter une analyse sommaire du mécanisme de transmission de la perturbation due à une aigrette qui prend naissance sur une pièce métallique d'un appareil ; les conséquences que l'on peut en tirer sont en effet importantes.

Considérons donc un appareil, connecté au circuit de mesure CISPR qui comprend la capacité de couplage C_m et la résistance de mesure R (Fig. 5.1). C représente la capacité par rapport aux masses de l'ensemble des pièces sous tension, y compris les connexions. Assimilons alors l'aigrette localisée en I , à l'éjection instantanée d'une certaine quantité de charge dans l'espace, soit q_e ; cette charge étant fournie au tout premier instant par la capacité C , il apparaîtra aux bornes de celle-ci un échelon de tension de valeur $v = \frac{q_e}{C}$. Il est aisé de calculer l'impulsion de courant $i(t)$, passant à travers R , qui en résultera. On a :

$$i(t) = \frac{q_e}{RC} \cdot e^{-t/R\Gamma} \quad \text{avec} \quad \Gamma = \frac{CC_m}{C + C_m}$$

work voltage and a possible ageing of the metal parts. In practice, ageing, including the effect of pollution, does not seem to be very important in the case of discharges from points.

Limited experimental investigations seem to show that, at least for marine pollution and its resultant corrosion, roughening, etc., R.I. inception levels may even be raised when the test-objects have been exposed for some months. (Controlled roughening of metal surfaces, such as line-conductors, is now an accepted way of marginally improving their R.I. performance). A contributory reason for improvement is the bridging, by pollution having an appreciable electrical conductivity under humidity, of gaps between metal parts which otherwise might be insulated from each other.

5.3. Interference caused by equipment

"Equipment" principally refers here to isolators and circuit-breakers, which are the main cause of R.I. recorded in substations. The ends of busbars, lightning-arresters, and spacers can also be sources of interference and are sometimes subjected to laboratory measurements.

For this category of apparatus, noise generation is generally localized on rough edges or sharp angles, where the electric surface gradient reaches the critical value and generates discharges.

Remark : The measurement of R.I. level of equipment should not be confused with the measurement of partial discharges, which is mainly applied to wound equipment in oil. This latter phenomenon is measured on account of the harmful effect of discharges in composite insulation. Serious R.I. from this cause is rare.

5.3.1. Analysis of R.I. injection

It may be of interest to include, in this practical guide, a summarized analysis of the mechanism by which interference caused by a discharge on a metal apparatus-part is injected into the line. The consequences are in fact quite important.

Let us therefore consider a piece of apparatus connected to the CISPR measuring circuit which comprises the coupling capacity C_m and the measuring resistance R (Fig. 5.1.). C represents the capacitance to ground of all the parts under voltage, including the connections. The discharge, localized at I , corresponds to the instantaneous ejection of a certain quantity of charge, q_e , this charge being supplied initially by the capacitance C . This causes a voltage-step with a value $v = \frac{q_e}{C}$ across the capacitance.

Calculating the current pulse, $i(t)$, passing through R which is generated we have :

$$i(t) = \frac{q_e}{RC} \cdot e^{-t/R\Gamma} \quad \text{with} \quad \Gamma = \frac{CC_m}{C + C_m}$$

On voit immédiatement que, si l'amplitude de l'impulsion dépend de la charge d'espace q_e , sa forme dépend uniquement des caractéristiques du circuit. Toutes les impulsions produites ont donc un spectre élémentaire de forme identique. On montre que, dans ces conditions, le spectre du courant perturbateur mesuré aura également la même forme ; le courant perturbateur mesuré à la fréquence $\omega/2\pi$ est alors donné par :

$$i(\omega) = i_0 \cdot \frac{C_m}{C_m + C} \times \frac{1}{1 + j\omega R\Gamma}$$

Dans cette expression, i_0 représente le courant haute fréquence engendré par l'appareil ; (il est indépendant de la fréquence dans la limite des hypothèses faites) ; ce courant prend en compte simultanément le nombre et l'amplitude des impulsions engendrées par unité de temps, ainsi que la bande passante et le système de détection de l'appareil de mesure. L'expression obtenue pour $i(\omega)$ apporte les renseignements suivants :

– influence de C_m :

la capacité de couplage introduit une erreur d'autant plus grande qu'on la choisit faible. Pour la condition $C_m = 5C$, on voit que cette erreur est de 1/6 ou -1,6 dB, ce qui reste acceptable.

– spectre :

si on exprime le spectre en dB en fonction de $\log(\omega)$, on peut le caractériser par deux asymptotes, l'une horizontale à 0 dB, l'autre présentant une pente de -6 dB par octave. Ces deux droites se coupent à une fréquence f_0 , dite fréquence de coupure, définie par $R\Gamma\omega_0 = 1$ (Fig. 5.4).

It is seen that while the amplitude of the pulse depends on the space charge q_e , its form depends solely on the characteristics of the circuit. All the pulses produced have therefore an elementary spectrum of identical form. It has been shown that in these conditions the spectrum of the R.I. current will likewise have the same form ; the R.I. current measured at the frequency $\omega/2\pi$ is therefore given by :

In this equation, i_0 represents the H.F. current generated by the test-object ; it is independent of the frequency within the limit of the assumptions made ; this current is governed by the number and amplitude of the pulses generated per unit time, by the pass band and by the detector characteristics of the measuring set. The expression obtained for $i(\omega)$ comprises the following information :

– influence of C_m :

The coupling capacitor introduces an error that becomes larger the lower the capacitance chosen. For the condition $C_m = 5C$ it can be seen that the error is 1/6 or -1.6 dB, which is acceptable.

– spectrum :

If the spectrum is expressed in dB as a function of $\log(\omega)$, it can be characterized by two asymptotes, one horizontal to 0 dB, the other having a slope of -6 dB per octave. These two straight lines cross at a frequency f_0 called the cut-off frequency, defined by $R\Gamma\omega_0 = 1$ (Fig. 5.4).

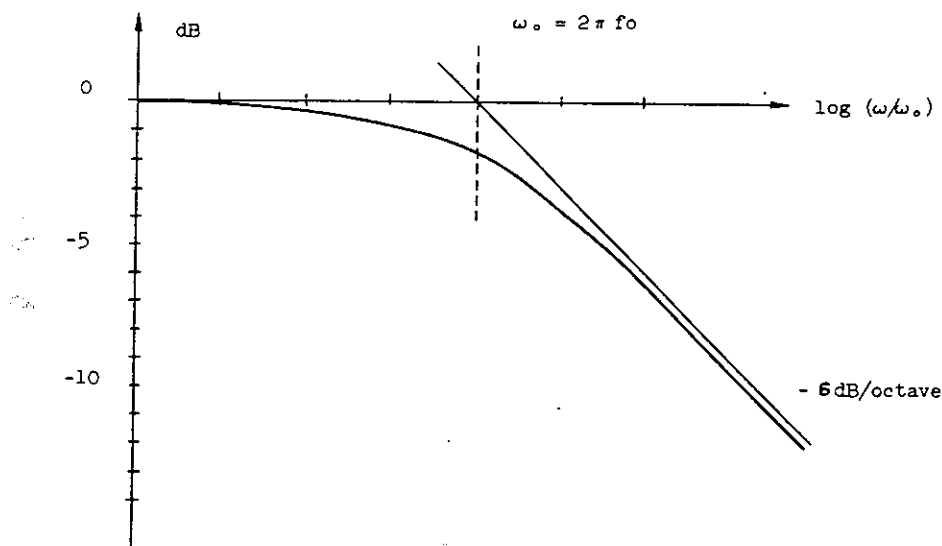


Figure 5.4

Spectre de fréquence du circuit de mesure CISPR
Frequency spectrum of CISPR circuit.

Pour les valeurs usuelles de C , cette fréquence se situe généralement au-delà de la fréquence de mesure recommandée, qui est de 0,5 MHz (ou quelquefois 1 MHz). Ainsi, à la fréquence de mesure, le courant $i(\omega)$ est largement indépendant de R (ou de Z dans le cas de la ligne). Cette propriété justifie le schéma CISPR, qui se

For the usual values of C , this frequency generally falls below the recommended measuring frequency, 0.5 MHz or 1 MHz. Thus at the measuring frequency, the current $i(\omega)$ is little dependent on R (or Z in the case of the line). This property justifies the CISPR diagram, which is intended to measure the current injected by the

propose de mesurer le courant injecté par l'objet dans une ligne, en simulant l'impédance de ligne vue depuis cet objet.

Pour respecter des habitudes anciennes, on exprime le niveau perturbateur d'un objet localisé en tension CISPR, c'est-à-dire en microvolts, aux bornes de 300Ω , bien qu'en fait cette tension ne soit qu'une grandeur secondaire, la grandeur caractéristique étant le courant injecté.

Remarque : Dans le cas de très grands montages, nécessités par les essais sur du matériel à 750 kV et au-delà, les inductances du circuit, et certaines capacités parasites, notamment celles du condensateur de couplage C_m , ne peuvent plus être négligées. L'expression de la fonction de transfert $i(\omega)/i_0$ n'est alors plus aussi simple et rarement accessible par le calcul seul. Il est donc recommandé d'étalonner le circuit de mesure, ce qui revient à relever cette fonction de transfert expérimentalement. La méthode impulsionnelle et la méthode sinusoïdale sont toutes deux acceptables.

5.3.2. Exemples de niveaux perturbateurs

Les figures (5.5.) et (5.6.) donnent deux exemples de courbes du niveau perturbateur en fonction de la tension, relevées l'une sur un sectionneur, l'autre sur un disjoncteur.

Le premier exemple montre que le niveau peut être différent selon la partie de l'appareil soumise à la tension, ce qui paraît assez évident.

Sur le deuxième exemple, on voit que les niveaux à tension décroissante se situent nettement au-dessus des niveaux à tension croissante. Cela est dû à l'allumage, vers 230-240 kV, d'une aigrette qui s'est ensuite maintenue une fois allumée, jusqu'à des tensions beaucoup plus faibles. La méthode du "conditionnement" de l'objet aurait donc conduit, du fait de ce phénomène d'hystérésis de l'aigrette à une surévaluation du niveau perturbateur. Cet exemple montre qu'une certaine interprétation des résultats est parfois nécessaire.

La figure (5.7.) enfin, illustre un cas d'intervention sur un sectionneur qui présentait à l'origine un niveau trop élevé. La perturbation anormale avait son origine sur les mâchoires des contacts, et il a suffi de protéger celles-ci par deux anneaux de garde pour obtenir des niveaux convenables.

5.4. Niveaux perturbateurs dus aux isolateurs et aux chaînes d'isolateurs

5.4.1. Isolateurs élémentaires

On a observé que le caractère de la perturbation engendrée par des isolateurs élémentaires dépend généralement des conditions ambiantes et de leur état de surface.

Lorsque les isolateurs sont propres et secs, les sources d'interférence les plus importantes apparaissent sur les points présentant les plus forts gradients de tension, par exemple à proximité des tiges ou des capots, ou dans les parties internes de la tête de l'isolateur, quand celle-ci n'est pas correctement conçue. Les causes physiques de l'interférence sont de petits arcs se produisant dans l'air entre le métal et le matériau isolant, ou dans de petites fissures internes. Partant de ce point de vue, les isolateurs

object into the line, by simulating the line impedance seen from that object.

Following early practice, the R.I. level of a localized object is expressed in CISPR voltage, i.e. in microvolts across 300Ω , although in effect this voltage is only a secondary quantity, the primary one being the injected current.

Remark : In the case of the very large set-ups required for tests on 750 kV equipment and above, circuit inductance and certain stray capacitance, particularly that of the coupling capacitor C_m , cannot be ignored. The expression of the transfer function $i(\omega)/i_0$ is not then simple and is rarely amenable to calculation alone. In this case calibration of the measuring circuit is requisite, i.e. plotting the transfer-function experimentally. The impulse method and the sinusoidal method are both acceptable.

5.3.2. Examples of R.I. levels

Figures 5.5. and 5.6. give two examples of curves of R.I. level versus voltage, one relating to an isolator, the other to a circuit-breaker.

The first shows, not unexpectedly, that the level can differ depending on which part of the apparatus has voltage applied to it.

In the second example, it is seen that the levels at decreasing voltage are situated well above the levels at increasing voltage. This is caused by a discharge, striking at 230-240 kV and maintained until the voltage has fallen much lower. The method of "conditioning" the object would therefore have led to an over-valuation of the R.I. level, in this case, because of the hysteresis phenomenon of the discharge. This example shows that results sometimes require interpretation.

Finally Figure 5.7. illustrates a case of modification to an isolator which originally gave too high a level. The abnormal noise was generated at the jaws of the contacts and it was sufficient to protect these with two guard rings to obtain satisfactory levels.

5.4. Interference caused by insulators and insulator strings

5.4.1. Single insulator units

The character of the R.I. generated by insulator units depends generally on the ambient conditions and on their surface state.

When insulators are clean and dry the most important sources of interference are regions of high voltage gradient such as around pins or caps, or in the internal parts of the insulator head when improperly made. The physical cause of the interference is small sparks occurring in the air between metal and insulating material or across internal cracks. From this point of view the solid-core and long-rod insulators are generally less noisy than the cap-and-pin types or pin insulators. An illustration of this

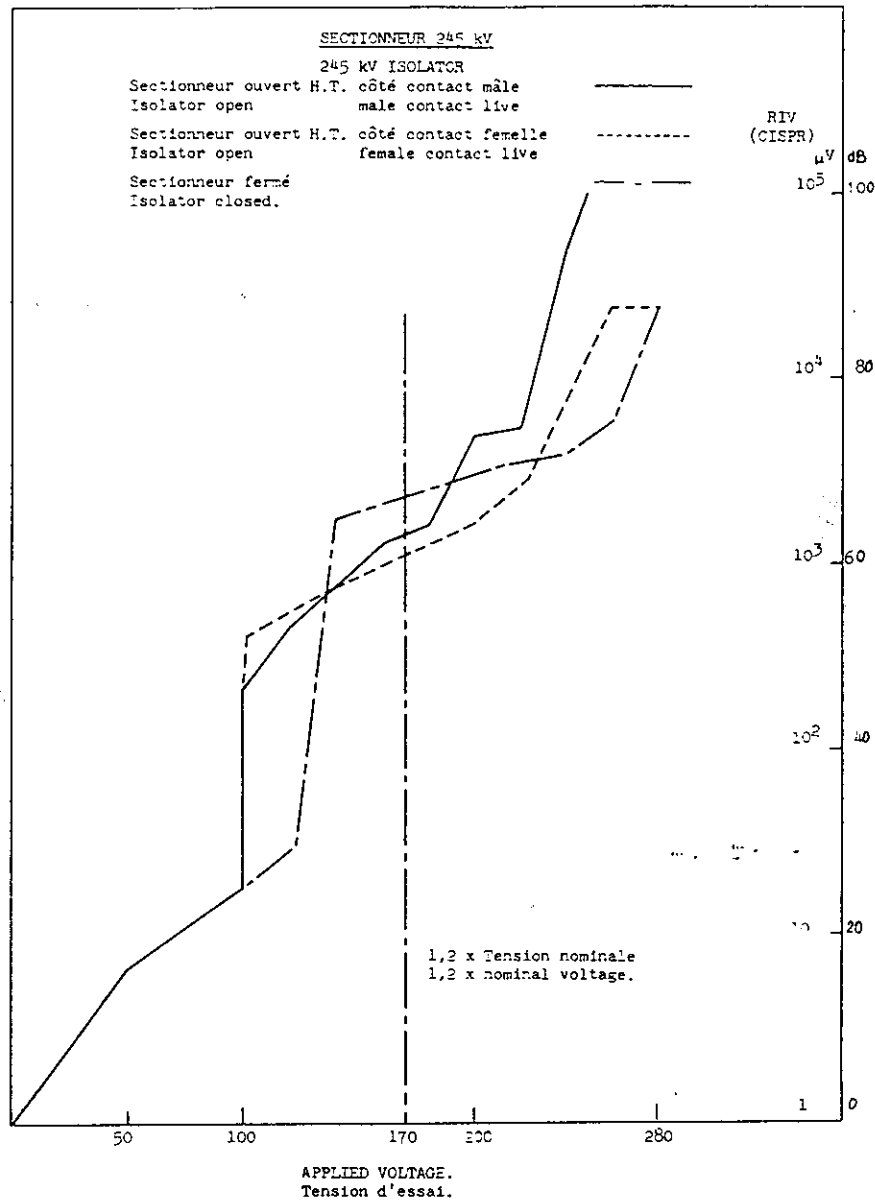


Figure 5.5

Exemple de niveau perturbateur engendré par un sectionneur
Example of RIV produced by an isolator.

à noyau plein et à long fût sont généralement moins bruyants que les isolateurs du type à capot et tige ou du type rigide. Ce fait se comprend clairement en regardant la figure 5.8. où on donne les caractéristiques de perturbation d'un isolateur rigide, d'un isolateur à noyau plein, et d'un isolateur à capot et tige tous conçus pour la même tension nominale.

Un autre exemple de niveau perturbateur dû à un isolateur standard à capot et tige est donné sur la figure 5.9.

En cas de pluie ou de brouillard épais, l'origine des interférences radio est entièrement différente. Les décharges apparaissent surtout sur les gouttelettes qui se forment sur la périphérie des jupes. Les gradients accrus sur ces points provoquent une augmentation des perturbations et leur apparition à des tensions d'essai plus basses, comme on le voit sur la figure 5.9.

fact is given by Figure 5.8. where the R.I. characteristics of different insulator types are compared. The insulators are designed for use at the same nominal voltage.

An example of the level from a standard disc-insulator is given in Figure 5.9.

During rain or dense fog the origin of the interference is entirely different. Sparking appears, mostly at the droplets formed at the edge of the skirts. The increased gradients on these points cause an increase in the R.I., and its appearance at lower test voltages is seen from Figure 5.9.

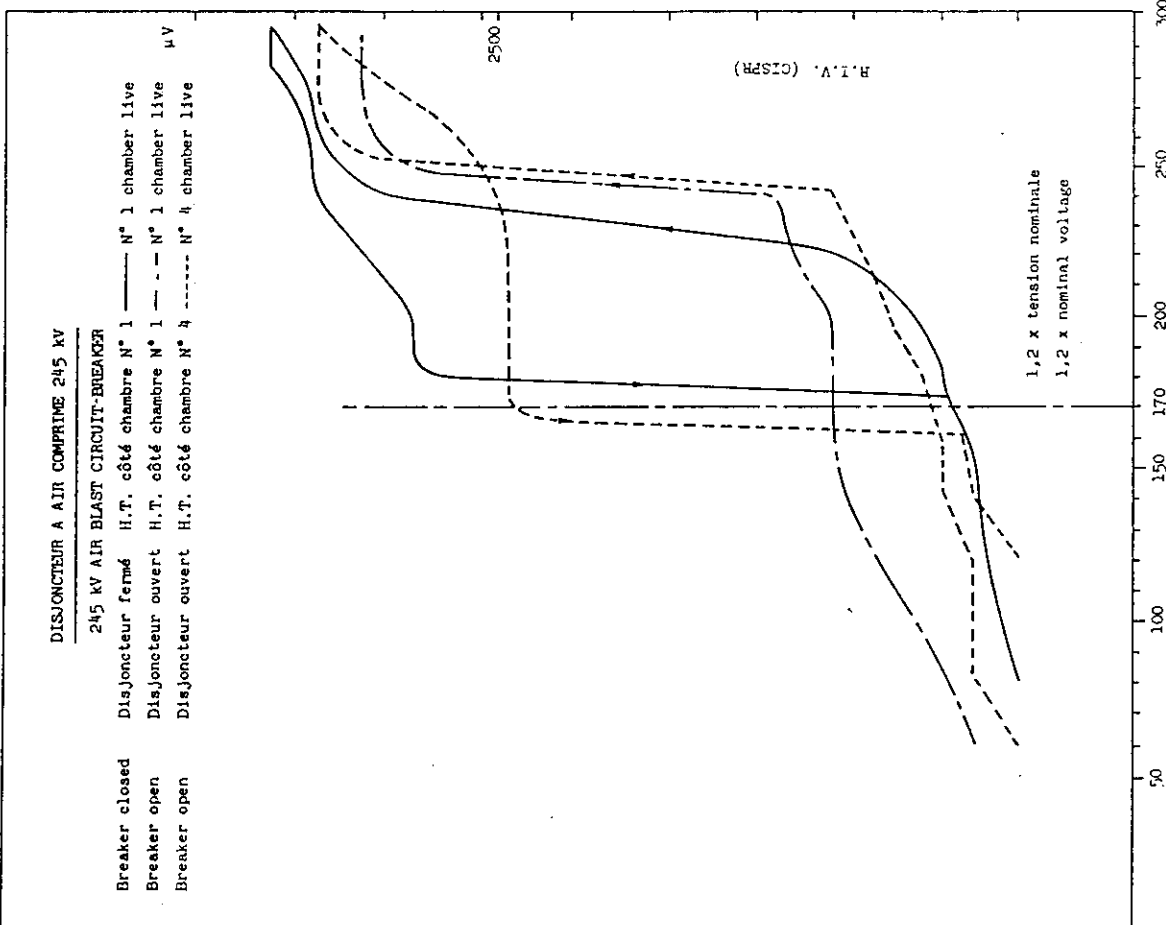


Figure 5.6
Exemple de niveau perturbateur engendré par un disjoncteur
Example of RIV produced by a circuit-breaker.

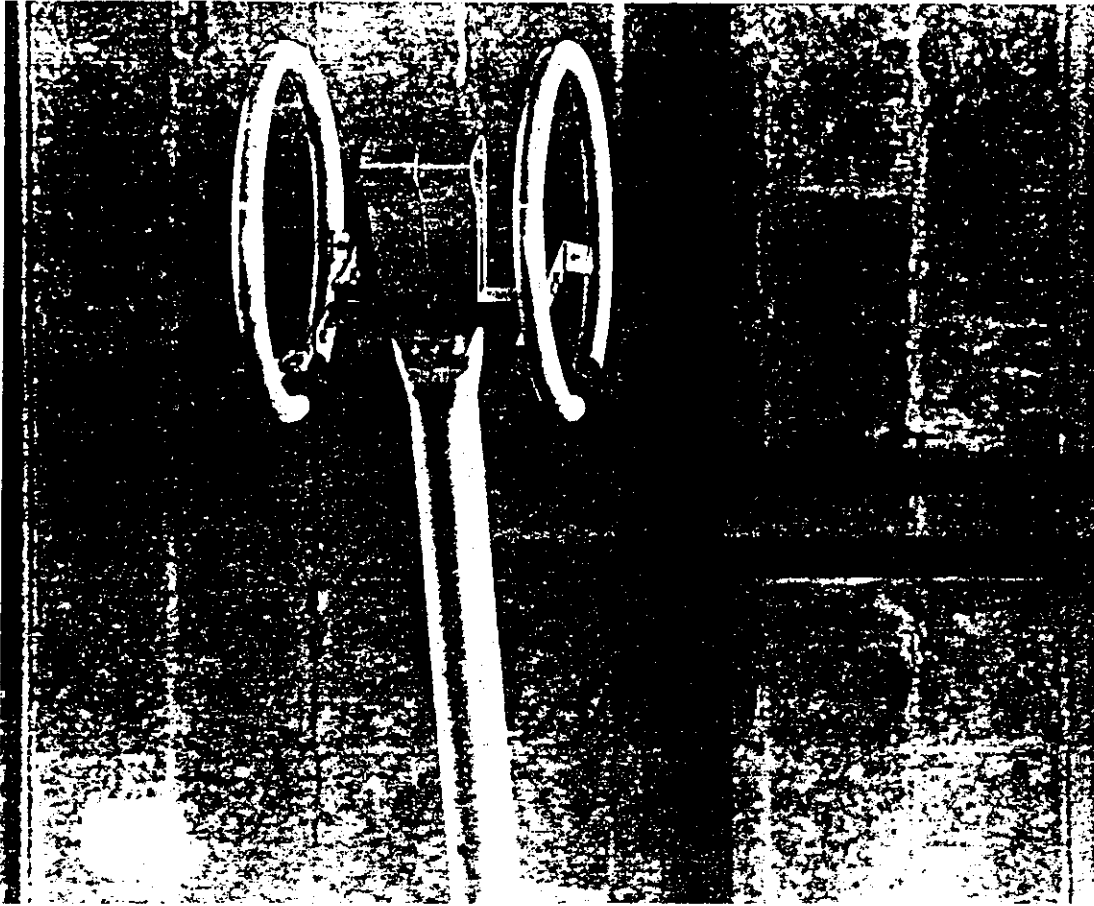


Figure 5.7
Exemple de reduction du niveau perturbateur par adjonction d'un anneau de garde
Example of reduction of RIV obtained by adding guard rings.

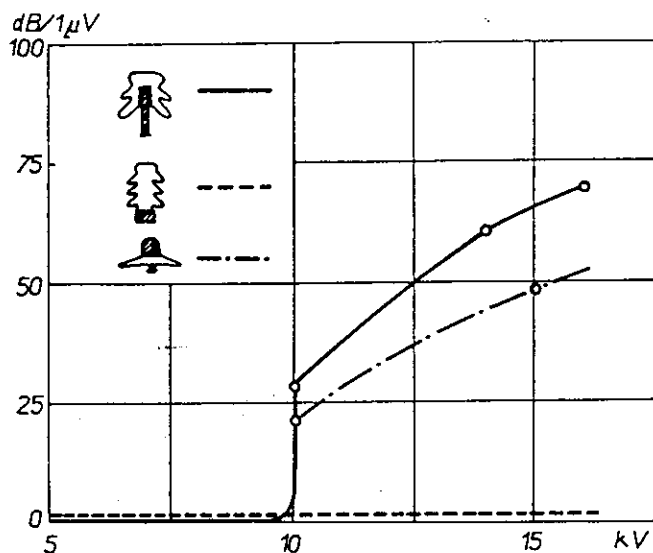


Figure 5.8

Exemple de niveau perturbateur de 3 types d'isolateurs
Example of RIV from 3 single unit insulators.

La pollution présente de sérieux problèmes également du point de vue des perturbations. Le niveau perturbateur d'un isolateur donné diffère sensiblement selon son taux de pollution et d'humidification. Même s'il est légèrement pollué, son niveau perturbateur peut être plus élevé qu'à l'état propre.

La pollution sèche peut aussi altérer la géométrie de la surface, et par sa conductance électrique, peut altérer les distributions de tension sur la surface de l'isolateur et à travers les intervalles d'air dans des régions à forte contrainte, par exemple dans le voisinage de la tige. L'eau, même dépourvue de solutés ioniques est susceptible par sa conductivité de modifier la distribution de tension sur la surface.

Une pollution de conductivité appréciable, c'est-à-dire plus grande que l'admittance électrostatique qui lui est parallèle, fait qu'on approche ainsi des conditions de contournement, et des arcs apparaissent à travers les bandes sèches. Le développement de la perturbation d'un isolateur pollué durant l'essai est montré sur la figure 5.10. La perturbation augmente lorsque le franchissement des bandes sèches passe d'un amorçage d'arc de puissance aux arcs capacitifs durant l'extension des bandes sèches et diminue quand la couche s'assèche.

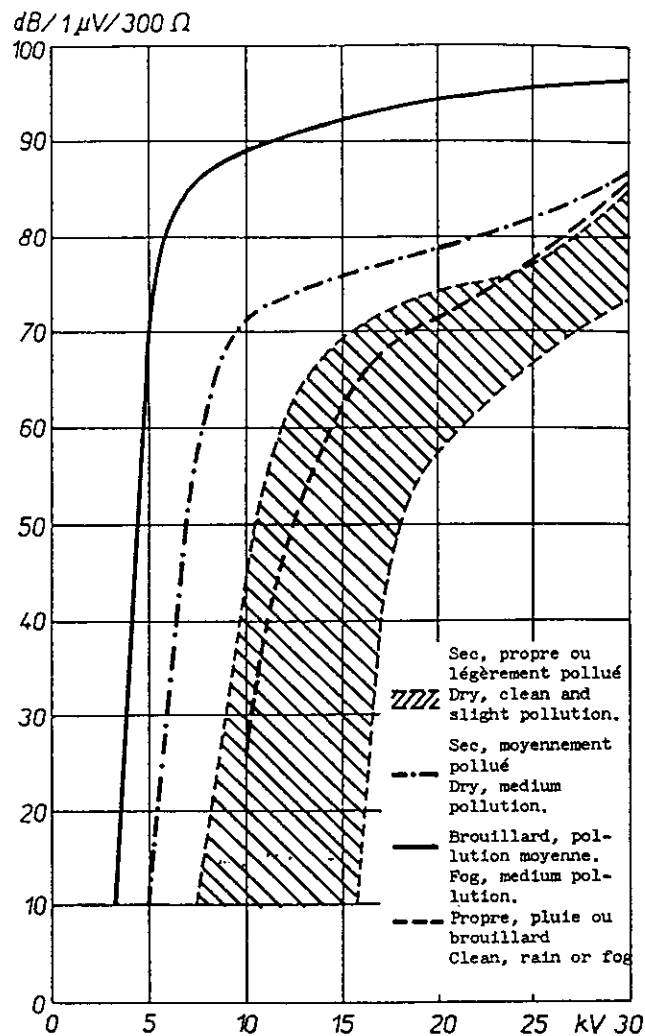


Figure 5.9

Niveau perturbateur d'un isolateur capot-tige pour différentes conditions d'ambiance
RIV from a cap and pin unit for different ambient conditions.

Pollution also presents a serious problem from the point of view of R.I. The R.I. performance of a given insulator differs markedly depending on the degree to which it is wetted and contaminated. Also, if slightly polluted, it may interfere more than if clean.

Dry pollution may alter the geometry of the surface, and, by its permittivity, alter the voltage-distributions over the insulator surface, and across air-gaps in highly-stressed regions, e.g. the neighbourhood of the pin. Water, even when free of ionic solutes, has a very large permittivity and is likely to modify the voltage-distribution over the surface.

Pollution of appreciable conductance causes the development of dry-bands, bridged by sparks, as flashover conditions are approached. The development of R.I. from a polluted insulator under test is shown in Figure 5.10. The R.I. increases as the discharges across the dry-bands change their character, from arcs to sparks, with increasing width of dry-band and decreases as the pollution-layer dries out.

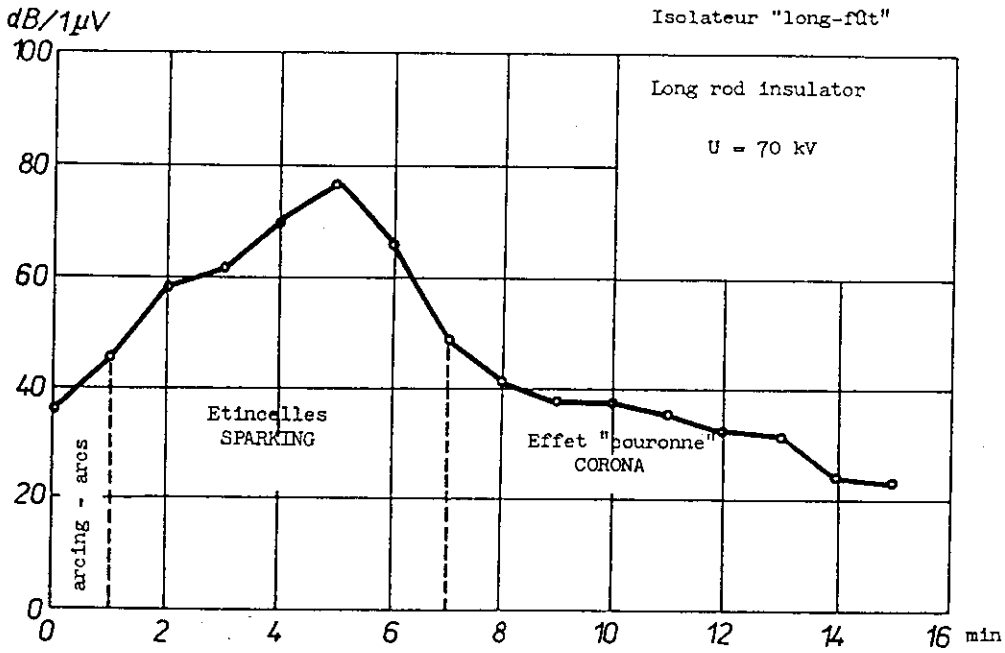


Figure 5.10.
Evolution du niveau perturbateur au cours du séchage d'un isolateur pollué.
Development of RIV from a drying polluted insulator.

Le ralentissement de la formation de la pellicule d'eau à la surface des isolateurs au moyen d'enrobages hydrofuges, spécialement lorsque cette pellicule d'eau peut inclure des dépôts solides, a pour effet de réduire la variation du niveau perturbateur de l'isolateur lorsque le degré de pollution ou les conditions ambiantes varient. Les enrobages d'hydrocarbures ou de graisses aux silicones se sont révélés extrêmement efficaces pour la suppression des interférences provoquées par le dépôt de sel et de gouttelettes d'eau.

On peut indiquer sommairement que le niveau perturbateur augmente en même temps que le degré de pollution selon les stades suivants : propre et sec ; légèrement pollué et sec ; propre et humide ; pollué et sec ; pollué et humide ; fortement pollué et humide.

5.4.2 Chaines complètes

Ainsi qu'on l'a montré au paragraphe 5.3, un isolateur élémentaire peut également être assimilé à un générateur à courant haute fréquence i_0 , alimentant la capacité propre C_0 de l'isolateur. La figure 5.11 donne le circuit équivalent d'un isolateur élémentaire.

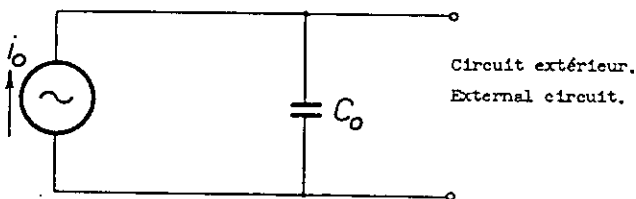


Figure 5.11.
Schéma équivalent d'un isolateur.
Equivalent circuit of a single unit.

The formation of water-films on the surfaces of insulators may be inhibited by means of hydrophobic-coatings, especially where these are of a nature which can also engulf solid deposits. Grease-treatment has the effect of reducing the variability of insulator-performance with changes in pollution and ambient conditions. Coatings of hydrocarbon or silicon grease have proved highly effective in suppressing interference, caused by deposition of salt and water-droplets.

As a very rough indication, the R.I. level increases with the severity of pollution, in the following stages ; clean and dry ; lightly polluted and dry ; clean and wet ; polluted and dry ; polluted and damp ; heavily polluted and damp or wet.

5.4.2. Complete strings

As shown in paragraph 5.3 a single insulator unit can also be simulated by a generator of high-frequency current i_0 , feeding the inherent capacity C_0 of the insulator and the external circuit. Figure 5.11 gives the equivalent circuit of a single unit.

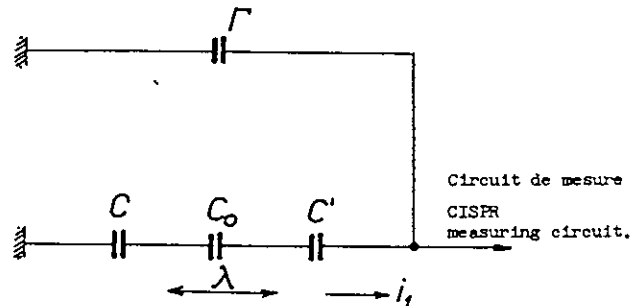


Figure 5.12.
Schéma équivalent d'une chaîne.
Equivalent circuit of a string.

Le circuit équivalent d'une chaîne, qui est proposé sur la figure 5.12 n'est valable que pour les 4 ou 5 premiers isolateurs, placés côté haute tension. Mais comme ceux-ci supportent généralement les plus grandes contraintes, ce sont eux qui sont principalement responsables du courant total perturbateur engendré par la chaîne, l'effet des autres isolateurs peut être négligé.

Dans le circuit, C_o est la capacité de l'isolateur perturbateur, C et C' sont les capacités amont vers la terre et aval vers le circuit de mesure (ou vers la ligne) du restant de la chaîne, tels qu'on les "voit" de l'isolateur.

Γ est la capacité à la terre des anneaux de garde et des connexions haute tension.

La valeur résultante C_I de C et C' branchés en série peut être estimée selon le raisonnement suivant : désignons par λ la contrainte relative de l'isolateur C_o , c'est-à-dire

$$\lambda = \frac{\text{haute tension aux bornes de } C_o}{\text{haute tension aux bornes de la chaîne}}$$

C_I sera tel que cette capacité série sera soumise à la contrainte complémentaire $1 - \lambda$ et en conséquence sera défini par :

$$C_I = C_o \frac{\lambda}{1 - \lambda}$$

En désignant encore par i_o le courant haute fréquence engendré par l'isolateur C_o , on trouve la valeur du courant perturbateur à travers R :

$$i_1 = \frac{i_o \lambda}{1 + j \omega R (\lambda C_o + \Gamma)}$$

En tenant compte de la valeur de Γ (environ 100 pF), le courant de mesure sera également indépendant de R , pour les fréquences habituelles de mesure de 0,5 ou 1 MHz, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} i_1 &= i_o \lambda \\ V &= i_o \lambda R \end{aligned}$$

Le courant perturbateur engendré par la chaîne complète réduite à ses n premiers isolateurs, sera alors (en appliquant la loi de la somme quadratique des grandeurs non-corrélées) :

$$I = \sqrt{\sum_{j=1}^n (i_{oj} \lambda_j)^2}$$

En supposant que tous les λ_j soient égaux au plus grand λ , et par conséquent de même pour i_{oj} , et en retenant seulement les 4 premiers isolateurs, cette expression se simplifie, et on obtient :

$$\begin{aligned} I &= i_o \cdot 2 \lambda \\ V &= i_o \cdot 2 \lambda R \end{aligned}$$

I et V calculés de cette manière sont généralement un peu trop élevés à cause de l'hypothèse faite sur λ .

Les relations théoriques entre niveau perturbateur d'un isolateur individuel et niveau perturbateur d'une chaîne complète ont été vérifiées de façon très satisfaisante pour

The equivalent circuit of a string, shown in Figure 5.12 is valid only for the first 4 or 5 insulators from the HV conductor. Since these are the units which are electrically highest stressed they are therefore mainly responsible for the total interference current generated by the string, the effect of the other insulators being relatively negligible.

In the diagram C_o is the capacity of the given interfering insulator, C and C' are the capacities to earth and to the measuring circuit (or to the line), of the remainder of the string, as they are "seen" by the insulator.

Γ is the capacity to earth of the guard rings and the high voltage connections.

The resultant value, C_I of C and C' connected in series can be estimated thus. Let λ be the relative stress of insulator C_o , i.e.

$$\lambda = \frac{\text{voltage at the terminals of } C_o}{\text{voltage at the terminals of the string}}$$

C_I is the series capacity which carries the remaining stress, $1 - \lambda$, and consequently will be defined by :

$$C_I = C_o \frac{\lambda}{1 - \lambda}$$

When i_o is the HF current generated by the insulator C_o , the value of the interfering current flowing through R is given by

Because of the value of Γ (approximately 100 pF), the current will also be independent of R , at the usual frequencies, 0.5 or 1 MHz, thus :

$$\begin{aligned} i_1 &= i_o \lambda \\ V &= i_o \lambda R \end{aligned}$$

The interference current generated by the complete string, reduced to its first n insulators, by applying the law of quadratic summation of non-correlated signals is :

Assuming that all the λ_j are equal to the greatest, the same follows for i_{oj} , and by retaining only the first 4 insulators, this expression simplifies to :

$$\begin{aligned} I &= i_o \cdot 2 \lambda \\ V &= i_o \cdot 2 \lambda R \end{aligned}$$

I and V calculated in this way are generally slightly too large, because of the assumption made for λ .

The theoretical relationships between R.I. levels of a single unit and of complete string have been verified in a very satisfactory manner although only for insulators

des isolateurs secs et propres. Elles ne sont cependant utilisables pratiquement qu'à la condition que les accessoires métalliques ne soient pas eux-mêmes le siège de perturbations par effet de pointe.

Donnons deux exemples pour illustrer ces faits :

1^{er} exemple : influence néfaste d'un accessoire mal conçu

Le tableau suivant donne le niveau perturbateur mesuré à la tension de $240/\sqrt{3} = 138$ kV, sur une chaîne de 12 éléments capot-tige diversement équipés. La raquette et les cornes ont un effet à peu près semblable sur la répartition de potentiel, mais les cornes sont caractérisées par un intense effet de pointe, qui accroît le niveau perturbateur d'une vingtaine de décibels.

Equipement	Niveau perturbateur en	
	$\mu\text{V}/300 \Omega$	dB
Chaîne nue	700	57
Chaîne équipée de raquettes	250	48
Chaîne équipée de cornes	25.000	88

Equipment	R.I. level in	
	$\mu\text{V}/300 \Omega$	dB
Bare string	700	57
String fitted with arcing-rings	250	48
String fitted with arcing-horns	25,000	88

2^e exemple : influence de la répartition du potentiel

La figure (5.13) représente des courbes de variation du niveau perturbateur en fonction de la tension, relevées à l'occasion de l'étude de chaînes d'isolateurs pour lignes à 750 kV, et montre l'amélioration apportée par la mise en place de divers anneaux de garde.

La courbe 1 correspond à la chaîne sans aucun accessoire d'équipotentialité, les courbes 2 et 3 ont été obtenues avec deux types d'anneaux légèrement différents, et enfin, la courbe 4 montre l'amélioration supplémentaire obtenue en disposant des pare-effluves autour des pinces d'accrochage des conducteurs.

which are clean and dry. They can however only be used in practice in cases where the metallic fittings are not themselves the sources of noise, by discharges from points.

Two examples illustrate these facts.

1st example : effect of a badly designed fitting

The following Table gives the R.I. level measured at the voltage of $240/\sqrt{3} = 138$ kV, on a string of 12 cap-and-pin units equipped in different ways. Arcing-rings and horns have similar effects on the voltage-distribution, but the horns are characterized by a severe point-discharge, which increases the R.I. level by some twenty decibels.

2nd example : influence of the voltage-distribution

Figure 5.13 shows the R.I. level versus voltage curves, plotted during a study of strings for 750 kV lines. The improvement brought about by fitting different guard rings is evident.

Curve 1 corresponds to the bare string ; curves 2 and 3 were obtained with two types of slightly different rings ; curve 4 shows the additional improvement obtained by arranging discharge-shields around the conductor-clamp.

5.5. Le problème des niveaux admissibles

5.5.1. Principe général

Pour les lignes à haute tension, la tendance actuelle est de tenir le raisonnement suivant. L'effet couronne dû aux conducteurs est un phénomène sur lequel on n'a aucune action une fois que le choix des conducteurs est fait. D'autre part, on peut s'efforcer de concevoir les autres éléments de telle façon que leur niveau propre n'augmente le niveau minimal inévitable que d'une quantité négligeable : disons 0,5 dB.

5.5. The problem of admissible levels

5.5.1. General principle

For HV lines the following argument tends to be presented. The corona effect due to the conductors is a magnitude over which the engineer has no control once the choice of conductors is made. On the other hand he can endeavour to design other elements in such a manner that their inherent level only increases the inevitable minimum level to an extent which is completely negligible : say 0.5 dB.

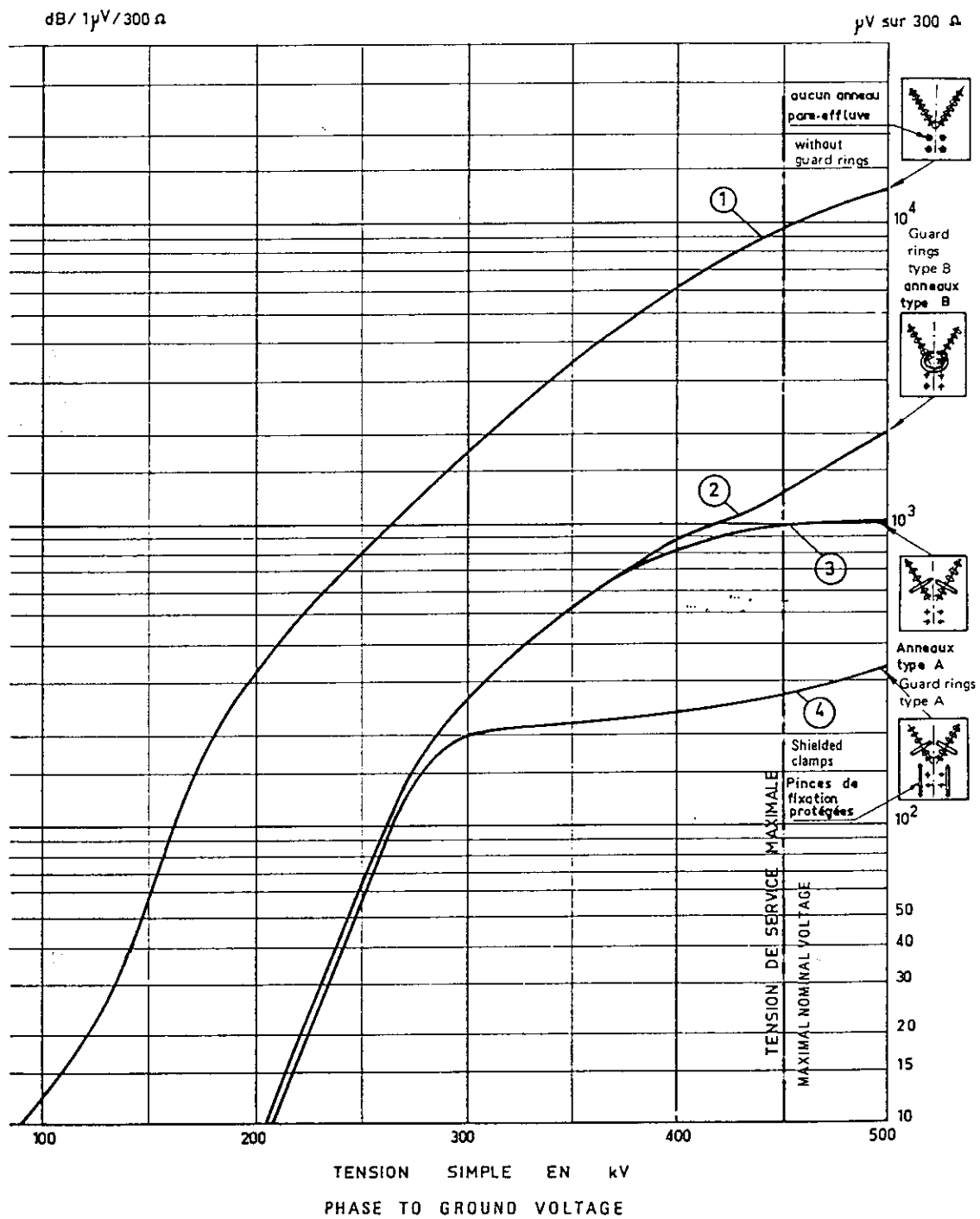


Figure 5.13.
 Exemple de réduction du niveau perturbateur d'une chaîne par adjonction d'anneaux de garde.
 Example of reduction of RIV obtained by adding guard rings.

Ce principe n'est applicable qu'aux lignes dont les conducteurs fonctionnent à des gradients superficiels suffisamment élevés. Si tel n'est pas le cas, (ou si leur gradient de fonctionnement est inférieur à environ 14 kV/cm) il peut ne plus être économique de l'appliquer. Le champ perturbateur de la ligne est alors dû aux seuls isolateurs.

Cette tendance est valable également pour l'appareillage des postes lorsque le courant injecté dans la ligne est pris en compte. Mais une simple évaluation des limites concernant le champ perturbateur rayonné n'est pas possible à l'heure actuelle.

5.5.2. Le cas de l'appareillage de postes :

a) Champ rayonné

Les caractéristiques du niveau perturbateur dans les postes haute tension diffèrent de celles des lignes. La raison en est qu'en plus de l'effet couronne, qui est la principale source d'interférence de la ligne, il y a dans les postes d'autres sources, par exemple des décharges capacitatives, des effluves aux points de gradients concentrés, des attaches mal serrées, des mauvais contacts, des isolateurs perforés, etc.

Les variations des spectres de fréquence et de profils latéraux se voient clairement sur les figures 5.14 et 5.15 concernant des postes 220 kV. Il va de même pour les postes 110 et 400 kV. La tendance générale des deux courbes caractéristiques est décroissante, mais la pente des courbes est plus faible que dans le cas des lignes à haute tension, et les caractéristiques, mesurées près des postes présentent des maxima et des minima significatifs

This principle is only applicable to lines whose conductors are submitted to sufficiently high gradients. If this is not the case, (surface gradient less than about 14 kV/cm), it may be uneconomic to apply it. The interference field of the line is then dominated by the performance of the insulators.

This tendency is valid also for components of substations, when the current injected into the line is considered; a simple evaluation of the limits concerning the radiated interference field is not, however, practicable at present.

5.5.2. Case of apparatus in substations :

a) Radiated field

The interference characteristics of HV substations differ from those of HV lines. The reason is that, besides the corona effect, which is the main interference source for lines, there are other sources in substations, e.g. capacitive discharges, brush discharges at points, loose clamps, poor contacts, punctured insulators, etc.

The variability of the frequency spectra and lateral profiles characteristics can be seen from Figures 5.14 and 5.15 relating to 220 kV substations. This variability is also found with 110 and 400 kV substations. The general tendency of both the characteristic dependences is decreasing, but the slope of the curves is flatter than in the case of HV lines and the characteristics measured at substations show significant maxima and minima up to

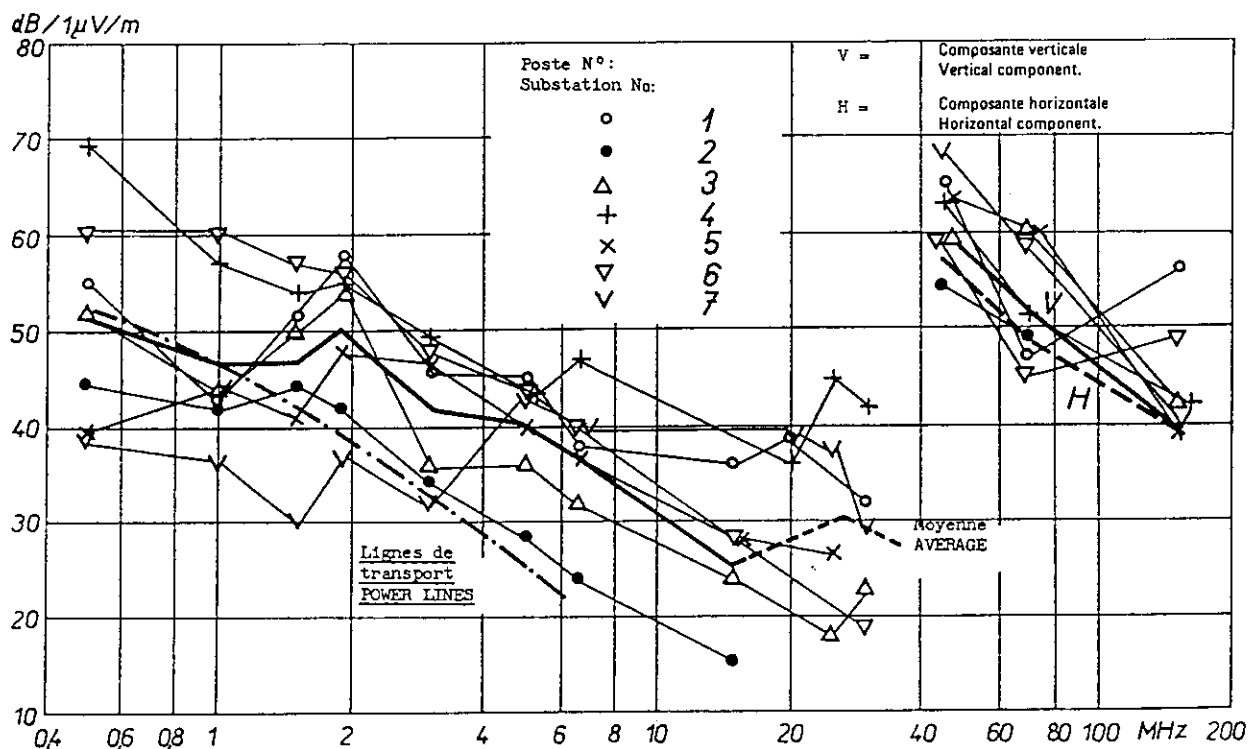


Figure 5.14.

Spectres de fréquence du champ perturbateur direct rayonné par un poste HT.
Frequency spectra of RI field directly radiated by an HV substation.

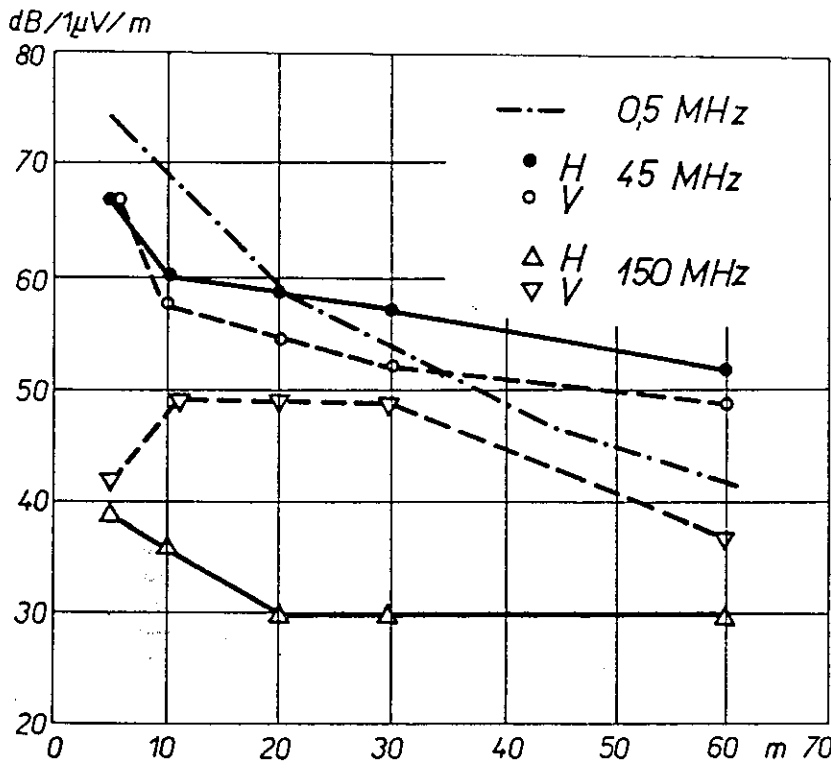


Figure 5.15.
 Profils latéraux du champ perturbateur directement rayonné par un poste HT.
 Lateral profiles of RI field directly radiated by an HV substation.

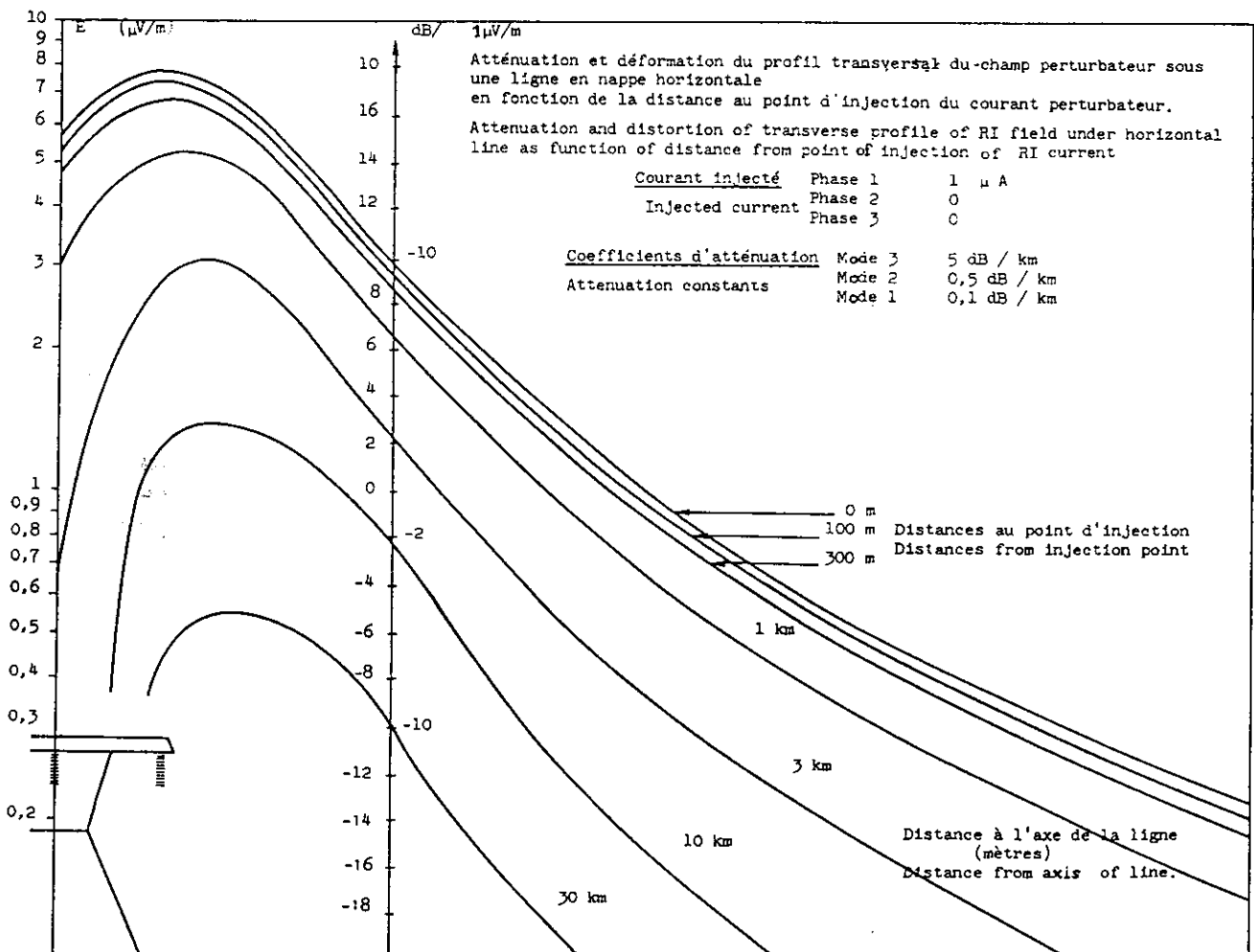


Figure 5.16.

Atténuation et déformation, en fonction de la distance, du champ perturbateur guidé engendré par une source ponctuelle.
 Attenuation and distortion of guided RI field produced by a single source.

jusqu'à la fréquence de 150 MHz. Ces résultats de mesures répétés prouvent qu'actuellement il n'est pas encore possible de fixer des limites sérieuses au champ perturbateur rayonné par l'équipement des postes et par les postes eux-mêmes. Bien qu'on dispose de bases théoriques pour expliquer le comportement du champ rayonné, ces théories ne présentent pas beaucoup d'intérêt car les calculs nécessaires pour obtenir les données numériques seraient trop longs et trop compliqués.

b) Courant injecté dans la ligne

On raisonne en considérant l'appareillage comme un générateur de courant perturbateur, comme nous l'avons montré au paragraphe 5.3. Le problème consiste à étudier la propagation le long de la ligne du courant injecté, c'est-à-dire à étudier l'atténuation et la déformation du champ électro-magnétique guidé associé à ce courant. Pour ce faire, on doit recourir à l'analyse modale. La figure (5.16) donne le résultat des calculs effectués dans le cas de l'injection d'un courant de $1 \mu\text{A}$ (CISPR) dans une phase latérale d'une ligne en nappe horizontale. On constate que la composante homopolaire du courant qui s'atténue le plus n'a déjà, à une faible distance du poste, plus aucune influence. À l'inverse, la composante interphase, dont l'atténuation est très faible, se propage à des dizaines de kilomètres. En même temps, le profil latéral du champ guidé se déforme, passant progressivement d'un champ presque homopolaire au champ interphase.

Par ailleurs, s'il y a N appareils par départ, produisant chacun le même courant perturbateur I , le courant total sera $I\sqrt{N}$.

Si un poste donné comporte n départs de lignes, les courants injectés se partageront entre ces diverses lignes chacune recevant $\frac{1}{n}$ du courant total. En supposant alors que chaque départ possède un même nombre N d'appareils, et que tous ces appareils représentent le même niveau, on calcule facilement le courant i injecté dans une ligne :

$$i = I \frac{\sqrt{N}}{n}$$

Le cas du poste en antenne, où $n = 1$, est donc le plus défavorable.

En se basant sur ces diverses considérations, EdF par exemple a été conduit à proposer une valeur limite de $2\,500 \mu\text{V}$ CISPR pour l'appareillage de postes de tension supérieure à 90 kV. La limite n'a pas encore été fixée pour l'appareillage des réseaux à 750 kV.

5.5.3. Cas des chaînes d'isolateurs et des entretoises

Pour évaluer l'influence relative des chaînes par rapport aux conducteurs, il suffit de comparer le courant engendré par une chaîne d'isolateurs au courant total I_L engendré par une portée de la ligne considérée. Si le courant de chaîne est inférieur à I_L , sa contribution au champ perturbateur total de la ligne sera négligeable ; s'il est égal à I_L , la majoration de niveau due aux chaînes sera de 3 dB ; s'il est supérieur à I_L , enfin, le champ perturbateur de la ligne sera déterminé par l'effet des chaînes seules. On se fixera en pratique comme limite du courant de chaîne la valeur $I_L/3$ (ou -10 dB), ce qui correspond à une majoration de niveau de 0,4 dB, qui n'est pas mesurable pratiquement.

150 MHz. The results of repeated measurements prove that it is not possible, at present, to fix useful limits for the interference radiated by the equipment in substations and by substations themselves. Although theoretical support, to explain the behaviour of the radiated field, is available, it is of little interest, because the calculations for obtaining numerical data would be very long and intricate.

b) Current injected into the line

The equipment is considered as a generator of interference current, as shown in paragraph 5.3. The problem consists in studying the propagation of the injected current along the line, i.e. the attenuation and distortion of the guided electromagnetic field associated with this current. To do this, modal analysis is employed. Figure 5.16 gives the results of calculations made in the case of the injection of a current of $1 \mu\text{A}$ (CISPR) into a lateral phase of a horizontal line. It is found that the homopolar component of the current, which is attenuated the most, no longer has any influence at a short distance from the station. Conversely, the interphase component, the attenuation of which is very low, propagates to dozens of kilometres. At the same time, the lateral profile of the guided field distorts, passing progressively from an almost homopolar field to an interphase field.

In other respects, if there are N pieces of apparatus per outgoing line each producing the same interference current I , the total current will be $I\sqrt{N}$.

If a given substation contains n outgoing lines, the injected currents will divide themselves between these different lines, each one receiving $\frac{1}{n}$ of the total current.

Assuming that each outgoing line has the same number N of pieces of apparatus, and that all these pieces present the same level, the current i injected into a line is given by

$$i = I \frac{\sqrt{N}}{n}$$

The case of a substation with only one outgoing line, where $n = 1$, is therefore the most unfavourable.

Using different considerations as a basis, EdF for example, has proposed a limit of $2\,500 \mu\text{V}$ (CISPR) for substation apparatus intended for service above 90 kV. No limit has yet been set for 750 kV apparatus.

5.5.3. Case of strings of insulators and of spacers

To evaluate the relative influences of insulators and conductors, it is sufficient to compare the current generated by a string of insulators with the total current I_L generated by a span of the line. If the string current is less than I_L , its contribution to the total interference field of the line will be negligible ; if it is equal to I_L , the increase in level due to the strings will be 3 dB ; if it is greater than I_L , the interference field of the line will be determined by the effect of the strings alone. In practice the current limit of the string will be fixed at a value of $I_L/3$ (or -10 dB), which corresponds to an increase in level of 0.4 dB, which cannot be measured in practice.

On procède comme suit : à partir de l'abaque des fonctions excitatrices et de la matrice des capacités de la ligne (cf. paragraphe 4), on calcule le courant I injecté par unité de longueur d'un conducteur de phase. Pour passer ensuite du courant élémentaire I au courant total engendré par une portée de longueur L , on applique la loi d'addition quadratique :

$$I_L = I \sqrt{L}$$

Rappelons que la fonction excitatrice fournie par l'abaque est valable sous forte pluie. Si on retient une valeur de 20 dB inférieure pour représenter le niveau par temps sec, cela signifiera que le courant limite admissible pour une chaîne sera donné par :

$$I_c = I_L (\text{pluie}) - (20 + 10) \text{ dB}$$

Autrement dit, le champ perturbateur limite engendré par les chaînes seules serait de 30 dB inférieur au champ d'effet couronne sous pluie. Le calcul dont le principe vient d'être esquissé, a été appliqué aux principaux échelons de tension et a abouti à fixer les limites suivantes pour des chaînes à l'état sec :

Tension nominale de la ligne U	(kV)	225	335	400	550	750
Tension perturbatrice limite d'une chaîne aux bornes de 300 Ω	μV	1000	1400	1800	2200	3200
	dB/1 μV	60	63	65	67	70

Nominal voltage of the line U	(kV)	225	335	400	550	750
Maximum R.I.V. of a string measured across 300 Ω	μV	1000	1400	1800	2200	3200
	dB/1 μV	60	63	65	67	70

Sous pluie, la limite admissible pour les chaînes serait évidemment, avec les hypothèses faites, de 20 dB supérieure aux valeurs de ce tableau.

A titre de contre exemple, indiquons que si l'on appliquait le même principe à des lignes dont les conducteurs sont faiblement contraints, il faudrait limiter à 45 dB le niveau des chaînes 150 kV et à 50 dB celui des chaînes équipant certaines lignes 400 kV à faisceaux de 4 conducteurs. On aboutirait à des solutions peu économiques. On sait, par contre, réaliser sans difficulté des chaînes d'isolateurs dont le niveau ne dépasse pas 60 dB.

En ce qui concerne les entretoises, le raisonnement est exactement le même. Mais, comme on compte, en moyenne 6 fois plus d'entretoises que de chaînes, leur niveau individuel devra être $\sqrt{6}$ fois plus faible, (soit - 8 dB) que celui des chaînes. Bien entendu, ces niveaux sont ceux que chaînes et entretoises doivent avoir dans les conditions d'installations réelles et dans les conditions climatiques réelles, et toute la difficulté consiste à estimer la marge de sécurité qu'il faut réserver par rapport aux conditions de mesure en laboratoire.

The procedure is as follows : starting from the graph of the Excitation Functions and the matrix of the line capacities (cf. para. 4), the current I injected per unit length of a phase conductor is calculated. To pass from the elementary current I to the total current generated by a span of length L , the law of quadratic summation is applied :

$$I_L = I \sqrt{L}$$

The excitation function supplied by the graph is valid in heavy rain. If a lower value of 20 dB is taken to represent the level in dry weather, the admissible current limit for a string will be given by :

$$I_c = I_L (\text{rain}) - (20 + 10) \text{ dB}$$

In other words, the limiting interference field generated by the strings alone would be 30 dB lower than the field caused by line-corona in rain.

The calculation, the principle of which has just been outlined, has been applied to the main voltage levels yielding the following limits for strings in dry conditions :

In rain, the admissible limit for the strings would clearly be, with the assumptions made, 20 dB higher than the values in the Table.

By way of contrast, it should be noted that this principle, if applied to lightly-stressed lines, would call for a limitation to 45 dB of the level from the insulators at 150 kV, and to 50 dB for insulators on a 4-bundle 400 kV line. This could lead to uneconomic designs. The design of insulators with levels not exceeding 60 dB presents no difficulty.

With regard to spacers, the reasoning is exactly the same. But since, on average, spacers are 6 times as numerous as strings, their individual level must be $\sqrt{6}$ times lower, (namely - 8 dB) than that of the strings. Of course, these R.I. levels are those required of strings and spacers in actual conditions of installation and actual climatic conditions, and the main difficulty consists in estimating the safety margin to be allowed in relation to laboratory measuring conditions.

LA PRATIQUE DU CALCUL ET DE LA MESURE DES NIVEAUX PERTURBATEURS

INTERFERENCE LEVEL MEASUREMENT AND CALCULATION METHODS

6.1. Le problème des limites — Lignes à perturbations minimales

6.1.1. Proposition pour une politique des limites

Bien qu'il n'entre pas dans les attributions de la CIGRE d'établir des règles fixant des valeurs limites du niveau perturbateur des lignes, il est cependant nécessaire d'évoquer ce problème délicat, afin de bien préciser les objectifs du présent guide.

Le problème des limites est en fait du ressort du CISPR, organisme de réglementation, le rôle de la CIGRE se bornant, en principe, à fournir à ce dernier les données techniques qui lui permettent d'assumer sa tâche. Mais, alors qu'il est facile et peu onéreux de fixer une limite aux perturbateurs tels que des appareils électrodomestiques, il faut bien voir, et c'est ce que nous allons tenter de montrer, que le choix de limites, dans le cas des lignes de transport d'énergie, déborde du cadre purement technique et dépend largement de conditions démographiques et économiques.

Les exposés qui précèdent ont clairement montré que les perturbations dues aux conducteurs des lignes à haute et très haute tension sont pratiquement imposées par la tension et par la section des conducteurs, de sorte qu'une fois ce choix fait, l'ingénieur n'a qu'une très faible emprise sur l'amplitude du phénomène ; il ne peut guère que remédier à d'éventuelles anomalies. Or ce choix est fortement conditionné par des considérations économiques ; en particulier, au début de l'exploitation d'un nouvel échelon de tension, l'optimum économique incite plutôt à une section assez faible, fut-ce au prix d'un effet de couronne non négligeable.

Par ailleurs, on peut concevoir que la valeur acceptable du niveau perturbateur puisse dépendre de facteurs démographiques, tels que la densité de la population des zones traversées par les lignes, ainsi que de facteurs techniques indépendants de la ligne elle-même, tels que les champs utiles reçus, c'est-à-dire l'implantation et la puissance des émetteurs de radiodiffusion.

Il serait par exemple absurde, sur le plan économique, d'assigner la même limite de niveau perturbateur à une ligne située dans la banlieue de Londres et à une ligne traversant des régions désertiques ou très peu peuplées.

Cette position ne signifie évidemment pas que l'on cherche à favoriser les populations urbaines par rapport aux populations rurales : cela signifie simplement qu'il est beaucoup plus facile et moins onéreux d'améliorer les conditions de réception en zone faiblement peuplée, en déplaçant quelques antennes ou en installant une antenne collective bien placée.

6.1. Limits — Lines producing minimum interference

6.1.1. Proposed policy on limits.

Although it is not a function of CIGRE to set up rules fixing limiting values for the interference level of lines it is nevertheless necessary to examine this delicate problem in order properly to define the objectives of the present study.

The problem of limits is, in fact, within the scope of CISPR, a regulating organization, the role of CIGRE being restricted, in principle, to supplying CISPR with the technical data required for its work. But in spite of the fact that it is straightforward to fix limits for interference sources such as household electric appliances, it must be recognised, as will be shown, that the choice of limits in the case of power lines lies beyond purely technical considerations and depends largely on human and economic questions.

The previous sections have clearly shown that interference caused by HV and EHV line conductors is, in practice, governed by the voltage and cross-section of the conductors so that once a conductor is chosen the engineer can do little to alter the interference level ; he can only make minor adjustments. Conductor-choice is strongly conditioned by economic considerations ; in particular, when a new voltage-level is first introduced there is often an incentive to install a small-section conductor even when this may lead to a significant corona level.

Moreover, an acceptable value of interference level can be considered as depending on such human factors as density of population in the areas crossed by the lines as well as on technical factors independent of the line itself such as the effective coverage and power of the broadcast transmitters.

For example, it would be economically absurd to assign the same interference level limit to a line located in the suburbs of London as to a line that crosses deserts or nearly uninhabited terrain.

This position evidently does not imply that urban populations should be better treated than rural, but simply states that it is much easier and less costly to improve reception conditions in a sparsely inhabited area as by resiting a few antennas or installing a good communal one.

Certains palliatifs permettent d'obtenir une réduction ou même l'annulation de l'effet couronne des conducteurs : citons la mise en place, autour des conducteurs, de points ou d'un fil mince (ultra-couronne), ou de tubes d'aluminium lisses (augmentation du gradient critique). Mais ce remède n'a qu'une action tout à fait localisée, et n'est de ce fait applicable qu'au cas du bruit acoustique.

Il y a d'ailleurs un certain "ajustement" naturel entre les diverses conditions énumérées ci-dessus, puisqu'une ligne desservant une région urbaine devra transmettre une forte puissance, donc nécessiter une forte section, alors que l'inverse sera probable dans des zones rurales ou dans des pays peu peuplés.

En se basant sur ces considérations, la position de la CIGRE a toujours été très ferme pour soutenir qu'il est illogique de fixer une limite internationale unique concernant le niveau perturbateur produit par les lignes d'énergie. Chaque ligne devrait être traitée comme un cas d'espèce, pour lequel le problème du niveau perturbateur doit être étudié en fonction des données économiques et démographiques locales. Les données climatiques locales devraient également intervenir dans cet examen, puisque l'on sait que l'humidité et la pluie augmentent le niveau perturbateur d'effet de couronne. Il devrait alors être relativement facile, puisque les calculs de prédétermination des champs perturbateurs sont maintenant possibles de se mettre d'accord, dans chaque cas particulier, avec les organismes de Radiodiffusion ou avec les législations nationales, pour définir les spécifications techniques de la ligne en question.

Cette position de la CIGRE, longtemps combattue au sein du CISPR, semble avoir maintenant emporté l'adhésion de la majorité des membres de ce dernier organisme.

6.1.2. Les critères techniques

On peut tenter de donner aux considérations précédentes une formulation un peu plus objective, basée sur quelques chiffres.

Il est d'abord évident qu'au voisinage d'une ligne, il n'est pas possible de protéger l'écoute de tous les émetteurs de radiodiffusion, quelle que soit leur implantation (émetteurs hors du territoire national notamment) et quel que soit le signal utile reçu.

En France, par exemple, l'ORTF délimite la "zone de service" d'un émetteur par la condition que le champ utile soit supérieur ou égal à 3 mV/m (70 dB) pour la bande de fréquence 150-225 kHz (grandes ondes ou ondes kilométriques) et à 2 mV/m (66 dB) pour la bande 500-1600 kHz (petites ondes ou ondes hectométriques). Dans la mesure où tout le territoire est couvert, et en acceptant comme raisonnable un rapport signal/bruit de 24 dB (voir 2.2.3), une plainte ne saurait alors être recevable tant que le champ perturbateur reste inférieur à 42 dB à 500 kHz.

Un autre critère envisageable est le suivant : on relève, le long du tracé d'une ligne, avant sa construction, les champs utiles des principaux programmes de radiodiffusion nationaux et éventuellement des pays limitrophes. On établit le diagramme $N(E)$ des fréquences cumulées N des champs dépassant la valeur E , et on note le niveau E_0 du champ dépassé par 80 % des programmes. Le niveau perturbateur admissible pour la ligne

Some palliatives permit the reduction or even cancellation of the conductor corona effect : for example, the installation of points or thin wires (ultra-corona) or of smooth aluminium tubes (increased critical gradient) around the conductors. But such means have only localized effects and are accordingly applicable mainly against acoustical noise.

In addition, there is a certain natural "adjustment" between the various conditions mentioned above since a line serving an urban area is likely to carry heavy loads and thus require a large cross-section while the reverse will probably occur in rural areas or in sparsely inhabited countries.

The position of CIGRE, based on these considerations, has firmly maintained that it is illogical to fix a single international limit for the interference level produced by power lines. Each line should be treated as a separate case for which the interference level problem requires study as a function of local economic and human data. Local climatic data should also be considered in this examination because of the well-known increase of corona effect in humidity and rain. Thus it should be relatively easy, since calculations of the interference fields are now possible, to come to an agreement, for each case, with the broadcasting bodies or national regulatory authorities to define technical specifications for the line concerned.

This CIGRE position, after lengthy discussion within CISPR, seems now to have received the assent of most members of the latter.

6.1.2. Technical criteria

An attempt will be made to place these considerations on a more objective and quantitative basis.

First, it is obvious that in the vicinity of a line it is not possible to ensure good reception of all broadcast transmissions, regardless of coverage (for example, foreign transmitters) and of received signal strength.

In France, for example, the ORTF limits the "service area" of a transmitter to that region where the effective fields is greater than or equal to 3 mV/m (70 dB) for the 150-225 kHz frequency band (long wave) and 2 mV/m (66 dB) for the 500-1600 kHz band (medium wave). When a whole area is covered in this way and a signal/noise ratio of 24 dB (see 2.2.3) is accepted as reasonable, no complaint should be received as long as the interference field is less than e.g. 42 dB at 500 kHz.

Another conceivable criterion is the following : the signal field-strengths radiated by the principal national and adjacent stations are sampled along the path of a line before its construction. The cumulative frequency diagram $N(E)$ where N of the fields exceed the value E is drawn and the level E_0 is noted where E_0 is exceeded by 80 % of the values. The permissible interference level for the line concerned will be the most probable level for

en question sera le niveau le plus probable par temps sec tel que :

$$E_1 = E_0 - 24 \text{ dB}$$

Le niveau E_1 ne devra pas être dépassé en dehors d'un couloir dont la largeur correspond aux contraintes de passage de la ligne.

Même si les niveaux limites auxquels on aboutit par cette méthode ne sont pas techniquement ou économiquement réalisables, ils fournissent une valeur de référence en cas de litige avec un riverain plaignant.

Mais quel que soit le critère retenu, il conviendra d'introduire une définition probabiliste de la notion de gêne, compte tenu de la distribution temporelle des niveaux perturbateurs d'une ligne.

Supposons alors qu'une ligne ait été techniquement définie (Section et éventuellement nombre de conducteurs s'il s'agit de faisceaux) en fonction d'une valeur, ou mieux d'une distribution de niveaux perturbateurs, fixée d'un commun accord entre l'exploitant ou le constructeur de la ligne et les autorités chargées de la protection des réceptions radioélectriques. Il reste maintenant à indiquer les précautions à prendre, lors de la construction de la ligne, pour que les valeurs convenues soient effectivement respectées. Pour cela, deux conditions sont nécessaires :

– les niveaux d'effet de couronne doivent être conformes aux niveaux contractuels, tels qu'ils ont été calculés.

– les chaînes d'isolateurs et les accessoires de ligne doivent satisfaire aux critères exposés au chapitre 5, c'est-à-dire produire un niveau perturbateur négligeable devant celui des conducteurs.

Le respect de la première condition est essentiellement lié à l'état de surface des conducteurs. Rappelons en effet que, si le niveau perturbateur sous forte pluie est une donnée calculable avec précision le niveau à sec, et par conséquent la distribution annuelle des niveaux, pourront être très différents selon que les conducteurs seront propres ou sales.

Il en résulte que la pose des conducteurs devra se faire avec le plus grand soin, sans traînage sur le sol, afin d'éviter la formation d'éraflures ou que la terre vienne y adhérer.

La graisse superficielle retenant des impuretés ou même des insectes et formant elle-même des aspérités, devra être autant que possible prohibée ; si des circonstances particulières, comme par exemple le risque de corrosion, conduisent l'exploitant à demander un graissage de brins, ce graissage devra se limiter aux couches internes du câble ; de plus, une graisse très visqueuse et à haut point de goutte sera exigée, afin d'éviter qu'elle ne migre vers la surface du câble.

Enfin, l'estimation du niveau perturbateur de la ligne par temps sec devra prendre en compte le degré de pollution de la région traversée : s'il s'agit d'une région industrielle, où des fumées et des poussières sont produites, il sera prudent de s'attendre à une majoration du niveau perturbateur par rapport au niveau moyen calculé : par exemple, on mettra sur une majoration de 5 à 10 dB par rapport au niveau le plus probable à sec (voir § 6.2).

fair weather such that :

$$E_1 = E_0 - 24 \text{ dB}$$

Level E_1 shall not be exceeded outside a corridor corresponding to the width of the right-of-way.

Even if the limiting levels which this method yields are not realizable technically or economically, they provide a reference value in case of dispute with a complainant.

But whatever the chosen criterion a statistical definition of the interference could conveniently be introduced which would take account of the temporal distribution of the interfering levels.

Assume that a line is technically defined (section and number of subconductors) in terms of a level, or preferably a distribution of levels agreed between the user or constructor of the line and the telecommunications authorities. It remains to state the precautions to be taken when the line is constructed so that the agreed values are actually respected. Two conditions are necessary for this :

– the corona RI levels must be in agreement with the calculated and agreed levels.:-

– the insulator strings and line fittings must satisfy the criteria given in Chapter 5, that is, produce an interference level negligible compared to that of the conductors.

The first condition essentially relates to the conductors' surface state. Although the interference level under heavy rain can be calculated precisely, the dry level and the annual distribution of levels can be very different depending on whether the conductors are clean or dirty

It follows that conductors should be laid with the greatest care and that precautions are needed against the collection of dirt or soil by conductors dragged on the ground.

Surface grease which may trap dirt or insects and lead to surface roughness should be avoided ; if special circumstances, for example the risk of corrosion, call for greased conductors, the grease should be confined to the internal layers ; in addition, a viscous grease with a high drop point will be required to prevent migration to the surface of the conductor.

Finally, the estimation of the line's interference level in dry weather should take into account the degree of pollution in the area : if this is industrial, where smoke and dusts are produced, an increase in the interference level must be foreseen above the calculated mean level : for example, an increase of 5 to 10 dB above the most probable level will be expected when dry (see § 6.2).

En ce qui concerne les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de vérifier leur niveau perturbateur par un essai de laboratoire ; cet essai montrera s'il y a lieu de corriger le niveau d'origine par une modification des anneaux de garde ou même en choisissant un autre type d'isolateurs. On tiendra également compte du degré de pollution locale pour s'assurer que les niveaux restent contractuels même sous brouillard ou pluie.

6.2. Etablissement d'une formule CIGRE pour la prédétermination du niveau perturbateur des lignes de transport

6.2.1. Introduction

Le nombre important de formules de calcul et de méthodes de prédétermination présentées dans le Chapitre 4 peut laisser planer un doute sur la validité de ces méthodes. En fait l'analyse effectuée dans le cadre de l'enquête CIGRE – IEEE montre que la plupart de ces formules donnent des résultats peu différents les uns des autres, mais que par contre les niveaux réels mesurés sont relativement dispersés. Il faut donc en conclure que l'incertitude est due plus aux variations aléatoires et aux difficultés de mesure du phénomène étudié qu'à une méconnaissance de ce phénomène.

D'autre part, le nombre important de lignes diverses présentées dans cette enquête mondiale CIGRE – IEEE permet de définir avec une bonne précision le domaine d'application d'une formule de calcul et ainsi de proposer une formule simple ayant pour seule prétention de s'appliquer aux lignes de type existant ou prévisible dans un futur proche.

6.2.2. Limites de validité de la formule de calcul CIGRE

Les domaines de variation des paramètres à prendre en compte ont été extraits de l'enquête CIGRE – IEEE. Ils sont précisés sur la figure 6.1.

a) Tension nominale des lignes : 200 – 765 kV

La formule proposée étant basée exclusivement sur l'effet de couronne des conducteurs donnerait les valeurs par défaut pour des lignes de tension nominale inférieure à 200 kV. En effet dans ce cas le niveau perturbateur global de la ligne est dû généralement plutôt aux accessoires de ligne : isolateurs, etc.

Ce peut être également le cas pour certaines lignes de tension supérieure dont les conducteurs fonctionnent à des gradients superficiels faibles : 12 kV/cm environ : Quant aux lignes de tension supérieure à 765 kV, elles sont actuellement trop peu connues pour envisager avec précision l'extrapolation de la formule.

b) Gradients électriques maximaux : de 12 à 20 kV/cm

Bien que la population analysée par l'enquête comporte des lignes très diverses, on constate que la variation des gradients est relativement faible. La moyenne des gradients est de 15,5 kV/cm et les 2/3 des lignes ont leur gradient compris dans l'intervalle 14 – 17 kV/cm.

Concerning insulator strings, it is indispensable to check their interference level by means of a laboratory test ; this test will demonstrate any need for modified corona-rings or change in insulator type. The local degree of pollution should also be taken into account to ensure that the levels remain within agreed limits even under fog or rain.

6.2. Establishment of a CIGRE formula for predicting transmission line interference level

6.2.1. Introduction

The large number of calculating formulae and prediction methods presented in Chapter 4 can lead to doubts about validity. In fact, the analysis carried out in the CIGRE-IEEE survey shows that most of these formulae give consistent results, but that, on the other hand, the actual measured levels show wide scatter. It is concluded that the uncertainty is caused more by random variations and measurement difficulties than by misconceptions about the processes of interference.

On the other hand, the large number of different types of line presented in this world-wide CIGRE-IEEE survey permits precise definition of the scope of application of a calculation formula and thus leads to a simple formula which claims no more than applicability to types of lines that exist or are envisaged in the near future.

6.2.2. Validity limits of the CIGRE calculation formula

The range of parameters to be taken into account were derived from the CIGRE-IEEE survey. They are specified in Figure 6.1.

a) Nominal line voltage : 200 – 765 kV

The formula proposed, based exclusively on conductor corona effect, would give incorrect values for lines of nominal voltage less than 200 kV. In fact, in this case, the overall interference level of the line is due generally rather to line hardware, insulators, etc.

This can also be the case for some higher voltage lines whose conductors operate with low surface gradients, approximately 12 kV/cm. Insufficient information is yet available to envisage extrapolation of the formula with precision to lines operating above 765 kV.

b) Maximum electric gradients : from 12 to 20 kV/cm.

Although the population analyzed in the survey includes many types of line, the variation of gradients is found to be relatively small. The mean of the gradients is 15.5 kV/cm and two-thirds of the lines have their gradient in the range 14-17 kV/cm.

Nombre total de lignes } 76
 Total number of lines }
 dont: lignes à 1 circuit } 82
 single circuit lines }
 double circuit lines } 14

Voltage kV.	1 circuit	2 circuits	total
220-275	11	10	21
330-400	15	4	19
500	30		30
750	6		6

Nombre de sous-conducteurs par faisceau.
 Number of sub-conductors per bundle

1	2	3	4
22 lignes 220-400kV	24 lignes 320-500kV	17 lignes 320-500kV	13 lignes 380-750kV



Pour: $A=30\text{ cm} \rightarrow A/4 \sim 10$
 $A=40\text{ cm} \rightarrow A/4 \sim 13$
 $A=57\text{ cm} \rightarrow A/4 \sim 20$

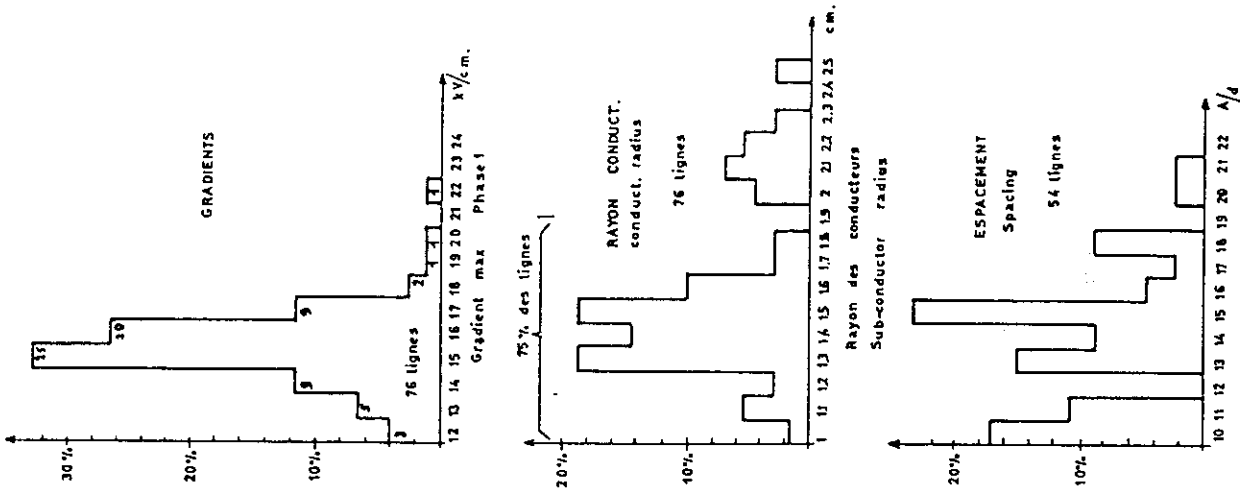


Figure 6.1. Enquête CIGRE-IEEE sur le niveau perturbateur des lignes. Variations des paramètres : Gradient électrique, rayon des conducteurs, nombre de sous-conducteurs par faisceau, espacement des sous-conducteurs. Line parameters variations: Electrical gradient, sub-conductors radius, number of sub-conductors per bundle, sub-conductors spacing.

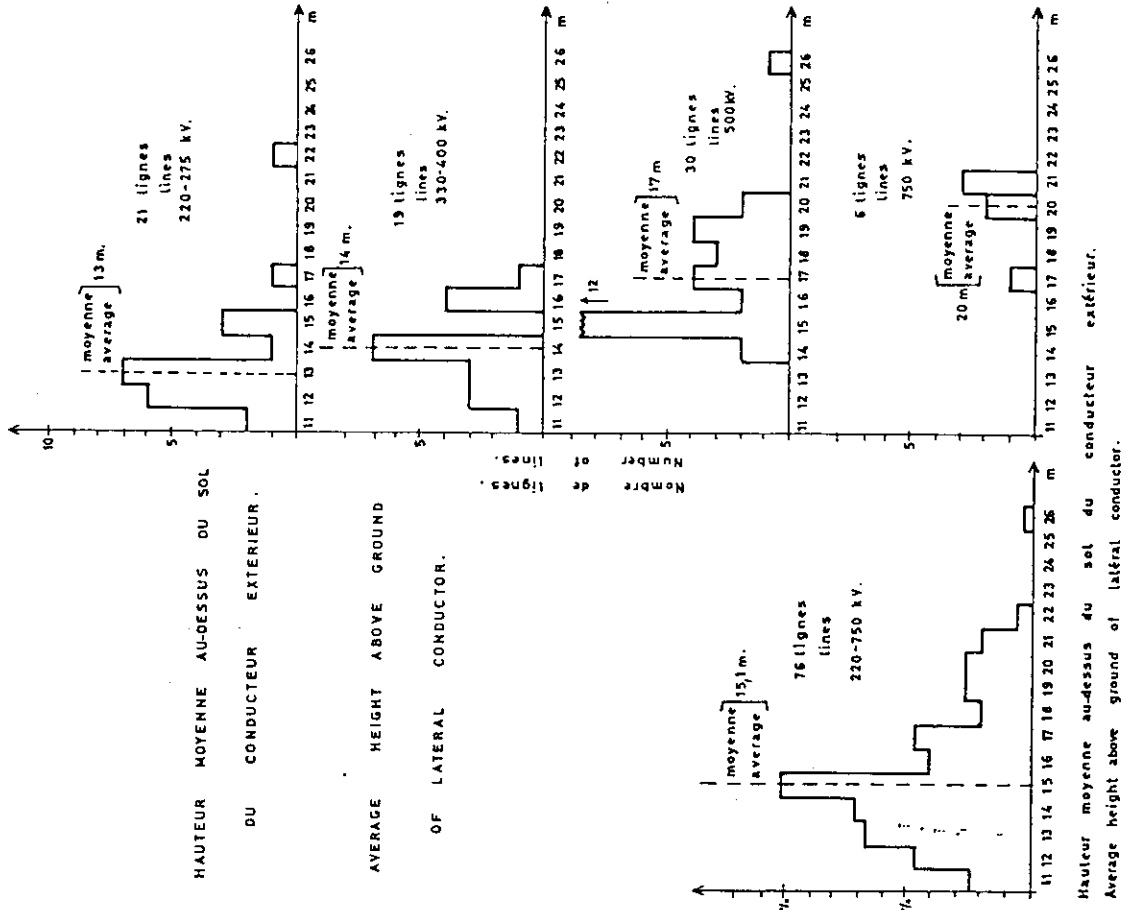


Figure 6.2. Enquête CIGRE-IEEE. Variation de la hauteur moyenne au-dessus du sol du conducteur extérieur des lignes de transport. Variation of average height above ground of the lateral conductor of transmission lines.

c) Rayons des conducteurs élémentaires : de 1 à 2,5 cm

On peut remarquer que pour 75 % des lignes le rayon des conducteurs élémentaires est compris dans l'intervalle : 1–1,8 cm.

d) Nombre de conducteurs par faisceau : de 1 à 4

En principe la formule doit pouvoir être extrapolée sans grave erreur à des faisceaux de 6 et 8 conducteurs, l'influence de ce paramètre pouvant être négligée lorsque le niveau perturbateur est calculé à partir du gradient maximal.

e) Espacement relatif des conducteurs du faisceau : de 10 à 20.

L'espacement relatif des conducteurs élémentaires d'un faisceau est le rapport de la distance de deux conducteurs voisins à leur diamètre. Ce paramètre est pratiquement sans influence dans la gamme utile.

f) Hauteur des conducteurs au-dessus du sol

Pour le calcul des gradients électriques, on fait intervenir la hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol, tout au long d'une portée moyenne. Les variations de ces paramètres sont données sur la figure 6.2. Des hauteurs-types, pour chaque gamme de tension, peuvent être utilisées pour un calcul préliminaire. La méthode de calcul des gradients, exposée ci-après, ne comportant pas d'approximation pour ce paramètre, il n'est pas utile de définir une gamme de variations.

La gamme normale des hauteurs des conducteurs au-dessus du sol, au point de mesure, s'étend de 8 à 18 mètres (voir Fig. 6.3) pour les lignes de 225 à 765 kV étudiées. L'extrapolation de la formule, dans des cas particuliers, jusqu'à des hauteurs de 25 mètres ne paraît pas réduire sensiblement la précision de la détermination.

6.2.3. Etablissement de la formule CIGRE

Par définition cette formule donnera une estimation du niveau perturbateur le plus probable, en dB/1µV/m, CISPR, par beau temps sec (conducteurs secs, vieillis et moyennement pollués, soit état de surface moyen) à une distance horizontale de 15 m du conducteur extérieur, à 2 m au-dessus du sol et à une fréquence de mesure de 0,5 MHz.

a) Formule élémentaire pour une seule phase

$$NP \text{ dB}/1\mu\text{V}/\text{m} \text{ (CISPR)} = 3,5 g_m + 12 r - 30$$

g_m = gradient maximal du conducteur ou du faisceau en $\text{kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$

r = rayon du conducteur élémentaire en cm

Les coefficients 3,5 et 12 sont des valeurs expérimentales obtenues à partir de mesures statistiques effectuées en nasse.

L'accroissement du niveau perturbateur en fonction du gradient est pratiquement constant à sec, le coefficient 3,5 constituant une bonne moyenne des valeurs généralement rencontrées ; sous pluie apparaît un phénomène de saturation au-dessus de 16 – 17 kV/cm , mais la figure 6.4 montre que, dans la zone utile des gradients, on ne commet pas une grande erreur en adoptant une pente constante et égale à la pente à sec.

c) Basic conductor radius : from 1 to 2.5 cm

It is noted that for 75 % of the lines, the conductor-radius is between 1 – 1.8 cm.

d) Number of subconductors per bundle : from 1 to 4

Theoretically, the formula may be extrapolated without serious error to bundles of 6 and 8 conductors. The effect of this parameter can be neglected when the interference level is calculated from the maximum surface electric stress.

e) Relative subconductor spacing : from 10 to 20.

The relative subconductor spacing in a bundle is the ratio of the distance of two neighbouring conductors to their diameter. This parameter has practically no effect in the useful range.

f) Height of conductors above the ground.

The mean height of the conductors above ground in an average span is used for calculating gradients. The variations in these parameters are given in Figure 6.2. Typical heights for each voltage range can be used for preliminary calculation. The method of calculating gradients given below does not contain any approximation for this parameter. It is thus not necessary to define a range of variations.

The normal range of conductor heights above ground at the measuring point is 8 to 18 metres (see Fig. 6.3) for the studied lines of 225 to 765 kV. Extrapolation of the formula in special cases up to heights of 25 metres does not seem to reduce the accuracy substantially.

6.2.3. Establishment of the CIGRE formula

By definition, this formula will give a figure for the most probable interference level in dB/1 µV/m, CISPR, for dry, fair weather (dry, aged, and moderately dirty conductors, that is, a mean surface state) at a horizontal distance of 15 m from the external conductor, 2 m above the ground and at a measurement frequency of 0.5 MHz.

a) Elementary formula for a single phase

$$NP \text{ dB}/1 \mu\text{V}/\text{m} \text{ (CISPR)} = 3.5 g_m + 12 r - 30$$

g_m = maximum gradient of the conductor or bundle, in $\text{kV}_{\text{rms}}/\text{cm}$

r = conductor radius in cm.

Coefficients 3.5 and 12 are experimental values obtained from the statistical measurements made using cages.

Increase of the interference level as a function of the surface electric stress is practically constant when dry, the coefficient 3.5 being a good average for the values generally encountered ; a saturation phenomenon above 16-17 kV/m occurs in rain, but Figure 6.4 shows that, in the effective range of gradients, the adoption of a constant slope equal to the dry weather value does not lead to a large error.

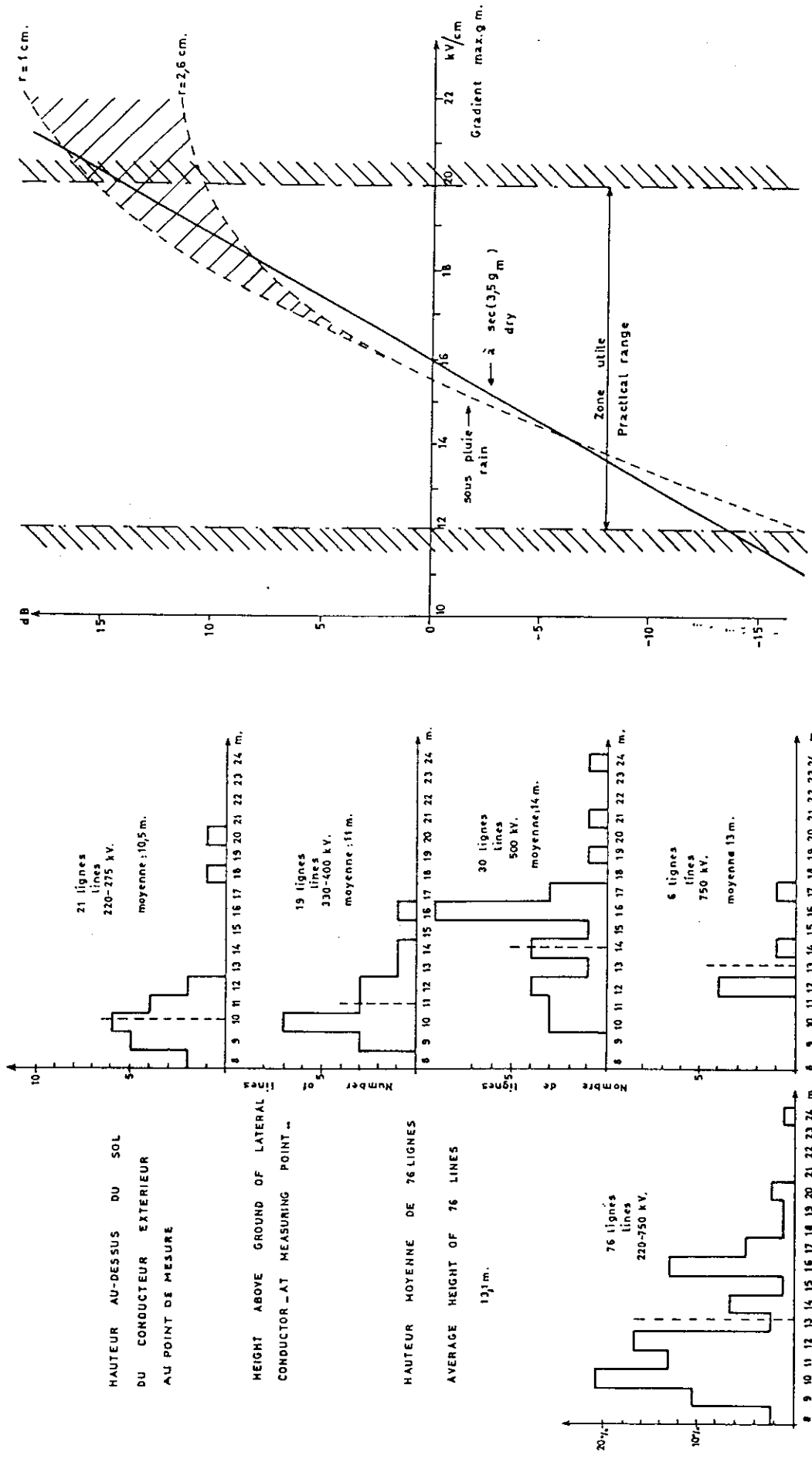


Figure 6.3.

Enquête CIGRE-IEEE. Variation de la hauteur du conducteur le plus proche du point de mesure.
CIGRE-IEEE survey. Variation of height above ground of lateral conductor at measuring point.

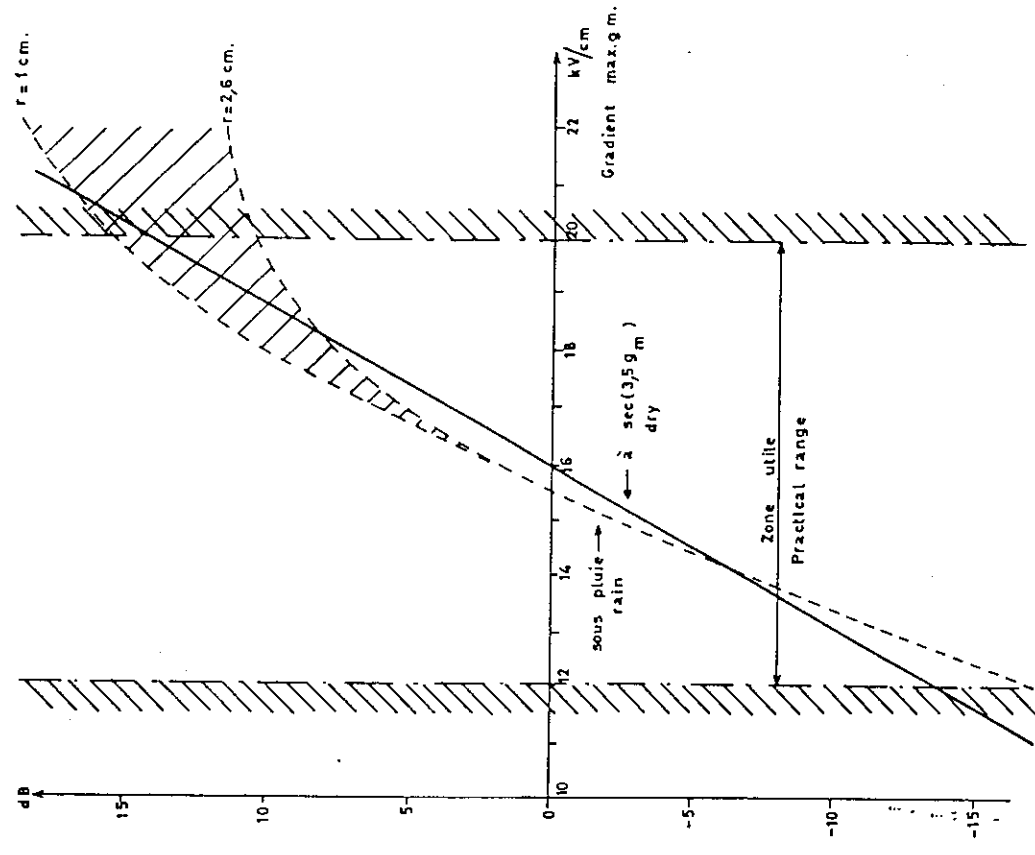


Figure 6.4.

Variation du N.P. en fonction du gradient maximal.
Variation of R.N. versus maximum gradient.

Pour l'influence du rayon, on a préféré proposer une loi linéaire, plus simple et plus proche de la réalité physique que la loi logarithmique, généralement adoptée. La figure 6.5 montre d'ailleurs que dans la zone utile des rayons, l'écart entre les deux lois est faible.

Remarques :

1. Il est recommandé de calculer le gradient électrique avec une bonne précision à cause de son importance sur le niveau perturbateur. Une méthode de calcul est donnée ci-après (voir 6.3).

2. Cette formule suppose que la distance du point de mesure au conducteur est $D_0 = 20$ mètres en distance directe, à laquelle correspond une hauteur de celui-ci au-dessus du sol de sensiblement 15 mètres. Si la distance directe est différente, soit D , on adoptera la formule de correction suivante :

$$\frac{NP (\mu V/m)}{NP_0} = \left(\frac{D_0}{D} \right)^{1,65}$$

ou en décibels : $NP = NP_0 - 33 \log_{10} \left(\frac{D}{D_0} \right)$

Cette loi n'est valable que pour des variations relativement faibles de D autour de D_0 ($0,5 D_0 < D < 3 D_0$ environ).

b) Cas d'une ligne triphasée à 1 terne

L'extension de la formule précédente à une ligne triphasée se fait en calculant, au point de mesure, le niveau perturbateur dû à chaque phase soit : (Fig. 6.6).

$$NP_1 = 3,5 g_{m1} + 12_{r1} - 33 \log_{10} \frac{D_1}{20} - 30$$

$$NP_2 = 3,5 g_{m2} + 12_{r2} - 33 \log_{10} \frac{D_2}{20} - 30$$

$$NP_3 = 3,5 g_{m3} + 12_{r3} - 33 \log_{10} \frac{D_3}{20} - 30$$

On effectue ensuite la sommation CISPR de ces trois champs de la façon suivante : si l'un des champs est supérieur aux autres d'au moins 3 dB, il est seul pris en compte, sinon on aura :

$$NP = \frac{NP_a + NP_b}{2} + 1,5 \text{ dB}$$

NP_a et NP_b étant les deux valeurs les plus élevées parmi les 3 valeurs ci-dessus.

c) Cas d'une ligne triphasée à deux ternes

On calcule comme ci-dessus les champs perturbateurs, au point de mesure, produits par chacun des 6 conducteurs. On ajoute d'abord quadratiquement les champs correspondant aux phases ayant même indice horaire, puis on effectue la sommation CISPR sur les trois champs résultants.

For the effect of radius, a linear law is preferred which is simpler and closer to physical reality than the generally adopted logarithmic law. Figure 6.5 shows, moreover, that in the effective range of radii, the difference between the two results is small.

Remarks

1. *Precise calculation of the surface electric stress is recommended because of its important effect on the interference level. A calculation method is given below (see 6.3).*

2. *This formula assumes that the distance from the measuring point to the conductor is $D_0 = 20$ metres corresponding to a line-height of about 15 metres. If the direct distance is different, say D , the following correction formula is applicable.*

$$\frac{NP (\mu V/m)}{NP_0} = \left(\frac{D_0}{D} \right)^{1,65}$$

or in decibels : $NP = NP_0 - 33 \log_{10} \left(\frac{D}{D_0} \right)$

This law is valid only for relatively small variations of D about D_0 ($0.5 D_0 < D < 3 D_0$ approx.)

b) Case of single-circuit 3-phase line

The previous formula is applied to a three-phase line by calculating, at the measuring point, the interference level due to each phase, that is : (Fig. 6.6).

The CISPR summation of these three fields is made in the following way : if one of the fields is at least 3 dB greater than the others, then they are neglected.

Otherwise, we have :

$$NP = \frac{NP_a + NP_b}{2} + 1.5 \text{ dB}$$

Where NP_a and NP_b are the two highest among the 3 values above.

c) Case of a double circuit line

The interference fields produced by each of the 6 conductors are calculated as above at the measuring point. First, the fields produced by the phases corresponding in time are added quadratically and then the CISPR summation is made on the three resulting fields.

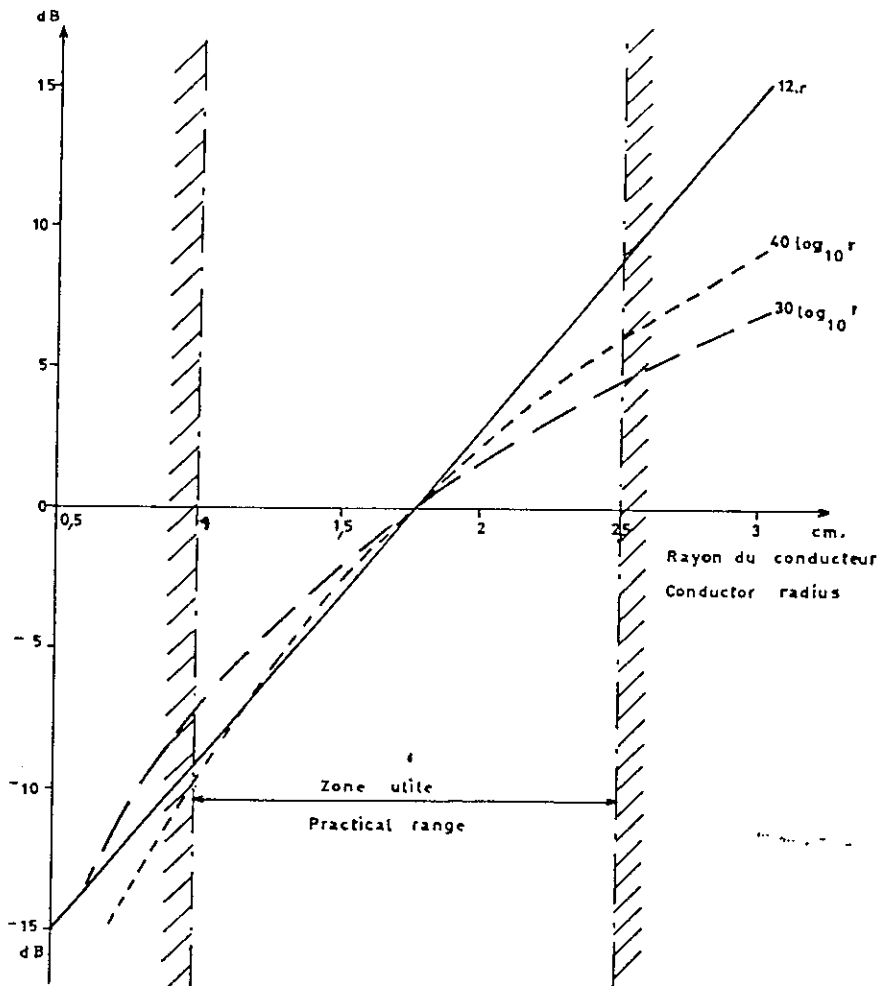


Figure 6.5.

Variation du N.P. en fonction du rayon des conducteurs, comparaison de 3 formules.
 Variation of R.N. versus conductor radius, comparison between 3 formulae.

6.2.4. Influence de la fréquence de mesure, de la distance à la ligne, des conditions atmosphériques et de l'altitude

La formule de base : $NP = 3,5 g_m + 12 r - 33 \log_{10} \frac{D}{20} - 30$ prend en compte les différents paramètres de la ligne :

– le gradient maximal g_m est fonction de la hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol, de la distance entre phases, du diamètre, nombre et espacement des conducteurs du faisceau et de la présence éventuelle de câbles de garde.

– le second terme, $12 r$ ne dépend que du rayon des conducteurs élémentaires.

– le troisième terme, $33 \log_{10} \frac{D}{20}$, tient compte de la hauteur réelle des conducteurs au point de mesure et de l'espacement des phases.

Rappelons que cette formule donne le niveau perturbateur le plus probable d'une ligne, par temps sec, à 15 m. latéralement et à 0,5 MHz.

Pour obtenir le niveau à une fréquence différente de 0,5 MHz, il suffit d'appliquer la correction indiquée par la figure 3.2 où sont reportés les spectres-types de fréquence.

6.2.4 – Effect of measuring frequency, distance to the line, atmospheric conditions and altitude

The basic formula : $NP = 3.5 g_m + 12 r - 33 \log_{10} \frac{D}{20} - 30$ takes into account the different parameters of the line :

– the maximum gradient g_m is a function of the mean height of the conductors above the ground, the distance between phases, the diameter, number, and spacing of the conductors of the bundle, and of the presence of earth-wires.

– the second term, $12 r$, depends only on the radius of the conductors.

– the third term, $33 \log_{10} \frac{D}{20}$ takes into account the actual height of the conductors at the measuring point and the spacing of the phase conductors.

It is noted that this formula gives the most probable interference level of a line in dry weather at 15 m laterally and at 0.5 MHz.

To obtain the level at a different frequency from 0.5 MHz, it is sufficient to apply the correction shown in Figure 3.2 where typical frequency spectra are given.

De même le niveau perturbateur à une *distance latérale autre que 15 mètres* sera obtenu à partir de la figure 3.4, selon la configuration de la ligne considérée.

Le niveau dans d'autres conditions atmosphériques que le beau temps sec moyen pourra être estimé à partir des indications du tableau 3.3. Enfin, l'influence de l'altitude peut être prise en compte par l'emploi de l'expression suivante :

$$NH_h = NP_o + \frac{q - q_o}{300}$$

où NP_o est le niveau perturbateur à l'altitude q_o (mètres) et NP_h le niveau perturbateur à l'altitude q (mètres) (cf. tableau 4.1, méthode italienne).

Likewise, the interference level at a lateral distance other than 15 metres will be obtained from Figure 3.4 : it depends on the configuration of the considered line.

The level in atmospheric conditions other than mean dry, fair weather can be estimated using Table 3.3. Finally, the effect of altitude can be taken into account by using the following expression :

$$NH_h = NP_o + \frac{q - q_o}{300}$$

where NP_o is the interference level at altitude q_o (metres) and NP_h the interference level at altitude q (metres) (cf. Table 4.1, Italian method).

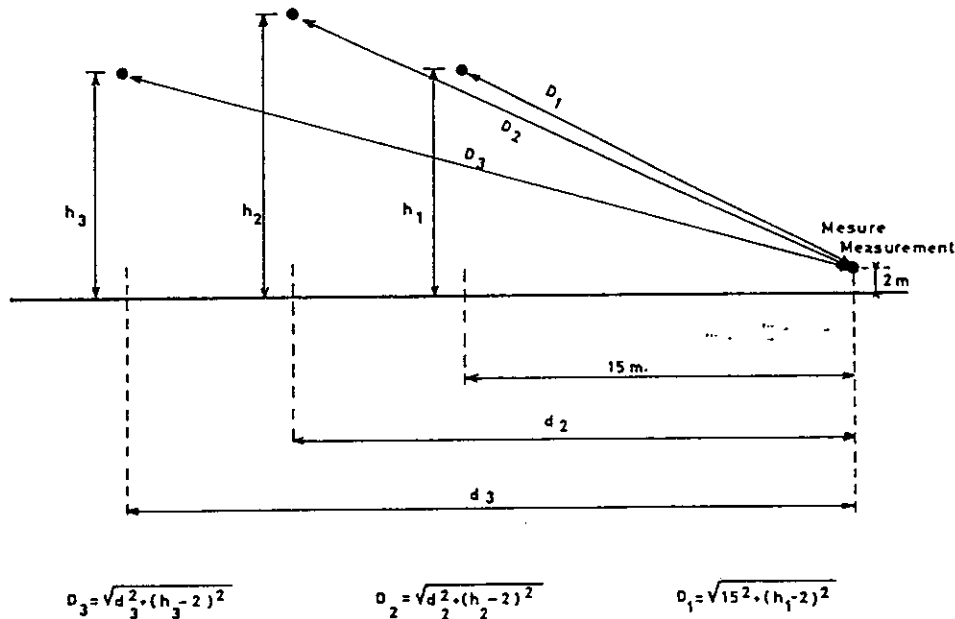


Figure 6.6.

Distances conducteur – point de mesure : D = distance directe. d = distance horizontale.
 Distances conductor – measuring point : D = Direct distance – d = horizontal distance.

6.2.5. Précision de la méthode CIGRE

La méthode de calcul exposée ci-dessus a été proposée par le Groupe de Travail 36.01 en raison de sa simplicité d'emploi. Son application à 53 lignes, de tensions comprises entre 220 kV et 750 kV, extraites de l'enquête CIGRE-IEEE, a permis de démontrer sa validité.

Les valeurs prises en compte pour les 53 lignes étaient des moyennes d'au moins quatre mesures effectuées par temps sec ; l'écart-type des différences entre les valeurs calculées et ces mesures est alors d'environ 4 dB. Cette dispersion est du même ordre de grandeur que celle que l'on obtient en utilisant des formules ou des méthodes de calcul plus complexes. On peut en conclure que les écarts entre mesure et calcul sont dus bien plus à l'incapacité de définir un état de surface des conducteurs qu'à la formulation elle-même.

6.2.5. Precision of the CIGRE method

The calculation method given above was proposed by Working Group 36.01 because of its simplicity in use. Its application to 53 lines of voltages between 220 kV and 750 kV extracted from the CIGRE-IEEE survey has shown its validity.

The values taken into account for the 53 lines were the means of at least four measurements made during dry weather ; the standard deviation of the differences between the calculated values and these measurements is approximately 4 dB. This dispersion has the same order of magnitude as that obtained by using more complex formulae or methods. We conclude that the variations between measurements and calculation are due more to the inability to define a conductor surface state than to the formula itself.

6.2.6. Cas des lignes à moyenne tension (<30 kV).

Les conducteurs des lignes de tension à 30 kV sont soumis à un gradient suffisamment faible (de l'ordre de 3 à 6 kV/cm) pour n'engendrer aucun effet couronne, même sous pluie. Les perturbations que l'on peut observer sont uniquement dues aux isolateurs.

Comme les conducteurs de phase de ces lignes sont relativement rapprochés, le champ perturbateur au sol est dû au seul mode homopolaire, les autres modes pouvant être négligés.

La relation entre courant perturbateur I_c mesuré en laboratoire sur une chaîne et sur le champ sous la ligne est alors beaucoup plus facile à établir. A l'aplomb de la ligne, on a pratiquement, entre 0,5 et 1 MHz, la relation suivante :

$$NP \text{ (dB)} = I_c \text{ (dB)} + 34$$

Cette relation est valable pour une distance entre poteaux de 64 m et une hauteur au-dessus du sol de 8 mètres. Un doublement de la portée entraîne une réduction théorique de champ de 3 dB.

Le courant perturbateur injecté à chaque poteau dépend du type d'isolateurs utilisés : dans le cas d'isolateurs rigides, l'effet perturbateur est dû à des petites étincelles se formant entre le conducteur et le corps de l'isolateur au niveau de l'attache : une attache desserrée peut nettement accroître les perturbations. Sous pluie, les gouttes d'eau court-circuitent les petits intervalles d'air, et les perturbations disparaissent presque totalement.

Le niveau perturbateur est le plus élevé par ambiance sèche et chaude et atteint alors, à la tension nominale de l'isolateur, 500 à 1000 $\mu\text{V}/300 \Omega$. La figure 6.7 donne un exemple de niveau perturbateur engendré par un isolateur rigide.

Dans le cas des isolateurs suspendus, capot-tige ou isoblocs, le niveau perturbateur normal est négligeable par temps sec,; il croît un peu sous pluie, mais reste néanmoins extrêmement faible, comme le montre la figure 6.8.

6.3. Méthode de calcul du gradient superficiel des conducteurs

6.3.1. Ainsi qu'on l'a montré dans le chapitre précédent, l'un des paramètres les plus influents sur le niveau perturbateur d'une ligne et plus généralement sur l'intensité de l'effet couronne est le champ électrique à la surface du conducteur ou gradient superficiel.

En raison de la grande sensibilité du phénomène couronne à la valeur de ce champ, il est nécessaire d'employer une méthode de calcul fournissant le champ avec une précision de l'ordre de 1 %.

Du fait de la réalisation des conducteurs usuels en brins toronnés, le champ superficiel réel accuse, le long de leur circonférence, des fluctuations autour d'une valeur moyenne. Il est d'usage de calculer le champ superficiel du conducteur lisse de même diamètre extérieur, quitte à introduire, si nécessaire, un coefficient expérimental de correction de toronnage.

6.2.6. Lower voltage lines

The conductors of lines at voltages lower than 30 kV operate at such low gradients (of the order of 3 to 6 kV/cm) that no corona effect occurs even in rain. Any case of interference is solely caused by the insulators.

Since the phase conductors of these lines are relatively close, the interference field at the ground is due only to the line-to-ground mode, other modes being negligible.

The relation between the interference current I_c measured in the laboratory on an insulator string and the field under the line can then be more easily established. Just below the line, between 0.5 and 1 MHz, we have, in practice, the following relation :

$$NP \text{ (dB)} = I_c \text{ (dB)} + 34$$

This relation is valid for a distance between poles of 64 m and a height above the ground of 8 metres. Doubling the span gives a theoretical field reduction of 3 dB.

The interference current injected at each pole depends on the type of insulator used : in the case of rigid insulators, the interference effect is due to small sparks that form between the conductor and the body of the insulator at the binder : loose binding can clearly increase interference. In rain, raindrops can short-circuit the small air gaps and interference then disappears nearly completely.

The interference level is highest in a hot and dry environment and may then reach, at the nominal insulator voltage, 500 to 1000 $\mu\text{V}/300 \Omega$. Figure 6.7 gives an example of an interference level generated by a rigid insulator.

In the case of suspension insulators, either cap-and-pin or long rod, the normal interference level is negligible in dry weather ; it increases slightly in rain, but nevertheless remains extremely small, as shown in Figure 6.8.

6.3. Conductor surface gradient calculation method

6.3.1. *As we showed in the previous chapter, one of the dominant parameters on the interference level of a line, and, especially, on the magnitude of the corona effect is the electric field at the surface of the conductor or surface gradient.*

Because of the close dependence of corona effects on the value of this field, it is necessary to use a calculation method that gives the field with a precision of the order of 1 %.

Since ordinary conductors are stranded, the actual surface field varies, round their circumference, about a mean value. It is customary to calculate the surface field of a smooth conductor with the same external diameter even if an experimental stranding factor has to be introduced.

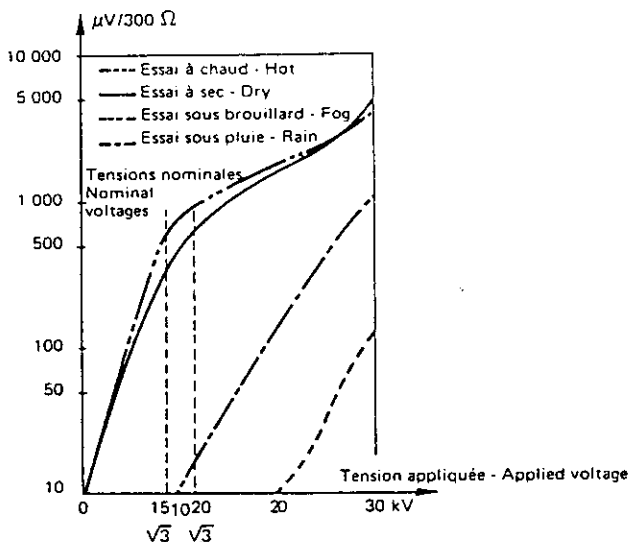


Figure 6.7.

Courbes du niveau perturbateur d'un isolateur rigide pour diverses conditions climatiques.
Curves of R.I.V. of a pin-type insulator for various climatic conditions.

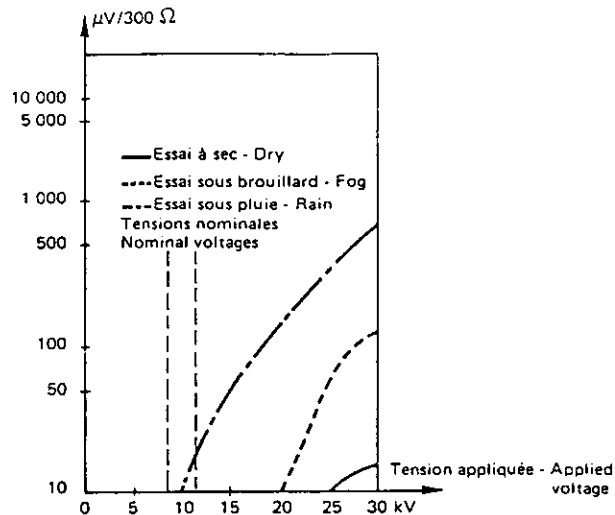


Figure 6.8.

Courbes du niveau perturbateur d'une chaîne de 3 isolateurs capot et tige pour diverses conditions climatiques.
Curves of R.I.V. of a string of 3 cap and pin insulators for various climatic conditions.

De la façon la plus générale, le champ superficiel se calcule par le théorème de Gauss :

$$E = q/2 \pi \epsilon_0 r$$

où E = champ superficiel en V/cm
 q = charge superficielle par unité de longueur en C/m
 r = rayon du conducteur lisse équivalent en cm.

$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi 10^9}$ est la permittivité du vide (ou de l'air), en F/m

6.3.2. Matrice des coefficients de potentiel et de capacité.

La relation générale que l'on emploie pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle suivante :

$$\{q\} = [C] \{V\}$$

où $\{q\}$ et $\{V\}$ sont les matrices unicolonnes des charges et des potentiels des conducteurs (le sol étant au potentiel nul), et $[C]$ est la matrice carrée des coefficients de capacité propres et mutuelles. Pour déterminer $[C]$, on commence d'abord par calculer les coefficients de potentiels de la ligne. Ceux-ci sont obtenus par application directe de la théorie des images : on remplace le sol, considéré comme un plan de potentiel nul, par l'image des conducteurs par rapport à ce plan. Désignons par $i, j \dots$ les conducteurs parallèles en présence et par $i', j' \dots$ leurs images.

Generally, the surface gradient is calculated from Gauss' s theorem :

$$E = q/2 \pi \epsilon_0 r$$

where E = surface gradient in V/cm
 q = surface charge per unit length, in C/m
 r = equivalent smooth conductor radius in cm.
 $\epsilon_0 = 1/36 \pi 10^9$ is the permittivity of free space in F/m.

6.3.2. Potential and capacity coefficient matrix

The general relation used to calculate the charges carried by the conductors of a multi-conductor line is the following matrix equation :

$$\{q\} = [C] \{V\}$$

where $\{q\}$ and $\{V\}$ are the one-column matrices of charges and potentials on the conductors (the ground being at potential zero), and $[C]$ is the square matrix of the individual and mutual capacity coefficients. To determine $[C]$ we first calculate the potential coefficients of the line. These are obtained by direct application of the theory of images : the ground, considered as a zero potential plane, is replaced by the image of the conductors with respect to this plane. Let us designate $i, j \dots$ the parallel conductors present and by $i', j' \dots$ their images.

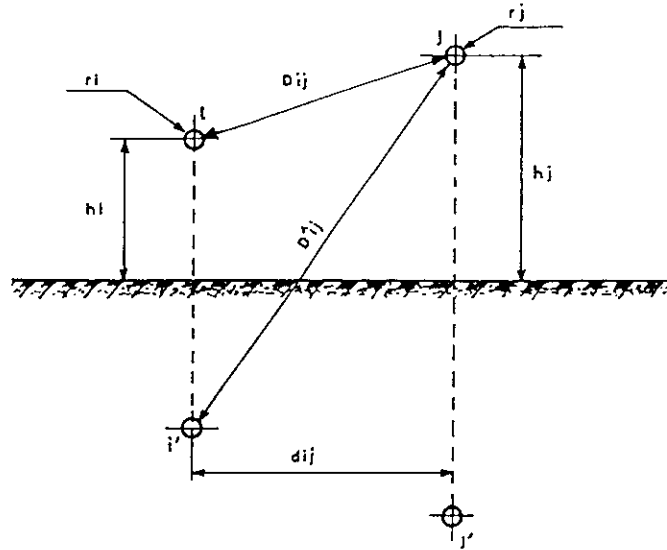


Figure 6.9.
Calcul des coefficients de potentiel.
Potential coefficients calculation.

En se conformant aux notations de la figure (6.9),
posons :

Using the notation of Figure (6.9), let :

$$D'_{ij} = \sqrt{(h_j + h_i)^2 + d_{ij}^2}$$

$$D_{ij} = \sqrt{(h_j - h_i)^2 + d_{ij}^2}$$

Les coefficients de potentiel s'écrivent :

The potential coefficients are written :

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \text{Log}_e \frac{2 h_i}{r_i}$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \text{Log}_e \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

On notera que $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$

where $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$

Remarque : En pratique, la hauteur des conducteurs varie le long d'une portée, ainsi que d'une portée à l'autre. Les hauteurs h_i et h_j à introduire dans les calculs de gradients sont les hauteurs moyennes définies par :

h (moyenne) = hauteur d'accrochage moyenne - 2/3 flèche moyenne.

A l'aide des coefficients de potentiel obtenus, on forme la matrice carrée :

Remark : In practice, the height of the conductors varies along a span as well as from one span to another. Heights h_i and h_j in the gradient calculations are the mean heights defined by :

h (mean) = mean stringing height - 2/3 mean sag.

By means of the potential coefficients obtained, the following square matrix is constructed :

$$[\lambda] \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{1i} & \dots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{j1} & \lambda_{ji} & \dots & \lambda_{jn} \\ \lambda_{n1} & \lambda_{ni} & \dots & \lambda_{nn} \end{bmatrix}$$

Par inversion on en déduit enfin la matrice des capacités :

$$[C] = [\lambda]^{-1}$$

By inversion, the capacitance matrix is finally deduced:

$$[C] = [\lambda]^{-1}$$

La matrice [C] permet de calculer les charges portées par chaque conducteur en fonction de leurs potentiels respectifs.

Dans le cas des lignes triphasées de transport d'énergie, la charge d'un conducteur, et par conséquent son champ superficiel, ne sont pas nécessairement maximaux en même temps que la tension du conducteur lui-même.

Ce phénomène est dû au déphasage entre les 3 tensions du système triphasé. Ainsi par exemple, si la succession des phases est définie par 1, a^2 , a , (où a est l'opérateur de Fortescue), la matrice unicolonne des tensions s'écrira :

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 + j0 \\ -1/2 + 1/2 j\sqrt{3} \\ -1/2 - 1/2 j\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

6.3.3. Ligne à plusieurs ternes

Il arrive fréquemment que plusieurs systèmes triphasés soient portés par les mêmes pylônes. Dans de tels cas, le calcul précis des gradients exige d'établir des matrices des $[\lambda]$ et des [C] qui peuvent être d'ordre élevé : une ligne à deux ternes sera caractérisée par des matrices d'ordre 6. L'inversion de telles matrices n'est pratiquement possible qu'à l'aide d'un ordinateur ; mais le parc d'ordinateurs est maintenant suffisamment développé pour que ces calculs ne posent, à l'heure actuelle, plus aucun problème.

Il faut faire remarquer par ailleurs que la position des indices de phase sur chaque terna influence sur les charges des conducteurs : il est important d'en tenir compte lors du calcul des gradients d'une ligne à deux ternes.

Ainsi par exemple, la disposition en nappe horizontale de deux ternes définis par 1, a , a^2 et 1, a , a^2 entraînera des gradients plus élevés que la disposition 1, a , a^2 et a^2 , a , 1.

6.3.4. Influence des câbles de garde

Lorsqu'une ligne comporte des câbles de garde, le déroulement des calculs sera en principe absolument identique. Il faut seulement prendre leur existence en compte dans la formation de la matrice des potentiels ; d'autre part, dans la matrice unicolonne des tensions, le potentiel des câbles de garde sera évidemment pris égal à 0.

Bien entendu, leur présence augmente l'ordre des matrices. Montrons cependant qu'un artifice permet de ramener cet ordre à celui de la matrice d'une ligne sans câbles de garde.

A cet effet, écrivons l'équation matricielle aux coefficients de potentiel sous la forme suivante, dans laquelle apparaissent les sous-matrices relatives aux câbles de phases (indice c), les sous-matrices relatives aux câbles de garde (indice g), et les sous-matrices de couplage (indice cg).

$$\begin{Bmatrix} v_c \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{cc} & \dots & \lambda_{cg} \\ \dots & \dots & \dots \\ \lambda_{gc} & \dots & \lambda_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_c \\ q_g \end{Bmatrix}$$

Matrix [C] allows calculation of the charges carried by each of the conductors as a function of their respective potentials.

In the case of three-phase lines, the charge on a conductor, and, as a result, its surface gradient does not necessarily reach a maximum at the same time as the voltage of the conductor itself.

This phenomenon arises from the phase-differences between conductors. Thus, for example, if the phase-sequence is defined by 1, a^2 , a (where a is the Fortescue operator), the one-column matrix of the voltages will be written :

6.3.3. Lines with several circuits

Frequently it happens that several three-phase systems are carried by the same towers. In such a case, the precise calculation of the gradients requires derivation of matrices of $[\lambda]$ and [C] which can be of high order : for example, a line with two circuits will be characterized by matrices of order 6. The inversion of such matrices is impracticable without the use of a computer but a sufficient range of computer capabilities exists for the purpose.

It should be noted that the relative positions of the phases in each circuit affect the charges on the conductors : it is important to take them into account when calculating the gradients of a double-circuit line.

For example, the horizontal flat configuration of two circuits defined by 1, a , a^2 , and 1, a , a^2 will result in higher gradients than the configuration 1, a , a^2 , and a^2 , a , 1.

6.3.4. Earth wire effects

When a line has earth wires the calculations will in principle be precisely the same. The existence of such wires must however be taken into account in the formation of the potential matrix ; on the other hand, in the one-column voltage matrix, the potential of the earth wires will evidently be zero.

The presence of earth wires naturally increases the order of the matrices, but by a device this order can be reduced to that of a line without earth wires.

For this purpose the matrix equation of the potential coefficients is written in the following form, in which appear submatrices relating to phase conductors (index c), to earth wires (index g) and coupling submatrices (index cg).

L'examen de cette équation montre qu'on peut exprimer les q_g uniquement en fonction des q_c , ce qui conduit à écrire :

$$\{v_c\} = [\lambda_{cc} - \lambda_{cg} \lambda_{gg}^{-1} \lambda_{gc}] \{q_c\}$$

On constate que cette équation matricielle est bien ramenée à un ordre inférieur égal au nombre des phases de la ligne.

Remarquons toutefois que l'influence des câbles de garde est relativement faible : ils ont pour effet de majorer les gradients des conducteurs de phase de quelque 1 à 3 %. Il sera donc souvent suffisant de les négliger dans le calcul des gradients, quitte à majorer ceux-ci d'une quantité forfaitaire de 2 %.

6.3.5. Emploi des faisceaux de conducteurs

Les lignes à très hautes tensions, supérieures à 300 kV, sont équipées presque exclusivement de faisceaux de plusieurs conducteurs par phase. Cette disposition permet de maintenir les champs superficiels des conducteurs à des valeurs admissibles.

It is seen from this equation that the q_g 's can be expressed solely as a function of q_c 's which results in the following :

This matrix equation is thus reduced to a lower order equal to the number of phases of the line.

It is noted, however, that the effect of the earth wires is relatively small : they increase the gradients of the phase conductors a few percent-1 to 3 %. It is usually sufficient to disregard their presence, in calculating the gradients, and to compensate by increasing the latter by 2 %.

6.3.5. Conductor bundle utilization

Lines for operation above 300 kV are almost exclusively strung with bundles of several conductors per phase. This configuration permits the restriction of conductor surface gradients to tolerable levels.

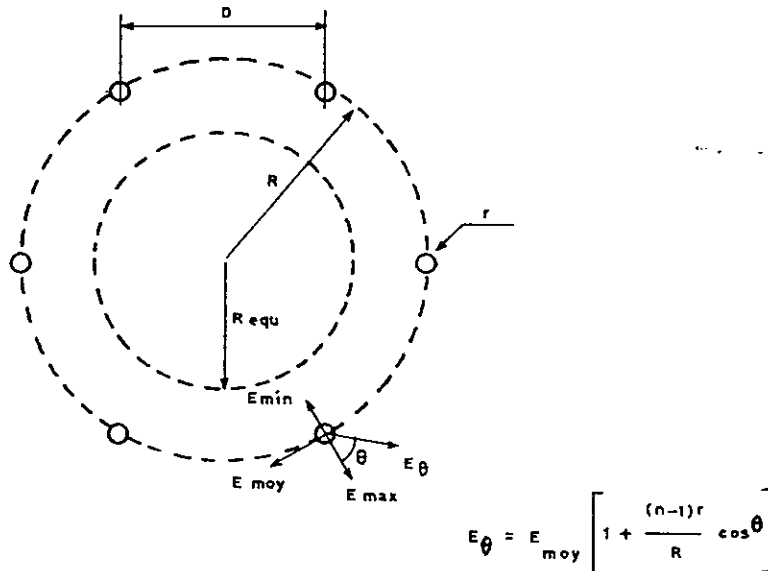


Figure 6.10.

Calcul du gradient maximal d'un conducteur élémentaire d'un faisceau.
Calculation of maximal gradient of a subconductor.

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes (Fig. 6.10)

- le rayon des conducteurs élémentaires : r (cm)
- le nombre de conducteurs élémentaires : n
- le rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs) R (cm)
- la distance entre deux conducteurs consécutifs : $D = 2R \sin \pi/n$ (cm)
- le rayon équivalent, R_{equ} (cm)

C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants. Il est donné par l'expression : $R_{equ} = R \sqrt{\frac{nR}{R}}$.

A bundle is characterized by the following values (Fig. 6.10) :

- subconductor radius : r (cm)
- number of subconductors : n
- pitch-circle radius (radius of the circle passing through the centres of all the conductors) : R (cm)
- distance between two adjacent conductors : $D = 2R \sin \pi/n$ (cm)
- equivalent bundle radius : R_{equ} (cm)

This is the radius of an imaginary cylindrical conductor having the same capacitances as the real bundle with respect to all the other neighbouring conductors. It is given by $R_{equ} = R \sqrt{\frac{nR}{R}}$.

Pour calculer le champ superficiel des conducteurs d'un faisceau, on détermine d'abord la charge totale Q de celui-ci, en introduisant son rayon équivalent R_{equ} dans les expressions des coefficients de potentiel. Le gradient moyen d'un conducteur est alors donné par :

$$E_{\text{moy}} = \frac{1}{n} \frac{Q}{2 \pi \epsilon_0 r}$$

puisque la charge totale du faisceau se répartit également sur les n conducteurs du faisceau. Mais par effet de blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur, et plus faible vers l'intérieur du faisceau.

On définit donc :

Le *champ maximal* et le *champ minimal* des conducteurs, obtenus par les expressions :

$$E_{\text{max}} = E_{\text{moy}} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \right]$$

$$E_{\text{min}} = E_{\text{moy}} \left[1 - \frac{(n-1)r}{R} \right]$$

On admet généralement que le champ varie autour du conducteur conformément à l'expression :

$$E_{\theta} = E_{\text{moy}} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \cos \theta \right]$$

Voir figure 6.10.

6.4. Mesures sur le terrain

6.4.1. Appareils de mesure

Les caractéristiques du matériel de mesure pour le relevé de l'intensité des champs électromagnétiques produits par les lignes aériennes seront conformes aux spécifications du CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) ou de la ANSI (American National Standards Institute).

Les principales caractéristiques de ces appareils sont appelées au paragraphe 2.3.2.

On pourra utiliser une antenne ou un cadre pour la mesure du champ perturbateur.

L'antenne, généralement un brin vertical, est plus sensible mais non directionnelle, alors que dans le cas du cadre, la mesure est moins affectée par la hauteur au-dessus du sol.

De préférence, l'appareil de mesure sera muni d'une antenne de type cadre (mesure du champ magnétique). Le cadre a des caractéristiques mieux définies que celles d'une antenne. Par ailleurs, le niveau mesuré à l'aide d'un cadre, moins dépendant des conditions locales, définit mieux en moyenne le comportement de la ligne.

Le cadre sera disposé parallèlement à la ligne et situé à 2 m du sol.

Les fréquences de mesures recommandées 0,5 et 1 MHz seront, si besoin, légèrement modifiées dans l'hypothèse où des émetteurs accordés sur des fréquences voisines, risquent de gêner les mesures.

To calculate the surface gradient of conductors in a bundle, the total charge Q of the bundle is first determined by introducing its equivalent radius, R_{equ} into the expressions for the potential coefficients. The mean gradient of a conductor is then given by :

$$E_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \frac{Q}{2 \pi \epsilon_0 r}$$

since the total charge of the bundle is equally distributed on the n conductors of the bundle. But due to the mutual shielding effect, the actual gradient is larger towards the exterior and smaller towards the interior of the bundle.

Thus the maximum gradient and the minimum gradient of the conductors are defined by means of the following expressions :

$$E_{\text{max}} = E_{\text{mean}} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \right]$$

$$E_{\text{min}} = E_{\text{mean}} \left[1 - \frac{(n-1)r}{R} \right]$$

Generally, the field is assumed to vary around the conductor according to the expression :

$$E_{\theta} = E_{\text{mean}} \left[1 + \frac{(n-1)r}{R} \cos \theta \right]$$

(See Fig. 6.10).

6.4. Field measurements

6.4.1. Measuring sets

The characteristics of instruments for recording the electromagnetic field intensity produced by overhead conductors conform to the specifications of "CISPR" (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) or of ANSI (American National Standards Institute).

The main features of these instruments are indicated in paragraph 2.3.2.

It is possible to use either a rod or a loop antenna to perform the RI measurement.

The rod antenna is more sensitive but not directional. In the loop antenna case, the measurement is less dependent upon the height above ground.

The measuring instrument is preferably provided with a loop antenna (magnetic field measurement). The loop has better defined characteristics than those of the rod antenna. Furthermore, the level measured by means of a loop is less dependent on the local conditions and thus in general better defines the behaviour of the line.

The loop is located parallel to the line at 2 m above ground level.

The recommended measurement frequencies of 0.5 and 1 MHz may be, if required slightly changed to avoid transmissions on adjacent frequencies.

6.4.2.1. Cas de la détermination des caractéristiques d'une ligne

Le but recherché est de déterminer le niveau des parasites radioélectriques produit par la ligne. De ce fait des précautions seront prises pour éviter toutes anomalies locales du champ perturbateur.

On évitera les portées de hauteurs anormales. Le site sera normalement plat, à l'écart des pièces métalliques importantes et loin de toute ligne MT, BT, téléphonique. Il sera dégagé d'arbres ou de végétation importante.

De part et d'autre du point de mesure, la ligne sera si possible rectiligne sur plusieurs portées. Les extrémités de la ligne seront situées à plus de 10 km du point de mesure afin d'éviter toute réflexion de l'énergie électromagnétique qui fausserait les mesures.

Dans la mesure du possible, si la ligne est transposée, il faudra de même que les points de mesures soient situés loin des pylônes de transposition.

Par ailleurs la mesure sera effectuée au point bas d'une portée, à mi-distance entre deux pylônes.

Par rapport aux trois phases de la ligne de transport la distance aux points de mesure sera calculée de la manière suivante :

Le CISPR recommande une distance type de 20 m mesurée depuis le centre du cadre jusqu'au conducteur le plus proche.

Selon la norme ANSI on peut également prendre comme distance de référence 15 m, distance mesurée horizontalement depuis le plan du cadre jusqu'au conducteur le plus proche.

Dans les deux cas, il faut noter la hauteur de ce conducteur au-dessus du sol en face du point de mesure. La distance 15 m est celle qui conduit à une insensibilité maximale de la mesure par rapport à la hauteur des conducteurs.

6.4.2.2. Cas particulier

S'il s'agit d'estimer la gêne d'un plaignant particulier, on effectue la mesure au voisinage de l'antenne du plaignant, où qu'elle se trouve et on mesure la composante magnétique ou la composante électrique du champ perturbateur selon que la réception se fait avec un cadre ou avec une antenne.

6.4.3. Mesures

Plusieurs types de mesures pourront être effectuées ; celles-ci seront données en dB au-dessus d'un $\mu\text{V/m}$.

a) le site et la fréquence de mesure étant fixés, on peut effectuer des mesures de courtes et de longues durées. Dans le premier cas, il convient que les conditions atmosphériques soient relativement uniformes le long de la ligne. Dans le second cas, il sera possible de traiter les résultats obtenus d'une manière statistique.

b) la fréquence étant fixée, on peut relever le profil latéral des perturbations radioélectriques en se déplaçant perpendiculairement à la ligne.

c) le site étant fixé il sera possible de relever le niveau des perturbations radioélectriques en fonction de la fréquence.

6.4.2.1. Characteristics of an overhead line

The purpose of the survey is to determine the RI produced by the overhead line. Special care is taken to avoid incidental RI variations.

Abnormal heights are avoided. The site will be plane, far from major metal parts and any MV, LV or telephone lines. It should be free from trees and brushwood.

The line should be straight over a number of spans on both sides of the measuring site. The line should not terminate within at least 10 km of the measuring site, reflections of the electromagnetic energy, resulting in inaccurate measurements, are to be avoided.

If the line is transposed, the measuring site should be located as far distant as possible from the transposition towers.

Moreover, the measuring site will, where possible, be at midspan.

In relation to the three phases of the transmission line, the distance to the measuring sites should be calculated as follows :

CISPR recommends a standard distance of 20 m measured between the centre of the loop and the nearest phase conductor.

Following the ANSI recommendations, it is also possible to take a standard distance of 15 m, horizontally measured between the loop plane and the nearest phase conductor.

In both cases, it is necessary to note the height of this conductor above ground in front of the measuring site. The 15 m distance gives minimal dependence of the measured value on the conductor height.

6.4.2.2. Special case

If a complaint of RI has to be assessed a measurement is made close to the antenna of the complainant, whatever its location, and the magnetic or electric component of the disturbing field is measured depending on the type of antenna in use.

6.4.3. Measurements

Several types of measurements may be performed and the results expressed in dB above $1 \mu\text{V/m}$.

a) The site location and measuring frequency being determined, short and long duration measurements may be performed. In the first case, the atmospheric conditions should be near-uniform along the line. In the second case, the resulting information could be handled on a statistical basis.

b) once the frequency has been determined, the lateral profile of the RI will be recorded in a direction perpendicular to the line.

c) the site being determined, the RI level is measured as a function of frequency.

Dans chaque situation, les points de mesure seront soigneusement repérés.

Il convient également d'opérer rapidement et de ce fait il s'avère souvent nécessaire d'installer tout l'appareillage en bloc sur un véhicule.

6.4.4. Informations complémentaires

Souvent, une interprétation des mesures effectuées nécessite l'appoint d'informations complémentaires telles que :

a) Ligne

localisation, (altitude, terrain, topographie)
tension nominale,
tension d'exploitation au moment de la mesure
âge de la ligne depuis sa mise sous tension.

b) Conducteurs

type et diamètre des conducteurs,
nombre de conducteurs par phase (faisceau),
géométrie du faisceau,
distance entre phases,
valeur moyenne de la hauteur des conducteurs par rapport au sol,
gradient maximal (kV/cm) sur chaque phase, (voir 6.3. : calcul des gradients de potentiel)
type et diamètre des conducteurs de terre.

c) Pylône

nature,
type,
un dessin du pylône est utile.

d) Chaînes d'isolateurs

e) Conditions atmosphériques

température,
degré hygrométrique,
pression atmosphérique (altitude)
vitesse du vent,
type de temps (beau, sec, humide, pluvieux, brouillard, neige, rosée, givre, etc. . .),
précipitation (pluie, neige).

f) Instrument de mesure

type,
caractéristiques,
fréquence de mesure,
antenne.

g) Autres renseignements particuliers.

Measurement points are carefully recorded in each case.

For rapid measurement it is often advisable to install the whole equipment on a vehicle.

6.4.4. Additional information

An explanation of the performed measurements commonly requires the use of complementary information such as :

a) Line

*Location, (elevation, terrain, topography)
Rated voltage
Present operating voltage
Age since energization*

b) Conductors

*Conductor type and diameter
Number of conductors per phase (bundle)
Bundle geometry
Distance between phases
Mean clearance of conductors above ground*

*Maximum gradient (kV/cm) on each phase
(see 6.3 : calculation of the potential gradient)
Type and diameter of earth wire*

c) Tower

*Nature
Type
(A tower sketch is useful)*

d) Insulator strings

e) Weather conditions

*Temperature
Humidity
Pressure (altitude)
Wind velocity
Weather type (fair, dry, rain, fog, sleet, snow, dew, frost. . .)
Precipitation (rain, snow)*

f) Measuring set

*Type
Characteristics
Tuned frequency
Antenna*

g) Other details

TROISIÈME PARTIE

PERTURBATIONS AUTRES QUE RADIOPHONIQUES

PART 3

INTERFERENCES OTHER THAN RADIO (NOISE)

AVERTISSEMENT

Les problèmes traités dans la deuxième partie, et qui sont relatifs aux perturbations engendrées dans la gamme de fréquences radiophoniques (< 30 MHz) par les lignes en tension alternative, ont actuellement atteint un stade de connaissances expérimentales et théoriques relativement élaboré, à partir duquel des méthodes de calcul précises ont pu être établies. Seules des améliorations de détail peuvent encore être espérées.

La troisième partie par contre, traite de phénomènes encore assez mal compris, et qui nécessiteront encore de sérieux travaux avant d'aboutir à des méthodes de prédétermination fiables. C'est le cas des perturbations aux fréquences supérieures à 30 MHz (FM et TV), des perturbations engendrées en tension continue, du bruit acoustique. Il nous a semblé néanmoins utile de présenter dans ce guide la situation actuelle dans ces domaines, situation qui permet déjà certaines estimations, et en tout cas de prévoir les ordres de grandeur des gênes à attendre. Cette troisième partie est donc un bilan provisoire, étant entendu qu'elle fera l'objet d'une nouvelle publication du Groupe de Travail lorsque nos connaissances auront atteint un stade de maturité suffisant.

FOREWORD

The problems discussed in Part 2, related to interference, in the radio-frequency range (< 30 MHz), generated by HV a.c. lines are now relatively well understood, both theoretically and experimentally, and quite precise methods of calculation are available. Only improvements in detail can still be envisaged.

However, Part 3 deals with phenomena which are not yet fully understood and on which substantial work is required before reliable prediction formulae can be established. This applies to interference above 30 MHz (FM and TV), interference by d.c. lines and acoustic noise. It seemed, nevertheless, useful to review in this guide the current situation of these matters since some calculations can already be made and, in any case, orders of magnitude of the expected effects can be derived. Part 3 thus contains largely provisional material which can be reinforced, when more information is available, in a further publication of our Working Group.

PERTURBATIONS
EN COURANT ALTERNATIF
AUX FRÉQUENCES
RADIOPHONIQUES FM
ET DE TÉLÉVISION

7.1 – Généralités.

Les perturbations produites par les lignes de transport dans la gamme de fréquence des émissions FM et TV ont deux aspects :

Les perturbations actives produites par des décharges électriques sur des parties de la ligne,

– Les perturbations passives, ce qui veut dire que l'onde électromagnétique émise par un émetteur de télévision est réfléchiée par la ligne, arrivant en conséquence un peu plus tard que l'onde incidente à l'antenne d'un téléspectateur qui, sous certaines conditions, peut observer une deuxième image sur l'écran.

Les deux aspects seront discutés séparément dans les paragraphes suivants.

7.2 – Les perturbations actives.

7.2.1 – Formation des perturbations.

Des perturbations relativement importantes, dans la gamme de fréquence supérieure à 30 MHz, peuvent être engendrées par :

- a) l'effet de couronne
- b) les décharges du type éclateur

a) Le terme effet de couronne est un collectif utilisé pour les phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité de l'air au voisinage d'une partie conductrice portée à haute tension (chapitre 1).

Par définition ces phénomènes n'entraînent pas le court-circuit entre électrodes et c'est pourquoi on emploie le terme décharges partielles ou décharges incomplètes.

Seules les formes impulsionnelles de l'effet de couronne (les "dards") peuvent produire des perturbations. Le spectre de fréquence de ces impulsions de courant est déterminé par le mécanisme physique de décharge et n'est pas influencé par les impédances du circuit externe qui fournit la haute tension. Pour cette raison le spectre d'une décharge particulière de l'effet de couronne peut être considéré comme caractéristique de ce type.

La largeur du spectre de fréquence qui est d'environ 1 MHz pour tous les types impulsionnels de l'effet de couronne est déterminée par la durée d'une impulsion de courant. La diminution de l'intensité spectrale à des fréquences excédant la fréquence de coupure est déterminée par le temps de montée de l'impulsion de courant.

AC INTERFERENCE
WITH FM AND TV

7.1 – General.

Interference caused by overhead lines in the frequency range of FM and TV broadcasting has two aspects :

– *Active interference, which is produced by electrical discharges on parts of the line,*

– *Passive interference, by which it is meant that the electromagnetic field radiated by a television transmitter is reflected by the line, and therefore arrives somewhat later than the direct field at the antenna of a TV viewer who, under certain conditions, can observe a second image on the screen.*

These two aspects will be treated separately in the following sections.

7.2 – Active interference.

7.2.1 – Generation of interference.

Interference with appreciable power in the frequency range above 30 MHz can be generated by :

- a. *corona*
- b. *gap-type discharges.*

a. *Corona is a collective term for the phenomena connected with the appearance of the conductivity of the air around a single conductive part at high voltage (Chapter 1).*

By definition these phenomena do not short-circuit a pair of electrodes (gap), and therefore they are called partial or incomplete discharges.

Only the pulsative forms of corona (streamers) can produce interference. The frequency spectrum of these current pulses is determined by the physical discharging mechanism and is not influenced by impedances in the external circuit that delivers the high voltage. Therefore the frequency spectrum of a particular type of corona discharge can be considered to be characteristic of that type.

The width of the frequency spectrum, which has been found to be about 1 MHz for all types of pulsative corona, is determined by the duration of a current pulse. The decrease of the spectral intensity at frequencies beyond the cut-off frequency is determined by the rise time of the current pulse. Therefore interference with FM

Par conséquent, les perturbations aux fréquences radio-phoniques FM et de télévision, qui sont supérieures à 30 MHz, ne peuvent être produites que par des impulsions de courant de grande amplitude et de très courts temps de montée. De telles impulsions peuvent être engendrées par des flocons de neige heurtant les conducteurs ou par des gouttes d'eau qui y pendent. La présence et l'intensité de ce type de perturbation sont représentées par les statistiques "mauvais temps" discutées dans le chapitre 3.

b) Le terme "décharges du type éclateur" est un collectif employé pour les décharges dans une couche isolante entre deux surfaces chargées. Elles se produisent à une jonction isolante où le gradient de potentiel est suffisamment grand pour engendrer une décharge. Bien que la configuration du circuit externe ne permette pas en général que le courant de décharge soit entretenu, il est néanmoins possible qu'une impulsion de courant de grande amplitude et de très courte durée soit engendrée. Après que l'éclateur ait été rechargé par la tension ligne, une nouvelle décharge est initiée et ainsi engendre une forme d'onde de courant répétitive avec un large spectre de fréquence.

Une décharge du type éclateur cause une décharge complète, bien que dans le cas d'une surface isolante la zone dans laquelle la décharge se produit peut être restreinte. La forme d'impulsion de courant de la décharge n'est pas déterminée par la décharge elle-même mais par le circuit extérieur et la capacité de l'éclateur. C'est pourquoi il n'existe pas un spectre-type pour le courant résultant d'une décharge du type éclateur.

Les décharges du type éclateur comprennent :

- des claquages entre deux pièces métalliques
- des microclaquages entre une pièce métallique et une surface d'isolation chargée
- des décharges superficielles sur les isolateurs
- des décharges internes dans les fissures qui se trouvent dans les matières isolantes.

Les claquages peuvent se produire entre des pièces métalliques sous haute tension établissant un mauvais contact par exemple :

- entre les capots et les tiges des chaînes d'isolateurs
- aux connexions des chaînes au pylône ou au conducteur
- entre l'entretoise et un conducteur d'un faisceau
- entre les parties d'un contrepoids ou d'un amortisseur de vibrations.

Les mauvais contacts peuvent être causés par corrosion, poussière ou par pollution sèche. Des conditions sèches de l'atmosphère ont une influence favorable sur l'isolation des pièces métalliques et sont en conséquence également favorables pour l'apparition des décharges. Les mouvements des chaînes d'isolateurs peuvent être à l'origine de perturbations, particulièrement dans le cas où les chaînes sont peu chargées.

Des claquages causés par une induction électrostatique ont été observés entre une plaque métallique portant une note d'avertissement et le pylône d'acier auquel elle avait été fixée.

Des microclaquages peuvent se produire autour des tiges d'isolateurs dans des conditions extrêmement sèches et aussi entre un conducteur et une couche de glace.

and TV frequencies, which are higher than 30 MHz, can only be expected from current pulses with high amplitudes and short rise times. Such pulses may be initiated by snow impingement on conductors or by waterdrops hanging from them. The occurrence and the intensity of this type of interference is covered by the foul weather statistics discussed in Chapter 3.

b. Gap-type discharges is a collective term for the electrical breakdown of the insulation between two charged surfaces. They occur at small gaps where the potential gradient is large enough to initiate a discharge. Although the configuration of the external circuit is usually such that the discharge current cannot be maintained, a current pulse of high amplitude and very short duration can be produced. After the gap has been recharged by the line voltage a new discharge is initiated and in this way a repetitive current wave form with a broad frequency spectrum can be generated.

A gap-type discharge causes a complete discharge although in the case of an insulating surface the area that is affected can be small. The current pulse shape of the discharge is not determined by the discharge itself but by the external circuit and the gap capacitance. Therefore there is no typical frequency spectrum of the current resulting from a gap-type discharge.

The kinds of gap-type discharge are :

- *sparks between two metal parts*
- *microsparks between a metal part and an electrically charged insulating surface*
- *surface discharges on insulators*
- *internal discharges in voids within insulating materials*

Sparks may occur between badly contacting metallic parts carrying high voltage, e.g:

- *between caps and pins in insulator strings,*
- *at the connections of the strings to the tower or the line-conductor,*
- *between spacer and subconductor of a bundle,*
- *between parts of a counterweight or vibration damper.*

Bad contacts between metallic parts can be caused by corrosion, dust or dry pollution. Dry weather improves the isolation of metallic parts and is therefore favourable for the occurrence of sparks. Movement of an insulator string by the wind sometimes causes a burst of interference, especially with lightly loaded strings.

Sparks caused by electrostatic induction have been observed between a metal plate bearing a warning notice and the steel tower on which it was bolted.

Microsparks may appear around the pins of insulators under very dry conditions, and between a conductor and a covering ice cap.

Des décharges superficielles peuvent être engendrées à travers les bandes sèches sur la surface d'isolateurs pollués par une couche partiellement conductrice.

Le spectre-type d'une impulsion de courant produit par l'effet de couronne ainsi qu'un exemple du spectre d'une décharge du type éclateur ont été donnés par la figure 7.1. Ces phénomènes ne peuvent produire du rayonnement qu'au cas où des courants sont injectés dans des parties conductrices de la ligne fonctionnant comme antenne.

Surface discharges can be produced across dry-bands on the surface of insulators that are polluted by a partly conducting layer.

The typical frequency spectrum of a corona current pulse and an example of the spectrum of a gap-type discharge is given in Figure 7.1. Radiation can only be produced by these phenomena when currents are generated in conducting parts of the line acting as an antenna.

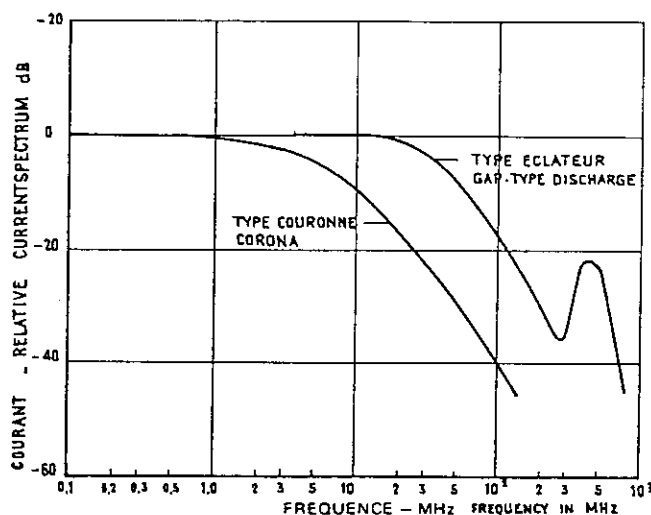


Figure 7.1.

Spectres de fréquence des impulsions couronne et de type éclateur.
Frequency spectra of corona pulses and gap-type discharges.

Si une ligne de transport a été projetée d'une façon correcte pour éviter des perturbations radiophoniques dans la gamme de fréquence autour de 1 MHz, les problèmes de perturbations au-dessus de 30 MHz ne se présenteront qu'accidentellement.

Si des perturbations se produisent tout de même, elles seront dans la majorité des cas causées par des claquages sur les isolateurs et sur le matériel de ligne et rarement par des microclaquages ou par l'effet de couronne.

Pour détecter une source perturbatrice on commence en général par localiser le pylône d'où provient le bruit. Cependant, il faut noter que des matières conductrices tombées sur un conducteur, telles que des brins perdus par des oiseaux ou des objets portés par le vent ou jetés par des vandales sur les conducteurs peuvent causer de graves perturbations de couronne.

7.2.2 – La propagation des perturbations.

Aux fréquences supérieures à 30 MHz le mécanisme de propagation des perturbations le long d'une ligne à haute tension diffère considérablement de celui observé à des fréquences d'environ 1 MHz.

L'atténuation de la ligne augmente avec la fréquence tandis que la longueur de ligne sur laquelle les sources perturbatrices distribuées et locales sont supposées s'additionner, diminue. Par conséquent, la contribution au champ perturbateur total par l'effet de couronne distribué sur les conducteurs diminue et les sources de bruit locales deviennent plus importantes et peuvent être identifiées plus facilement.

When an overhead line has been correctly designed to prevent radio interference in the frequency range around 1 MHz, interference problems above 30 MHz will be accidental.

If interference happens, it will in most cases be caused by sparks on insulators and hardware and seldom by microsparks or corona.

A search for a noise source usually starts with localizing the structure that contains it. However, it should be kept in mind that conductive matter fallen on a conductor, such as thin wires, dropped by birds, blown on it by the wind or thrown by vandals, can cause severe corona interference.

7.2.2 – Propagation of interference.

At frequencies above 30 MHz the propagation mechanism of the interference along a high voltage line becomes quite different from that at frequencies around 1 MHz.

The attenuation of the line will rise with frequency and the length of line over which the distributed and local noise sources can be assumed to add up, will diminish. The result will be that the contribution of the distributed corona noise sources on the conductors to the total interference field will become less and that the local noise sources in the towers become more important and can be better identified.

La perturbation qui était transmise le long de la ligne à des fréquences d'environ 1 MHz, sera à des fréquences plus élevées également rayonnée dans des directions perpendiculaires à la ligne. A ces fréquences un rayonnement gênant de la perturbation peut se produire.

Le rayonnement d'une source au-dessus du sol et dans la direction perpendiculaire à la ligne peut être décrit par l'addition d'une onde directe et d'une onde réfléchiée par le sol. Le calcul exact du champ causé par une source déterminée est possible mais compliqué. Toutefois des considérations qualitatives montrent que le champ E à une hauteur h et une distance d de la ligne est en grande partie régi par une expression de la forme

$$E = \frac{2 K}{d} \sin \frac{2 \pi hH}{\lambda d}$$

H = hauteur de la source
λ = longueur d'onde

H = height of the source
λ = wavelength

pour des distances de ligne dépassant $d = \sqrt{H^2 + h^2}$

K dépend de la puissance, de l'efficacité du rayonnement et de la directivité de la source. La figure 7.2 présente un graphique typique du rapport entre le champ et la distance. Il ressort de ce graphique, que le champ passe par une série de minima et de maxima lorsque l'on s'éloigne de la ligne.

The interference power that was transmitted along the line at frequencies around 1 MHz, will at the higher frequencies also be radiated in directions perpendicular to it. At these shorter wavelengths efficient radiation of interference power may occur.

Radiation from a source above the ground and in a direction perpendicular to the line can be described by the addition of a direct wave and of a wave reflected by the ground. Exact calculation of the field strength caused by a particular source is possible but will be complicated. However, qualitative considerations show that the field strength E at a height h and a distance d from the line is mainly governed by a relation of the form :

for distances farther than $d = \sqrt{H^2 + h^2}$ from the line.

K depends on the power, the radiation efficiency and the directivity of the source. A graph showing a typical relationship between field strength and distance is shown in Figure 7.2. It can be seen that the field strength passes through a series of minima and maxima as the distance from the line increases.

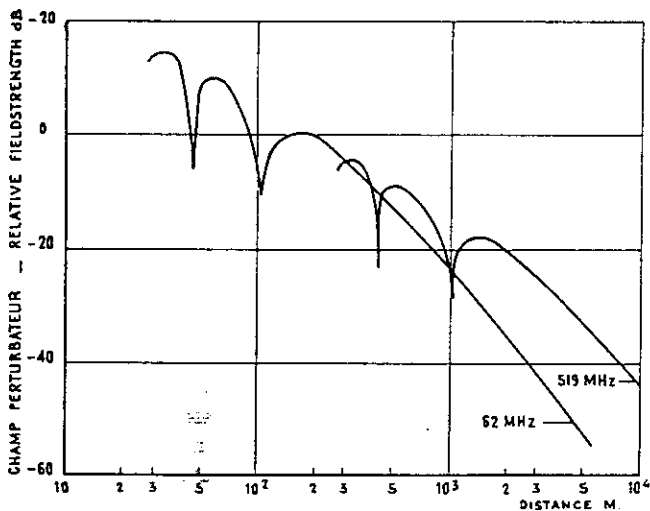


Figure 7.2.

Profil latéral du champ perturbateur en T.V.
Lateral profile of T.V.I. field.

Les valeurs des maxima du champ diminuent de 6 dB pour chaque doublement de la distance, le dernier maximum étant trouvé à une distance $d = 3,1 Hh/\lambda$. A des distances plus grandes le champ décroît rapidement à raison de 12 dB pour chaque doublement de la distance.

La figure 7.3 montre le spectre-type du champ produit par l'effet de couronne à une certaine distance de la ligne et aussi, par comparaison, un spectre produit par une décharge du type éclateur. Il est évident qu'au-dessus d'une certaine fréquence la susdite réflexion du sol conduira à des maxima et des minima dans le spectre de fréquence.

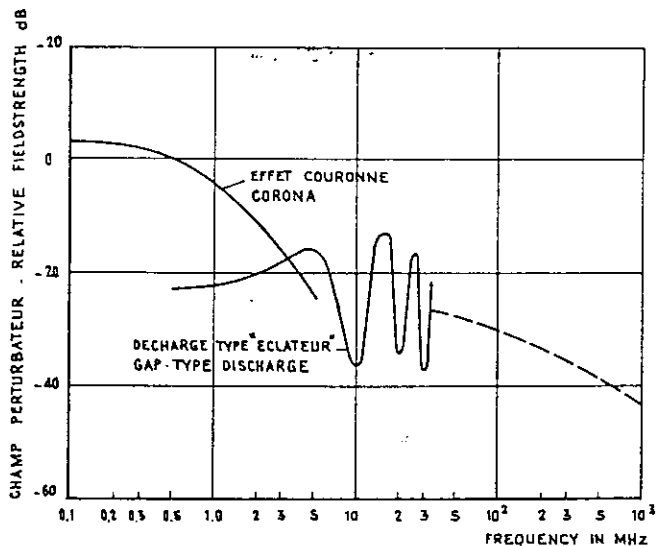


Figure 7.3.

Spectres des champs perturbateurs, effet couronne et décharges type éclateur.
Frequency spectra of interference fields : corona and gap-type discharges.

The values of the maxima in field strength decrease by 6 dB for every doubling of the distance, while the last maximum is found at a distance of $d = 3.1 Hh/\lambda$. Beyond that distance the field strength decreases rapidly at a rate of 12 dB for every doubling of the distance.

Figure 7.3 shows the typical frequency spectrum of the field strength caused by corona at a definite distance from the line and also, for comparison, a spectrum produced by a gap-type discharge. It can be seen that beyond a certain frequency maxima and minima appear in the frequency spectrum because of the above mentioned ground reflection.

7.2.3 – La réception des perturbations.

Les postes récepteurs pour des fréquences supérieures à 30 MHz ont des plus grandes largeurs de bande que les récepteurs pour des fréquences d'environ 1 MHz et c'est pourquoi ils reçoivent relativement plus de puissance perturbatrice. Ceci a été expliqué dans le paragraphe 2.3.

La largeur de bande d'un récepteur FM est environ 200 KHz ce qui résulte en une réception d'approximativement 13 dB de plus de puissance perturbatrice que dans le cas d'un récepteur avec une largeur de bande de 9 kHz. La largeur de bande d'un téléviseur est à peu près 5 MHz ce qui le rend environ 27 dB plus susceptible aux perturbations.

Le CISPR a standardisé les mesureurs perturbateurs pour la gamme de fréquence de 25 à 300 MHz avec les caractéristiques suivantes :

Bande passante	: 120 kHz
Constante de temps de charge	: 1 ms
Constante de temps de décharge	: 550 ms

Les valeurs spécifiées par l'ANSI pour la gamme 20 à 400 MHz

Bande passante	: 120 kHz
Constante de temps de charge	: 1 ms
Constante de temps de décharge	: 600 ms \pm 120 ms

Cependant, à cause de la complexité des perturbations, il est possible que la gêne soit incorrectement pondérée par ces mesureurs.

Pour une réception FM non-stéréophonique d'une qualité acceptable à l'aide d'une antenne extérieure, un champ d'approximativement 250 μ V/m avec un rapport signal/bruit meilleur que 20 dB environ dans la largeur de bande suffira. Ainsi on peut attendre des réclamations sur les perturbations radiophoniques FM avec un champ perturbateur de 35 μ V/m (bande passante 120 kHz suivant CISPR) ou plus.

Pour une réception de télévision, Bande I, d'une qualité acceptable à l'aide d'une antenne extérieure, un champ d'approximativement 300 μ V/m avec un rapport signal/bruit meilleur que 30 dB environ dans la largeur de bande suffira. Dans ce cas on peut attendre des réclamations sur des perturbations de TV avec un champ perturbateur de 3 μ V/m (bande passante 120 kHz suivant CISPR) ou plus.

7.2.4 – Résumé des perturbations actives.

La description des sources perturbatrices radiophoniques FM et TV donnée dans les paragraphes précédents est plutôt de nature qualitative que quantitative. Cela est dû au fait que les perturbations sont en majeure partie causées par un défaut dans la ligne qui peut être corrigé. Un tel défaut peut conduire à un niveau de perturbation quelconque.

Le niveau de perturbation au-dessus de 30 MHz d'une ligne projetée sur la base des chapitres précédents est du même ordre ou meilleur que celui qu'on aurait obtenu par extrapolation de la méthode de calcul à ces fréquences avec la correction de largeur de bande. Il n'existe pas encore une base théorique pour cette extrapolation mais les résultats de mesures, qui sont difficiles à effectuer à ces fréquences, montrent qu'elle conduira à une approximation assez correcte.

7.2.3 – Reception of interference.

Broadcast receivers for frequencies above 30 MHz have larger bandwidths than receivers for frequencies around 1 MHz and therefore receive relatively more interference power. This has been explained in section 2.3.

The bandwidth of an FM receiver is about 200 kHz, resulting in a reception of about 13 dB more interference power than with a receiver with 9 kHz bandwidth. The bandwidth of a TV receiver is about 5 MHz, making it about 27 dB more susceptible to interference.

CISPR has standardized interference measuring equipment for the frequency range of 25 to 300 MHz with the following characteristics :

Bandwidth	: 120 kHz
Charging time constant	: 1 msec
Discharging time constant	: 550 msec

ANSI specifies for the frequency range of 20 to 400 MHz

Bandwidth	: 120 kHz
Charging time constant	: 1 msec
Discharging time constant	: 600 msec \pm 120 msec

However, due to the complexity of the interference, it is possible that these receivers do not provide a correct weighting of the annoyance.

For non-stereophonic FM reception of acceptable quality with an adequate outdoor antenna a field strength of about 250 μ V/m with a signal-to-noise ratio better than about 20 dB in the receiver bandwidth is sufficient. Hence complaints about FM interference can be expected at interference field strengths of 35 μ V/m (120 kHz bandwidth CISPR) or more.

For Band I TV reception of acceptable quality with an adequate outdoor antenna a field strength of about 300 μ V/m with a signal/noise ratio better than about 30 dB in the receiver bandwidth will be sufficient. Complaints about TV interference can therefore be expected at interference field strengths of 3 μ V/m (120 kHz bandwidth CISPR) or more.

7.2.4 – Summary of active interference.

In the foregoing sections a qualitative rather than a quantitative description of the sources of FM and TV interference has been given. This is due to the fact that interference mostly results from a faulty condition in a line construction which can be corrected. Almost any interference level may result from such a fault.

The interference level above 30 MHz of a line designed on the basis of the foregoing chapters is of the same order as or better than what would be expected from the extrapolation of the calculation method to these frequencies with proper allowance for the bandwidth. There is no theoretical basis for this extrapolation yet, but results of measurements, which are difficult to perform at these interference levels, show that it will lead to a fair approximation.

Pour prévenir les perturbations radiophoniques FM et de TV, il faut éviter les décharges du type éclateur sur les accessoires de ligne. Cela peut être réalisé par les mesures suivantes :

- charger suffisamment les chaînes d'isolateurs
- utiliser une graisse conductrice entre les pièces métalliques qui se touchent, tels que les capots et les tiges d'isolateurs
- court-circuiter l'assemblage des pièces conductrices par des shunts supplémentaires
- couvrir les surfaces des isolateurs d'une couche de graisse ou de vernis à grande résistivité
- employer des manchons en caoutchouc semi-conducteur entre les griffes des entretoises et les conducteurs d'un faisceau
- monter en position oblique les chaînes d'isolateurs, permettant un nettoyage plus efficace par la pluie.

7.3 – Les perturbations passives.

7.3.1 – Réflexions par une ligne de transport d'énergie.

On peut observer aux alentours d'une ligne à haute tension avec des pylônes en acier une distorsion appréciable du champ électromagnétique incident aux fréquences d'environ 1 MHz et plus.

La distorsion du champ peut être décrite comme une superposition de l'onde incidente et des ondes réfléchies par les pièces conductrices de la ligne. Pour les fréquences de TV cette superposition est perceptible de deux manières :

- les ondes incidentes et les ondes réfléchies composent des franges d'interférences d'ondes stationnaires avec des maxima et des minima qui subordonnent le champ local total à la position par rapport à la ligne
- les signaux modulés sur les ondes réfléchies montrent un retard par rapport au signal modulé sur l'onde incidente, produisant un ou plusieurs échos de l'image sur l'écran d'un téléviseur.

L'expérience a montré que des plaintes concernant des réflexions causées par des lignes de transport proviennent en grande partie de spectateurs demeurant du côté émetteur de la ligne, particulièrement si l'onde incidente est perpendiculaire à la ligne. C'est pourquoi la discussion du problème des perturbations sera limitée à cette situation.

L'onde réfléchie peut être mesurée indépendamment de l'onde incidente en utilisant une antenne directionnelle. Le rapport du champ incident au champ de l'onde réfléchie, exprimé en dB, s'appelle le taux de réflexion ce qui a la même signification qu'un rapport signal sur perturbation.

L'amplitude de l'onde réfléchie peut être très importante et dans des cas extrêmes elle peut être même plus grande que l'amplitude de l'onde incidente. Cela s'explique si l'on se rappelle qu'à cause de sa hauteur la ligne se trouve dans une position beaucoup plus favorable pour recevoir l'onde incidente que l'antenne réceptrice usuelle.

Fondamentalement, le taux de réflexion r à une distance d d'un seul conducteur d'un diamètre a augmente avec la fréquence jusqu'à une valeur donnée par :

To prevent FM and TV interference, gap-type discharges on construction hardware should be avoided. This can be achieved by :

- *sufficient loading of insulator strings,*
- *the application of conductive grease between contacting conductive parts, such as caps and pins of insulators,*
- *additional bonding of contacting conductive parts of insulators,*
- *coating of insulator surfaces with grease or resistive glaze,*
- *use of semiconducting rubber bushes between the jaws of spacers and subconductors,*
- *oblique mounting of insulator strings, so that cleaning by rain becomes more effective.*

7.3 – Passive interference.

7.3.1 – Reflections by an overhead line.

In the vicinity of a high voltage line with steel towers an appreciable distortion of the field of an incident electromagnetic wave can be observed at frequencies of about 1 MHz and higher.

The distortion of the field can be described as a superposition of the original incident wave and of waves that are reflected by the conducting parts of the line. At TV frequencies this superposition of waves near the line is perceptible in two ways :

- *the incident and reflected waves form an interference pattern of standing waves with maxima and minima which make the total local field strength dependent on the position relative to the line,*
- *the signals modulated on the reflected waves have a time delay with respect to the signal modulated on the incident wave, causing a second or even more images to appear on the screen of a TV receiver.*

Experience has shown that complaints about reflections by overhead lines mostly come from TV-viewers living on the transmitter side of the line, the more so when the incident wave is perpendicular to the line. The following discussion of the interference problem will therefore be limited to this situation.

The reflected wave can be measured separately from the incident wave by means of a directional antenna. The ratio of the incident field strength to the field strength of the reflected wave, expressed in dB, is called the reflection loss. It has the same meaning as a signal to interference ratio.

The level of the reflected wave can be surprisingly high, and in extreme cases it can be even higher than the level of the incident wave. To explain this it should be remembered that due to its height the line is in a much more favourable position to pick up the incident wave than the usual receiving antenna.

Basically the reflection loss r at a distance d from a single wire of diameter a increases with frequency to a value given by :

$$r = -20 \log_{10} \sqrt{\frac{a}{d}}$$

C'est pourquoi on peut constater qu'il y a moins de réflexions d'une ligne de transport d'énergie dans la bande UHF que dans la bande VHF.

Dans le cas d'un faisceau la relation entre le taux de réflexion et la fréquence est plus compliquée par suite des réflexions possibles entre les conducteurs constitutifs. La figure 7.4 montre le taux de réflexion calculé pour un faisceau de trois conducteurs et pour des ondes horizontalement polarisées en fonction de la direction de réflexion. A 62 MHz le taux de réflexion est à peu près indépendant de la direction de réflexion mais à 519 MHz le taux de réflexion augmente notablement en fonction de la direction de réflexion.

$$r = -20 \log_{10} \sqrt{\frac{a}{d}}$$

Therefore it can be found that in a UHF TV channel the reflections from an overhead line are less than in a VHF channel.

In case of bundled conductors the frequency dependence of the reflection loss is more complicated because of the possible reflections between the constituting conductors. Figure 7.4 shows the calculated reflection loss of a 3-conductor bundle for horizontally polarized waves as a function of the direction of reflection. At 62 MHz the reflection loss is practically independent of the direction of reflection, whereas at 519 MHz the reflection loss increases markedly depending on the direction of reflection.

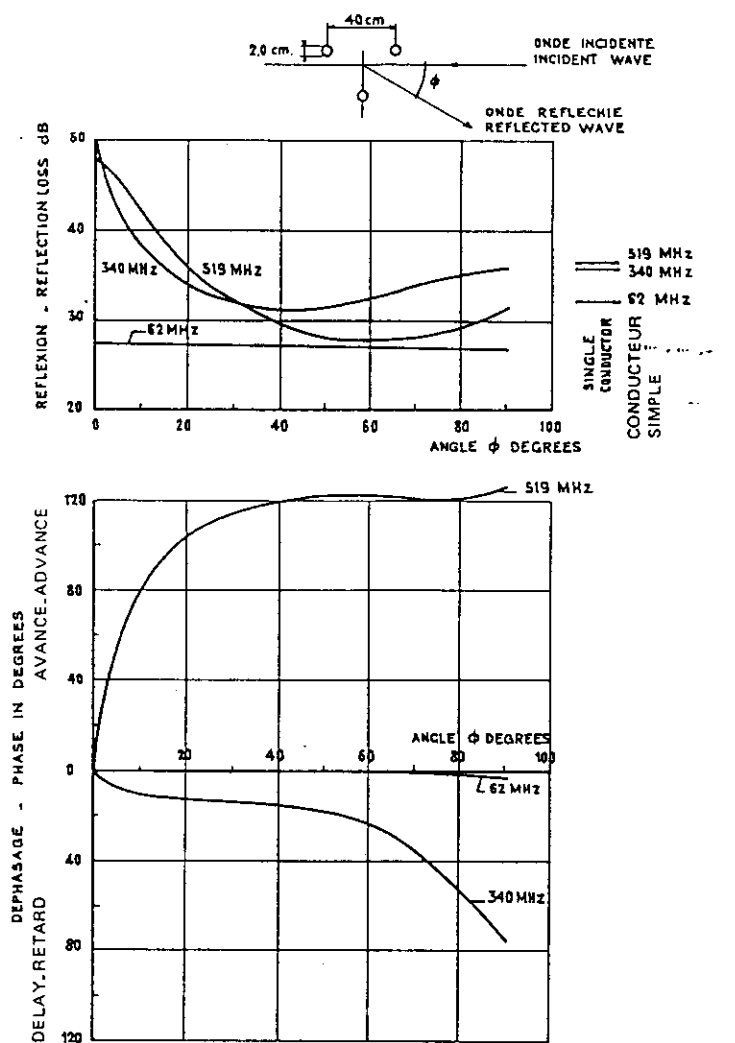


Figure 7.4.

Taux de réflexion et déphasage d'un faisceau triple.
Reflection loss and phase of a three-conductor bundle.

7.3.2 – La propagation des ondes réfléchies.

L'onde réfléchie est une addition de toutes les ondes séparées qui sont réfléchies par les conducteurs et les pylônes. Ces réflexions, qui peuvent être considérées aussi comme des rayonnements, arrivent à l'antenne réceptrice non seulement directement mais aussi après réflexion par le sol. Le résultat sera que jusqu'à une

7.3.2 – Propagation of the reflected wave.

The reflected wave is the addition of all the separate waves reflected by the conductors and the towers. These reflections, which can also be considered as reradiations, arrive at the receiving antenna not only directly, but also after reflection by the earth surface. The result will be that up to a certain distance from the line the reflected

certaine distance de la ligne le champ réfléchi lui-même aura des franges d'interférences supplémentaires aux franges d'interférences indiquées dans le paragraphe 7.3.1.

La figure 7.4 montre qu'à 519 MHz la phase de l'onde réfléchie par un faisceau à trois conducteurs change très rapidement avec la direction de réflexion. L'onde réfléchie sur le sol sera déphasée en avant par rapport à l'onde réfléchie directement sur les antennes réceptrices. Ce déphasage avant peut avoir une influence importante sur le résultat de la superposition des ondes aux antennes réceptrices et doit être considéré comme responsable du fait que les réflexions sont parfois moindres que celles observées en VHF.

En négligeant toutes ces complications pour obtenir un résultat qualitatif, on peut montrer que le taux de réflexion r à une hauteur h et une distance d de la ligne de transport d'énergie est principalement régi par une expression de la forme:

$$r = 20 \log \left(\frac{2K}{d} \sin \frac{2\pi}{\lambda} \frac{hH}{d} \right)$$

H = hauteur de la ligne
 λ = longueur d'onde

H = height of the line
 λ = wavelength

pour des distances de la ligne dépassant $d = \sqrt{H^2 + h^2}$. K dépend de la fréquence et est déterminé par la construction de la ligne ainsi que par la différence du champ incident reçu par la ligne et par l'antenne.

La figure 7.5 montre un rapport spécifique entre le taux de réflexion et la distance d'une ligne. Le taux de réflexion passe par une série de maxima et de minima lorsque la distance augmente.

field itself will have an interference pattern which is additional to the interference pattern mentioned earlier in section 7.3.1.

Figure 7.4 shows that at 519 MHz the phase of the wave reflected by a 3-conductor bundle shifts very rapidly with the direction of reflection. The wave reflected to the ground will be slightly advanced with respect to the wave reflected directly to the receiving antenna. This advance in phase shift can have an important influence on the result of the addition of the waves at the receiving antenna, and must be considered to account for the reflections at UHF being occasionally less than at VHF.

Neglecting all these complications to obtain a qualitative result, it can be shown that the reflection loss r at a height h and a distance d from an overhead line is mainly governed by a relation of the form :

for distances farther than $d = \sqrt{H^2 + h^2}$ from the line. K depends on the frequency and is determined by the construction of the line and by the difference in incident field strength received by the line and by the antenna.

Figure 7.5 shows typical relationship between reflection loss and distance from a line. The reflection loss passes through a series of maxima and minima as the distance increases.

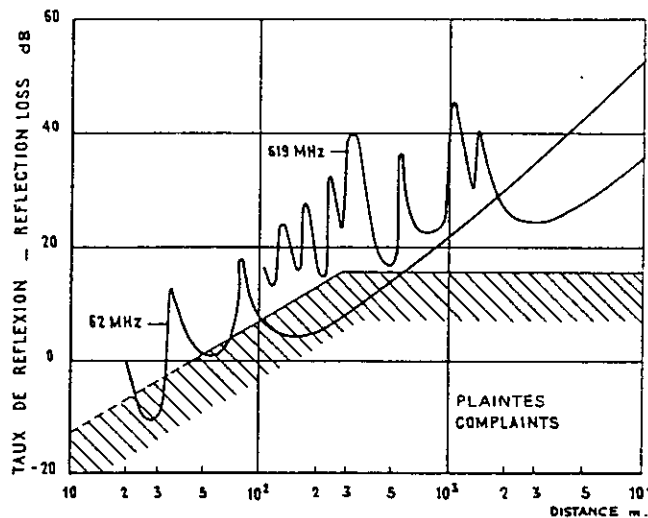


Figure 7.5.
 Taux de réflexion d'une ligne 380 kV.
 Reflection loss of a 380 kV line.

Les valeurs des minima du taux de réflexion s'accroissent de 3 dB pour chaque doublement de la distance, le dernier minimum étant trouvé à une distance de $d = 3,4 Hh/\lambda$. A des distances plus grandes le taux de réflexion augmente de 9 dB pour chaque doublement de la distance.

The values of the minima in reflection loss increase by 3 dB for every doubling of the distance, while the last minimum is found at a distance of $d = 3.4 Hh/\lambda$. Beyond that distance the reflection loss increases at a rate of 9 dB for every doubling of the distance.

7.3.3 – La réception de télévision avec des ondes réfléchies

Les ondes réfléchies sont la cause de l'apparition d'images fantômes sur l'écran d'un récepteur de télévision. Dans des conditions extrêmes où le niveau des réflexions est très important la synchronisation du récepteur peut être perturbée. La présence et la gravité de ces phénomènes dépendent

- du rapport entre le champ incident et le champ réfléchi,
- du retard entre la modulation sur l'onde réfléchie par rapport à la modulation sur l'onde directe.

Plus le retard entre l'onde réfléchie et l'onde incidente est grand, plus le taux de réflexion exigé par une bonne réception de TV doit être grand. Le retard t en microsecondes à une distance d (en mètres) de la ligne peut être calculé par l'expression :

$$t = d/150$$

Une limite pour le taux de réflexion admissible en fonction de la distance de la ligne a été dessinée sur la figure 7.5. Cette limite est basée sur l'hypothèse que l'antenne réceptrice comporte trois éléments (avec un rapport arrière – avant de 15 dB au moins) et que des plaintes peuvent être émises si le taux de réflexion est inférieur de 10 dB à la valeur exigée pour les systèmes de télévision à antenne collective de bonne qualité.

7.3.4 – Résumé des phénomènes par suite des perturbations passives de télévision.

La réflexion de l'onde électromagnétique incidente d'un émetteur cause l'apparition d'images fantômes sur l'écran d'un récepteur de télévision, tandis que dans des cas graves la synchronisation peut être perturbée.

Jusqu'ici on n'a pas réussi à trouver une solution efficace pour prévenir les réflexions produites par les lignes à haute tension. Pour une réception de télévision satisfaisante dans un champ composé d'ondes réfléchies une antenne extérieure est une condition nécessaire. Cette antenne doit avoir une caractéristique directionnelle avec un bon rapport arrière – avant permettant dans un secteur assez vaste l'atténuation des ondes réfléchies par rapport à l'onde incidente. L'antenne doit être placée le plus haut possible, loin d'objets réfléchissants. Un autre objet placé devant (telle qu'une autre antenne) peut réfléchir l'onde réfléchie, annulant ainsi les caractéristiques directionnelles de l'antenne.

Plus la fréquence est élevée, plus les caractéristiques directionnelles d'antennes qui se trouvent dans le commerce sont bonnes et plus les réflexions de la ligne tendent à décroître. Pour ces raisons les problèmes concernant la réception de TV se produisent en général dans la bande de fréquence la plus basse, c'est-à-dire la Bande I, jusqu'à des distances d'environ 600 m de la ligne.

7.3.3 – TV-reception with reflected waves.

Reflected waves are the cause of the appearance of ghost images on the screen of a TV-receiver. In extreme circumstances in which the level of the reflections is very high, the picture synchronisation of the receiver can be disturbed. The occurrence and the severity of these phenomena depend on

- *the ratio of the incident field strength to the field strength of the reflection,*
- *the time delay between the modulation on the reflected wave relative to the modulation on the direct wave.*

The longer the time delay between the reflected and the incident wave, the higher the reflection loss that is required for good TV-reception. The time delay t in microseconds at a distance d (in metres) from the line can be calculated from the formula

$$t = d/150$$

A limit for the admissible reflection loss in terms of the distance from the line has been drawn in Figure 7.5. For this limit it has been assumed that a three-element antenna array will be used for reception (with at least 15 dB front-to-back ratio) and that complaints will be raised when the reflection loss is 10 dB less than the value required for high quality central antenna TV systems.

7.3.4 – Summary of passive TV interference phenomena.

The reflection of the incident electromagnetic wave from a transmitter causes the appearance of ghost images on the screen of a TV receiver, while in severe cases the picture synchronisation can be disturbed.

Up till now no solution has been found to prevent reflections from high voltage lines. For acceptable TV reception in a field with reflected waves a good outdoor antenna is imperative. This antenna must have a gain characteristic with a good front-to-back ratio to suppress over a wide angle the reflected waves relative to the incident wave. The antenna has to be placed as high as possible, far from reflecting objects. Another object (e.g. another antenna) in front of it can reflect the reflected wave again and nullify the directional properties of the antenna.

The higher the frequency, the better are the directional characteristics of commercially available TV antennas and often the lower are the reflections from the line. Therefore problems with TV reception usually arise in the lower frequency band, i.e. Band I, up to distances of about 600 m from the line.

CHAPITRE 8

BRUIT ACOUSTIQUE DES LIGNES A COURANT ALTERNATIF

8.1 – Considérations générales.

8.1.1 – Etat du problème.

L'effet de couronne des lignes aériennes est, en certaines circonstances, à l'origine de bruits acoustiques, lesquels pourraient être à l'origine de plaintes.

Un tel bruit apparaît plus fréquemment pendant les périodes de mauvais temps et de brouillard ; par beau temps il se manifeste le plus souvent pour des lignes sujettes à des types particuliers de pollution. Ce sujet est au programme de plusieurs centres de recherches EdF, CERL, IREQ, ENEL, BPA, Project UHV et Apple Grove.

8.1.2 – Sources de bruit acoustique.

La principale source de bruit acoustique par mauvais temps est la goutte d'eau. Soit qu'elle pende sous un conducteur mouillé, soit qu'elle passe à proximité de la ligne sous forme de gouttes de pluie, ou qu'elle soit éjectée de la périphérie du conducteur, l'eau conduit à différents types de décharges. Le givre sur les conducteurs est aussi générateur de bruit acoustique.

8.1.3 – Analyse spectrale.

Les composantes distinctes du bruit acoustique peuvent être observées en différentes circonstances, elles comportent :

- a) un bourdonnement à basse fréquence, principalement aux harmoniques de la fréquence industrielle,
- b) un bourdonnement et sifflement à haute fréquence,
- c) une modulation à très basse fréquence de a) et de b) associée aux oscillations des sous-conducteurs, conséquence mécanique de l'effet de couronne.

8.1.4 – Instruments de mesure.

La procédure habituelle est d'utiliser un équipement de mesure du bruit équipé d'un filtre pondéré (dBA) : les sonomètres seront conformes aux réglementations telles que CEI 179, DIN 45 633.

Les modalités générales de mesure sont données dans un guide IEEE [98] (1). En plus des niveaux obtenus en dBA l'analyse spectrale est habituellement utilisée en vue de déterminer les caractéristiques particulières d'un bruit donné.

(1) Voir liste des références

CHAPTER 8

AC AUDIBLE NOISE

8.1 – General considerations.

8.1.1 – State of the problem.

Corona on overhead lines can, in some circumstances, generate acoustic noise which may be the subject of complaint.

Such noise is more likely to occur in foul weather and fog ; in fair weather it arises mainly where lines are subject to special kinds of pollution. This subject is currently under investigation in several research centres including EdF, CERL, IREQ, ENEL, BPA, Project UHV and Apple Grove.

8.1.2 – Sources of audible noise.

The principal source of foul weather acoustic noise is water drops. Whether hanging from a wet line, arriving at the line as rain drops, or streaming from the line, water can give rise to various types of discharge. Rime on conductors may also give rise to noise.

8.1.3 – Spectral analysis.

Several distinct components of acoustic noise can be detected in various circumstances. These include:

- a) low frequency hum, mainly at harmonics of the power frequency,*
- b) higher frequency buzzing, and hiss,*
- c) very low frequency modulation of (a) and (b) associated with subconductor oscillation, a mechanical consequence of corona discharge.*

8.1.4 – Measuring devices.

The general practice is to use A-weighted noise measuring equipment : the sound meters comply with such standards as CEI 179, DIN 45 633.

General guidance on technique is given in the IEEE Guide [Ref. 98] (1). In addition to dBA levels obtained in this way spectral analysis is commonly used to determine the special characteristics of a given noise.

(1) See list of references

8.1.5 – Facteurs influençant le bruit acoustique.

Parmi les facteurs qui déterminent le bruit acoustique produit par une ligne aérienne, il faut noter le gradient de potentiel à la surface des conducteurs, le diamètre et le nombre de conducteurs et leur état de surface.

Gradient de potentiel : Habituellement le bruit acoustique augmente, à partir d'un seuil, lorsque le gradient de potentiel augmente, mais un phénomène de saturation apparaît dans la plupart des cas.

Nombre : Si chacun des sous-conducteurs émettait un bruit acoustique identique, le bruit acoustique global croîtrait proportionnellement à la racine carrée du nombre de sous-conducteurs. En général, cependant, ni le gradient de potentiel, ni la disposition des gouttes n'est exactement la même pour tous les sous-conducteurs, de sorte que la loi en racine carrée n'est pas applicable pratiquement.

Diamètre : Dans une certaine gamme de diamètre et pour un gradient de potentiel donné, l'effet d'une augmentation de diamètre conduit à accroître le bruit acoustique. La quantité d'eau et la variation relativement faible du gradient de potentiel avec la distance au conducteur sont les facteurs probables qui contribuent au phénomène observé.

8.2 – Niveau de bruit acoustique. Relations empiriques.

Les expressions suivantes concordent avec les résultats expérimentaux obtenus dans les nasses, avec une approximation raisonnable. Ces formules sont valables sous forte pluie et pour une seule phase.

a) ENEL

$$AN = 42 + 85 \log \frac{E}{15} + 45 \log \frac{d}{3,15} + 18 \log n + 10 \log \frac{20}{D}$$

b) EDF

$$AN = (AN)_b + 0,45 d + 15 \log n - 10 \log D$$

c) IREQ

$$AN = 72 \log E + 45,8 \log d + 22,7 \log n - 11,39 \log D - 103,46$$

d) ULg (Université de Liège) { 4 }

$$AN = 0,00116 E^{*3} - 0,185 E^{*2} + 7,65 E^* - 14,3 - 10 \log D$$

$$E^* = E \left(\frac{n}{n_R} \right)^{0,3} \left(\frac{d}{d_R} \right)^{0,6} \text{ est compris entre 10 et 28 kV/cm}$$

e) Project UHV

$$AN = 54,2 + 10 \log (AI Kn) + 20 \log n + 44 \log \frac{d}{38} - 10 \log D$$

$$Kn = 1 \text{ pour } n \geq 3 - Kn = 1,8 \text{ pour } n = 2 - Kn = 5,6 \text{ pour } n = 1$$

8.1.5 – Factors influencing the audible noise level.

Among the factors which determine the acoustic noise emitted by a power line are the surface electric gradient, the diameter and number of subconductors and the state of the subconductor surfaces.

Gradient : In general, AN levels increase, above an inception value, as the electric gradient increase but these levels saturate in most cases.

Number : If each of the subconductors emitted identically the AN would be expected to increase in proportion to the square root of the number of subconductors.

In general, however, neither the electrical gradient nor the patten of rain deposition is exactly the same for all subconductors so that the half-power law is not practically applicable.

Diameter : Within a certain range of diameters, the effect of increasing diameter, for a given surface electrical gradient, is to increase the AN level. Probable contributory factors are the amount of water collected and the relatively slow variation of electrical gradient with distance from the conductor.

8.2 – Audible noise levels : empirical relations.

The following expressions have been derived which agree, to different extents, with results of experiments using cages. They relate to heavy rain and single phase.

a) ENEL

$$AN = 42 + 85 \log \frac{E}{15} + 45 \log \frac{d}{3,15} + 18 \log n + 10 \log \frac{20}{D}$$

b) EDF

$$AN = (AN)_b + 0,45 d + 15 \log n - 10 \log D$$

c) IREQ

$$AN = 72 \log E + 45,8 \log d + 22,7 \log n - 11,39 \log D - 103,46$$

d) ULg (University of Liege)

$$AN = 0,00116 E^{*3} - 0,185 E^{*2} + 7,65 E^* - 14,3 - 10 \log D$$

$$E^* = E \left(\frac{n}{n_R} \right)^{0,3} \left(\frac{d}{d_R} \right)^{0,6} \text{ between 10 and 28 kV/cm}$$

e) Project UHV

$$AN = 54,2 + 10 \log (AI Kn) + 20 \log n + 44 \log \frac{d}{38} - 10 \log D$$

$$Kn = 1 \text{ for } n \geq 3 - Kn = 1,8 \text{ for } n = 2 - Kn = 5,6 \text{ for } n = 1$$

avec AN : gêne acoustique (dBA)

d : diamètre des conducteurs constituant le faisceau (mm)

n : nombre de conducteurs du faisceau

D : distance de l'axe du faisceau au point de mesure (m)

E : valeur efficace de l'intensité maximale du champ électrique autour du faisceau (kV/cm)

$(AN)_b$ voir figure 8.1.

$A1$ voir figure 8.2

l'indice R se rapporte au faisceau choisi comme référence dans l'étude, soit un faisceau $6 \times 25,4$.

Les exposants 0,3 et 0,6 correspondent à la valeur efficace de l'intensité maximale du champ électrique autour du faisceau.

with AN : audible noise (dBA)

d : diameter of the subconductor (mm)

n : number of subconductors

D : distance between the bundle axis and the measuring point (m)

E : r.m.s. value of the maximum intensity of the electric field around the bundle (kV/cm).

$(AN)_b$ see Figure 8.1.

$A1$ see Figure 8.2

index R relates to the bundle chosen as a reference i.e. a 6×25.4 bundle.

Exponents 0.3 and 0.6 correspond to the r.m.s. value of the maximum electric field intensity around the bundle.

$(AN)_b$ (dBA)

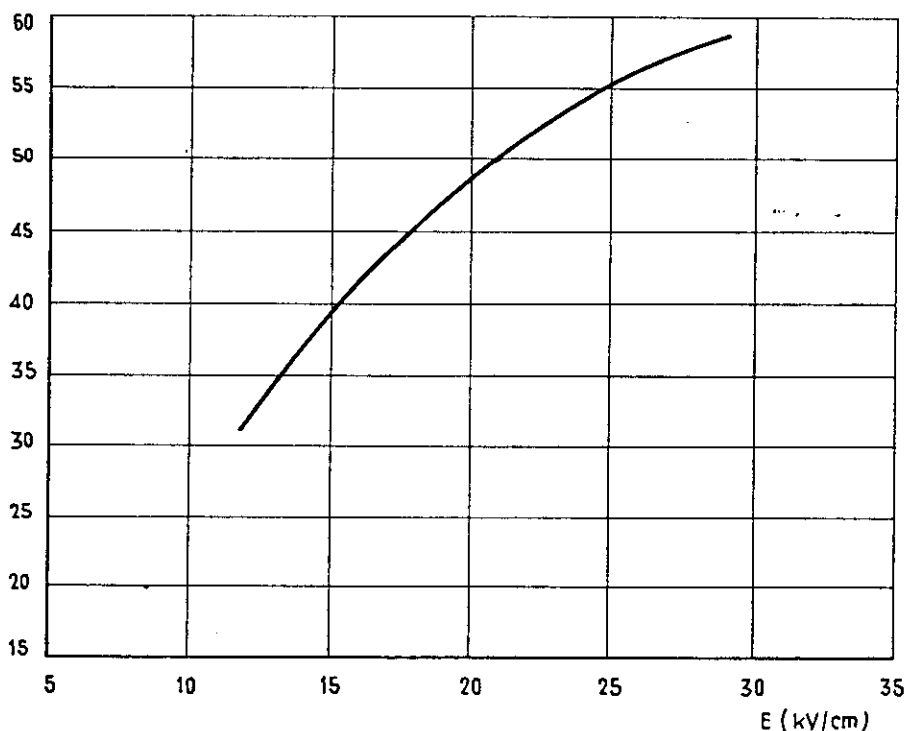


Figure 8.1.

Courbe de référence du bruit acoustique : EdF .

Reference curve for audio-noise : EdF .

Les formules de prédétermination font appel aux mêmes variables E , n , d , mais ont été établies grâce à des résultats expérimentaux différents en tout ou en partie.

L'atténuation du son dans l'air a été reprise dans ces formules ; on admet la loi classique d'une réduction de 3 dB par doublement de la distance du point de mesure à la source pour les formules a, b et d ; une loi légèrement différente pour la formule c.

En pratique, l'atténuation est une fonction beaucoup plus complexe de la distance, de la fréquence, ...

Although all these formulae use the same variables E , n , d , they are nevertheless based on different test results.

Sound attenuation in air has been included in these formulae amounting to 3 dB per doubling of distance, as far as the formulae a, b, and d are concerned. A slightly different law is assumed for formula c.

In practice the attenuation is likely to vary with distance, frequency etc., in a more complex way.

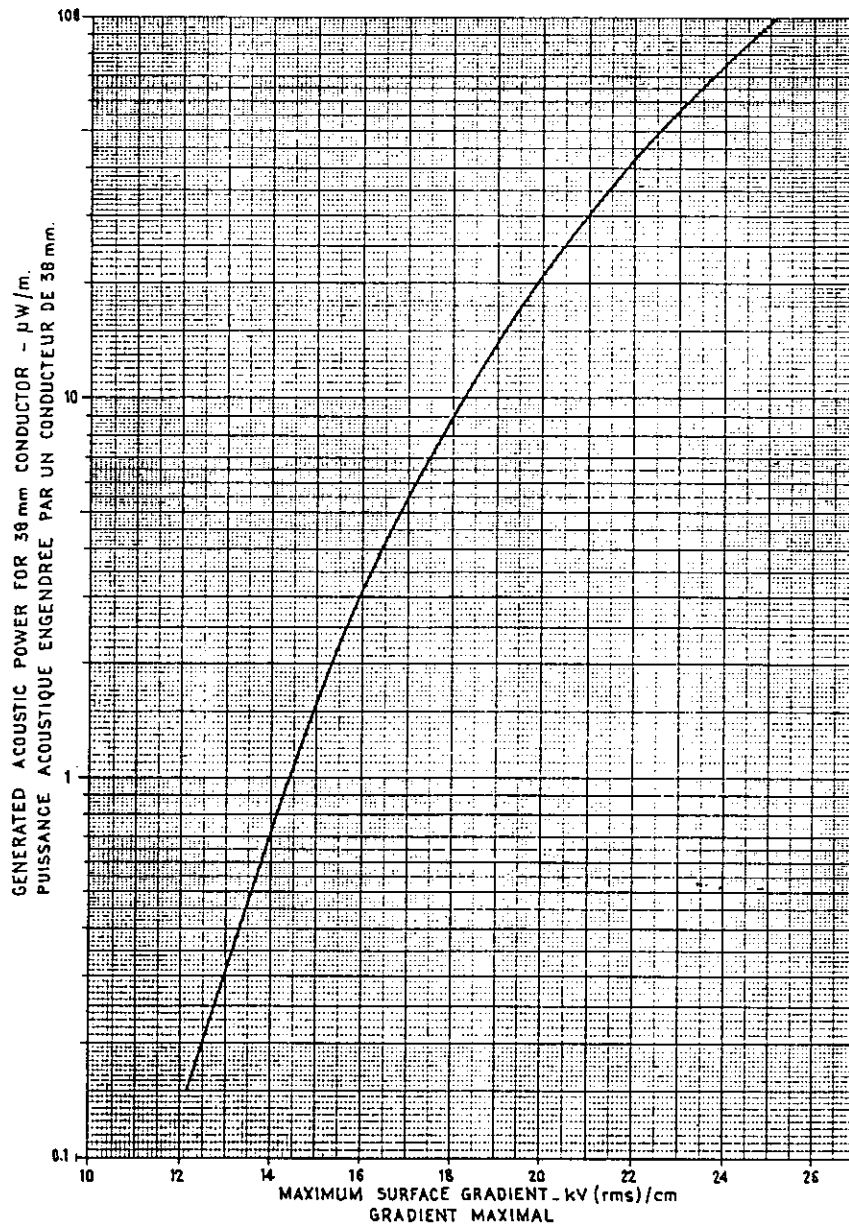


Figure 8.2.

Courbe de référence du bruit acoustique : UHV.
 Reference curve for audio-noise : UHV.

Exemple : Un faisceau monophasé 2 x 25 pour une intensité maximale du champ électrique $E = 15,5 \text{ kV/cm}$ produit un bruit acoustique de 45 dB(A) sous pluie à 25 m du faisceau.

Example : a single-phase bundle 2 x 25 mm with a maximum electric field intensity $E = 15.5 \text{ kV/cm}$ causes an audible noise of 44 (dB(A) under rain, 25 m away from the bundle.

Déterminer le bruit acoustique produit par un faisceau 4 x 38 travaillant sous 15,9 kV/cm dans les mêmes conditions (distance point de mesure - source, paramètres atmosphériques, ambiance).

Determine the audible noise from a 4 x 38 mm bundle under 15.9 kV/cm in the same conditions (distance measuring point-source, weather parameters, ambient noise).

	dB - A	
	2 x 25 - 15,5 kV/cm	4 x 38 - 15,9 kV/cm
ENEL	45	56
EdF	45	53
IREQ	41	53
ULg	41	55
Project UHV	44	57

	dB - A	
	2 x 25 - 15.5 kV/cm	4 x 38 - 15.9 kV/cm
ENEL	45	56
EdF	45	53
IREQ	41	53
ULg	41	55
Project UHV	44	57

Les résultats sont assez voisins ; il est de plus utopique d'attendre une précision meilleure que 2-3 dB.

Cependant, il faut souligner que cette manière de calculer n'est pas encore applicable aux réseaux réels pour de multiples raisons y compris la variation du niveau de bruit de l'ambiance.

Il reste encore à vérifier que les essais en nasses représentent correctement le bruit acoustique produit lors du passage d'un faisceau monophasé à un système triphasé sans altérer le phénomène.

The four results are fairly close ; moreover it is over-optimistic to attempt a precision closer than 2-3 dB.

It is emphasised that this type of calculation is not yet applicable to real lines for many reasons including the variation in ambient levels.

It is still to be verified that cage tests correctly represent the change from single to three-phase AN and do not introduce spurious phenomena.

PERTURBATIONS
EN COURANT CONTINU

D.C. INTERFERENCE

Comparée à la période de la tension alternative, la durée des décharges individuelles par effet de couronne est extrêmement petite. De sorte que le phénomène physique qui apparaît pendant et après l'impulsion de couronne se développe de manière pratiquement similaire pour le courant alternatif et pour le courant continu. Au lieu que pour les lignes à courant continu les différents phénomènes apparaissent au même moment sur les conducteurs des deux polarités, pour les lignes à courant alternatif, les phénomènes se succèdent sur le même conducteur, générés par une tension qui varie de manière relativement lente.

Le niveau des perturbations produites par une ligne à courant alternatif est régi par les plus grandes impulsions de couronne durant l'alternance positive ; les impulsions négatives contribuent d'une manière peu significative aux perturbations. En substance, le conducteur positif seul est responsable des perturbations radioélectriques dans le cas des lignes à courant continu. Le spectre en fréquence de l'intensité des perturbations au voisinage des lignes à courant continu et à courant alternatif se présente de manière identique (fig. 9.1.) Toutes les théories, résultant d'un calcul simple de répartition de champ, qui impliquent la fonction excitatrice et la propagation par modes des courants HF sont en principe applicables, vu que l'excitation positive seule est prise en compte.

Compared with speed of alternation in case of a.c. voltage, the length of an individual corona discharge is extremely short. So the physical phenomena during and following a corona impulse develop rather similarly for a.c. and d.c. Whereas for d.c. lines different phenomena occur at the same time on two polar conductors, on a.c. lines these phenomena follow each other on the same conductor, excited by a relatively slowly altering voltage.

The RI-field of an a.c. line is governed by the highest corona impulses during the positive cycle ; negative impulses contribute only trivially to the interference. Substantially the positive pole only is responsible for RI in the case of d.c. lines. Frequency spectra of the RI-field near a.c. and d.c. lines have identical forms (Fig. 9.1). In principle all theories involving excitation function and modal propagation of RI current are applicable, resulting in a simple calculation of field patterns, since only positive excitation occurs.

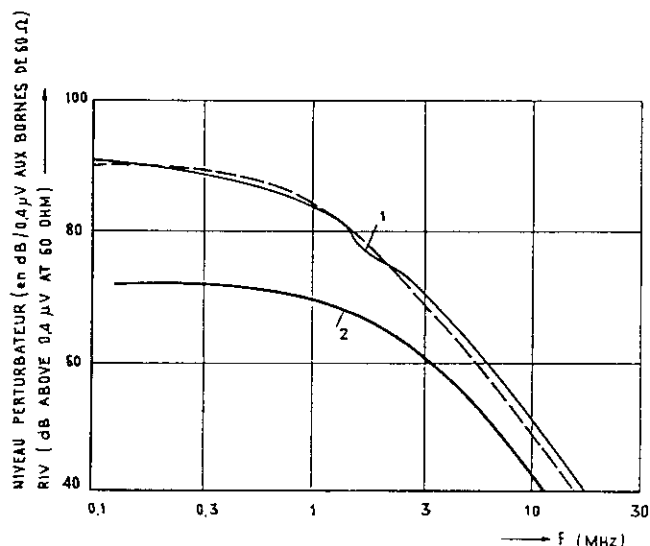


Figure 9.1.

Spectres de fréquence d'un faisceau de deux conducteurs (2 x 39,3 mm) en nasse.
Polarité positive $g = 26,1$ kV/cm

- 1. Beau temps
- 2. Pluie artificielle

La courbe en pointillé rappelle le spectre obtenu en tension alternative.

Frequency spectra of a twin-conductor (2 x 39.3 mm) measured in a cage.

Positive polarity $g = 26.1$ kV/cm

- 1. Fair weather
- 2. Artificial rain

Dashed line indicates typical form of an AC spectrum.

Utilisant les appareils de mesure et les méthodes mises au point dans le cas du courant alternatif, un critère particulier est reconnu : l'interférence, ayant pour origine des lignes à courant continu est moins gênante que l'interférence des lignes à courant alternatif, de même valeur absolue, pour la moyenne des auditeurs. Pour une même sensation de gêne, des essais ont montré que dans le cas du courant continu, un niveau supérieur de quelque 5 dB est acceptable.

Sans tenir compte de l'influence de la charge d'espace sur l'intensité du champ pour les lignes à courant continu, le gradient de tension superficiel du conducteur est une base utile de comparaisons. Dans le cas du courant continu, l'influence modérée de la charge d'espace sur les perturbations radioélectriques, est soulignée par la faible influence du vent ou de l'humidité atmosphérique.

On ne dispose pas actuellement de mesures statistiques des lignes en exploitation. Les seules données relatives à l'influence des différents paramètres sur l'interférence, proviennent des lignes expérimentales ou des nasses. En principe, des méthodes de détermination similaires à celles utilisées dans le cas des lignes à courant alternatif peuvent être employées : une méthode analytique basée sur des valeurs expérimentales ou une formule empirique.

On peut envisager la formule suivante : (*)

$$E = E_0 + 1,6 (g - g_0) + 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^{2,3} + 20 \log \left(\frac{n}{n_0} \right)^{0,25} + 20 \log \frac{1 + f_0^2}{1 + f^2} + 20 \log \left(\frac{D_0}{D} \right)^{1,5} + \Delta E_w \text{ (dB/1 } \mu\text{V/m)}$$

Tel que mentionné antérieurement la perturbation radioélectrique est fonction de l'intensité maximale du gradient de potentiel calculé tel qu'en alternatif. Entre 25 et 35 kV/cm, cette relation est à peu près linéaire. Les résultats d'essais montrent cependant une tendance marquée à l'augmentation de la dispersion des mesures lorsque le gradient de potentiel diminue. Au-dessus de 25 kV/cm la dispersion est inférieure à 2 dB, alors qu'à 20 kV/cm elle est voisine de 4 dB et qu'à 15 kV/cm elle se situe aux alentours de 6 dB.

L'influence du diamètre et du nombre de sous-conducteurs est similaire à celle que l'on observe dans le cas du courant alternatif. Pour des faisceaux où n est < 4 , l'influence du nombre de sous-conducteurs peut être négligée.

La pente du profil latéral en fonction de la distance, mesurée entre l'antenne et le conducteur positif (D), est fonction de la configuration géométrique. Pour une ligne bipolaire avec quelque 12 m entre phases et entre phase et sol, les mesures ont conduit à la valeur 1,5. Cette valeur est aussi représentative pour des lignes similaires.

L'influence du mauvais temps sur les perturbations produites par les lignes à courant continu est caractéristique de celles-ci (ΔE_w). Dans la gamme des gradients de potentiel techniquement réalisables les perturbations mesurées dans de mauvaises conditions atmosphériques sont actuellement plus faibles que celles par beau temps.

(*) L'indice 0 se rapporte aux grandeurs de référence.

Using the measuring apparatus and routine developed for a.c., a special criterion is recognized RI-noise originating from d.c. lines is less annoying for the average listener than a.c. noise of the same absolute value. For the same degree of annoyance tests have shown, that in the d.c. case a level some 5 dB higher is tolerable.

Without having any regard to space charge influence on the field of d.c. lines, the static surface voltage gradient at the conductor is a useful base for comparisons. In the d.c. case the moderate influence of space charge on RI phenomena is underlined by weak influence of wind or atmospheric humidity.

No statistical measurements from actual working lines are available. The only data about the influence of different parameters on RI, is that from test lines or from cages. In principle prediction techniques similar to the a.c. case can be used i.e. an analytical method based however on experimental values or an empirical formula.

One suggestion is : (*)

$$E = E_0 + 1.6 (g - g_0) + 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right)^{2,3} + 20 \log \left(\frac{n}{n_0} \right)^{0,25} + 20 \log \frac{1 + f_0^2}{1 + f^2} + 20 \log \left(\frac{D_0}{D} \right)^{1,5} + \Delta E_w \text{ (dB above 1 } \mu\text{V/m)}$$

As mentioned previously the RI field is related to the maximum static voltage gradient, which is calculated as for a.c. Between 25 kV/cm and 35 kV/cm this relationship is fairly linear. Test experience shows however a definite trend of increasing dispersion of measurements with decreasing voltage gradient. Above 25 kV/cm dispersion is less than 2 dB whereas at 20 kV/cm about 4 dB, and at 15 kV/cm about 6 dB must be taken into consideration.

The influence of subconductor diameter and number is similar to the one in the a.c. case. For bundles with $n < 4$ subconductor number can be neglected.

The decrease of the lateral profile with direct distance between antenna and positive pole (D) is dependent on actual geometric configuration. For a bipolar line, with some 12 m pole-to-pole and pole-to-ground distances, 1.5 was found from measurements. This value is representative for similar lines too.

The influence of foul weather on d.c. generated RI field is characteristic for d.c. only (ΔE_w). Within the range of technically feasible voltage gradients, the RI field under foul weather conditions is usually lower than that in fine weather.

(*) Index 0 indicates reference values.

La différence est fonction du conducteur ou du faisceau ; elle pourra atteindre 10 dB pour certains gradients de potentiel (Fig. 9.2).

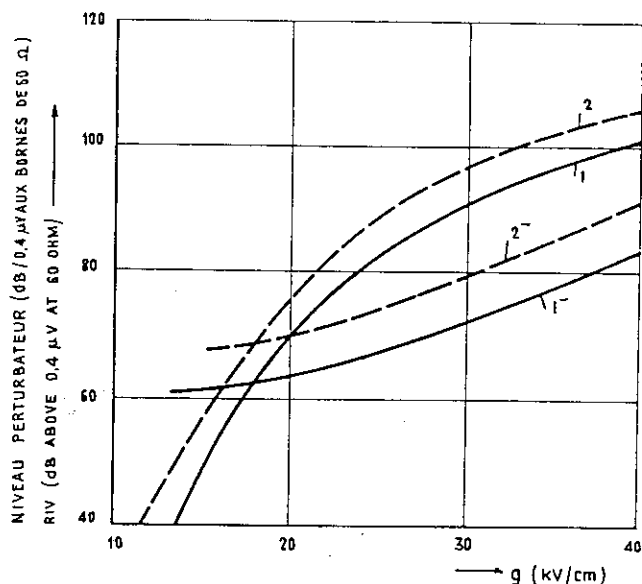


Figure 9.2.

Niveau perturbateur en fonction du gradient pour différentes conditions météorologiques.

1. Conducteur simple Φ 39,3 mm à sec 1- humide.
2. Faisceau double $2 \times \Phi$ 39,3 mm à sec 2- humide.

R.I.V. versus gradient for different weather conditions.

1. Single conductor 39.3 mm O.D. Dry 1- wet.
2. Twin conductor 39.3 mm O.D. Dry 2- wet.

Cette différence mesurée par mauvais temps peut s'expliquer par la présence de gouttes d'eau sur le conducteur. En dépit d'une augmentation du nombre de sources et de la fréquence des décharges qui contribuent à augmenter les pertes par effet de couronne, l'amplitude des effluves individuelles est réduite par la présence des charges d'espace comparée à la situation sur un conducteur sec. L'intensité des perturbations est généralement en relation avec l'amplitude et la fréquence des décharges. L'influence de la fréquence est limitée par un phénomène de saturation pour des taux de répétition élevés. De ce fait, une diminution de l'amplitude des décharges, par mauvais temps, conduit à des niveaux inférieurs pour les perturbations vu que le taux de répétition des effluves n'a pas d'effets supplémentaires sur la gêne.

Sur les lignes actuelles à courant continu, la détermination de l'interférence radioélectrique est exclusivement définie pour les valeurs par beau temps, vu que, pour le climat européen les conducteurs secs qui génèrent également un plus haut niveau de perturbations, sont les situations les plus courantes.

Pour une comparaison pratique des mesures, la formule mentionnée plus haut se réduit à une expression simplifiée :

$$E - E_0 = 1,6 (g - g_0) + 46 \log d/d_0$$

(pour une méthode de mesure, localisation et conditions atmosphériques identiques).

Ces remarques sur l'interférence produite par les lignes à courant continu ne laissent soupçonner aucun problème, mais l'état actuel de la connaissance, vu le manque de résultats significatifs relatifs aux lignes à courant continu actuellement en exploitation, est moins étayé que dans le cas du courant alternatif.

Comme les lignes à courant continu et alternatif, les stations de conversion constituent également des sources de perturbations dans la gamme des fréquences radioélectriques.

The difference is dependent on the particular conductor or bundle ; it may amount to more than 10 dB for certain gradients (Fig. 9.2).

This can be explained by the presence of water droplets on the conductors. In spite of an increase of discharge points and discharge frequency, which causes higher corona losses, the amplitudes of the individual discharge currents are reduced, compared with discharges on a dry conductor. Nuisance of RI is generally correlated to discharge amplitude and frequency, the influence of the latter is limited by saturation for higher rates. Thus a decrease of discharge amplitudes in foul weather results in lower RI values, since discharge repetition rates have no further effect on nuisance impression.

RI behaviour of actual d.c. lines will be exclusively governed by fine weather values, since for the European climate dry conductors are prevailing, which generate the highest RI additionally.

For practical comparison of measurements, the pre-mentioned formula is restricted to a simple expression :

(the same test routine, location and weather condition provided)

These remarks on d.c. generated RI field do not suggest unforeseen problems, but the present state of knowledge is, because of lack of significant measurements from actual working d.c. lines, less comprehensive than that of the a.c. case.

Linking together a.c. and d.c. lines converter stations are a source of interference in the RI frequency range too.

L'appareillage de poste porté à des potentiels élevés, aussi bien alternatif que continu, produit des décharges par effet de couronne similaires aux lignes elles-mêmes.

Dans le cas du courant alternatif étudié dans les chapitres précédents, on a examiné l'influence des postes sur l'interférence radioélectrique produite par les lignes reliées à ces postes.

Beaucoup plus sévère est l'interférence ayant pour origine les trains d'onde de tension d'allumage des redresseurs. En fonction du type de redresseurs — thyristors ou vapeur de mercure — des dispositifs d'amortissement sont employés, pour d'autres fins, qui peuvent aider à contrôler cette perturbation.

Des écrans additionnels pour ces groupes redresseurs ou un aménagement spécial sont nécessaires pour réduire cette interférence, en plus des dispositifs tels que réactance de lissage et parafoudre à condensateurs placés du côté continu. L'utilisation des filtres inductifs conventionnels préviendra la propagation de l'interférence radioélectrique au-delà de 10 km du poste sur le réseau à courant continu.

Le côté alternatif est habituellement équipé de filtres d'harmoniques et de circuits bouchon pour les hautes fréquences.

Le rayonnement direct émis par le poste décroît avec la distance D en raison de $1/D^2$ au voisinage du poste ; en raison de $1/D$ pour de plus grandes distances. Le point de rencontre entre ces deux fonctions ($1/D^2$ et $1/D$) se déplace vers le poste lorsque la fréquence augmente.

Station equipment, stressed with high voltage, either a.c. or d.c. produces corona discharges similar to that of the lines themselves.

Respective consideration for the a.c. case has shown their influence on the RI field on incoming lines.

Much more severe are interferences originating from the repetitive voltage steps at valve ignition. Depending on valve type thyristor or mercury arc — damping facilities are used, for other reasons, which can help to control this interference.

Additional screening of the valve groups or special construction is necessary to reduce this interference, together with system remanent components like smoothing reactance and lightning protecting condensor on the d.c. side. At last conventional inductive RI filters will avoid RI interference of the station to penetrate more than 10 km into the d.c. line.

The a.c. side is usually equipped with filters for characteristic harmonics and wave traps for higher frequencies.

Direct radiation of the station decreases with distance (d) at a rate of $1/d^2$ close to the station, at larger distances $1/d$ is more adequate. The transition between these proportionalities shifts towards the station with increasing frequency.

LISTE DES REFERENCES
LIST OF REFERENCES

- [1] R.W. Peek. – Dielectric phenomena in HV engineering. New York, McGraw-Hill, 3rd edition, 1929.
- [2] N. Gao, J.B. Jordan – Modes of corona discharges in air. *IEEE Transactions PAS*, May 1968.
- [3] E. Nasser. – Spark breakdown in air at positive point. *IEEE Spectrum*, November 1968.
- [3a] G.W. Trichel. – The mechanism of negative point-to-plane corona near onset *Physical Review*, 1938, p. 1978.
- [3b] G.W. Trichel. – The mechanism of the positive Point-to-Plane Corona in air at atmospheric pressure. *Physical Review*, vol. 55, p. 382, Feb. 1939.
- [4] C.R. Carson. – Wave propagation in overhead wires with earth return. *Bell system technical Journal* – October 1926 – n° 5, p. 539-554.
- [4b] F. Pollaczek – traduit par J.B. Pomey. – Sur le champ produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif. *Revue Générale d'Electricité* – 30 mai 1931 – p. 851-867.
- [5] D.E. Hedman. – Propagation on overhead transmission lines. I – Theory of modal analysis. II – Earth-conduction effects and practical results. *IEEE Trans. PAS. Vol. 84* – March 1965 – pp. 200-211.
- [5b] M.C. Perz, R.L. Hazel. – Effects of earth resistivity on modal parameters of an E.H. horizontal line at P.C.C. frequencies. *IEEE, Winter Power Meeting* – January – February 1973 – New-York.
- [6] L.O. Barthold, J. Cladé. – La propagation des hautes fréquences sur les lignes aériennes. The propagation of high frequencies on overhead lines. (CIGRE) 1964 – 420.
- [6b] G.D. Lippert, W.E. Pakala, S.C. Bartlett, C.D. Fahrnkopf. – Radio influence tests in field and laboratory 500 kV test. Project of the American Gas and Electric Company. *AIEE Transactions*, Vol. 70, Pt. I, 1951, p. 251-269.
- [7] G.E. Adams. – The calculation of the radio interference level of transmission lines caused by corona discharges. *AIEE Transactions PAS*, Vol. 75, June 1956, p. 411-418.
- [7b] R. Pélissier. – Propagation des ondes électromagnétiques guidées par une ligne multifilaire. *R.G.E.* – avril-mai 1969 – Tome 78 n° 4 et n° 5.
- [8] R. Bartenstein. – Prédétermination du niveau de perturbations à haute fréquence des lignes de transport à haute tension. Predetermination of the H.F. interference level of H.V. transmission lines. CIGRE 1960, No 409).
- [9] T. Yamada, H. Kondo. – Bruit de corona en très haute tension au Japon. EHV corona noise in Japan. CIGRE 1960, Paper No 402.
- [10] A.K. Abboushi, L.O. Barthold. – Digital calculation of radio noise levels. *AIEE Transactions*, Pt. III, PAS, Vol. 80, December 1961, pp. 841-846.
- [11] R.J. Mather and B.M. Bailey. – Radio interference from HV lines – A statistical approach, *Trans. AIEE*, Vol. 80, December 1961, pp. 890-896.
- [12] O. Nigol, J.G. Cassan. – Corona loss research at Ontario Hydro Coldwater Project. *AIEE Transactions Pt. III, PAS*, No.54, June 1961, pp. 304-313.
- [13] L.M. Robertson, W.E. Pakala, E.R. Taylor Jr.. – Leadville high altitude extra high voltage test project : Part III – Radio influence investigations. *AIEE Transactions Pt. III PAS*, No. 57, December 1961, pp. 732-743.
- [14] H.P. Smith, J.G. Cassan, N.J. Mc Murtrie. – Réseau à T.H.T. de l'Ontario Hydro. Choix de la tension du conducteur et de la disposition des faisceaux. Ontario Hydro's EHV system-selection of voltage, conductor size and bundle arrangements. CIGRE 1962, Paper No 413.
- [15] A.A. Akopyan, G.N. Alexandrov, N.P. Emelyanov, V.I. Levitov, A.V. Miroljubov, I.S. Nayachkov, V.J. Popkov, S.S. Rokotyán, N.N. Sokolov, A.V. Panov, N.N. Teekhodayev. – Ligne expérimentale à l'usage industriel Konakovo-Moscou pour transport d'énergie à 750 kV. The 750 kV experimental-commercial transmission line Konakovo-Moscow. CIGRE 1964, Paper No. 413.
- [16] O. Nigol. – Analysis of radio noise from high-voltage lines, Part I, Meter response to corona pulses. *IEEE Transactions (PAS)*, Vol. 83, No. 5, May 1964, pp. 524-533.
- [17] O. Nigol. – Analysis of radio noise from high-voltage lines, Part II, Propagation theory. *IEEE Transactions (PAS)*, Vol. 83, No. 5, May 1964, pp. 533-541.
- [18] L. Paris. – Criteri per la predeterminazione delle radiointerferenze prodotte dalle linee A.T. *Publication of the Electrical Department of the University of Pisa*, December 1964.

- [19] J. Reichman, J.R. Leslie. — A summary of radio interference studies applied to EHV lines. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 83, No. 3, March 1964, pp. 223-228.
- [20] J.J. Laforest. — The effect of station radio noise sources on transmission-line noise levels, *IEEE Trans.*, Vol. PAS-84, No 9, September 1965, pp. 833-838.
- [21] E.R. Taylor Jr., W.E. Pakala, N. Kolcio. — The Apple Grove 750 kV Project — 515 kV radio influence and corona loss investigation. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 84, No 7, July 1965, pp. 561-573.
- [22] E.R. Taylor Jr., W.E. Pakala, N. Kolcio. — The Apple Grove 750 kV Project — 775 kV radio influence and corona loss investigations *IEEE Transaction PAS*, Vol. 84, No 7, July 1965, pp. 573-579.
- [23] J. Cladé, C. Gary. — Les perturbations radio-électriques engendrées par les lignes de transport d'énergie. *Revue Générale de l'Electricité*, Vol. 75, No 5, Mai, 1966, pp. 659-681.
- [24] J. Davey, H.L. Deloney, and J.J. Laforest. — The effect of station radio noise sources on transmission-line noise levels — Experimental results, Paper 31PP66-490, presented at the IEEE Summer Power Meeting, New Orleans. LA, July 14, 1966.
- [25] J. Havelka, D. Kohoutová, J. Vokálek. — Calcul du niveau des perturbations radiophoniques causées par les lignes à très haute tension sur les fréquences comprises entre 0,15 et 30 MHz. Calculation of the radio interference level caused by EHV power lines at frequencies from 0.15 to 30 MHz. CIGRE 1966, Paper No 304.
- [26] M. Magnien, J. Cladé, C. Gary. — La station expérimentale de l'EDF pour l'étude de l'effet de couronne sur les futures lignes à très haute tension. The "Electricité de France" test station for corona studies on future EHV lines. CIGRE Paper No 427, 1966.
- [27] M. Sforzini. — Formules de prédétermination des parasites radio-électriques émis par les lignes d'énergie. Formulas for predetermination of radio interference from electric power lines. CIGRE 1966, Paper No 428-Appendix II.
- [28] E.H. Gehring, A.C. Peterson, C.F. Clark and T.C. Rednour. — BPA's 1100-KV DC test project, Part II — Radio interference and corona loss, *IEEE PAS-86*, No 3, March 1967.
- [29] R. Lacroix, H. Charbonneau. — Radio interference from the first 735 KV line of Hydro-Québec. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 87, No 4, April 1968, pp. 932-939.
- [30] J.J. Laforest. — Seasonal variation of fair-weather radio noise. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 87, No 4, April 1968, pp. 928-931.
- [31] W.E. Pakala, E.R. Taylor Jr.. — A method for analysis of radio noise on high voltage transmission lines. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 87, No 2, February 1968, pp. 334-345.
- [32] W.E. Pakala, et al. — Radio noise measurements on high-voltage lines from 2.4 to 345 kV. *IEEE EMC Symposium*, July 1968.
- [33] L. Paris, M. Sforzini. — RI problems in HV-line design. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 87, No 4, April 1968, pp. 940-946.
- [34] Ph. Sporn, P. Héroin. — Rapport d'activité du Comité d'Etudes n° 9 (Transmission par courant alternatif à très haute tension), Partie V, Etudes statistiques des perturbations radiophoniques (R.E. Bartenstein, F. Hirsch, E Schäfer). CIGRE 1968, n° 42-01, pp. 12. Progress report of Study Committee No9 (EHV a.c. Transmission). Part V., Statistical evaluation of radio interference (R.E. Bartenstein, F. Hirsch, E. Schäfer). CIGRE 1968, Paper No 42-01, pp. 11.
- [35] V.L. Chârtier, J.W. Bankoska. — Waltz Mill 1100-kV station: Conductor selection and laboratory verification. *IEEE Transactions-PAS*, Vol. PAS-88, No 6, June 1969, pp. 825-833.
- [35b] F. Cahen, R. Pélissier. — L'emploi de conducteurs en faisceaux pour l'armement des lignes à très haute tension. Résultats d'essais de la station expérimentale à 500 kV de Chevilly. *Bulletin S.F.E.*, mars 1948, p. 111.
- [36] C. Gary, M. Moreau. — Predetermination of the radio noise level under rain of an extra-high-voltage line. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 88, May 1969, pp. 635-660.
- [37] N. Kolcie, V. Caleca, S.J. Marmaroff, W.L. Gregory. — Radio interference and corona loss design aspects of AEP 765 kV lines. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 88, No 9, September 1969, pp. 1343-1355.
- [38] L.M. Wedephol and others. — Radio interference fields in multiconductor overhead transmission lines. *Proc. IEE*, Vol. 116, No 11, November 1969, pp. 1875-1884.
- [39] V.L. Chartier, D.F. Shankle, N. Kolcio. — The Apple Grove 750 kV Project: Statistical analysis of radio influence and corona loss performance of conductors at 775 kV. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 89, No 5, May/June 1970, pp. 867-883.
- [40] J. Cladé, C. Gary, M. Moreau. — Résultats des études sur l'effet de couronne menées à la station expérimentale des Renardières. Results of studies on corona effects undertaken at the experimental station at Les Renardières. CIGRE 1970, Paper No 31-08.
- [41] R. Cortina, W. Serravalli, M. Sforzini. — Radio interference long term recording on an operating 420 kV line. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 89, No 5, May/June 1970, pp. 881-892.
- [42] G.W. Juette, L.E. Zaffanella. — Radio noise currents and audible noise on short sections of U.H.V. bundle conductors. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 89, No 5 May/June 1970 pp. 902-913.

- [43] G.W. Juette, L.E. Zaffanella. — Radio noise, audible noise and corona loss of EHV and UHV transmission lines under rain: Predetermination based on cage tests. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 89, No 6, July/August 1970, pp. 1168-1178.
- [44] Y. Sawada. — Calculating method of radio noise level and its application to design of AC power transmission line. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 89, No 5, May/June 1970, pp. 844-853.
- [45] H.C. Barnes. — Preliminary experience of extensive switching surge testing of American Electric Power's first 765-kV line and stations. *IEEE Transactions PAS*, Vol. PAS 90, No 2, March/April 1971, pp. 785-798.
- [46] G.K. Carter, G.W. Juette, K.W. Priest. — Calculation of the radio interference statistics of transmission lines. *IEEE Pica Conference Proceedings*, 1971, pp. 143.
- [47] M. Moreau, C. Gary. — Predetermination of the RI level of high voltage transmission lines: Part I — Predetermination of the excitation function. *IEEE Summer Meeting*, Portland, Oregon, 1971, Paper No 71 TP 661.
- [48] M. Moreau, C. Gary. — Predetermination of the RI level of high voltage transmission lines: Part II — Field calculating method. *IEEE Summer Meeting*, Portland, Oregon, 1971, Paper No 71 TP 662.
- [49] W.E. Pakala, V.L. Chartier. — Radio noise measurements on overhead power lines from 2.4 to 800 kV. *IEEE Transactions PAS*, Vol. PAS-90, No 3, May/June 1971, pp. 1155-1165.
- [50] L.M. Wedepohl, J.N. Saha. — Radio interference from isolated noise sources on overhead transmission lines. *IEEE Transactions PAS*, Vol. PAS-90, No 5, Sept./Oct. 1971, pp. 2295-2300.
- [51] Comité International Spécial des Perturbations Radiophoniques. — Specification for CISPR radio interference measuring apparatus for the frequency range 0.15 to 30 MHz. *CISPR Publication No 1*, 1961.
- [52] Transmission system radio influence. — *IEEE Committee Report*, Power Apparatus and Systems, Vol. 84, No 8, August 1965, pp. 714.
- [53] CIGRE Report. — Etudes du bruit haute fréquence produit par les conducteurs et les ferrures autour d'une ligne à haute fréquence. Environmental studies of radio interference from conductors and hardware. Report No 408, 1966.
- [54] EHV Transmission line reference book. — Chapter 5. Edison Electric Institute, New York, 1968.
- [55] ANSI (American National Standards Institute, 1430 Broadway, New York, N.Y.). Specifications for radio noise and field strength meters 0.015 to 30 megacycles/second. C 63.2-1963, Reaffirmed in 1969.
- [56] IEEE Committee Report. — Radio noise design guide for high-voltage transmission lines. *IEEE Transactions (PAS)*, Vol. PAS-90, No 2, March/April 1971, pp. 833-842.
- [57] Draft American National Standard. — IEEE Trial-Use Standard procedures for the measurement at radio noise from overhead power lines. *IEEE Std.* 430-1972.
- [58] Study Committee No 36 — Working Group 01 Report. — Comparaison des méthodes de calcul des niveaux perturbateurs avec les résultats de l'enquête CIGRE/IEEE. Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE survey results. *Electra* No 22, May 1972, pp. 173-202.
- [59] IEEE Committee Report. — CIGRE/IEEE survey on extra high voltage transmission line radio noise. Paper No T72 192-8, presented at the Winter Meeting, 1972, in New York, New York.
- [60] IEEE Radio Noise Subcommittee Report. — Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE Survey Results. *IEEE PAS-Summer Meeting*, San Francisco, July 1972, paper T72 547-8.
- [61] D. Rivière, R. Parraud, C. Gary, M. Moreau, D. Kohoutova, J. Vokálek. — Influence des conditions d'ambiance sur le niveau perturbateur des chaînes d'isolateurs. The influence of ambient conditions on the interference level of insulator strings. CIGRE Rapport n° 36-04, 1972.
- [61b] P.D. Bernardelli, R. Cortina, M. Sforzini. — Laboratory investigation on the radio interference performance of insulators in different ambient conditions. *IEEE PAS* — Vol. 92 — jan/febr. 1973 — pp 14-24.
- [62] P.C.J. Hill. — Measurement of reradiation from lattice masts at V.H.F. *Proc. IEE*, Vol. 111, December 1964, pp. 1957-1968.
- [63] C. Gary. — Perturbations en télévision engendrées par les lignes à moyenne tension. *Revue Générale de l'Electricité*, Novembre 1965, pp. 881-893.
- [64] P. Knight. — Reradiation from masts and similar obstacles at radio frequencies. *Proc. IEE*, Vol. 114, January 1967, pp. 30-42.
- [65] J. Delebassée. — Perturbations en télévision engendrées par les lignes à moyenne tension. Résultats expérimentaux de l'antiparasitage. *Revue Générale de l'Electricité*, Mars 1968, pp. 289-296.
- [66] W.E. Pakala, E.R. Taylor, R.T. Harrold. — Radio noise measurement on high voltage lines from 2.4 to 345 kV. 1968 *IEEE EMC Symposium record*, 1968, pp. 96-107.
- [67] R. Cortina, M. Sforzini, F. De Michelis, W. Serravalli. — Experimental research on the most suitable instrumentation for measuring television interference from electric line and substation elements. *IEEE — EMC Symposium — New York* 1973.

- [68] J.P. German. — Characteristics of electromagnetic radiation from gap-type spark discharges on electric power distribution lines. *IEEE Transactions on EMC*, Vol. 11, May 1969, pp. 83-89.
- [69] F.W. Warburton, Tseng-Wu Liao, N.A. Hoglund. — Power line radiations and interference above 15 MHz. *IEEE Transactions on PAS*, Vol. 88, October 1969, pp. 1492-1501.
- [70] C.F. Clark and M.O. Loftness. — Some observations of foul weather EHV television interference. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No 6, 1970, pp. 1157-1168.
- [71] S. Tokeshita. — Scattering of VHF and UHF radio waves from extra-high voltage power transmission lines. *1970 IEEE EMC Symposium record* pp.217-227.
- [72] G.W. Juette. — Evaluation of television interference from high voltage transmission lines. *IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, Vol. PAS-91, No 3, 1972, pp. 865-873.
- [73] Y. Sawada, M. Fukushima, M. Yasui, I. Kimoto, K. Naito. — A laboratory study on RI, TVI and AN of insulator strings under contaminated conditions. *IEEE Trans. Paper T73 415-7*, May 1, 1973.
- [74] M.O. Loftness. — A guide to the correction of fair weather television interference. Conference Paper C 74 058-4.
- [75] V.L. Chartier, J.W. Bankoske. — Waltz mill 1100 kV station. Conductor selection and laboratory verification. *IEEE Trans. PAS*, Vol. 88, June 1969, pp. 825-833.
- [76] M. Sforzini. — Results of audible noise field measurements carried out on HV and EHV lines. *IEEE Symposium on Audible Noise from H.V. Transmission Lines*, Dallas, Tex., June 1969.
- [77] E.R. Taylor, V.L. Chartier, D.N. Rice. — Audible noise and visual corona from HV and EHV transmission lines and substation conductors. Laboratory tests. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 88, No 5, 1969, pp. 666-679.
- [78] H. Barnes, V. Caleca. — Expériences initiales sur le réseau à 765 kV de l'American Electric Power Co. Initial experiences on the 765 kV system of the AEP (USA). CIGRE 1970, Paper No 31-06.
- [79] G.W. Juette, L.E. Zaffanella. — Radio noise currents and audible noise on short sections of UHV bundle conductors. *IEEE Trans. PAS*, Vol. 89, May/June 1970, pp. 902-908.
- [80] G.W. Juette, L.E. Zaffanella. — Radio noise, audible noise, and corona loss of EHV and UHV transmission lines under rain : predetermination based on cage tests. *IEEE Trans.*, PAS-89, August 1970, pp. 1168-1178.
- [81] W.O. Pokorny, R.H. Schlemann, H.C. Barnes, C.J. Miller Jr.. — Investigation of corona effects from wet bundle conductors for application to UHV configurations. *IEEE Winter Meeting 1971*, Paper 71 TP 151 PWR.
- [82] J.G. Anderson, L.E. Zaffanella. — Project UHV test line research on the corona performance of a bundle conductor at 1000 kV. *IEEE Trans.*, PAS, Vol. PAS-91, January/February 1972, pp. 223-232.
- [83] T. Daniel, E. Whittaker. — The reduction of audible corona discharges on AC transmission lines. *Gas Discharges Symposium*, London, September 1972.
- [84] A. Coquard, C. Gary. — Bruit acoustique produit par les lignes de transport d'énergie à THT. Audible noise produced by electrical power transmission lines at VHV. CIGRE 1972, Rapport No 36-03.
- [85] M. Sforzini, R. Cortina, G. Sacerdote, R. Piazza. — Acoustic noise caused by a.c. corona on conductors : results of an experimental investigation in the anechoic chamber. *1974 IEEE Summer Meeting* — Paper No T74-402-4.
- [86] D.E. Perry. — An analysis of transmission line audible noise levels based upon field and three-phase test line measurements. *IEEE Trans.*, PAS, Vol. PAS-91, May/June 1972, pp. 857-864.
- [87] N.G. Trinh, P.S. Maruvada. — A semi-empirical formula evaluation of audible noise from line corona. *Canadian Communication and EHV Conference*, Montreal, November 1972.
- [88] P. Pirotte, A. Robert. — Faisceaux de conducteurs et gêne acoustique. *AIM Liège*, 1973.
- [89] G. Wilson. — The mechanism for audible noise on EHV transmission lines. Report to CIGRE 31, London 1972.
- [90] M. Comber, L. Zaffanella. — Audible noise reduction by bundle geometry optimization. *IEEE Winter Meeting 1973*, Paper 73-162-5.
- [91] N. Kolcio, B. Ware, R. Zagier. — The Apple Grove 750 kV Project — Statistical analysis of audible noise performance of conductors at 775 kV. *IEEE Summer Meeting 1973*, Paper T73-437-1.
- [92] N. Trinh, P. Maruvada, B. Poirier. — A comparative study of the corona performance of conductor bundles for 1200 kV transmission lines. *IEEE Summer Meeting 1973*, Paper T 73-439-7.
- [93] American National Standard Specification for General-Purpose *Sound Level Meters*, S 1.4-1961.
- [94] American National Standard Method for the Physical Measurement of Sound, S 1.2-1962.
- [95] American National Standard Method for the Calibration of Microphones, S 1.10-1966.
- [96] American National Standard Specification for Octave, half-octave and third-octave Band Filter Sets, S 1.11-1966.
- [97] Walsh-Healy Act, Occupational Noise Exposure, Federal Register, Vol. 34, No 96, Tuesday, May 20, 1969.
- [98] Audible Noise Task Force of the Radio Noise Subcommittee of the IEEE T & D Committee : A Guide for the Measurement of Audible Noise from Transmission Lines. *IEEE Trans. PAS*, Vol. PAS-91, May/June 1972, pp. 853-856.

- [99] R.M. Morris, B. Rakoshdas. — An investigation of corona loss and radio interference from transmission line conductors at high direct voltages. *IEEE Transactions, PAS*, Vol. 83, January 1964, pp. 5-16.
- [100] R. Cortina, C. Malaguti. — L'effetto corona nelle linee ad alta e ad altissima tensione in corrente continua : criteri per la predeterminazione delle perdite corona e delle radiointerferenze. Rendiconti della LXVII Riunione Annuale AEI 1966, 1-94/1966.
- [101] B.M. Bailey. — Progress report on BPA HV DC test line radio noise and corona loss. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 86, No 10, October 1967.
- [102] E.H. Gehring, A.C. Peterson, C.F. Clark, T.C. Rednour. — Bonneville Power Administration's 1100 kV direct current test project : radio interference and corona loss. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 86, No 3, March 1967.
- [103] F. Hirsch, E. Schäfer. — Corona losses and radio interference of a ± 450 kV DC test line with a pole-to-pole distance of 7 meters. CIGRE SC 10, May 1968.
- [104] R.M. Morris, A.R. Morse. — Progress report DC corona measurements on transmission line conductors. CIGRE SC 10, Heidelberg, June 1968.
- [105] F. Hirsch, E. Schäfer. — Radio interference measurements at a ± 400 kV DC-test line. CISPR/WG 3 Germany, April 1969.
- [106] F.W. Hirsch, E. Schäfer. — Progress report on the HVDC test line of the 400 kV-Forschungsgemeinschaft : Corona losses and radio interference. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 88, No 7, July 1969.
- [107] G.C. Kakoti, B. Salvage, R.B. Turner. — Radio interference from high-voltage insulators under direct-voltage conditions. *Proceedings IEE*, Vol. 116, No 3, March 1969.
- [108] B.M. Bailey. — Test line experience with HVDC overhead transmission. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 89, No 7, September/October 1970.
- [109] N. Knudsen, H. Bergqvist, P. Forsgren. — Résultats de trois années d'exploitation de la station d'essais en courant continu à haute tension d'Anneberg. Results from 3-year operation of the HVDC-test station in Anneberg. CIGRE 1970, Report 31-04.
- [110] M. Knudsen, F. Ilceto. — The electrical design of EHVDC overhead lines. *IEEE Conference Paper 70 CP 639 - PWR*, 1970.
- [111] S.A. Annestrand. — Radio interference from HVDC Converter Station. *IEEE Transactions Paper 71 TP 660-PWR*, 1971.
- [112] R.M. Morris, A.R. Morse. — Radio interference and corona loss measurements on "Nelson River" conductors. *Manitoba Power Conference EHV-DC Winnipeg*, June 1971.
- [113] W. Mosca, P. Ostano, G. Rumi. — HVDC visual corona and RIV testing on insulators and insulator samples. *IEEE Transactions PAS*, Vol. 90, No 1, January/February 1971.
- [114] F. Hirsch. — Progress report on field tests on a string insulator under positive DC voltage. CISPR/WG 3, Germany, March 1972.
- [115] M.P. Sarma, T. Gilsig. — A method of calculating the RI from converter stations. *IEEE Transactions Paper T 72 548-6*, 1972.
-

Le CIGRÉ a apporté le plus grand soin à la réalisation de cette brochure thématique numérique afin de vous fournir une information complète et fiable.

Cependant, le CIGRÉ ne pourra en aucun cas être tenu responsable des préjudices ou dommages de quelque nature que ce soit pouvant résulter d'une mauvaise utilisation des informations contenues dans cette brochure.

Publié par le CIGRÉ
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tél. : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99

Copyright © 2000

Tous droits de diffusion, de traduction et de reproduction réservés pour tous pays.

Toute reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, est interdite sans autorisation préalable. Cette interdiction ne peut s'appliquer à l'utilisateur personne physique ayant acheté ce document pour l'impression dudit document à des fins strictement personnelles.

Pour toute utilisation collective, prière de nous contacter à sales-meetings@cigre.org

The greatest care has been taken by CIGRE to produce this digital technical brochure so as to provide you with full and reliable information.

However, CIGRE could in any case be held responsible for any damage resulting from any misuse of the information contained therein.

*Published by CIGRE
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tel : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99*

Copyright © 2000

All rights of circulation, translation and reproduction reserved for all countries.

No part of this publication may be produced or transmitted, in any form or by any means, without prior permission of the publisher. This measure will not apply in the case of printing off of this document by any individual having purchased it for personal purposes.

For any collective use, please contact us at sales-meetings@cigre.org