

COMMISSION  
ÉLECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

**CISPR 18-1**

Première édition  
First edition  
1982

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES  
INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE

---

**Caractéristiques des lignes et des équipements  
à haute tension relatives aux perturbations  
radioélectriques**

**Première partie:**  
Description des phénomènes

**Radio interference characteristics  
of overhead power lines  
and high-voltage equipment**

**Part 1:**  
Description of phenomena



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC CISPR 18-1: 1982

## Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI et du CISPR est constamment revu par la Commission et par le CISPR afin qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI\*
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement  
(Catalogue en ligne)\*
- **Bulletin de la CEI**  
Disponible à la fois au «site web» de la CEI\* et comme périodique imprimé

## Terminologie utilisée dans la présente publication

Seuls sont définis ici les termes spéciaux se rapportant à la présente publication.

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande.

Pour les termes concernant les perturbations radio-électriques, voir le chapitre 902.

## Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*;
- la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*;

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 60027 ou CEI 60617, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

\* «Site web» de la CEI <http://www.iec.ch>

## Revision of this publication

The technical content of IEC and CISPR publications is kept under constant review by the IEC and CISPR, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site\***
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates  
(On-line catalogue)\*
- **IEC Bulletin**  
Available both at the IEC web site\* and as a printed periodical

## Terminology used in this publication

Only special terms required for the purpose of this publication are defined herein.

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the IEV will be supplied on request.

For terms on radio interference, see Chapter 902.

## Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to:

- IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*;

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 60027 or IEC 60617, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

\* IEC web site <http://www.iec.ch>

NORME  
ÉLECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

**CISPR 18-1**

Première édition  
First edition  
1982

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES  
INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE

---

**Caractéristiques des lignes et des équipements  
à haute tension relatives aux perturbations  
radioélectriques**

**Première partie:**  
Description des phénomènes

**Radio interference characteristics  
of overhead power lines  
and high-voltage equipment**

**Part 1:**  
Description of phenomena

© CEI 1982 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse

---



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE **XA**

Pour prix, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                              | Pages |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| PRÉAMBULE . . . . .                                                                                                                                          | 4     |
| PRÉFACE . . . . .                                                                                                                                            | 4     |
| Articles                                                                                                                                                     |       |
| 1. Domaine d'application . . . . .                                                                                                                           | 8     |
| 2. Objet . . . . .                                                                                                                                           | 8     |
| 3. Introduction . . . . .                                                                                                                                    | 10    |
| 4. Perturbations radioélectriques dues aux lignes de transport . . . . .                                                                                     | 12    |
| 4.1 Aspects physiques des perturbations radioélectriques . . . . .                                                                                           | 12    |
| 4.2 Principales caractéristiques du champ perturbateur créé par l'effet de couronne sur les conducteurs . . . . .                                            | 18    |
| 5. Effet de couronne dû aux conducteurs . . . . .                                                                                                            | 26    |
| 5.1 Aspects physiques de l'effet de couronne dû aux conducteurs . . . . .                                                                                    | 26    |
| 5.2 Méthodes de recherche sur l'effet de couronne à l'aide de nasses et de lignes expérimentales . . . . .                                                   | 30    |
| 5.3 Méthodes de prédétermination . . . . .                                                                                                                   | 32    |
| 5.4 Catalogue des profils types . . . . .                                                                                                                    | 34    |
| 6. Niveaux perturbateurs dus aux isolateurs, aux accessoires et aux appareillages des postes (à l'exclusion des mauvais contacts) . . . . .                  | 38    |
| 6.1 Aspects physiques des sources de perturbations . . . . .                                                                                                 | 38    |
| 6.2 Corrélation entre la tension perturbatrice et le champ correspondant à partir d'une source isolée ou de sources réparties . . . . .                      | 42    |
| 6.3 Influence des conditions ambiantes . . . . .                                                                                                             | 50    |
| 7. Arcs dus aux mauvais contacts . . . . .                                                                                                                   | 50    |
| 7.1 Aspects physiques du phénomène des perturbations radioélectriques . . . . .                                                                              | 50    |
| 7.2 Exemples de sources de décharges de type éclateur . . . . .                                                                                              | 52    |
| 8. Effets spéciaux en courant continu . . . . .                                                                                                              | 54    |
| 8.1 Généralités . . . . .                                                                                                                                    | 54    |
| 8.2 Effet de couronne causé par les conducteurs . . . . .                                                                                                    | 56    |
| 8.3 Perturbations radioélectriques dues aux isolateurs, aux accessoires et aux appareillages des postes . . . . .                                            | 62    |
| 8.4 Effets de commutation des valves . . . . .                                                                                                               | 64    |
| Bibliographie et références . . . . .                                                                                                                        | 69    |
| ANNEXE A — Calcul du gradient de potentiel à la surface d'un conducteur de ligne aérienne . . . . .                                                          | 72    |
| ANNEXE B — Catalogue des profils du champ perturbateur dû à l'effet de couronne des conducteurs de certains types de lignes de transport d'énergie . . . . . | 78    |
| ANNEXE C — Résumé du catalogue des profils du champ perturbateur selon les recommandations du C.I.S.P.R. . . . .                                             | 94    |
| FIGURES . . . . .                                                                                                                                            | 96    |

## CONTENTS

|                                                                                                                           | Page |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD . . . . .                                                                                                        | 5    |
| PREFACE . . . . .                                                                                                         | 5    |
| Clause                                                                                                                    |      |
| 1. Scope . . . . .                                                                                                        | 9    |
| 2. Object . . . . .                                                                                                       | 9    |
| 3. Introduction . . . . .                                                                                                 | 11   |
| 4. Radio noise from power lines . . . . .                                                                                 | 13   |
| 4.1 Physical aspects of radio noise . . . . .                                                                             | 13   |
| 4.2 Main characteristics of the noise field resulting from conductor corona . . . . .                                     | 19   |
| 5. Effects of corona from conductors . . . . .                                                                            | 27   |
| 5.1 Physical aspects of corona from conductors . . . . .                                                                  | 27   |
| 5.2 Methods of investigation of corona by cages and test lines . . . . .                                                  | 31   |
| 5.3 Methods of predetermination . . . . .                                                                                 | 33   |
| 5.4 Catalogue of standard profiles . . . . .                                                                              | 35   |
| 6. Radio noise levels due to insulators, fittings and substation equipment (excluding bad contacts) . . . . .             | 39   |
| 6.1 Physical aspects of radio noise sources . . . . .                                                                     | 39   |
| 6.2 Correlation between radio noise voltage and the corresponding field for distributed and individual sources . . . . .  | 43   |
| 6.3 Influence of ambient conditions . . . . .                                                                             | 51   |
| 7. Sparking due to bad contacts . . . . .                                                                                 | 51   |
| 7.1 Physical aspects of the radio noise phenomenon . . . . .                                                              | 51   |
| 7.2 Examples of gap sources . . . . .                                                                                     | 53   |
| 8. Special d.c. effects . . . . .                                                                                         | 55   |
| 8.1 General . . . . .                                                                                                     | 55   |
| 8.2 Effects of corona from conductors . . . . .                                                                           | 57   |
| 8.3 Radio noise due to insulators, fittings and substation equipment . . . . .                                            | 63   |
| 8.4 Valve firing effects . . . . .                                                                                        | 65   |
| Bibliography and references . . . . .                                                                                     | 69   |
| APPENDIX A — Calculation of the voltage gradient at the surface of a conductor of an overhead line . . . . .              | 73   |
| APPENDIX B — Catalogue of profiles of radio noise field due to conductor corona for certain types of power line . . . . . | 79   |
| APPENDIX C — Summary of the catalogue of radio noise profiles according to the recommendations of the C.I.S.P.R. . . . .  | 94   |
| FIGURES . . . . .                                                                                                         | 96   |

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE  
COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

## CARACTÉRISTIQUES DES LIGNES ET DES ÉQUIPEMENTS À HAUTE TENSION RELATIVES AUX PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

### Première partie: Description des phénomènes

#### PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels du C.I.S.P.R. en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des sous-comités où sont représentés tous les Comités nationaux et les autres organisations membres du C.I.S.P.R. s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux et les autres organisations membres du C.I.S.P.R.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, le C.I.S.P.R. exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte des recommandations du C.I.S.P.R., dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre les recommandations du C.I.S.P.R. et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

#### PRÉFACE

La présente publication a été établie par le Sous-Comité C du C.I.S.P.R.: Perturbations dues aux lignes et aux équipements à haute tension et aux systèmes de traction électrique.

La position des articles et paragraphes de cette première partie de la publication est indiquée dans le tableau ci-après en utilisant les définitions de la Publication 10 du C.I.S.P.R.:

- Rec.: *Recommandation du C.I.S.P.R.* — Texte publié en vue de sa prise en considération et de sa mise en application par les organisations ou autorités appropriées.
- Rap.: *Rapport du C.I.S.P.R.* — Exposé donné pour information et indiquant les résultats d'études portant sur des sujets techniques concernant le C.I.S.P.R.

| Article<br>ou paragraphe | Position        | Document<br>C.I.S.P.R./C (Secrétariat)... | Notes:<br>approuvé |
|--------------------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 1.                       | } Rapport n° 54 | } 6A                                      | Dubrovnik, 1977    |
| 2.                       |                 |                                           |                    |
| 3.                       |                 | 7A                                        | Dubrovnik, 1977    |
| 4.1                      |                 | 19                                        | La Haye, 1979      |
| 4.2                      |                 | 20                                        | La Haye, 1979      |
| 5.1                      |                 | 21                                        | La Haye, 1979      |
| 5.2                      |                 | } 22                                      | La Haye, 1979      |
| 5.3                      |                 |                                           |                    |
| 5.4                      |                 | 23                                        | La Haye, 1979      |
| 6.1                      |                 | 8A                                        | Dubrovnik, 1977    |
| 6.2                      |                 | 9A                                        | Dubrovnik, 1977    |
| 6.3                      |                 | 24A                                       | Tokyo, 1980        |

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION  
INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE

**RADIO INTERFERENCE CHARACTERISTICS  
OF OVERHEAD POWER LINES  
AND HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT**

**Part 1: Description of phenomena**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the C.I.S.P.R. on technical matters, prepared by Sub-Committees on which all the National Committees and other Member Organizations of the C.I.S.P.R. having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees and other Member Organizations of the C.I.S.P.R. in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the C.I.S.P.R. expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the C.I.S.P.R. recommendations for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the C.I.S.P.R. recommendations and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This publication was prepared by C.I.S.P.R. Sub-Committee C: Interference from Overhead Power Lines, High-voltage Equipment and Electric Traction Systems.

The status of the clauses and sub-clauses of Part 1 of this publication is given in the following table using the definitions of C.I.S.P.R. Publication 10:

- Rec.: *C.I.S.P.R. Recommendation*. — A statement issued for consideration and implementation by the appropriate organizations or authorities.
- Rep.: *C.I.S.P.R. Report*. — A statement issued for information giving results of studies on technical matters relating to the C.I.S.P.R.

| Clause<br>or sub-clause | Status        | Document<br>C.I.S.P.R./C (Secretariat)... | Notes:<br>Approved |
|-------------------------|---------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 1.                      | Report No. 54 | 6A                                        | Dubrovnik, 1977    |
| 2.                      |               |                                           |                    |
| 3.                      |               |                                           |                    |
| 4.1                     |               | 19                                        | The Hague, 1979    |
| 4.2                     |               | 20                                        | The Hague, 1979    |
| 5.1                     |               | 21                                        | The Hague, 1979    |
| 5.2                     |               | 22                                        | The Hague, 1979    |
| 5.3                     |               |                                           |                    |
| 5.4                     |               |                                           |                    |
| 6.1                     |               | 8A                                        | Dubrovnik, 1977    |
| 6.2                     |               | 9A                                        | Dubrovnik, 1977    |
| 6.3                     |               | 24A                                       | Tokyo, 1980        |

| Article<br>ou paragraphe | Position        | Document<br>C.I.S.P.R./C (Secrétariat)... | Notes:<br>approuvé |
|--------------------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 7.1<br>7.2               | } Rapport n° 54 | } 10A                                     | Dubrovnik, 1977    |
| 8.1                      |                 |                                           |                    |
| 8.2                      |                 | } 28                                      | La Haye, 1979      |
| 8.3                      |                 |                                           |                    |
| 8.4                      |                 |                                           |                    |

Cette première partie, qui a la position de Rapport du C.I.S.P.R., constitue la première des trois parties d'une publication consacrée au bruit radioélectrique engendré par les installations de transport et de distribution de l'énergie électrique (lignes aériennes et postes).

Elle a pour objet de discuter les phénomènes physiques qui interviennent dans la production de champs électromagnétiques perturbateurs; elle indique également les principales propriétés de ces champs avec des valeurs numériques.

Les données techniques qui figurent dans cette première partie apporteront une aide utile aux projecteurs de lignes aériennes comme à toute personne intéressée au contrôle des caractéristiques relatives au bruit radioélectrique d'une ligne dans le but d'assurer une protection satisfaisante des signaux radioélectriques utiles. Ces données devraient faciliter l'emploi des recommandations qui feront l'objet des deuxième et troisième parties concernant:

- les méthodes de mesure et les procédures de détermination des limites;
- un code pratique pour réduire au minimum la production de bruit radioélectrique.

Ces deuxième et troisième parties sont en cours d'approbation et seront publiées dans un proche avenir.

| Clause<br>or sub-clause | Status          | Document<br>C.I.S.P.R. C (Secretariat)... | Notes:<br>Approved |
|-------------------------|-----------------|-------------------------------------------|--------------------|
| 7.1<br>7.2              | } Report No. 54 | } 10A                                     | Dubrovnik, 1977    |
| 8.1                     |                 |                                           |                    |
| 8.2                     |                 | } 28                                      | The Hague, 1979    |
| 8.3<br>8.4              |                 |                                           |                    |

This Part 1, having the status of a C.I.S.P.R. Report, forms the first of a three-part publication dealing with radio noise generated by electrical power transmission and distribution facilities (overhead lines and substations).

The purpose of Part 1 of this publication is to discuss the physical phenomena involved in the generation of electromagnetic noise fields; it also includes the main properties of such fields and their numerical values.

The technical data given in Part 1 will be a useful aid to overhead line designers and also to anyone concerned with checking the radio noise performance of a line to ensure satisfactory protection of wanted radio signals. The data should facilitate the use of the recommendations which will be given in Parts 2 and 3 dealing with:

- Methods of measurement and procedure for determining limits;
- Code of practice for minimizing the generation of radio noise.

Parts 2 and 3 will be published in the near future.

Withdrawn

# CARACTÉRISTIQUES DES LIGNES ET DES ÉQUIPEMENTS À HAUTE TENSION RELATIVES AUX PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES

## Première partie: Description des phénomènes

### 1. Domaine d'application

La présente publication s'applique aux perturbations radioélectriques dues aux lignes de transport aériennes et aux équipements à haute tension susceptibles d'affecter la réception radio, à l'exclusion des champs créés par les signaux à courants porteurs.

La gamme des fréquences couvertes est de 0,15 MHz à 300 MHz.

### 2. Objet

Cette publication a été rédigée dans le but de fournir des renseignements sur les nombreux facteurs impliqués dans la protection de la réception des émissions radiophoniques et de télévision contre les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension et aux équipements associés à ces lignes. Ces renseignements devraient être utiles chaque fois que l'on envisagera des moyens propres à éliminer ou à réduire les perturbations radioélectriques. Elle ne traite pas des perturbations dues aux champs créés par les signaux à courants porteurs.

Ces renseignements concernent essentiellement la génération et les caractéristiques des perturbations radioélectriques dues aux lignes à courant alternatif et aux équipements opérant à 1 kV et au-dessus, dans la gamme de fréquences de 0,15 MHz à 30 MHz (émissions AM) et de 30 MHz à 300 MHz (émissions FM et TV). Le problème particulier des claquages dus à de mauvais contacts est pris en considération. Nous donnons également quelques informations sur les perturbations dues aux lignes aériennes à courant continu, à propos desquelles l'effet de couronne et les conditions de perturbations sont différents de ceux des lignes transportant du courant alternatif. Nous ne parlons pas enfin des perturbations dues aux équipements collecteurs de courant des systèmes de traction aériens des chemins de fer.

Nous indiquons la procédure générale de détermination des limites du champ perturbateur radioélectrique créé par les lignes et équipements sous tension, ainsi que des valeurs caractéristiques qui serviront d'exemples, et des méthodes de mesure.

L'article sur les limites traite exclusivement des bandes de basse fréquence et de moyenne fréquence, étant donné que c'est uniquement dans ce domaine que l'expérience a permis de réunir un vaste ensemble d'observations probantes. Aucun exemple des limites de protection de la réception dans la bande de fréquences de 30 MHz à 300 MHz n'a été donné, du fait que les méthodes de mesure et quelques autres aspects des problèmes rencontrés à ce niveau ne sont pas encore totalement élucidés. Les mesures sur le terrain et l'expérience d'exploitation ont montré que les niveaux de perturbations dues aux lignes de transport, aux fréquences supérieures à 300 MHz, sont si faibles qu'il est tout à fait improbable que des perturbations puissent affecter la réception des émissions de télévision.

Les valeurs des limites, fournies à titre d'exemples, sont calculées de manière à garantir un degré de protection raisonnable à la réception des émissions à la périphérie des zones couvertes officiellement par les émetteurs opérant dans les bandes de fréquences AM, et ce dans les conditions les moins favorables qui puissent être normalement envisagées. Ces limites sont censées servir de guide au stade de projet de la ligne et de référence après la construction de cette dernière, ainsi que durant son existence utile.

# **RADIO INTERFERENCE CHARACTERISTICS OF OVERHEAD POWER LINES AND HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT**

## **Part 1: Description of phenomena**

### **1. Scope**

This publication applies to radio noise from overhead power lines and high-voltage equipment which may cause interference to radio reception, excluding the fields from power line carrier signals.

The frequency range covered is 0.15 MHz to 300 MHz.

### **2. Object**

This publication has been prepared in order to provide information on the many factors involved in protecting the reception of radio and television broadcasting from interference due to high voltage overhead power lines and associated equipment. The information given should be of assistance when means of avoiding or abating radio noise are being considered. The publication does not deal with interference due to the fields produced by power line carrier signals.

Information is mainly given on the generation and characteristics of radio noise from a.c. power lines and equipment operating at 1 kV and above, in the frequency ranges 0.15 MHz to 30 MHz (a.m. sound broadcasting) and 30 MHz to 300 MHz (f.m. sound broadcasting and television). The special aspect of spark discharges due to bad contacts is taken into account. Some information is also given on interference due to d.c. overhead lines for which corona and interference conditions are different from those of a.c. power lines. Interference due to the current collecting equipment of overhead railway traction systems is not included.

The general procedure for establishing the limits of the radio noise field from the power lines and equipment is given, together with typical values as examples, and methods of measurement.

The clause on limits concentrates on the low frequency and medium frequency bands as it is only in these that ample evidence, based on established practice, is available. No examples of limits to protect reception in the frequency band 30 MHz to 300 MHz have been given, as measuring methods and certain other aspects of the problems in this band have not yet been fully resolved. Site measurements and service experience have shown that levels of noise from power lines at frequencies higher than 300 MHz are so low that interference is unlikely to be caused to television reception.

The values of limits given as examples are calculated to provide a reasonable degree of protection to the reception of broadcasting at the edges of the recognized service areas of the appropriate transmitters in the a.m. radio frequency bands, in the least favourable conditions likely to be generally encountered. These limits are intended to provide guidance at the planning stage of the line and standards against which the performance of the line may be checked after construction and during its useful life.

Des recommandations sont formulées à propos de la conception, du tracé, de la construction et de l'entretien des lignes et des équipements aux fins de minimiser les perturbations, et nous espérons que cette publication apportera aussi une aide aux divers services de radiophonie confrontés aux problèmes des perturbations.

### 3. Introduction

- 3.1 Les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension, c'est-à-dire au-dessus de 1 kV, peuvent être produites sur une très large bande de fréquences par:

- a) les décharges par effet de couronne dans l'air à la surface des conducteurs et des accessoires;
- b) les décharges et claquages dans les régions à forte contrainte des isolateurs;
- c) les claquages au niveau de contacts lâches ou défectueux.

Les sources de *a)* et de *b)* se répartissent généralement tout au long de la ligne, alors que l'origine de *c)* est habituellement locale. Pour les lignes opérant au-dessus de 100 kV, la contrainte électrique dans l'air à la surface des conducteurs et des accessoires peut provoquer des décharges par effet de couronne. Les claquages au niveau des contacts défectueux ou sur les isolateurs brisés ou fissurés peuvent donner naissance à des sources localisées de perturbations radioélectriques. Les appareillages à haute tension des postes peuvent également engendrer des perturbations radioélectriques susceptibles de se propager le long des lignes aériennes.

- 3.2 Si le champ perturbateur au niveau des antennes utilisées pour la réception des émissions radiophoniques et de télévision est trop élevé, il peut provoquer une altération du son et, dans le cas de la télévision, également de l'image.

- 3.3 La production de perturbations radioélectriques est affectée par les conditions atmosphériques; par exemple, l'effet de couronne est plus susceptible de se manifester sur un conducteur par temps humide, à cause des gouttelettes d'eau qui adhèrent aux conducteurs, alors que dans les mêmes conditions des contacts défectueux risquent d'être rétablis par l'eau, ce qui a pour conséquence de faire cesser la production de perturbations. De ce fait, les contacts lâches ou défectueux sont plus susceptibles de claquer par temps sec. Des isolateurs secs et propres peuvent causer des perturbations par beau temps, mais des claquages prolongés à la surface des isolateurs sont plus susceptibles de se produire lorsque ceux-ci sont pollués, notamment par temps humide, par brouillard et gel.

- 3.4 Pour recevoir sans perturbations les signaux radiophoniques et de télévision, il importe qu'un rapport suffisamment élevé existe à l'entrée du récepteur entre le niveau des signaux utiles et celui des perturbations indésirables. Des perturbations peuvent donc être enregistrées lorsque le signal est faible et que les conditions atmosphériques prédisposent à la génération de perturbations radioélectriques.

- 3.5 Lorsqu'on cherche à identifier les perturbations radioélectriques, il ne faut jamais oublier que le champ local peut être créé par une ou des sources éloignées, étant donné qu'une perturbation peut se propager sur une distance de ligne considérable.

- 3.6 Le domaine d'application de cette publication couvre les causes, les mesures et les effets des perturbations radioélectriques, la conception des lignes eu égard à ces perturbations, les méthodes et les exemples de détermination des limites et de prévision des niveaux admissibles de perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension et aux équipements associés et affectant la réception des émissions radiophoniques et de télévision.

Recommendations are made on the design, routing, construction and maintenance of the lines and equipment to minimize interference and it is hoped that this publication will aid other radio services in the consideration of the problems of interference.

### 3. Introduction

#### 3.1 Radio noise from high voltage, that is to say above 1 kV, overhead power lines may be generated over a wide band of frequencies by

- a) corona discharges in the air at the surfaces of conductors and fittings;
- b) discharges and sparking at highly stressed areas of insulators;
- c) sparking at loose or imperfect contacts.

The sources of *a)* and *b)* are usually distributed along the length of the line, but source *c)* is usually local. For lines operating above about 100 kV, the electric stress in the air at the surface of conductors and fittings can cause corona discharges. Sparking at bad contacts or broken or cracked insulators can give rise to local sources of radio noise. High voltage apparatus in substations may also generate radio noise which can be propagated along the overhead lines.

#### 3.2 If the field strength of the radio noise at the aerials used for receiving broadcast sound and television services is too high, it can cause degradation of the sound output and, in the case of television, the picture also.

#### 3.3 The generation of radio noise is affected by weather conditions, for example, conductor corona is more likely to occur in wet weather because of the water droplets which form on the conductors whereas, under these conditions, bad contacts can become bridged with water and the generation of radio noise, by this process, ceases. Consequently, loose or imperfect contacts are more likely to spark in dry weather conditions. Dry, clean insulators may cause interference in fine weather, but prolonged sparking on the surfaces of insulators is more likely to occur when they are polluted, particularly during wet, foggy or icy conditions.

#### 3.4 For the interference-free reception of radio and television signals it is important that a sufficiently high ratio is available at the input to the receiver between the level of the wanted signal and the level of the unwanted radio noise. Interference may therefore be experienced when the signal strength is low and the weather conditions are conducive to the generation of radio noise.

#### 3.5 When investigating radio noise it should be borne in mind that the local field may be caused by a distant source or sources as the noise may be propagated along the line over a considerable distance.

#### 3.6 The scope of this publication includes the causes, measurement and effects of radio interference, design aspects in relation to this interference, methods and examples for establishing limits and prediction of tolerable levels of interference from high voltage overhead power lines and associated equipment to the reception of broadcast services.

## 4. Perturbations radioélectriques dues aux lignes de transport

### 4.1 Aspects physiques des perturbations radioélectriques

#### 4.1.1 Mécanisme de formation d'un champ perturbateur

Les décharges par effet de couronne sur les conducteurs, les isolateurs et les accessoires des lignes ou les claquages au niveau des contacts défectueux peuvent être à l'origine de perturbations radioélectriques, par le fait qu'ils injectent des impulsions de courant sur les conducteurs de la ligne. Ces impulsions se propagent le long des conducteurs des deux côtés du point d'injection. Les différentes composantes du spectre de fréquences des impulsions ont des effets variés.

Dans la gamme des fréquences de 0,15 MHz à quelques mégahertz, la perturbation est essentiellement le résultat de l'effet de propagation le long de la ligne. Le rayonnement électromagnétique direct des sources d'impulsions elles-mêmes ne contribue pas sensiblement à l'établissement du niveau perturbateur. Dans ce cas, la longueur d'onde est grande comparativement aux distances transversales entre conducteurs, et la ligne ne peut de ce fait constituer une source de rayonnement efficace. Toutefois, un champ électrique et un champ magnétique, associés à chaque composante spectrale de tension et de courant, se propagent le long de la ligne. Etant donné l'atténuation relativement faible de cette propagation, le champ perturbateur est déterminé par la superposition des effets de toutes les décharges disséminées sur de nombreux kilomètres de ligne de chaque côté du point de réception. Il convient de remarquer qu'au voisinage immédiat de la ligne, c'est le champ guidé qui prédomine, alors qu'un peu plus loin, c'est le champ rayonné. Le passage de l'un à l'autre n'est pas nettement tranché, et l'on ne connaît pas encore très bien le phénomène. Cet effet n'est pas important aux basses fréquences, mais se remarque aux fréquences moyennes.

Cependant, pour des composantes spectrales supérieures à environ 30 MHz, les longueurs d'onde sont voisines des distances transversales entre conducteurs de la ligne, ou même inférieures à celles-ci, et, dans ce cas, les effets perturbateurs peuvent surtout s'expliquer par la loi des rayonnements aériens appliquée à la source des perturbations, étant donné qu'il n'existe pas de propagation sensible le long de la ligne.

Il convient, toutefois, de bien observer que la valeur de 30 MHz ne représente pas une frontière très nette entre les deux mécanismes différents qui engendrent les champs perturbateurs.

##### 4.1.1.1 Propagation longitudinale

Dans le cas d'une ligne monofilaire montée au-dessus du sol, on observe la propagation simultanée d'une onde de tension  $U(t)$  et d'une onde de courant  $I(t)$ .

Pour une fréquence donnée, les deux grandeurs sont liées par l'équation  $U(\omega) = ZI(\omega)$  où  $Z$ , également fonction de  $\omega$ , est l'impédance d'onde de la ligne.

Durant la propagation, les ondes sont atténuées par un coefficient commun  $\alpha$  tel que:

$$\begin{aligned} U_x &= U_0 e^{-\alpha x} \\ I_x &= I_0 e^{-\alpha x} \end{aligned}$$

$U_0$  et  $I_0$  étant les amplitudes à la source et  $x$  la distance de propagation le long de la ligne.

#### 4. Radio noise from power lines

##### 4.1 *Physical aspects of radio noise*

##### 4.1.1 *Mechanism of formation of a noise field*

Corona discharges on conductors, insulators or line fittings or sparking at bad contacts can be the source of radio noise as they inject current pulses into the line conductors. These propagate along the conductors in both directions from the injection point. The various components of the frequency spectrum of these pulses have different effects.

In the frequency range 0.15 MHz to a few megahertz, the noise is largely the result of the effect of propagation along the line. Direct electromagnetic radiation from the pulse sources themselves does not materially contribute to the noise level. In this case the wavelength is long in comparison with the clearances of the conductors and thus the line is not an efficient radiator. However, associated with each spectral voltage and current component, an electric and a magnetic field propagates along the line. In view of the relatively low attenuation of this propagation, the noise field is determined by the aggregation of the effects of all the discharges spread over many kilometres along the line on either side of the reception point. It should be noted that close to the line the guided field predominates, whereas further from the line the radiated field predominates. The change-over is not abrupt and the phenomena is not well known. This effect is not important at low frequencies but is apparent at medium frequencies.

However, for spectral components above 30 MHz where the wavelengths are close to or less than the clearance of the line conductors, the noise effects can be largely explained by aerial radiation theory applied to the source of noise, as there is no material propagation along the line.

It should be appreciated, however, that 30 MHz does not represent a clear dividing line between the two different mechanisms producing noise fields.

##### 4.1.1.1 *Longitudinal propagation*

In the case of a single conductor line mounted above the ground there is a simultaneous propagation of a voltage wave  $U(t)$  and of a current wave  $I(t)$ .

For a given frequency the two quantities are related by the expression  $U(\omega) = ZI(\omega)$  where  $Z$ , also a function of  $\omega$ , is the surge impedance of the line.

During propagation the waves are attenuated by a common coefficient  $a$  where:

$$\begin{aligned} U_x &= U_0 e^{-ax} \\ I_x &= I_0 e^{-ax} \end{aligned}$$

$U_0$  and  $I_0$  are the amplitudes at the source and  $x$  is the distance of propagation along the line.

Dans le cas de lignes polyphasées, l'expérience montre que tout système de tensions ou de courants se déforme durant la propagation, c'est-à-dire que l'atténuation varie selon la distance de propagation et diffère pour chaque conducteur. La théorie de la propagation et les mesures réelles sur les lignes de transport ont montré que les tensions de perturbation sur les conducteurs de phase sont constituées par un certain nombre de «modes», chacun d'eux ayant des composantes sur chaque conducteur. L'un des modes se propage entre tous les conducteurs en parallèle et la terre. Les autres se propagent entre conducteurs, chaque mode étant affecté de sa propre atténuation de propagation. La théorie complète de la propagation modale est complexe et implique des équations matricielles échappant au domaine couvert par la présente publication. Nous invitons à ce propos le lecteur à consulter les publications de la CIGRÉ et d'autres organismes. Il importe de souligner que l'atténuation de la propagation du mode conducteur-terre est très forte, soit de 2 dB/km à 4 dB/km, alors que l'atténuation des divers modes conducteur-conducteur n'est qu'une petite fraction de 1 dB/km à la fréquence de 0,5 MHz.

#### 4.1.1.2 Champ électromagnétique

Les tensions et les courants se propageant le long de la ligne produisent un champ électromagnétique associé se propageant au voisinage de la ligne.

Il convient d'observer que, dans un espace libre, les champs électrique et magnétique associés aux ondes électromagnétiques rayonnées forment un système orthogonal entre eux et avec la direction de propagation. Le rapport de leurs amplitudes représente une valeur constante:

$$\frac{E(\text{V/m})}{H(\text{A/m})} = 377 \, \Omega$$

que l'on appelle impédance intrinsèque ou impédance dans le vide.

D'un autre côté, les champs au voisinage de la ligne sont liés aux tensions et courants de fréquences radiophoniques se propageant le long de la ligne, et leur rapport dépend de l'impédance d'onde de la ligne pour les divers modes. En outre, les directions des champs électrique et magnétique diffèrent de celles des champs rayonnés dans l'espace libre, étant donné qu'elles sont largement déterminées par la configuration géométrique des conducteurs de la ligne. D'ailleurs, la question se complique davantage du fait que les conditions du terrain affectent diversement les images du champ électrique et du champ magnétique reflétées par le sol.

Le champ électrique ( $E$ )<sub>y</sub> au niveau du sol d'une ligne monofilaire, qui est la composante verticale du champ électrique total, est donné par la formule approchée basée sur des hypothèses simplifiées:

$$E(y) = 120 I \frac{h}{h^2 + y^2}$$

où  $I$  représente le courant, en ampères, se propageant dans le conducteur,  $h$  est la hauteur au sol du conducteur, en mètres, et  $y$  la distance transversale également en mètres, mesurée entre un point directement au-dessous du conducteur et le point de mesure.

En outre, pour une ligne monofilaire infiniment longue, la zone d'induction, ou champ proche, a le même rapport simple entre les champs électrique et magnétique que le champ lointain créé par un émetteur radioélectrique, soit 377  $\Omega$ , et cela reste à peu près vrai pour toutes les valeurs de conductivité du sol.

Dans le cas d'une ligne polyphasée, le champ électrique est la somme vectorielle des champs individuels associés à chacun des conducteurs de phase. La question est traitée plus en détail à l'article 9 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2: Caractéristiques des lignes et des équipements à haute tension relatives aux perturbations radioélectriques, Deuxième partie: Méthodes de

In the case of multi-phase lines, experience shows that any system of voltages or currents becomes distorted in propagation, that is to say, the attenuation varies with the distance propagated and it differs for each conductor. Theory of propagation and actual measurements on power lines have shown that noise voltages on the phase conductors can be considered as being made up of a number of “modes”, each one having components on every conductor. One mode propagates between all conductors in parallel and earth. The others propagate between conductors. Each mode has its own different propagation attenuation. The complete theory of modal propagation is complex and involves matrix equations outside the scope of this publication. Reference is made here to CIGRÉ and other published works. It is important to note that the attenuation of the conductor-to-earth mode propagation is fairly high, that is to say 2 dB/km to 4 dB/km, while the attenuation of the various conductor-to-conductor modes is a small fraction of 1 dB/km at a frequency of 0.5 MHz.

#### 4.1.1.2 *Electromagnetic field*

The voltages and currents propagating along the line produce an associated propagating electromagnetic field near the line.

It should be noted here that in free space the electric and magnetic fields associated with radiated electromagnetic waves are at right angles both to each other and to the direction of propagation. The ratio of their amplitudes represents a constant value:

$$\frac{E(\text{V/m})}{H(\text{A/m})} = 377 \, \Omega$$

and is called the intrinsic impedance or impedance of free space.

On the other hand, the fields near the line are related to the radio frequency voltages and currents propagating along the line and their ratio depends on the surge impedance of the line for the various modes. Furthermore, the directions of the electric and magnetic fields differ from those for radiated fields in free space as they are largely determined by the geometrical arrangement of the line conductors. The matter is further complicated by the fact that soil conditions affect differently the mirror image in the ground of the electric and magnetic field respectively.

The electric field  $E(y)$  at ground level of a single conductor line, which is the vertical component of the total electric field, is given by the approximate formula based on simplified assumptions:

$$E(y) = 120 I \frac{h}{h^2 + y^2}$$

where  $I$  is the current, in amperes, propagating in the conductor,  $h$  is the height, in metres, of the conductor and  $y$  is the lateral distance, also in metres, from a point directly under the conductor to the measuring point.

Furthermore, for an infinitely long single conductor line, the induction zone, or near field, has the same simple ratio of electric and magnetic fields as the far field from a radio transmitter, that is to say  $377 \, \Omega$  and this is approximately true for all values of ground conductivity.

In the case of a multi-phase line the electric field is the vectorial sum of the individual fields associated with each phase conductor. A more comprehensive treatment, together with practical methods of assessing the electromagnetic field, is discussed in Clause 9 of C.I.S.P.R. Publication 18-2: Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and High

mesure et procédures de détermination des limites (à l'étude), qui contient également des méthodes pratiques d'évaluation des champs électromagnétiques. La formule indiquée plus haut est une version simplifiée valable pour  $D = 20$  m et  $f = 0,5$  MHz,  $D$  étant la distance, en mètres, entre l'appareil de mesure et le plus proche conducteur de la ligne, et  $f$  la fréquence de mesure. Pour des valeurs supérieures de  $D$  et de  $f$ , il sera nécessaire de prendre en considération tous les paramètres affectant la formule.

#### 4.1.1.3 Effet de superposition

Dans le cas de sources de perturbations uniformément réparties, le champ engendré par une longueur unité de conducteur de phase peut être exprimé en n'importe quel point de la ligne en tant que fonction de la distance longitudinale  $x$  et de la distance transversale  $y$ , soit  $E(y, x)$ . A une distance transversale  $y$  donnée,

$$E(y, x) = E_0(y) e^{-ax}$$

Les impulsions aléatoires sur une longue ligne comportant des sources de perturbations uniformément réparties s'associent pour former le champ total. Leur manière de s'associer n'est pas unanimement admise. Certains chercheurs estiment qu'elles se combinent selon un mode quadratique:

$$E^2(y) = 2 \int_0^\infty E_0^2(y) e^{-2ax} dx$$

ou

$$E(y) = \frac{E_0}{\sqrt{a}}$$

D'autres chercheurs prétendent que si l'on utilise un détecteur de quasi-crête pour mesurer le champ, on s'aperçoit que les impulsions individuelles ne s'ajoutent pas les unes aux autres. Enfin, un troisième groupe de chercheurs aurait enregistré des résultats s'insérant entre ces deux extrêmes. Ce désaccord n'a d'importance que pour les méthodes de prédétermination analytiques, et les résultats obtenus par les différentes techniques ne varient que de 1 dB ou 2 dB.

Dans le cas de lignes polyphasées, les calculs suivent le même principe, mais se compliquent en raison de la présence de plusieurs modes, chacun de ceux-ci présentant un coefficient d'atténuation différent. Une étude plus approfondie, accompagnée d'exemples de calculs, est reprise à l'article 6.

#### 4.1.2 Définition du bruit

La valeur instantanée du bruit varie continuellement et de manière aléatoire, mais sa puissance moyenne sur une période suffisamment longue, par exemple 1 s, donne une grandeur aléatoire stationnaire qui peut être mesurée. Une autre grandeur se prêtant à la mesure est la valeur de crête ou la valeur de crête pondérée du niveau de bruit.

Un mesureur de bruit est essentiellement constitué par un voltmètre sensible et sélectif doté d'une bande passante déterminée, et accordable. Lorsqu'il est raccordé à une antenne ou à un cadre, et correctement étalonné, il peut mesurer la composante électrique ou la composante magnétique d'un champ perturbateur.

Selon la conception de l'appareil de mesure, le niveau de bruit peut être mesuré en valeur efficace, valeur de crête ou valeur de quasi-crête. La valeur efficace donne une définition énergétique du bruit. De nombreux bruits émanant d'équipements électriques, ainsi que les bruits dus à l'effet de couronne sur les lignes de transport, sont constitués par une succession de courtes impulsions, dont la fréquence de répétition est plus ou moins stable. Dans de tels cas, l'effet gênant du bruit est indiqué de manière plus proche de la réalité par un détecteur

Voltage Equipment, Part 2: Methods of Measurement and Procedure for Determining Limits (under consideration). The formula given above is a simplified version accurate for  $D = 20$  m and  $f = 0.5$  MHz where  $D$  is the distance, in metres, between the measuring set aerial and the nearest conductor of the line and  $f$  is the measurement frequency. For a wider range of  $D$  and  $f$  it would be necessary to take into account all the parameters affecting the formula.

#### 4.1.1.3 Aggregation effect

In the case of uniformly distributed noise sources, the field generated by a unit length of a phase conductor can be expressed at any point along the line as a function of the longitudinal distance  $x$  and the lateral distance  $y$ , that is to say,  $E(y, x)$ . At a given lateral distance of  $y$ ,

$$E(y, x) = E_0(y)e^{-ax}$$

The random pulses on a long line with uniformly distributed noise sources combine together to form the total field. The manner in which they combine is not unanimously agreed upon. Some investigators consider that they combine quadratically:

$$E^2(y) = 2 \int_0^\infty E_0^2(y) e^{-2ax} dx$$

or

$$E(y) = \frac{E_0}{\sqrt{a}}$$

Other investigators believe that, if a quasi-peak detector is used to measure the field strength, the individual pulses do not add and others have obtained results between the two extremes. This disagreement is only important in analytical prediction methods, the results obtained by the different methods vary by only 1 dB or 2 dB.

In the case of multi-phase lines, the calculation follows the same principle but is complicated by the presence of several modes, each mode having a different attenuation coefficient. A more detailed discussion, with examples of calculation, is given in Clause 6.

#### 4.1.2 Definition of noise

The instantaneous value of the noise varies continuously and in a random manner, but its average power level over a sufficiently long period, for example, 1 s, gives a stationary random quantity which can be measured. Another quantity suitable for measurement is the peak or some weighted peak value of the noise level.

A noise measuring set is basically a tuneable selective and sensitive voltmeter with a specified pass-band. When connected to a suitable rod or loop aerial and properly calibrated, it can measure the electric or magnetic component of the noise field.

Depending on the design of the measuring apparatus, the noise level can be measured in terms of r.m.s., peak or quasi-peak values. The r.m.s. value defines the noise in terms of energy. Many types of noise from electrical equipment, as well as noise due to power-line corona, consist of a succession of short pulses with approximately stable repetition frequencies. In such cases the nuisance effect of the noise can be realistically indicated by a quasi-peak type of voltmeter rather than by the r.m.s. type. The quasi-peak value is obtained from a circuit which

de valeur de quasi-crête que par un mesureur de la valeur efficace. La valeur de quasi-crête, fournie par un circuit comprenant une diode et un condensateur, est caractérisée par une constante de temps de charge relativement court et une constante de temps de décharge relativement long. La tension du condensateur fluctue à une valeur légèrement inférieure à la valeur de crête et dépend de la fréquence de répétition, ce qui veut dire qu'une certaine pondération est incluse dans la réponse. Ce principe a été introduit dans les appareils de mesure du C.I.S.P.R., à propos desquels la Publication 16 du C.I.S.P.R. fournit des renseignements détaillés. Le niveau de bruit est donc défini par la valeur mesurée par un tel instrument et s'exprime en microvolts ou en microvolts par mètre. Si nous utilisons le rapport champ électrique/champ magnétique,  $E/H = 377$ , les valeurs mesurées peuvent s'exprimer conventionnellement en microvolts par mètre même avec des appareils utilisant un cadre répondant au champ magnétique.

#### 4.1.3 Influence des paramètres extérieurs

Pour déterminer le gradient d'apparition de l'effet de couronne  $g_c$  sur un conducteur cylindrique à surface lisse, la formule de Peek est souvent utilisée.

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

Pour les tensions alternatives,  $g_c$  est la valeur de crête du gradient,  $r$  est le rayon du conducteur en centimètres,  $\delta = \frac{0,294 p}{273 + t}$  est la densité relative de l'air ( $\delta = 1$  pour  $p = 1013$  mbar et  $t = 25$  °C).

Toutefois, les conditions pratiques des lignes ne correspondent pas à ces hypothèses idéalisées. Le toronnage des conducteurs, les imperfections et les irrégularités de leurs surfaces provoquent des élévations locales du champ électrique et, par conséquent, une tension d'apparition de l'effet de couronne plus basse que celle qui se dégage de cette formule. Ce qui signifie souvent que le gradient critique d'apparition des perturbations radioélectriques, par mauvais temps, n'a environ que la moitié de la valeur qui lui est attribuée par la formule de Peek.

Ajoutons que, d'une manière générale, les conditions atmosphériques jouent un rôle important. Lorsqu'il pleut, qu'il y a du brouillard, de la neige ou de la rosée, des gouttes d'eau adhèrent à la surface du conducteur et, lorsque la température baisse, de la glace peut s'y former, ce qui réduit encore la tension d'apparition de l'effet de couronne et augmente le niveau de bruit, ainsi que nous l'expliquons aux articles 5 et 6.

En ce qui concerne les mauvais contacts et la production de petites étincelles, l'effet de la pluie et de l'humidité est de shunter les intervalles d'air soit au moyen de gouttelettes d'eau, soit par des couches d'humidité, ce qui diminue le niveau de ce type de perturbation.

La pluie et l'humidité affectent donc les perturbations dues à l'effet de couronne sur les conducteurs de manière exactement opposée à ce qui se produit dans le cas de mauvais contacts. Autrement dit, lorsque des interférences sont enregistrées par temps de pluie ou de brouillard, on peut en conclure qu'elles sont provoquées par l'effet de couronne. D'un autre côté, lorsque des interférences sont notées par beau temps et disparaissent ou s'atténuent par temps de pluie ou de brouillard, on en déduira qu'il s'agit de contacts défectueux.

#### 4.2 Principales caractéristiques du champ perturbateur créé par l'effet de couronne sur les conducteurs

Pour rationaliser les mesures des perturbations émanant d'une ligne de transport et faciliter les comparaisons entre différentes lignes, il est souhaitable de normaliser les conditions dans lesquelles les mesures doivent être effectuées.

includes a diode and a capacitor with relatively short charge and long discharge time constants. The voltage on the capacitor floats at a value somewhat below the peak value and depends on the repetition rate, that is to say a weighting feature is included in the response. This principle is adopted in the C.I.S.P.R. measuring instruments, details of which are given in C.I.S.P.R. Publication 16. The noise level is thus defined by the value measured by such an instrument expressed in microvolts or microvolts per metre. Using the ratio of the electric to magnetic fields,  $E/H = 377$ , the measured values can be expressed by convention in microvolts per metre even for instruments using a loop aerial responding to the magnetic field.

#### 4.1.3 Influence of external parameters

To determine the corona inception gradient  $g_c$  of a cylindrical conductor with smooth surface, Peek's formula is often used:

$$g_c \text{ (kV/cm)} = 31 \delta \left( 1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right)$$

For a.c. voltages,  $g_c$  is the peak value of the gradient,  $r$  is the radius of the conductor in centimetres,  $\delta = \frac{0.294 p}{273 + t}$  is the relative air density ( $\delta = 1$  for  $p = 1013$  mbar and  $t = 25$  °C).

However, practical conditions on overhead lines do not agree with these idealized assumptions. Stranding of the conductors, surface imperfections and irregularities lead to local enhancements of the electric field and consequently to a lower corona inception voltage than is obtained from the above formula. This often means that the critical gradient for initiating radio noise has, under foul weather conditions, about half the value given by Peek's formula.

Atmospheric conditions likewise play an important part. In conditions of rain, fog, snow or dew, drops of water form on the surface of the conductor and at low temperatures ice can form. This further reduces the corona inception voltage and increases the noise level as shown in Clauses 5 and 6.

With regard to bad contacts and the production of small sparks, the effect of rain and humidity is to bridge the relevant gaps either by water droplets or by humid layers, thus reducing the level of this type of noise.

Rain and humidity thus affect corona noise from conductors in a way opposite to that due to bad contacts. Hence when interference is observed during rain or fog, it can be concluded that it is caused by corona. On the other hand, when interference is observed during fine weather and disappears or decreases during rain or fog, it is due to bad contacts.

#### 4.2 Main characteristics of the noise field resulting from conductor corona

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.

Les principales caractéristiques du champ perturbateur sont le spectre de fréquence, le profil latéral et la variation statistique du bruit en fonction des conditions atmosphériques. En première approche, il est supposé que ces caractéristiques sont indépendantes les unes des autres.

#### 4.2.1 *Spectre*

Le spectre est la variation du niveau perturbateur mesuré en un point donné au voisinage d'une ligne, en fonction de la fréquence de mesure. Deux phénomènes sont impliqués:

##### *a) les impulsions de courant*

Les impulsions de courant engendrées par les aigrettes dans les conducteurs présentent un spectre particulier qui dépend de leur forme. Pour ce type d'aigrettes, le niveau perturbateur mesuré baisse avec la fréquence. Dans la gamme des fréquences radiophoniques, où les aigrettes positives ont un effet prépondérant, le spectre est indépendant du diamètre du conducteur.

##### *b) l'atténuation*

L'atténuation du bruit se propageant le long de la ligne augmente avec la fréquence. Cet effet modifie le spectre en réduisant encore le niveau de bruit au fur et à mesure qu'augmente la fréquence.

Les spectres mesurés sont souvent assez irréguliers, à cause des ondes stationnaires dues à des discontinuités de la ligne: changements de cap, pylônes d'ancrage, ou brusques variations de la configuration du terrain. En outre, la production de bruit peut varier durant la prise des mesures.

Pour faciliter les prévisions, des «spectres types» sont utilisés. L'expérience a montré que tous les spectres peuvent être regroupés en deux familles, l'une intéressant les lignes en «nappe horizontale», l'autre les lignes à deux termes et à configuration «triangle» ou «verticale». La différence entre ces deux familles provient du phénomène cité au point *b)* ci-dessus, la propagation différant légèrement selon le type de ligne. Toutefois, cette différence n'affectant que faiblement la précision des calculs, nous n'indiquons qu'un spectre type en valeurs relatives, le point de référence étant pris à 0,5 MHz.

La formule ci-après représente bien un tel spectre:

$$\Delta E \text{ (dB)} = 5 [1 - 2 (\lg 10f)^2]$$

où  $\Delta E$  (dB) est la variation du niveau de bruit radiophonique à la fréquence de référence de 0,5 MHz et  $f$  la fréquence exprimée en mégahertz dans la gamme de 0,15 MHz à 4 MHz.

Il convient d'observer que d'autres chercheurs ont élaboré des formules différentes donnant des résultats similaires.

Ajoutons qu'aux fréquences plus élevées, les spectres de perturbations sont plus difficiles à déterminer.

#### 4.2.2 *Le profil*

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

Le profil est déterminé à une hauteur de 2 m au-dessus du sol, depuis l'aplomb d'un conducteur extérieur, sur une distance ne dépassant pas 200 m. Au-delà, l'effet perturbateur des lignes s'avère généralement négligeable. La fréquence de référence des mesures C.I.S.P.R. est de 0,5 MHz.

The main characteristics of the noise field are the frequency spectrum, the lateral profile and the statistical variation of the noise with weather conditions. It is assumed as a first approximation that these characteristics are independent of each other.

#### 4.2.1 *Spectrum*

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

##### a) *Current pulses*

The current pulses generated in the conductors by the discharges show a particular spectrum dependent on the pulse shape. For this type of discharge the measured noise level falls with frequency. In the range of broadcasting frequencies, where the positive discharges have a predominant effect, the spectrum is independent of the conductor diameter.

##### b) *Attenuation*

The attenuation of noise propagating along the line increases with frequency. This effect modifies the spectrum by reducing still further the noise level with increase in frequency.

The measured spectra are often fairly irregular because of the standing waves caused by discontinuities such as angle or terminal towers or abrupt ground level variations. In addition, the noise generation might vary whilst the measurements are being made.

To aid prediction calculations, “standard spectra” are used. Experience has shown that all spectra can be put into two families, one applying to horizontal conductor configurations, the other to double-circuit and triangular or vertical conductor configurations. The difference between these two families originates from the phenomenon mentioned in Item *b)* above, the propagation differing slightly according to the type of line. However, as the difference is not material in relation to the accuracy of such calculations, only one standard spectrum is given in relative values, the reference point being taken at 0.5 MHz.

The following formula is a good representation of this spectrum:

$$\Delta E \text{ (dB)} = 5 [1 - 2 (\lg 10f)^2]$$

where  $\Delta E$  (dB) is the variation of the radio noise level from the reference frequency of 0.5 MHz and  $f$  is the frequency expressed in megahertz over the range 0.15 MHz to 4 MHz.

It should be noted that other investigators have developed different formulae which give similar results.

At higher frequencies the noise spectra are more difficult to predict.

#### 4.2.2 *Profile*

The variation of the noise fields as a function of distance from the line is characterized by a decrease depending on the frequency. 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 2 m above the ground from a point immediately beneath an outside conductor over a distance not exceeding 200 m. Beyond this distance the noise level of the lines generally becomes negligible. The reference frequency for C.I.S.P.R. measurements is 0.5 MHz.

Les profils mesurés sont souvent irréguliers, tant à cause des fluctuations continues du niveau du champ perturbateur au cours d'une série de mesures que des irrégularités rencontrées: pylônes d'angle ou d'arrêt et inégalités du terrain.

De nombreuses mesures prises sous une cinquantaine de lignes différentes ont fourni de bonnes connaissances expérimentales de ces profils, d'ailleurs confirmées par les calculs théoriques.

Une analyse précise a permis de tracer des profils en fonction des classes de tension des lignes et de leur configuration jusqu'à des distances d'environ 100 m, au-delà desquelles les bruits sont normalement si faibles qu'il n'est plus possible de procéder à des mesures fiables.

Au voisinage des lignes de transport, il existe deux champs perturbateurs: le champ direct ou guidé et le champ rayonné. Ce dernier est le résultat des irrégularités de la ligne (flèches des conducteurs, changements de cap de la ligne) et de la conductivité finie du sol. Le champ direct diminue en fonction du carré de la distance, le champ rayonné directement en fonction de la distance. Au voisinage de la ligne, c'est le champ direct qui prédomine, alors que plus loin c'est le champ rayonné. A la lumière de certains concepts théoriques, on peut s'attendre que les deux champs soient identiques à une distance proche de  $300/2\pi f$  mètres,  $f$  s'entendant en mégahertz. En réalité, l'atténuation transversale proche de la ligne s'estompe moins rapidement que le carré de la distance. Le facteur d'atténuation  $k$  pour les fréquences allant de 0,5 MHz à 1,6 MHz, par exemple, est de 1,65 (voir annexe C). Au voisinage de la ligne, l'atténuation transversale peut être définie comme suit:

$$E = E_0 + 20k \lg D_0/D$$

où:

$E$  = niveau de perturbation, en décibels (1  $\mu$ V/m) à la distance  $D$

$k$  = facteur d'atténuation

$E_0$  = niveau de perturbation, en décibels (1  $\mu$ V/m) à la distance de référence  $D_0$

Plus loin encore de la ligne, le facteur d'atténuation s'abaisse graduellement pour aboutir à la valeur de l'unité. Certains chercheurs estiment que les deux champs sont égaux aux environs de  $300/2\pi f$  mètres, ainsi que nous l'avons signalé plus haut. L'équation à la fin du paragraphe 10.3.13 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2, par exemple, indique le profil dans la bande de 0,4 MHz à 1,6 MHz, en supposant que la distance à la ligne soit de 100 m.

Les profils types sont tracés selon une échelle logarithmique de distance, en se référant à une distance directe au conducteur de 20 m. Cette présentation met en évidence la loi physique de décroissance du champ perturbateur en fonction de la distance au conducteur le plus proche. Les profils peuvent également être présentés en fonction de la distance transversale. Cette présentation est utile pour prévoir la largeur du couloir perturbé.

#### 4.2.3 Distribution statistique

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

The measured profiles are often irregular both because of the continual fluctuations of the radio noise during a series of measurements and because of irregularities such as angle or terminal towers and terrain variations.

Numerous measurements carried out under some fifty different lines have provided a good experimental knowledge of these profiles, which has been confirmed by theoretical calculations.

An accurate analysis has enabled profiles to be plotted as functions of classes of line voltage and configuration up to distances of about 100 m, beyond which the noise level is normally so low that reliable measurements are not practicable.

In the vicinity of a power line there are two noise fields, the direct or guided field and the radiation field. The latter is a result of irregularities in the line such as conductor sag and changes in line direction and imperfect ground conductivity. The direct field decreases as the square of the distance, the radiation field decreases directly as the distance. Close to the line the direct field predominates, whereas at greater distances the radiation field predominates. Based on certain aerial concepts, the two fields may be expected to be equal at a distance of around  $300/2\pi f$  metres where  $f$  is in megahertz. In actual fact, the lateral attenuation close to the line falls off less rapidly than the square of the distance. The attenuation factor  $k$  for frequencies between 0.5 MHz and 1.6 MHz, for example, is 1.65 (see Appendix C). Close to the line the lateral attenuation may be described by:

$$E = E_0 + 20k \lg D_0/D$$

where:

$E$  = noise level, in decibels (1  $\mu$ V/m) at distance  $D$

$k$  = attenuation factor

$E_0$  = noise level, in decibels (1  $\mu$ V/m) at the reference distance  $D_0$

Further from the line the attenuation factor gradually decreases until it reaches a value of unity. Some investigators consider that the two fields are equal at around  $300/2\pi f$  metres as discussed above. The equation at the end of Sub-clause 10.3.13 of C.I.S.P.R. Publication 18-2, for example, shows the profile in the 0.4 MHz to 1.6 MHz band assuming that the distance is 100 m from the line.

Standard profiles are shown with a logarithmic scale of distance referring to a direct distance to the conductor of 20 m. This presentation shows the physical law of the noise field decreasing as a function of the distance from the nearest conductor. The profiles can also be presented as a function of the lateral distance. This presentation is useful for predicting the width of the corridor subject to interference.

#### 4.2.3 Statistical distribution

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

Les principales causes de fluctuations des niveaux perturbateurs enregistrés sont les suivantes:

- la nature aléatoire du phénomène;
- les variations des conditions météorologiques, tant au point de mesure qu'au long des quelques dizaines de kilomètres de ligne contribuant à la perturbation locale;
- les modifications de l'état de surface des conducteurs, qui n'est pas seulement affecté par les conditions météorologiques, pluie et gel, mais aussi par les dépôts de poussières, d'insectes et d'autres particules.

Ces causes sont très difficiles à mesurer systématiquement. D'ailleurs, même des variations de la tension appliquée à la ligne provoquent des fluctuations du niveau perturbateur; cette cause cependant peut être mesurée.

La distribution des niveaux perturbateurs dépend également du type de climat; un climat très humide, un climat pluvieux ou un climat impliquant d'abondantes chutes de neige ou du gel élèveront le pourcentage des niveaux élevés, alors qu'un climat très sec l'abaissera.

Les courbes des figures 3 à 6, pages 98 à 101, dans un climat tempéré, donnent des exemples d'une distribution tous temps, d'une distribution temps sec et d'une distribution moyenne fortes pluies. On pourra observer que la courbe d'ensemble est plus ou moins une combinaison de deux ou trois distributions de Gauss.

A propos de la distribution tous temps, il est habituel de dégager plusieurs niveaux caractéristiques:

- *Le niveau 99%* est pratiquement le niveau le plus élevé possible pour une ligne, à un point donné.
- *Le niveau moyen fortes pluies* est le niveau le plus stable et le plus reproductible, et la chute de pluie est considérée comme forte lorsque le débit atteint ou dépasse 0,6 mm à l'heure. C'est pour cette raison que le niveau moyen fortes pluies est souvent pris comme référence pour le calcul de la perturbation radioélectrique. Pratiquement, le niveau moyen fortes pluies est un niveau à 95%, et est inférieur d'environ 5 dB au niveau 99%.
- *Le niveau moyen beau temps* correspond à l'état conducteurs secs. Il est important à des fins pratiques, mais, en raison de la dispersion très étendue, il est nécessaire de réunir un plus grand nombre de mesures tout au long de l'année pour dégager des résultats fiables. Heureusement, les mesures sont beaucoup plus facilement prises par beau temps que sous fortes pluies.
- *Le niveau à 50%* est fourni par la courbe cumulée tous temps. Le niveau 50% ne doit pas être confondu avec le niveau moyen beau temps défini ci-dessus, étant donné qu'il se dégage non seulement des conditions de temps sec, mais également de toute la gamme des conditions climatiques régnant tout au long des enregistrements prolongés. En outre, les niveaux moyen beau temps et 50% dépendent tous deux fortement de l'état de surface des conducteurs; ces niveaux peuvent varier dans une fourchette de plus de 10 dB selon que les conducteurs sont ou non pollués, gras, etc. Certains experts considèrent que le niveau à 50% ne variera pas de plus de 10 dB sur une période relativement longue, par exemple d'un mois ou même d'un an, bien que certaines mesures particulières puissent varier de plus de 10 dB.
- *Le niveau à 80%* est fourni par la courbe de distribution tous temps. Il est retenu en tant que valeur caractéristique et sert de base pour les limites. Le niveau 80%, intermédiaire entre le niveau beau temps et le niveau moyen fortes pluies, est probablement moins sujet aux incertitudes que le niveau à 50%, et c'est cette raison qui l'a fait choisir comme «niveau caractéristique». L'examen de plusieurs courbes cumulées montre que la différence entre les niveaux 95% et 80% se situe entre 5 dB et 12 dB. Ainsi que nous l'avons signalé au paragraphe 4.2.2, il faut se souvenir qu'au-delà de 100 m à 200 m environ, des mesures fiables ne peuvent pratiquement plus être faites.

The most important causes of fluctuations in recorded radio noise level are:

- the random nature of the phenomenon;
- variations of the meteorological conditions, both at the measuring point and along the few tens of kilometres of the line which contribute to the local interference;
- changes in the surface state of the conductors, which is affected not only by weather conditions such as rain and frost, but also by deposits of dust, insects and other particles.

These causes are very difficult to measure systematically. Even variations of the applied line voltage result in fluctuations in the radio noise level, but this cause is possible to measure.

The distribution of the noise 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.

The curves in Figures 3 to 6, pages 98 to 101, in a temperate climate show examples of an all weather distribution survey, together with a dry weather distribution and an average heavy rain distribution. It can be seen that the overall curve is more or less a combination of two or three Gaussian distributions.

On such an all weather distribution, it is customary to define several characteristic levels:

- *The 99% level* is practically the highest possible level of the line, at a given point.
- *The average heavy-rain level* is the most stable and reproducible and the rainfall is considered to be heavy when it reaches 0.6 mm or more per hour. For this reason the average heavy-rain level is often chosen as the reference level for the calculation of radio noise. Practically, the average heavy-rain level is a 95% level and is about 5 dB lower than the 99% level.
- *The average fair weather level*, corresponding to dry conductor conditions. This is important for practical purposes, but, due to the larger dispersion, a greater number of measurements throughout the year is necessary to obtain reliable results. Fortunately, measurements are more easily made in average fair weather than in average heavy rain.
- *The 50% level*, read on the all-weather cumulative curve. This 50% level must not be confused with the above defined average fair weather level, since it arises not only from dry weather conditions, but also from the whole range of climatic conditions prevailing during the long term recordings. Both the average fair weather and 50% levels are furthermore strongly dependent on the surface state of the conductors; these levels can vary over a range of more than 10 dB according to whether or not the conductors are polluted, greasy, etc. Some experts consider that the 50% level will not vary by more than 10 dB over a relatively long period, say a month or a year, even though individual readings may vary by more than 10 dB.
- *The 80% level*, read on the all-weather distribution curve, is chosen as the characteristic value, to be used as the basis for limits. This 80% level, intermediate between the fair weather level and the average heavy-rain level, is probably less subject to uncertainties than the 50% level and for this reason is preferred as the “characteristic level”. A survey of numerous cumulative curves shows that the difference between the 95% and 80% levels lies between 5 dB and 12 dB. As mentioned in Sub-clause 4.2.2, it should be remembered that beyond about 100 m to 200 m reliable measurements are not normally practicable.

Les indications générales qui précèdent sont illustrées aux figures 3 à 6, pages 98 à 101, concernant les lignes de 400 kV à 750 kV et s'appliquent pour les lignes où la source perturbatrice principale est due à l'effet de couronne.

## 5. Effet de couronne dû aux conducteurs

### 5.1 Aspects physiques de l'effet de couronne dû aux conducteurs

#### 5.1.1 Généralités

La génération de perturbations radioélectriques par effet de couronne sur les conducteurs se traduit par une décharge électrique, ou aigrette, se produisant à la surface ou au voisinage de la surface d'un conducteur. L'effet de couronne est «une décharge accompagnée d'une légère luminosité produite au voisinage d'un conducteur et limitée à la région enveloppant le conducteur où le champ électrique dépasse une certaine valeur». De nombreux aspects des décharges par effet de couronne sur les lignes sont inconnus ou non définis; toutefois, le processus physique de base est la multiplication des électrons, c'est-à-dire la formation de l'avalanche. C'est au voisinage du conducteur de la ligne que le gradient électrique est le plus élevé et, si ce gradient ou la contrainte électrique est suffisamment élevé, tout électron présent dans l'air environnant le conducteur ionisera les molécules de gaz, et les électrons produits par cette ionisation provoqueront une avalanche. Si, par un processus quelconque, un nouvel électron est formé dans ce gradient émanant de l'avalanche électronique primitive, une nouvelle avalanche sera formée par ce processus secondaire, et il y aura développement d'aigrette.

Dans le cas des conducteurs des lignes de transport, on estime que le processus secondaire important est l'éjection d'électrons hors des molécules de gaz sous l'effet d'une lumière ultraviolette à haute énergie (photo-ionisation) engendrée par l'avalanche primitive. De nombreux chercheurs ont constaté que le niveau de perturbations radioélectriques, engendré lorsque le conducteur est positif, est nettement plus élevé que lorsque le conducteur est négatif. Dans le cas d'un conducteur positif de ligne aérienne, la cathode est si éloignée que l'émission cathodique est négligeable et le processus secondaire intervenant dans ce cas est la photo-ionisation du gaz.

Lorsque des streamers se forment sur un point du conducteur, deux champs d'impulsion sont en présence. Près du streamer, un champ localisé se forme, et le long de la ligne se forme le champ direct dû aux impulsions se déplaçant le long de la ligne. Lors de la conception des lignes à très haute tension, seul le champ direct est retenu comme important, et les mesures les plus utiles sont prises à une certaine distance des sièges des streamers sur le conducteur de la ligne.

Pour une étude plus approfondie des aspects théorique de l'effet de couronne sur les conducteurs [1, 2]\*.

#### 5.1.2 Facteurs concourant à la formation d'une aigrette

La formation d'une aigrette à la surface d'un conducteur dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels nous pouvons citer:

- a) Le gradient théorique de tension de surface du conducteur, qui de son côté dépend:
  - 1) de la tension du réseau;
  - 2) du diamètre du conducteur;
  - 3) de l'espace séparant le conducteur de la terre et des autres conducteurs de phase;
  - 4) du nombre de conducteurs par phase ou par faisceau;

\* Les chiffres entre crochets se rapportent à la «Bibliographie et références», pages 69 à 71.

The above generalized guide lines are illustrated in Figures 3 to 6, pages 98 to 101, related to 400 kV to 750 kV lines, and are valid for lines where the predominant noise source is conductor corona.

## 5. Effects of corona from conductors

### 5.1 *Physical aspects of corona from conductors*

#### 5.1.1 *General*

The generation of radio noise by conductor corona is by means of the electrical discharge, usually called corona, occurring at or near the conductor surface. Corona is defined as “a discharge with slight luminosity produced in the neighbourhood of a conductor and limited to the region surrounding the conductor in which the electric field exceeds a certain value”. Many aspects of corona discharge on lines are unknown and undefined; however, the basic physical process is that of electron multiplication or avalanche formation. The electric gradient in the vicinity of the line conductor is the highest gradient and, if this gradient or electric stress is sufficiently high, any electrons in the air around the conductor will ionize the gas molecules and electrons produced by this ionization will cause an avalanche. If an additional electron is formed in this gradient by some process from the original electron avalanche, a new avalanche is formed by this secondary process and the corona discharge is developed.

In the case of the transmission line conductor, it is believed that the important secondary process is the ejection of electrons from gas molecules by high energy ultra-violet light (photoionization) generated by the original avalanche. It has been found by several investigators that the radio noise level generated when the conductor is positive is significantly greater than it is when the conductor is negative. In the case of a positive overhead line conductor, the cathode is so far away that cathode emission is of no consequence and the secondary process existing in this case is photoionization of the gas.

When streamer corona forms at a point on the conductor, two pulse fields will exist. Near the streamer a localized field is formed and along the line the direct field is developed due to the pulses travelling down the line. For the design of extra high voltage lines, only the direct field is considered significant, and the most useful measurements are made at some distance from the streamer locations on the line conductor.

For a more detailed discussion of the theoretical aspects of conductor corona [1, 2]\*.

#### 5.1.2 *Factors in corona generation*

The possibility of a corona discharge taking place at the surface of a conductor is dependent upon several factors, these include:

- a) Theoretical conductor surface voltage gradient which depends on:
  - 1) system voltage;
  - 2) conductor diameter;
  - 3) spacing of the conductor from earth and other phase conductors;
  - 4) number of conductors per phase or in the bundle;

\* The figures in square brackets refer to “Bibliography and references”, pages 69 to 71.

- b) Le diamètre du conducteur.
- c) L'état de surface du conducteur.
- d) Les conditions atmosphériques.

Nous examinerons chacun de ces facteurs séparément.

#### 5.1.2.1 *Gradient de tension de surface des conducteurs*

L'un des principaux paramètres du niveau de perturbation d'une ligne, et notamment de l'ampleur de l'effet de couronne, est le champ électrique à la surface du conducteur ou gradient de surface.

En raison de la sensibilité de l'effet de couronne à la valeur de ce champ, il est nécessaire d'employer une méthode de calcul qui donnera le champ avec une précision de l'ordre de 1%.

Les conducteurs ordinaires étant toronnés, le champ superficiel varie autour d'une valeur moyenne le long de leur circonférence. Il est habituel de calculer le champ de surface d'un conducteur lisse ayant le même diamètre extérieur, même si un facteur de toronnage expérimental doit être introduit.

Des formules pour le calcul du gradient de tension superficiel d'un conducteur sont données à l'annexe A, à la fois pour les conducteurs individuels et pour les conducteurs en faisceaux, et pour les lignes monophasées et polyphasées. En fait, les calculs exigent une équation matricielle et, normalement, l'on recourt à l'ordinateur pour les lignes triphasées à un et deux ternes et pour des lignes plus complexes en courant continu à haute tension.

#### 5.1.2.2 *Diamètre du conducteur*

Le niveau de perturbations radioélectriques s'élève avec l'augmentation du diamètre des conducteurs, même si le gradient de surface demeure inchangé. Ce phénomène est dû au fait que la divergence du champ électrique au voisinage de la surface du conducteur diminue avec l'augmentation du diamètre du conducteur. En conséquence, le champ électrique enveloppant un gros conducteur engendrera des décharges dues à l'effet de couronne plus longues que le champ électrique entourant les petits conducteurs.

#### 5.1.2.3 *Etat de surface des conducteurs*

Le type du conducteur, par exemple toronné ou à segments, et l'état de sa surface, autrement dit son plus ou moins grand poli ou sa plus ou moins grande rugosité, la présence ou l'absence de pollution, de gouttelettes d'eau, de flocons de neige, etc., ont une forte influence sur la formation de l'effet de couronne. Un conducteur de ligne de transport neuf donnera généralement davantage naissance à l'effet de couronne, en raison des irrégularités de sa surface, constituées par les barbes d'aluminium, les fientes d'oiseaux, la poussière, la terre, la boue, etc., qui y adhèrent et forment des dépôts favorisant l'apparition de l'effet de couronne, même par beau temps. Toutefois, lorsque la ligne a été mise sous tension, les pertes par effet de couronne et les perturbations radioélectriques diminueront avec le temps. On distingue généralement deux étapes: la première comprend les quelques minutes suivant la mise sous tension du conducteur, au cours desquelles l'effet de couronne consume les poussières et autres particules qui se sont fixées préalablement au conducteur. La seconde période est plus longue, et voit le conducteur noircir complètement et se patiner comme s'il était très vieux, tout en se débarrassant de sa graisse de protection superficielle.

- b) Conductor diameter.
- c) Conductor surface conditions.
- d) Atmospheric and weather conditions.

Each of these factors will be considered separately.

#### 5.1.2.1 *Conductor surface voltage gradient*

One of the most important quantities in determining the radio noise level of a line, especially when conductor corona is dominant, is the strength of the electric field in the air at the surface of the conductor or surface voltage gradient.

Because of the close dependence of conductor corona on the value of this voltage gradient, it is necessary to use a method of calculation which gives the gradient with a precision of about 1%.

Since conductors are usually stranded, the surface voltage gradient varies about a mean value around the circumference of the conductor. However, it is customary to calculate the surface gradient for a smooth conductor with the same overall diameter, even if an experimental stranding factor has to be introduced.

Formulae for the calculation of the voltage gradient at the surface of a conductor are given in Appendix A for the simple case of a single-phase line with earth return or a monopolar d.c. line to the more complex three-phase multicircuit and bipolar d.c. lines. Usually the calculations need a matrix equation and computer programs are used for both single and multicircuit three-phase lines and the more complex high-voltage d.c. lines.

#### 5.1.2.2 *Conductor diameter*

The radio noise level increases with increasing conductor diameter even if the conductor surface gradient remains the same. This phenomenon is due to the fact that the decay of the electric field from the surface of a conductor decreases with increasing conductor diameter. Therefore, the electric field surrounding a large conductor can support longer corona streamers than the electric field around small conductors.

#### 5.1.2.3 *Conductor surface conditions*

The type of conductor, for example circular or segmental stranding, and the condition of its surface, that is to say the degree of smoothness or roughness, the presence or absence of pollution, water droplets, snow flakes, etc., have a strong influence on the generation of corona. A transmission line conductor when first strung will usually have higher corona activity due to surface irregularities such as aluminium burrs, bird droppings, dust, soil, mud or any other deposits causing corona even in fair weather. However, after a line is energized the corona losses and radio noise will decrease with time. There are usually two time periods involved; the first period is the first few minutes after the conductor is energized and the corona activity is burning off the dust and other particles that have collected on the conductor before it was energized. The longer time period is needed to blacken completely a conductor which makes it look weathered and also destroys the surface grease on new conductors.

Il est également démontré qu'au fur et à mesure que le conducteur est en service, le niveau perturbateur, même sous la pluie, diminue. La surface d'un conducteur neuf est hydrophobe, en raison de la présence d'huile laissée en cours de fabrication, et des gouttelettes d'eau se formant sur cette surface huileuse. A mesure que le conducteur vieillit, sa surface devient hydrophile et les gouttelettes d'eau sont absorbées entre les brins.

#### 5.1.2.4 Conditions atmosphériques

Une réduction de la pression barométrique ou une augmentation de la température ambiante, ou les deux phénomènes ensemble, peuvent abaisser la densité de l'air qui de son côté voit se réduire son gradient disruptif, ce qui augmente la possibilité de formation d'une aigrette sur le conducteur. La pression barométrique ne prend de l'importance qu'aux altitudes supérieures à environ 1000 m. Dans les zones affectées par suffisamment de pluie, de brouillard, de gelées ou de chutes de température, susceptibles d'entraîner la formation de glace ou de gouttelettes d'eau sur le conducteur, les aigrettes ont plus de chance de se développer. La pluie et la neige sont les causes des activités de couronne les plus intenses sur la surface d'un conducteur et peuvent élever le niveau perturbateur de plus de 20 dB par rapport à un temps sec. Les gouttes de pluie ou la neige qui s'amassent sur la surface d'un conducteur au cours d'une tempête modifient très sensiblement le champ électrique et créent un grand nombre de sources d'effet de couronne. Des décharges peuvent également se produire entre un flocon de neige ou une goutte de pluie et le conducteur lorsque l'un ou l'autre passe à proximité de ce dernier.

### 5.2 Méthodes de recherche sur l'effet de couronne à l'aide de nasses et de lignes expérimentales

Deux méthodes fondamentales ont été utilisées pour étudier le phénomène de couronne sur les lignes de transport. Il s'agit des nasses et des lignes expérimentales [9, 21, 31].

#### 5.2.1 Nasses d'essai

Des nasses ont été employées par de nombreux chercheurs dans le but de déterminer rapidement la fonction excitatrice d'un conducteur ou d'un faisceau de conducteurs [4 à 6]. La fonction excitatrice est liée au courant dans le faisceau par la relation suivante:

$$I = \Gamma \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \quad (1)$$

où  $I$  est le courant de haute fréquence injecté dans le conducteur ou le faisceau de conducteurs en A/m<sup>1/2</sup>,  $C$  est la capacité en F/m,  $\Gamma$  est la fonction excitatrice en A/m<sup>1/2</sup> et  $\epsilon_0$  est la constante diélectrique absolue de l'air. Le principal avantage du concept de la fonction excitatrice est qu'il s'agit d'une grandeur indépendante de la capacité du conducteur par unité de longueur.

Le courant perturbateur dans une nasse est mesuré à l'aide d'appareils répondant aux prescriptions de la section un de la Publication 16 du C.I.S.P.R.: Spécification du C.I.S.P.R. pour les appareils et les méthodes de mesure des perturbations électriques. Le courant à une extrémité du conducteur ou du faisceau s'écoule par un circuit de couplage à haute fréquence, similaire à ceux qui sont décrits au paragraphe 1.3 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2. L'impédance équivalente des résistances et des instruments de mesure utilisés dans ces circuits est généralement ramenée à l'impédance caractéristique du conducteur ou du faisceau de conducteurs afin d'éviter la formation de réflexions successives.

Les nasses ont fourni des données reproductibles sur les perturbations radioélectriques sous fortes pluies, mais, dans les conditions de beau temps, elles ne se sont pas révélées appropriées en raison du nombre relativement petit de sources par unité de longueur de conducteur sous contrainte normale. La longueur de conducteur dans une nasse est généralement trop courte pour représenter une longue ligne réelle. En outre, l'état de surface du conducteur et les conditions météorologiques régnant autour d'une courte ligne proche du sol ne sont pas nécessairement identiques à ceux d'une ligne en service effectif.

There is also evidence that as the conductor ages the radio noise level, even during rain, will decrease. The surface of a new conductor is hydrophobic, due to the oil that is present on the surface from the manufacturing processes, and water beads form on this oily surface. As the conductor ages, its surface becomes hydrophilic whereby the surface of the conductor draws up the water drops into the strands.

#### 5.1.2.4 *Atmospheric and weather conditions*

A reduction in the barometric pressure or an increase in the ambient temperature, or both, can reduce the air density which reduces the breakdown strength of air and thereby increases the likelihood of a corona discharge taking place on a conductor. The barometric pressure is usually important only at altitudes above approximately 1000 m. In areas that have sufficient rain, fog, frost or falling temperatures which can lead to the formation of ice or water droplets on the conductor, corona discharges are more likely to take place due to these conditions. Rain and snow are the cause of the highest corona activity at the surface of a conductor and can cause the radio noise level to increase by more than 20 dB compared with the noise from the same line under dry conditions. The water droplets or snow which collect on the conductor surface during a storm modify the electric field significantly, creating a large number of corona sources. Discharges may also occur when a snowflake or raindrop passes the conductor and initiates a discharge from the conductor to the particle.

### 5.2 *Methods of investigation of corona by cages and test lines*

Two basic methods have been used to investigate the corona phenomena from transmission lines. These are test cages and test lines [9, 21, 31].

#### 5.2.1 *Test cages*

Test cages have been used by many experimenters to determine rapidly the excitation function of a conductor or a bundle of conductors [4 to 6]. The excitation function is related to the current in the bundle by the following:

$$I = F \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \quad (1)$$

where  $I$  is the high frequency current injected into the conductor or bundle of conductors in A/m<sup>1/2</sup>,  $C$  is the capacitance in F/m,  $F$  is the excitation function in A/m<sup>1/2</sup> and  $\epsilon_0$  is the absolute permittivity of the air. The main advantage of the concept of the excitation function is that it is a quantity independent of the conductor capacitance per unit length.

The radio noise current in a test cage is measured using measuring apparatus complying with Section 1 of C.I.S.P.R. Publication 16: C.I.S.P.R. Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measuring Methods. The current at one end of the conductor or bundle is passed through a high-frequency coupling circuit similar to those described in Subclause 1.3 of C.I.S.P.R. Publication 18-2. The equivalent impedance of the resistors and of the measuring instrument used in these circuits is usually made equal to the characteristic impedance of the conductor or bundle to avoid the occurrence of successive reflections.

Test cages have been found to give reproducible radio noise data under heavy rain but, under fair weather conditions, they have proved inadequate because of the relatively small number of sources per unit length of conductor under normal stress. The length of conductor in a cage is generally too short to give a representation of an actual long line. Additionally, the surface condition of the conductor and meteorological conditions surrounding a short line near to the ground are not necessarily the same as the conditions on an operational line.