

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 ou paragraphe	Position	Document C.I.S.P.R./C (Secrétariat)...	Notes: 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 or sub-clause	Status	Document C.I.S.P.R./C (Secretariat)...	Notes: Approved
1.	Report No. 54	6A	Dubrovnik, 1977
2.		7A	Dubrovnik, 1977
3.		19	The Hague, 1979
4.1		20	The Hague, 1979
4.2		21	The Hague, 1979
5.1		22	The Hague, 1979
5.2		23	The Hague, 1979
5.3		8A	Dubrovnik, 1977
5.4		9A	Dubrovnik, 1977
6.1		24A	Tokyo, 1980
6.2			
6.3			

Article ou paragraphe	Position	Document C.I.S.P.R./C (Secrétariat)...	Notes: approuvé
7.1 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 or sub-clause	Status	Document C.I.S.P.R. C (Secretariat)...	Notes: Approved
7.1 7.2	} Report No. 54	} 10A	Dubrovnik, 1977
8.1			
8.2 8.3 8.4		} 28	The Hague, 1979

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.

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 ω , est l'impédance d'onde de la ligne.

Durant la propagation, les ondes sont atténuées par un coefficient commun a tel que:

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

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 ω , 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)_y 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 Ω , 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 une mesure 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 ΔE (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 ΔE (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 μ V/m) à la distance D

k = facteur d'atténuation

E_0 = niveau de perturbation, en décibels (1 μ 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 μ V/m) at distance D

k = attenuation factor

E_0 = noise level, in decibels (1 μ 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, graisseux, 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 termes 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'accumulent 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^{1/2}, C est la capacité en F/m, Γ est la fonction excitatrice en A/m^{1/2} et ϵ_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^{1/2}, C is the capacitance in F/m, F is the excitation function in A/m^{1/2} and ϵ_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.

L'application de la fonction excitatrice à des lignes polyphasées exige l'emploi de l'équation (1) sous sa forme matricielle [7 à 9].

$$[I] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \times [C] \times [U] \quad (2)$$

5.2.2 Lignes expérimentales

Alors que les nasses sont construites pour des raisons d'économie et de commodité des essais, des lignes expérimentales à échelle réelle sont encore construites aujourd'hui, en premier lieu pour étudier le phénomène de couronne sur les futures lignes à très haute tension. Il n'y a pas de longueur normalisée pour les lignes expérimentales. Des lignes expérimentales, monophasées et triphasées en courant alternatif et bipolaires en courant continu, d'au maximum 8 km et d'au minimum 300 m, ont été construites [10 à 30].

Quelques tentatives de mesure de la fonction excitatrice ont été faites sur de courtes lignes d'essai et ont été couronnées d'un certain succès, notamment lorsqu'il s'agissait de lignes en courant continu [28, 29].

Pour les lignes de transport longues, le spectre des fréquences des perturbations radioélectriques présente une caractéristique de niveau régulièrement décroissant au fur et à mesure de l'élévation de la fréquence. Toutefois, cette situation ne s'observe pas pour les lignes d'essai courtes. En raison des réflexions des tensions et des courants du champ perturbateur aux extrémités de la ligne, il se crée une configuration d'onde stationnaire dans le spectre des fréquences. Ce spectre est caractérisé par des pics aigus et de larges creux, son tracé exact dépendant de la longueur de la ligne, du type des impédances d'extrémité et de l'emplacement du point de mesure.

Dans le but de rapprocher le spectre des fréquences des lignes courtes de celui des lignes longues, la plupart des chercheurs se sont inspirés de la «Méthode de la moyenne géométrique» [12, 14 à 16, 18, 26, 29]. La correction ainsi réalisée s'obtient en prenant la moyenne géométrique, en $\mu\text{V/m}$, des maxima et minima successifs du spectre de fréquences des lignes courtes. Par contre, c'est la moyenne arithmétique qui est utilisée lorsque l'on s'exprime en $\text{dB } \mu\text{V/m}$.

Cette démarche, à vrai dire, n'est valable que dans le cas idéalisé d'une ligne monophasée parfaitement horizontale dont les extrémités sont de purs circuits ouverts aux fréquences radiophoniques. Ajoutons, cependant, que des études expérimentales ont révélé qu'à des fins pratiques elle s'adaptait aux lignes à courants alternatif et continu [28, 32, 33].

5.3 Méthodes de prédétermination

En raison de la nécessité de construire des lignes de transport de tension toujours plus élevée, des recherches intensives ont été entreprises au cours des 30 dernières années, dans diverses parties du monde, afin d'élucider le phénomène de couronne. L'un des principaux objectifs de ces recherches était de mettre au point des méthodes de prédétermination du niveau perturbateur.

Les mesures de niveau perturbateur qui ont été faites sur des lignes expérimentales courtes et à l'échelle réelle monophasées et triphasées en courant alternatif, sur des lignes expérimentales en courant continu, sur des lignes en exploitation, en laboratoire, ont donné naissance à plusieurs méthodes empiriques et semi-empiriques de prédétermination du niveau perturbateur. Ces méthodes peuvent être utilisées pour prévoir le niveau perturbateur de différentes lignes à haute tension, à la condition que la tension et les paramètres de conception soient connus. Toutes les méthodes se fondent sur des données expérimentales, émanant des lignes d'essai, des lignes en exploitation ou des nasses. Deux méthodes de base ont évolué au cours des années, la première étant analytique ou semi-empirique, la seconde étant empirique ou comparative.

The application of the excitation function to multi-phase lines requires the use of equation (1) in matrix form [7 to 9].

$$[I] = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \times [C] \times [V] \quad (2)$$

5.2.2 Test lines

Whilst test cages are built for reasons of economy and ease of testing, full-scale test lines are still being built, primarily to study corona phenomena on future UHV lines. There is no standard length for test lines. Test lines, single and three-phase a.c. lines and bipolar d.c. lines, as long as 8 km and as short as 300 m have been built, [10 to 30].

There have been some attempts to measure the excitation function on short test lines and with some success, especially on short d.c. test lines, [28, 29].

For long transmission lines, the radio noise frequency spectrum exhibits a characteristic of a steadily decreasing level with increasing frequency. However, for short test lines this situation does not exist. Due to reflections of the radio noise voltages and currents at the line terminations, a standing-wave pattern in the frequency spectrum is created. This spectrum is characterized by sharp peaks and broad valleys, the exact form being dependent on the length of the line, the type of terminations, and the longitudinal location of the measuring point.

The approach that has been used by most investigators to correct the short-line frequency spectrum to the long-line spectrum is the "Geometric mean method" [12, 14 to 16, 18, 26, 29]. This correction is made by taking the geometric mean in terms of $\mu\text{V}/\text{m}$ of the successive maxima and minima of the short line frequency spectrum. In terms of $\text{dB } \mu\text{V}/\text{m}$, the arithmetic mean is used.

This approach, strictly speaking, is only valid for the idealized case of a perfectly horizontal single phase line with terminations that appear as pure open circuits for radio frequencies. However, experimental studies show that, for all practical purposes, this approach is valid for a.c. and d.c. lines [28, 32, 33].

5.3 Methods of predetermination

Because of the need for higher transmission voltages, a considerable amount of research has been conducted over the past 30 years, in various parts of the world, to understand the corona process. One of the primary purposes of this research was to develop methods to predetermine radio noise.

Radio noise measurements that have been conducted on short full-scale single and three-phase a.c. test lines, on d.c. test lines, on operational lines, and in the laboratory, have resulted in several empirical and semi-empirical formulae for predicting radio noise. These formulae can be used to predict the radio noise performance of different high-voltage lines, as long as the voltage and the design parameters are known. All the methods rely on experimental data either from test lines, operational lines or test cages. Two basic methods have evolved over the years, the first one being analytical or semi-empirical and the second being empirical or comparative.

5.3.1 Méthodes analytiques

Il n'existe aucune méthode strictement analytique de prédétermination du niveau perturbateur d'une ligne de transport. Deux méthodes semi-empiriques ont été mises au point par l'Electricité de France (EDF) [8] et par Project Ultra High Voltage (UHV) [7] aux Etats-Unis d'Amérique. Ces deux méthodes analytiques se fondent sur les données fournies par les nasses et sur des analyses extrêmement complexes et sont amplement décrites dans la littérature.

Le calcul du niveau perturbateur des lignes de transport par ces méthodes analytiques se fait en deux temps. La fonction excitatrice est connue grâce aux nasses, puis le système des capacités de la ligne est déterminé, et enfin les courants perturbateurs injectés par unité de longueur de conducteur sont calculés à l'aide de l'équation (2). La théorie de la propagation modale est appliquée afin de connaître les courants modaux dans une section donnée de la ligne. Les atténuations de la propagation de ces courants de mode sont calculées, et les courants sont rassemblés en courants réels à haute fréquence par addition quadratique sur toute la longueur de la ligne afin d'obtenir la totalité des courants perturbateurs.

La seconde étape consiste à calculer le champ perturbateur au voisinage de la ligne, à partir des courants perturbateurs totaux sur une section de la ligne, ou des tensions perturbatrices sur les phases. Le profil perturbateur latéral peut alors être obtenu (voir exemple au paragraphe 5.4).

Des programmes d'ordinateur sont généralement utilisés pour effectuer des calculs aussi complexes. Ces programmes ont été élaborés par l'EDF et par le Project UHV.

5.3.2 Méthode CIGRÉ

Les formules comparatives sont en général très simples et faciles à utiliser. Certaines des formules les plus connues pour les lignes en alternatif ont été décrites dans une publication de la CIGRÉ [1] et dans la littérature technique [34, 35]. Il existe également de nombreuses formules comparatives pour les lignes en continu, et elles sont décrites à l'article 8.

La précision maximale de prédétermination lorsqu'on emploie ces formules exige que l'on réunisse des données sur de longues périodes concernant des lignes de référence en exploitation qui utilisent des conducteurs ou des faisceaux proches de ceux que l'on étudie [36, 37, 38].

La CIGRÉ a réalisé une analyse plus complète des différentes méthodes de prédétermination en exploitant les données rassemblées par l'enquête CIGRÉ/IEEE [6, 34, 35]. A partir de cette analyse, elle a mis au point une nouvelle méthode que l'on peut considérer comme optimale. Elle est exprimée par une formule relativement simple, que nous citons au paragraphe 11.2 de la Publication C.I.S.P.R. 18-3: Caractéristiques des lignes et des équipements à haute tension relatives aux perturbations radioélectriques, Troisième partie: (à l'étude) [1].

5.4 Catalogue des profils types

Un grand nombre de mesures effectuées sur des lignes en exploitation, ainsi que des calculs appuyés par des mesures faites dans des nasses ou sur des lignes expérimentales, nous permettent de fournir des exemples pour une vaste gamme de lignes à l'annexe B. Les valeurs indiquées ne sont valables que pour les lignes construites et entretenues normalement, à l'exclusion des lignes fortement polluées, car bien entendu ces dernières peuvent donner naissance à des niveaux de perturbations radioélectriques plus élevées que celles qui sont dues à l'effet de couronne sur les conducteurs.

L'annexe B indique la valeur estimée du champ perturbateur qu'il est possible de constater sous certaines conditions bien définies. Elle contient également des références qui peuvent être utilisées pour prédéterminer le champ qu'une ligne nouvelle est susceptible de créer. Enfin, à titre d'exemples, elle propose des courbes des champs en fonction de la distance à la ligne pour certains types de lignes (voir figures B1 à B11, pages 80 à 90).

5.3.1 *Analytical methods*

No purely analytical method of predicting transmission line radio noise exists. Two semi-empirical methods have been developed by Electricité de France (EDF) [8] and Project Ultra High Voltage (UHV) [7] in the United States of America. Both of these analytical methods rely on radio noise data from test cages and on highly complex analysis, and they are adequately described in the literature.

The calculation of radio noise from transmission lines using these analytical methods is a two-stage process. The excitation function is obtained from cage tests, the system of line capacitances is established and the injected noise currents per unit conductor length are calculated using equation (2). The theory of modal propagation is applied to obtain the modal currents flowing in a given cross-section of the line. The attenuations of propagation of these modal currents are calculated and these currents are recombined into real high-frequency currents taking into account the quadratic summation over the whole line length to obtain the total noise currents.

The next step is to calculate the noise field near the line, which is based on the total noise currents through the cross-section of the line, or the noise voltages on the phases. The lateral noise profile can then be obtained (see examples in Sub-clause 5.4).

Computer programs are usually used to perform these complex calculations and such programs have been written at EDF and Project UHV.

5.3.2 *CIGRÉ method*

The comparative formulae are generally quite simple and easy to use. Some of the best known formulae for a.c. lines are described in a CIGRÉ Publication [1] and the technical literature [34, 35]. There are also several comparative formulae for d.c. lines and these are described in Clause 8.

The highest precision of predetermination, using any of these formulae, is obtained by choosing long-term data from an operational reference line which uses conductors or bundles close to those being studied [36, 37, 38].

CIGRÉ has made a more complete analysis of the different predetermination methods using the data collected by the CIGRÉ/IEEE Survey [6, 34, 35]. From this analysis they developed a new method that can be considered optimal. This method is expressed by a fairly simple formula, which is given in Sub-clause 11.2 of C.I.S.P.R. Publication 18-3: Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and High Voltage Equipment, Part 3: (under consideration) [1].

5.4 *Catalogue of standard profiles*

A large number of measurements on operational lines, together with calculations supported by measurements on cage and test lines, have been carried out and examples of the results for a variety of line designs are given in Appendix B. The given values are valid only for lines constructed and maintained according to normal practice and not heavily polluted, as otherwise these conditions can give rise to higher radio noise levels than those due to conductor corona.

Appendix B gives the estimated value of the radio noise field which it is possible to obtain under certain well-defined conditions. It also includes references which can be used for pre-determining the field that a new line may be expected to produce. It also includes, as examples, curves giving the field as a function of the distance from the line for certain types of line (see Figures B1 to B11, pages 80 to 90).

Le fait qu'une ligne apparaisse dans le catalogue de l'annexe B ne signifie pas que cette ligne engendre un niveau perturbateur acceptable; son objet est seulement de donner une idée de l'ordre de grandeur que l'on peut espérer pour le type de ligne considéré.

5.4.1 Principe de présentation du catalogue

Les mesures des niveaux perturbateurs, prises à la fois sur les lignes en exploitation et sur les lignes d'essai, ont révélé que la stabilité et la reproductibilité du champ dû à l'effet de couronne sur les conducteurs sont plus précises par fortes pluies continues. Il convient de remarquer que la valeur sous fortes pluies ne correspond pas toujours à la valeur maximale mauvais temps qui peut être de quelques décibels au-dessus.

De larges enquêtes statistiques ont également révélé qu'il existait une certaine corrélation entre le niveau perturbateur fortes pluies et le niveau beau temps 50%, bien que la dispersion par beau temps soit plus étendue. A des fins pratiques, le niveau beau temps 50% est généralement d'une plus grande importance; sa valeur est dérivée du niveau fortes pluies continues par une déduction de 17 dB à 25 dB, selon l'état de surface des conducteurs.

Il est donc possible de constituer un catalogue des champs perturbateurs pour certaines lignes de transport. Pour faciliter l'exploitation pratique de ce catalogue, trois niveaux ont été pris en considération, à savoir le niveau beau temps 50% (moyenne beau temps), et, en fonction de l'origine des profils, le niveau forte pluie (20 dB au-dessus) ou le niveau maximal mauvais temps (24 dB au-dessus). A partir de ces niveaux de référence, il est possible d'estimer les niveaux perturbateurs pour d'autres types de temps, à la condition que l'on connaisse la distribution statistique annuelle des niveaux pour la zone géographique étudiée (voir, comme exemple, la figure B13, page 92).

Ces principes ne sont valables que pour les perturbations radioélectriques dues à l'effet de couronne sur les conducteurs. Les perturbations causées par d'autres appareillages de la ligne, par les chaînes d'isolateurs, par les accessoires etc., ne sont pas prises en considération. Ces conditions sont satisfaites lorsque les conducteurs de la ligne sont soumis à des contraintes superficielles relativement fortes, par exemple supérieures à 14 kV/cm (valeur efficace calculée pour des conducteurs lisses). Toutefois, pour les lignes dont les conducteurs sont soumis à des contraintes de surface inférieures à, par exemple, 12 kV/cm (valeur efficace), ce sera la perturbation émanant des isolateurs et autres accessoires, qui risquera, sous certaines conditions, de prédominer. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'utiliser ce catalogue pour prévoir les niveaux perturbateurs, puisqu'il a été dressé en supposant la bonne qualité des isolateurs et des accessoires.

Les profils des bruits radioélectriques pour les lignes de 225 kV, 380 kV et 750 kV, présentés dans ce catalogue, ont été calculés par la méthode Analig [8].

Les profils pour les lignes de 362 kV, 525 kV et 765 kV ont été déterminés d'après les résultats de l'enquête CIGRÉ-IEEE [35, 39].

Les gradients superficiels ont été calculés selon la méthode générale des coefficients de potentiel. Cette méthode fournit, avec une grande précision, les gradients électriques superficiels de chaque conducteur d'une ligne. Une récapitulation des méthodes de calcul des gradients de tension superficiels des lignes de transport est proposée par [40].

La forme du profil latéral du champ perturbateur dépend essentiellement de la configuration des conducteurs. La distance entre les phases et la hauteur au-dessus du sol ont une influence primordiale. Le type de conducteur ou de faisceau n'affecte que légèrement la forme du profil en raison de la structure de la matrice des capacités. Lorsqu'on passe d'un type de conducteur à un autre, avec la même géométrie, dès l'instant où les deux matrices sont proportionnelles entre elles, le profil ne change pas sensiblement. Cette hypothèse est suffisamment confirmée pour être appliquée dans la pratique.

The appearance of a given line in the catalogue in Appendix B does not mean that this line generates an acceptable radio noise level; it gives only an indication of the order of magnitude to be expected for the given line design.

5.4.1 Principle of catalogue presentation

Radio noise measurements taken both on operational lines and on test lines have indicated that the stability and reproducibility of the field due to conductor corona is most accurate under conditions of heavy and continuous rain. It should be noted that this heavy rain value may not be the maximum foul-weather value, which can be a few decibels higher.

Extensive statistical surveys have also indicated that there is reasonable correlation between the heavy rain radio noise level and the 50% fair-weather level, though the dispersion under fair-weather conditions is larger. For practical purposes, the 50% fair-weather level is usually of greater importance, this value being derived from the heavy continuous-rain level by a reduction of between 17 dB and 25 dB, depending upon conductor surface conditions.

It is therefore possible to establish a catalogue of radio noise fields for certain transmission lines. For the practical use of this catalogue, three noise levels are considered, namely the 50% fair-weather level and, depending on the origin of the profiles, either the heavy-rain level (20 dB higher) or the maximum foul-weather level (24 dB higher). From these reference levels, it is possible to estimate the radio noise levels for other types of weather, if the yearly statistical distribution of levels is known for the geographical area under consideration (see, for example, Figure B13, page 93).

These principles are valid only for radio noise generated by conductor corona. The radio noise currents generated by other components of the line, insulator strings, fittings and so on, are not taken into consideration. These conditions are satisfied when the conductors of the line are subjected to a relatively high surface stress, in excess of, say, 14 kV r.m.s. per centimetre when referred to smooth conductors. However, for lines whose conductors are subjected to a surface stress less than, say, 12 kV r.m.s. per centimetre, it is the radio noise from the insulators and other fittings which may, under certain conditions, predominate. Under these conditions it is not possible to use this catalogue to predict the noise level since a good quality of insulators and fittings has been assumed.

The radio noise profiles for the 225 kV, 380 kV and 750 kV lines included in this catalogue were calculated by the Analig method [8].

The profiles for the 362 kV, 525 kV and 765 kV lines were determined from the results of the CIGRE-IEEE survey [35, 39].

The surface gradients have been calculated using the general method of potential coefficients. This method gives, with great accuracy, the electric surface gradient of each conductor of a line. A survey of methods for calculating transmission line surface voltage gradients is given in [40].

The shape of the lateral profiles of the radio noise field is essentially dependent on the conductor configuration. The distance between phases and their height above the ground have a major influence. The type of conductor or the bundle only slightly affects the shape of the profile owing to the structure of the capacitance matrix. When changing from one type of conductor to another with the same geometry, so long as the two matrices are proportional to each other, the profile will not be significantly changed. This assumption is sufficiently true to be applied in practice.

Dans l'annexe B, les profils ont été regroupés pour certains types de lignes de tension aériennes. L'influence du nombre des conducteurs et leur disposition par phase, leur diamètre et leur gradient de tension ont été pris en compte simplement en appliquant la correction adéquate à un profil de référence. C'est ainsi que chaque figure du catalogue donne le profil de référence et un tableau des valeurs et des corrections applicables à d'autres lignes utilisant d'autres conducteurs ou d'autres faisceaux.

Les profils sont dressés pour une fréquence de mesure de 0,5 MHz. Les niveaux perturbateurs pour d'autres fréquences, de 0,15 MHz à 4 MHz, pourront être déterminés d'après la figure B12, page 91.

Les variations du niveau perturbateur, dues soit aux conditions climatiques, soit à l'état de surface des conducteurs, peuvent également être prises en considération en appliquant des corrections estimées aux niveaux des profils de base (voir figure B13, page 92).

On pourra trouver des exemples de mesures et de calculs dans [8, 35, 39].

Le catalogue est résumé à l'annexe C selon les conventions admises par le C.I.S.P.R.; ce qui veut dire que l'intensité des champs perturbateurs a été tracée en fonction de la distance, mesurée entre le centre du cadre et le plus proche conducteur de la ligne, à l'aide d'une échelle logarithmique. Sur la figure C1, page 95, on peut remarquer que les courbes sont relativement droites et que l'intensité des champs à la distance de référence de 20 m est dégagée par interpolation.

Les principaux niveaux perturbateurs du catalogue sont énumérés dans le tableau de l'annexe C; ce tableau permet donc de comparer les niveaux des différentes lignes figurant dans le catalogue et de prévoir, avec suffisamment de précision à des fins pratiques, l'intensité du champ d'une ligne envisagée de même configuration à condition que la distance entre l'aérien récepteur et le plus proche conducteur de la ligne soit supérieure à 20 m.

6. Niveaux perturbateurs dus aux isolateurs, aux accessoires et aux appareillages des postes (à l'exclusion des mauvais contacts)

6.1 Aspects physiques des sources de perturbations

Les isolateurs, les accessoires et les appareillages des postes peuvent être les causes de bruits radioélectriques susceptibles de perturber les réceptions radio et, dans certains cas, les réceptions des émissions de télévision. Cela peut être dû à différents phénomènes, par exemple les décharges par effet de couronne dans l'air au niveau des isolateurs et des accessoires, les décharges de surface sur les isolateurs, et les étincelles dues aux mauvais contacts. Les effets de commutation des appareillages convertisseurs alternatif/continu, qui peuvent produire des bruits radioélectriques, seront étudiés à l'article 8.

Nous examinerons dans le présent article le phénomène de couronne et les décharges superficielles du point de vue physique; les arcs dus aux mauvais contacts seront abordés à l'article 7.

6.1.1 Perturbations dues à l'effet de couronne sur les accessoires

Les aigrettes sont engendrées par les gradients de tension élevés sur certaines surfaces des accessoires, tels que les pinces de suspension, les anneaux de garde ou les cornes, les entretoises et les raccords. Si nous supposons que la tension appliquée aux accessoires augmente progressivement, nous assisterons à différents types de décharges. Seuls certains d'entre eux sont capables d'engendrer des bruits radioélectriques, mais tous sont lumineux dans une certaine mesure et contribuent à des pertes par effet de couronne. Les phénomènes sont

In Appendix B, profiles have been assembled for certain types of overhead power line. The influence of the number and arrangements of conductors per phase, their diameter and their voltage gradient, were taken into account merely by applying the appropriate correction to a reference profile. Thus each figure in the catalogue gives such a reference profile and a table of values and corrections applicable to other lines using other conductors and bundles.

The profiles are given for a measurement frequency of 0.5 MHz and the radio noise levels for other frequencies, 0.15 MHz to 4 MHz, can be obtained from Figure B12, page 91.

The variations of the radio noise level, due either to climatic conditions or surface state of the conductors, can also be taken into consideration by estimated corrections to the levels of the basic profiles (see Figure B13, page 93).

Examples of measurements and calculations can be found in [8, 35, 39].

The catalogue is summarized in Appendix C according to the conventions agreed in C.I.S.P.R.; that is to say the strengths of the radio noise fields are plotted as a function of distance, measured from the centre of the aerial loop to the nearest conductor of the line, using a logarithmic scale. From Figure C1, page 95, it is seen that substantially straight lines are obtained and the field strengths at the reference distance of 20 m are obtained by interpolation.

The main radio noise levels, given in the catalogue, are listed in the table of Appendix C; from this table it is possible to compare the levels of the various lines given in the catalogue and to predict, with sufficient accuracy for practical purposes, the field strength to be expected from a proposed line of similar design, provided the distance between a receiving aerial and the nearest conductor of the line is greater than 20 m.

6. Radio noise levels due to insulators, fittings and substation equipment (excluding bad contacts)

6.1 *Physical aspects of radio noise sources*

Insulators, fittings and substation equipment may be the source of radio noise which may lead to radio and, in some cases, to television interference also. This may be due to various phenomena such as corona discharges in the air at insulators and fittings, surface discharges on insulators and sparks due to bad contacts. Commutation effects in a.c./d.c. converting equipment, which can also be a source of radio noise, are discussed in Clause 8.

This clause examines the phenomena of corona and surface discharges from the physical point of view; sparks due to bad contacts are dealt with in Clause 7.

6.1.1 *Radio noise due to corona discharges at fittings*

Corona discharges are caused by high potential gradients at certain surfaces of fittings such as suspension clamps, guard-rings or guard-horns, spacers and joints. Assuming that the voltage applied to the fittings is progressively increased, numerous different discharge processes occur. Only some of these are able to generate radio noise, but all are luminous to some extent and contribute to corona losses. The phenomena are similar to those described in Sub-clause 5.1 in respect of conductors. Similarly, in this case, various corona modes occur,

similaires à ceux que nous avons décrits au paragraphe 5.1 à propos des conducteurs. Là encore, différents modes d'effet de couronne interviennent, en fonction de la tension appliquée et dans l'ordre suivant: streamer initial, lueur et décharge prédisruptive donnant lieu à l'effet couronne positif; impulsions de Trichel ou impulsions négatives, lueur et décharge prédisruptive donnant lieu à l'effet négatif. Une lueur ne produit pas de parasites, alors que c'est le cas pour un streamer. Les impulsions de Trichel produisent de faibles niveaux perturbateurs, mais les décharges prédisruptives en produisent de très élevés aux très fortes tensions.

Les niveaux perturbateurs les plus élevés se produisent avec les modes correspondant à la décharge prédisruptive, qu'elle soit positive ou négative; toutefois, ces phénomènes se manifestent à des gradients beaucoup plus élevés que ceux qui correspondent aux tensions normales, et sont donc presque dépourvus d'intérêt pratique.

De même que dans le cas des conducteurs, les bruits radioélectriques produits par les accessoires ont tendance à augmenter par forte humidité ou par pluie, en raison de l'élévation des gradients locaux due à la présence de gouttes d'eau sur la surface des accessoires.

6.1.2 *Perturbations dues aux isolateurs*

Les bruits engendrés par les isolateurs peuvent être de diverses origines, dont la plupart sont associées à des phénomènes intervenant à leur surface, par exemple de petites décharges dues au renforcement des gradients locaux, des décharges par effet de couronne dues aux irrégularités créées par des dépôts de matières sèches ou de gouttes d'eau, ou à l'apparition d'arcs à travers les bandes sèches causés par les fuites de courant sur des isolateurs pollués. Ce n'est que dans des cas spéciaux, par exemple d'isolateurs défectueux, que le bruit est le résultat de phénomènes intervenant au sein des isolateurs, autrement dit production d'étincelles dans les vides intérieurs ou fissures. Néanmoins, des bruits peuvent naître de décharges entre le ciment et la porcelaine ou le verre ou de petits intervalles d'air éventuellement présents à ce niveau.

Lorsque la surface d'un isolateur est propre et sèche, les impulsions de courant à l'origine du bruit parasite sont causées par des décharges dans des zones de gradient de potentiel élevé, dépendant de la géométrie et du matériau de l'isolateur ainsi que du type de liaison entre capot et tige. La figure 7, page 102, montre, à l'aide d'un exemple, les lignes équipotentielles, exprimées en tant que fraction de la tension appliquée, sur une section d'isolateur sec et propre.

On pourra remarquer que ces lignes sont beaucoup plus concentrées et que, par conséquent, les gradients sont plus élevés, au voisinage du capot et de la tige, où les décharges qui causent le bruit se produisent en fait. Les valeurs des gradients de tension dans un isolateur, et par conséquent les niveaux de bruits parasites, dépendent de la valeur de la tension appliquée à l'isolateur et, dans le cas d'isolateurs en chaînes, dépendent également de la distribution de la tension le long de la chaîne. Cette distribution tend à être moins uniforme au fur et à mesure qu'augmente le nombre d'isolateurs de la chaîne, et, de ce fait, pour les plus longues chaînes d'isolateurs ou les isolateurs supports, il est nécessaire de disposer d'accessoires, des anneaux métalliques, par exemple, pour améliorer la distribution de la tension.

Les impulsions de courant produisant des perturbations sur un isolateur propre et sec ne diffèrent pas sensiblement en polarités positive et négative et, généralement, se produisent entre les valeurs zéro et de crête de la tension alternative appliquée. La forme de ces impulsions et, par conséquent, la fréquence de coupure de leur spectre dépendent de la capacité propre de l'isolateur et de l'impédance d'onde de la ligne à laquelle l'isolateur est raccordé. Pour les valeurs normales de ces paramètres, la fréquence de coupure est d'environ 1 MHz. Le bruit produit par un isolateur propre et sec est donc limité aux fréquences atteignant environ 30 MHz, et, généralement, pour les isolateurs à caractéristiques moyennes, des niveaux

depending on the voltage applied and in the following sequence: onset streamer, glow and pre-breakdown streamer for positive corona; Trichel or negative pulses, glow, and pre-breakdown streamer for negative corona. A glow discharge does not produce radio noise but onset streamers do. Trichel pulses produce low levels of radio noise but pre-breakdown streamers produce very high levels at very high voltages.

The highest noise levels occur with modes corresponding to the pre-breakdown streamer, both positive and negative; however, these phenomena take place at much higher gradients than those corresponding to normal voltages and are therefore of little practical interest.

As in the case of conductors, radio noise from fittings tends to increase in high humidity or rain, as a result of the increase in local gradients due to the presence of drops of water on the surface of the fittings.

6.1.2 *Radio noise due to insulators*

Insulator noise may be due to various reasons, most of which are associated with phenomena occurring at their surfaces, for example, small discharges due to enhanced local gradients, corona discharges due to unevenness created by dry deposits or drops of water, or sparks across dry bands caused by leakage currents on polluted insulators. Only in special cases, for example defective insulators, is the noise due to phenomena occurring inside the insulator, that is to say sparking in internal voids or punctures. However, radio noise can result from discharges between the cement and porcelain or glass and may occur if small air gaps are present at this margin.

When the surface of an insulator is clean and dry, the current pulses at the origin of the radio noise are caused by discharges in areas of high potential gradient, depending on the geometry and material of the insulator and on the type of bonding to the cap and to the pin. Figure 7, page 102, shows, by way of an example, the equipotential lines, expressed as a fraction of the applied voltage, in a cross-section of a clean and dry insulator unit.

It should be noted that these lines are much more concentrated and, therefore, the gradients are higher, near the cap and pin, where the discharges that cause the noise actually occur. The values of local potential gradients in an insulator unit, and therefore the noise levels, depend on the value of the voltage applied to the unit and, in the case of insulators consisting of several units, they also depend on the voltage distribution along the insulator string. This distribution tends to be less uniform as the number of units increases and, consequently, for the longer insulator strings or post insulators, it is necessary to have devices, such as metal rings, to improve the voltage distribution.

The current pulses producing the radio noise on a clean and dry insulator do not differ substantially between positive and negative polarity and, generally, the pulses occur between the zero and peak values of the applied power frequency voltage. The shape of these pulses and, consequently, the cut-off frequency of their spectrum, depends on the self-capacitance of the insulator and the surge impedance of the line to which the insulator is connected. For normal values of these parameters, the cut-off frequency is about 1 MHz. The noise produced by a clean and dry insulator is therefore limited to frequencies up to about 30 MHz and, generally, for insulators with average characteristics, fairly low levels are produced. Bad design

relativement bas sont engendrés. Une conception ou des connexions défectueuses peuvent, cependant, donner naissance à des niveaux plus importants s'étendant à des fréquences plus élevées. Comme c'est également le cas des décharges par effet de couronne produites par les accessoires, la réception des émissions de télévision n'est généralement pas affectée par ce type de perturbations.

Si l'isolateur est légèrement pollué et assez sec, par exemple par beau temps, le phénomène décrit plus haut s'accompagne d'aigrettes par effet de couronne sur les irrégularités superficielles causées par les matières polluantes adhérant à l'isolateur. Généralement, ce second phénomène a des effets moins graves que le premier, de sorte que les niveaux perturbateurs, sauf dans le cas de certains types de pollution, par exemple la pollution créée par les fabriques de produits chimiques, ne sont pas nettement différents de ceux qui sont produits par un isolateur sec et propre ou sont à peine plus élevés.

Si la surface de l'isolateur est propre, mais humide, la présence de gouttes d'eau provoque des aigrettes importantes qui, généralement, engendrent des niveaux perturbateurs plus élevés que les décharges d'origine polluante. Ce dernier phénomène, en conditions d'humidité, peut être atténué grâce à une meilleure répartition de la tension. Le niveau de bruit est généralement plus fort que pour les isolateurs secs, mais, là encore, il se limite aux fréquences de quelques mégahertz.

Lorsque la surface de l'isolateur est fortement polluée et mouillée, le phénomène est totalement différent, étant donné que les parasites sont produits par des impulsions de courant correspondant aux arcs qui traversent les bandes sèches sous l'effet de la chaleur dégagée par les courants de fuite passant sur la surface de l'isolateur. L'amplitude et le nombre de ces impulsions dépendent de la valeur de la tension aux bornes des bandes sèches isolantes, de la forme de l'isolateur et de ses dimensions, de la conductivité superficielle de la couche polluante et des caractéristiques du matériau à la surface de l'isolateur. La fréquence de coupure des spectres associés à ces impulsions peut atteindre quelques dizaines de mégahertz, de sorte que les parasites, dans ce cas, peuvent affecter les fréquences des émissions de télévision. Avec des isolateurs de verre ou de porcelaine mouillés et pollués, les perturbations, aux contraintes de tension normales imposées par les conditions de tenue diélectrique, peuvent atteindre des niveaux beaucoup plus élevés que dans les autres conditions dont il a été question plus haut.

Ces niveaux peuvent être abaissés, non seulement en réduisant les contraintes de tension, mais également en utilisant des isolateurs à caractéristiques spéciales. Par exemple, les isolateurs faits de matières organiques, ou les isolateurs de verre ou de porcelaine revêtus de graisse, empêchent la formation d'une couche humide continue et, par conséquent, de courants de fuite et de bandes sèches dus aux propriétés hydrophobes de la surface. Il existe donc de bonnes solutions pour abaisser le niveau des parasites dans les conditions d'humidité et de pollution. Toutefois, ces isolateurs risquent de ne plus être déparasités lorsqu'ils auront pris de l'âge et que leur surface aura été contaminée et sera devenue plus mouillable. Les isolateurs à email semi-conducteur offrent également une solution, étant donné qu'ils sont caractérisés par de très faibles niveaux perturbateurs en conditions de pollution, puisque l'email conducteur améliore la distribution de la tension et que la chaleur produite par le passage du courant dans le revêtement entretient des bandes sèches suffisamment larges pour supporter la tension appliquée sans donner naissance à des arcs.

6.2 *Corrélation entre la tension perturbatrice et le champ correspondant à partir d'une source isolée ou de sources réparties*

Dans ce paragraphe, nous traiterons du problème de la corrélation existant entre la tension du bruit radioélectrique d'une source isolée de perturbations, comme c'est le cas pour les mesures en laboratoire, et le champ perturbateur effectivement engendré par cette même source, ou une série de sources similaires réparties le long d'une ligne ou dans un poste de transformation.

and unsuitable bonding can, however, cause higher levels extending to higher frequencies. As is also the case with corona discharges at fittings, television reception is not usually affected by this type of radio noise.

If the insulator is lightly polluted and reasonably dry, for example in fair weather, the phenomenon described above is accompanied by corona discharges at surface irregularities caused by pollutants on the insulator. Generally this second phenomenon produces less serious effects than the first so that the noise levels, except in the case of certain types of pollution, for example near chemical works, are not significantly different from, or only slightly greater than, those occurring with a dry and clean insulator.

If the surface of the insulator is clean, but damp or wet, the existence of drops of water produces pronounced corona discharges which, generally, produce higher levels of radio noise than are produced by discharges from points of surface pollution. This latter phenomenon, in damp conditions, may become less important due to a better voltage distribution. The noise level is generally greater than with dry insulators but, again, it is limited to frequencies up to a few megahertz.

When the surface of the insulator is heavily polluted and wet, the phenomenon is completely different, since radio noise is produced by current pulses which flow when sparking occurs across the dry bands that are created by heating due to the passage of leakage currents on the surface of the insulator. The amplitude and number of these pulses depend on the voltage stress across the insulating dry bands, on the insulator shape and dimensions, on the surface conductivity of the pollutant layer and on the characteristics of the material at the surface of the insulator. The cut-off frequency of the spectra relating to these impulses may reach a few tens of megahertz and therefore the radio noise may also affect television frequencies. With wet and polluted glass or porcelain insulators, the radio noise at the normal voltage stresses, that are imposed by dielectric withstand requirements, may reach much higher levels than in other conditions previously described.

These levels may be reduced, not only by reducing the voltage stress, but also by using insulators of special characteristics. For instance, insulators made of organic material, or glass or porcelain insulators coated with grease, prevent the formation of a continuous damp layer, and therefore of leakage currents and dry bands, due to the water repelling properties of the surface. Consequently, these are adequate solutions for reducing the noise level in wet and polluted conditions. However, such insulators may no longer be noise-free when aged and their surfaces become contaminated and hence more wettable. The semi-conducting glaze type of insulator is also a possible solution, as it is characterized by relatively low noise levels in polluted conditions, since the conducting glaze improves the control of voltage distribution and the heat caused by the current flow in the glaze maintains dry bands which are sufficiently wide to sustain the applied voltage without sparking.

6.2 *Correlation between radio noise voltage and the corresponding field for distributed and individual sources*

This sub-clause deals with the problem of the correlation between the radio noise voltage of a single source of noise as can be measured in the laboratory, and the radio noise field actually generated in service by that source alone, or by a number of similar sources distributed along a line or present in a substation.

Généralement, une série de sources isolées de caractéristiques similaires se répartissent le long d'une ligne (exemple: isolateurs ou entretoises) ou se trouvent à l'intérieur d'un poste (exemple: isolateurs-soutiens, pinces et raccords). Occasionnellement, cependant, le bruit parasite peut n'être causé que par une seule source, comme c'est le cas du bruit provoqué par un isolateur défectueux ou par un accessoire mal fixé ou défectueux sur une ligne, du bruit injecté par un poste, ou du bruit de commutation dû à un redresseur.

Une source isolée de parasites, par exemple une chaîne d'isolateurs, peut être représentée comme un générateur de courant idéal produisant un courant I , et connecté d'un côté au conducteur sous tension et de l'autre au sol. Ainsi que l'indique le paragraphe 9.3 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2, ce courant peut être mesuré directement en laboratoire à l'aide d'un circuit d'essai approprié simulant le circuit réel en exploitation, auquel sera raccordé l'objet examiné contenant la source parasite. Bien que le courant parasite soit le paramètre constant entre conditions d'exploitation et conditions de laboratoire, les résultats des mesures de laboratoires sont habituellement exprimés en volts aux bornes d'une résistance R de 300 Ω , correspondant à environ la moitié de l'impédance d'onde d'une ligne typique prise comme référence. La relation entre la tension parasite V , en décibels au-dessus de 1 μV , et le courant parasite I , en décibels au-dessus de 1 μA , est donnée par la formule:

$$I = V - 20 \lg 300 = V - 49,5$$

Nous récapitulons brièvement, ci-après, les méthodes et les formules de calcul de la corrélation entre ledit courant I et le champ électrique E engendré. Ces méthodes et ces formules ne s'appliquent qu'à des fréquences d'au maximum quelques mégahertz.

6.2.1 *Approche semi-empirique et formules*

6.2.1.1 *Introduction*

La démarche générale visant à établir une corrélation quantitative entre le courant parasite I et le champ parasite E correspondant prévoit les étapes suivantes:

a) Source parasite isolée

- Détermination du courant I de la source, que l'on peut réaliser directement en laboratoire à partir de la mesure de la tension V .
- Calcul des courants parasites dans chaque phase pour la section de ligne pour laquelle le profil du champ perturbateur doit être calculé, cette étape tenant compte de l'atténuation longitudinale ainsi que du couplage mutuel entre phases.
- Sur la base des courants parasites de la section de ligne ci-dessus, calcul des champs parasites dus à ces courants à différentes distances latérales de la ligne.
- Pour chaque distance latérale, le champ total est obtenu en additionnant les champs ci-dessus.

b) Sources parasites multiples

- Répétition des calculs prévus pour la source isolée pour chacune des sources présentes dans la phase examinée.
- Composition des champs parasites pour chacune des distances à la ligne, calculés séparément pour chaque source de la phase examinée.

La démarche que nous venons de décrire détermine le champ électrique E_k dû aux sources parasites existant sur la phase k de la ligne ou du poste. Les calculs sont répétés pour chaque phase comportant des sources parasites. Le champ global E à chaque distance latérale est obtenu, selon la règle décrite dans [1], en ajoutant 0 dB à 1,5 dB à la plus forte valeur du champ calculé pour chaque phase à la distance en question. Dans les cas normaux, impliquant des

Usually, a number of single sources, with similar characteristics, are distributed along a line, for example insulators and spacers, or are present in a substation, for example post insulators, clamps and joints. Occasionally, however, the radio noise may be caused by just one source, for example the noise produced by a defective insulator or a loose or faulty fitting on a line, the injected noise from a substation, or the commutation noise from an a.c./d.c. convertor.

A single source of radio noise, for example an insulator string, can be represented as an ideal current generator producing a current, I and connected between the energized conductor and ground. As shown in Sub-clause 9.3 of C.I.S.P.R. Publication 18-2, this current can be measured directly in the laboratory by using an appropriate test circuit simulating the actual circuit in service and by connecting the object under test, which includes the noise source, to that circuit. Though the noise current is the parameter which is constant between service and laboratory conditions, the results of a laboratory measurement are usually expressed in terms of the voltage V across a resistance R of 300 Ω , corresponding to about half the surge impedance of a typical line taken as a reference. The relationship between the noise voltage V , in decibels above 1 μV , and the noise current I , in decibels above 1 μA , is given by the expression:

$$I = V - 20 \lg 300 = V - 49.5$$

Briefly reviewed below are methods and formulae for calculating the correlation between the above current I and the generated electric field E . These methods and formulae apply only to frequencies up to a few megahertz.

6.2.1 *Semi-empirical approach and formula*

6.2.1.1 *Introduction*

The general approach for establishing a quantitative correlation between the radio noise current I and the corresponding radio noise field E includes the following steps:

a) *Single noise source*

- Determination of the current I of the source, which can be obtained directly in the laboratory from measurement of the voltage V .
- Calculation of the noise currents in each phase for the section of the line for which the profile of the radio noise field is to be calculated. This step takes into account longitudinal attenuation as well as mutual coupling between phases.
- On the basis of the radio noise currents in the above line section, calculation of the radio noise fields due to these currents at different lateral distances from the line.
- For each lateral distance the aggregate field is obtained by the summation of the above fields.

b) *Multiple noise sources*

- Repetition of the calculations described for the single source for each source present in the phase under consideration.
- Aggregation of the noise fields for each distance from the line, calculated separately for each source on the phase under consideration.

The above approach determines the electric field E_k due to the sources of noise that are present on phase k of a line or a substation. Calculations are repeated for each phase on which noise sources are present. The aggregate field E at each lateral distance is obtained, according to the rule described in [1], adding 0 dB to 1.5 dB to the highest value of the field calculated for each phase at the particular lateral distance. In normal cases involving three-

lignes triphasées, les sources se répartissant de la même façon sur chaque phase, la correction se dégageant de la règle ci-dessus est généralement inférieure à 1 dB, et peut donc être négligée. Le champ global E peut donc être évalué en ne considérant que les sources parasites de la phase la plus proche.

6.2.1.2 Formules

Les formules semi-empiriques, ci-après, peuvent être dégagées de l'approche décrite plus haut:

a) Source parasite isolée

- 1) Dans le cas d'une ligne à un seul conducteur, par exemple une ligne de courant continu monopolaire, le champ électrique $E(x)$ en décibels au-dessus de $1 \mu\text{V/m}$, à une distance longitudinale x , en kilomètres, du point d'injection du courant I de la source parasite, en décibels au-dessus de $1 \mu\text{A}$, et à une distance latérale y donnée en mètres, de la ligne, peut être exprimé par la formule suivante:

$$E(x) = I + A - Bx + C \quad (3)$$

où A tient compte de la répartition du courant injecté des deux côtés du point d'injection.

On peut calculer A à l'aide de la formule $A = 20 \lg \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$ où Z_1 et Z_2 sont les impédances d'onde des deux sections des deux côtés du point d'injection. Dans le cas le plus commun d'une seule source parasite, par exemple un isolateur défectueux, sur une ligne longue $Z_1 = Z_2$ et par conséquent $A = -6 \text{ dB}$.

Le terme Bx exprime l'atténuation du courant le long de la ligne. Le coefficient B , dans la pratique, se situe entre 2 dB/km et 4 dB/km; on peut retenir une valeur moyenne de 3 dB pour des fréquences voisines de 0,5 MHz.

C exprime la corrélation entre l'intensité du champ parasite et le courant parasite dans la section de la ligne où le champ doit être calculé. C peut être déterminé expérimentalement, mais on peut également le déterminer à l'aide de la formule suivante (pour la signification des symboles voir figure 8, page 103):

$$C = 20 \lg \left[60 \left(\frac{h}{h^2 + y^2} + \frac{h + 2 P_g}{(h + 2 P_g)^2 + y^2} \right) \right]$$

Pour une distance de 20 m du conducteur, c'est-à-dire la position de référence C.I.S.P.R., la valeur de C se situe entre 7 dB et 12 dB.

- 2) Dans le cas de lignes triphasées, une formule semi-empirique similaire peut être employée pour déterminer le champ $E(x)$ produit par la phase la plus proche:

$$E(x) = I + A + F(x) + C \quad (4)$$

La différence la plus importante entre les deux cas représentés par les formules (3) et (4) est que, dans le cas de la ligne triphasée, l'atténuation longitudinale ne peut être exprimée à l'aide d'une seule constante d'atténuation; dans ce cas, il est nécessaire de définir une fonction d'atténuation $F(x)$. La figure 9, page 103, montre l'allure moyenne de cette fonction d'atténuation, d'après les résultats enregistrés avec des lignes à haute tension et à très haute tension. Les autres symboles de la formule (4) sont identiques à ceux de la formule (3) [41, 45, 46, 47, 48, 49, 50].

b) Sources parasites multiples

- 1) Dans le cas de lignes à un seul conducteur, le champ E , dû à des sources parasites multiples se distribuant uniformément le long du conducteur, peut être exprimé par la formule:

$$E = I + A - 10 \lg(as) + C \quad (5)$$

phase lines, with the same distributed sources on each phase, the correction derived from the above rule is generally lower than 1 dB and hence it can be neglected. The aggregate field E can therefore be evaluated by considering the sources of noise on the nearest phase only.

6.2.1.2 Formulae

On the basis of the above approach, the following semi-empiric formulae can be obtained:

a) Single noise source

- 1) In the case of lines with only one conductor, for example a monopolar d.c. line, the electric field $E(x)$, in decibels above 1 $\mu\text{V/m}$, at a longitudinal distance x , in kilometres, from the injection point of the noise source current I , in decibels above 1 μA , and at a given lateral distance y , in metres, from the line, can be expressed by the following formula:

$$E(x) = I + A - Bx + C \quad (3)$$

where: A takes into account the splitting of the injected current on either side of the injection point. It can be calculated by means of the formula $A = 20 \lg \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$ where Z_1 and Z_2 are the surge impedances of the two sections on either side of the injection point. In the most common case of a single source of noise on a long line, for example a defective insulator, $Z_1 = Z_2$ and then $A = -6 \text{ dB}$.

Term Bx expresses the attenuation of the current along the line. Coefficient B , in practice, lies between 2 dB/km and 4 dB/km; an average value of 3 dB can be assumed for frequencies around 0.5 MHz.

C expresses the correlation between the strength of the noise field and the noise current in the section of the line where the field is to be calculated. It can be determined experimentally, but it can also be obtained by making use of the following formula (for the meaning of the symbols see Figure 8, page 103):

$$C = 20 \lg \left[60 \left(\frac{h}{h^2 + y^2} + \frac{h + 2 P_g}{(h + 2 P_g)^2 + y^2} \right) \right]$$

For a direct distance from the conductor of 20 m, that is to say the C.I.S.P.R. reference position, the value of C lies between 7 dB and 12 dB.

- 2) In the case of three-phase lines, a similar semi-empirical formula can be used for the determination of the field $E(x)$ produced by the nearest phase:

$$E(x) = I + A + F(x) + C \quad (4)$$

The most important difference between the two cases represented by formulae (3) and (4) is that in the case of a three-phase line the longitudinal attenuation cannot be expressed by means of only one attenuation constant; in this case the definition of an attenuation function $F(x)$ is necessary. Figure 9, page 103, shows an average trend of this attenuation function, based on the results of experiments performed on high voltage and extra high voltage lines. The other symbols in formula (4) are the same as in formula (3) [41, 45, 46, 47, 48, 49, 50].

b) Multiple noise sources

- 1) In the case of lines with only one conductor, the field E , due to multiple noise sources equally distributed along the conductor, can be expressed by the formula:

$$E = I + A - 10 \lg(as) + C \quad (5)$$

A et C sont identiques aux mêmes lettres de la formule 3; s est la distance entre sources en mètres; a est la constante d'atténuation par mètre et est reliée au coefficient B de la formule (3) par la relation ci-après:

$$a = (B/8,7) \cdot 10^{-3}$$

La gamme des valeurs prises par le coefficient a par mètre, correspondant à la gamme de B de l'alinéa précédent, va de $250 \cdot 10^{-6}$ à $450 \cdot 10^{-6}$. La formule (5) s'applique aux lignes de longueur infinie, et il y aura lieu de pratiquer les corrections qui s'imposent pour les lignes plus courtes.

- 2) Dans le cas des lignes triphasées, le champ E , dû à des sources parasites se répartissant sur les trois phases, peut être calculé comme suit:

$$E = I + A + (D - 10 \lg (s/500)) + C \quad (6)$$

où le terme $D - 10 \lg (s/500)$ tient compte de l'addition des sources parasites le long de la ligne selon la loi d'atténuation moyenne indiquée par la figure 9, page 103. Les valeurs moyennes de D se situent entre 10 dB et 12 dB. La formule (6) s'applique également aux lignes de longueur infinie et appelle les corrections adéquates pour les lignes plus courtes.

6.2.2 Méthodes analytiques

La corrélation entre le courant parasite et le champ parasite peut également être évaluée à l'aide de méthodes analytiques similaires à celles que nous avons expliquées à propos de l'effet de couronne sur les conducteurs (voir paragraphe 5.3). Lorsque le courant parasite I , engendré par une source isolée sur un conducteur et injecté dans le conducteur, est connu, la détermination du champ parasite E , engendré en une position donnée par rapport au conducteur, est effectuée en tenant compte, en premier lieu, du partage du courant I entre les deux sections de la ligne, vu du point d'injection. Par exemple, dans le cas d'une source parasite sur une ligne de longueur infinie, le courant se partage également entre les deux sections de la ligne. L'atténuation du courant se propageant le long du conducteur est ensuite calculée et, finalement, on évalue le champ engendré par le courant en une position donnée.

Dans le cas de lignes à un seul conducteur, par exemple des lignes monopolaires à courant continu, les calculs sont relativement simples, puisqu'il suffit de connaître la constante d'atténuation en fonction de la fréquence et de la résistivité du sol.

Dans le cas de lignes à plus d'un conducteur, lignes triphasées à courant alternatif, lignes bipolaires ou homopolaires à courant continu, les calculs de la propagation du bruit sont moins simples; en général, on fait appel à l'analyse modale. La théorie modale complète est relativement complexe, et diverses procédures plus ou moins simplifiées ont été élaborées [2, 8, 42, 43, 44]. Le principe, cependant, demeure essentiellement le même: le système effectif de courants ou de tensions parasites est ramené à plusieurs systèmes simples, caractérisés par des lois plus simples de propagation similaires à celles que l'on applique pour les systèmes à un seul conducteur. Il reste ensuite à appliquer les mêmes calculs à chaque système et à additionner les champs individuels pour en déduire le champ global.

Lorsque plusieurs sources se répartissent sur l'une des trois phases, le mode de calcul est très semblable à celui que nous avons expliqué pour la source isolée. Dans ce cas, il suffit de tenir compte de l'addition des diverses sources de bruit que l'on considère habituellement comme étant de type aléatoire.

Dans le cas de sources parasites sur les trois phases, le calcul du champ doit être fait séparément pour le bruit injecté dans chacune des phases, et l'on obtient le champ global E ainsi qu'il est dit au paragraphe 6.2.1.1.

A and C are the same as in formula 3; s is the distance between sources in metres; a is the attenuation constant per metre and it is related to coefficient B of formula (3) by means of the relationship:

$$a = (B/8.7) \cdot 10^{-3}$$

The range of values assumed by coefficient a per metre, corresponding to the range of B given in the preceding paragraph, is between $250 \cdot 10^{-6}$ and $450 \cdot 10^{-6}$. Formula (5) applies to lines of infinite length and for shorter lines appropriate corrections can be applied.

- 2) In the case of three-phase lines, the field E , due to distributed sources of noise on the three phases, can be calculated as follows:

$$E = I + A + (D - 10 \lg (s/500)) + C \quad (6)$$

where the term $D - 10 \lg (s/500)$ takes into account the aggregation of the noise sources along the line on the basis of an average attenuation law given in Figure 9, page 103. Average values of D lie between 10 dB and 12 dB. Formula (6) also applies to lines of infinite length and for shorter lines appropriate corrections can be applied.

6.2.2 Analytical methods

The correlation between noise current and noise field can also be evaluated by means of analytical methods similar to those already described in the case of the corona effect on conductors (see Sub-clause 5.3). When the radio noise current I , generated by an individual source on a conductor and injected into the conductor, is known, the determination of the radio noise field E , produced at a given position with respect to the conductor, is carried out by considering, in the first place, the splitting of the current I between the two sections of line, as seen from the injection point. For example, in the case of a source of noise on a line of infinite length, the current is divided equally between the two sections of the line. The attenuation of the current propagating along the conductor is then calculated and, finally, the field produced by the current at a given position is evaluated.

In the case of lines with only one conductor, for example a monopolar d.c. line, the calculation process is relatively simple, as all it calls for is a knowledge of the attenuation constant as a function of the frequency and the resistivity of the soil.

In the case of lines with more than one conductor, three-phase a.c. lines, bipolar or homopolar d.c. lines, the calculation of propagation of the noise is less simple and is generally dealt with by modal analysis. The complete modal theory is relatively complex and various more or less simplified procedures have been developed [2, 8, 42, 43, 44]. The principle, however, remains substantially the same and the actual system of radio noise currents, or voltages, is reduced to a few simple systems, characterized by simpler laws of propagation similar to those that exist for a system with only one conductor. It is then a question of applying similar calculations to each system and then aggregating the individual fields in order to determine the resultant field.

Where several sources are distributed on one of the three phases, the calculation process is much the same as previously described for the single source. In this case, account has only to be taken of the aggregation of the various sources of noise which are usually assumed to be of the random type.

In the case of noise sources on all three phases, the calculation of the field is carried out separately for the noise injected into each phase, and the total field E is obtained by the same processes as those described in Sub-clause 6.2.1.1.

6.2.3 Exemple d'application

Un exemple recourant à la méthode analytique décrite plus haut a été étudié à propos d'une ligne de 420 kV de longueur infinie, ayant une portée moyenne de 400 m et des chaînes d'isolateurs produisant une tension parasite, rapportée à 300 Ω , de 49,5 dB au-dessus de 1 μ V, soit un courant de 1 μ A par chaîne. Les calculs ont été exécutés à l'aide d'un programme informatique approprié et les résultats sont résumés sur la figure 10, page 104, qui indique également les données incorporées dans les calculs.

Si les calculs sont répétés en utilisant la formule semi-empirique (6), par rapport à la position de référence C.I.S.P.R. de 20 m au conducteur le plus proche, et en affectant à D la valeur de 11 dB, on obtient pour le champ électrique la valeur suivante:

$$E = 0 - 6 + 11 - 10 \lg \frac{400}{500} + 20 \lg 60 \left(\frac{2 \times 9}{20^2} \right) = 14,5 \text{ dB au-dessus de } 1 \mu\text{V/m}$$

ce qui concorde bien avec la valeur de 13,5 dB calculée par la méthode analytique (voir figure 10).

6.3 Influence des conditions ambiantes

Le paragraphe 6.1 donne des informations qualitatives sur les effets des conditions ambiantes: humidité, pluie, brouillard, pollution, qui influencent le niveau perturbateur des isolateurs et des accessoires. Ces informations découlent essentiellement d'une analyse simplifiée des phénomènes physiques impliqués dans les diverses situations. La connaissance de ces phénomènes physiques est généralement suffisante pour définir des lois de variation qualitative des niveaux perturbateurs en fonction des principaux paramètres caractérisant les états de surface des isolateurs et des accessoires. D'un autre côté, certaines incertitudes existent encore quant aux effets quantitatifs de ces paramètres. Notamment, certains résultats d'essais sur des essais de perturbations radioélectriques effectués par différents chercheurs sur des isolateurs légèrement pollués, spécialement lorsque ceux-ci étaient secs, ne sont pas véritablement probants. Il n'existe pas actuellement de procédure généralement admise pour simuler en laboratoire les conditions d'exploitation les plus communes des isolateurs légèrement pollués, et aucun résultat d'essais significatif n'a été utilisé, ainsi qu'il est dit au paragraphe 10.4 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2.

La question est à l'étude actuellement et sera revue dès que les résultats des recherches de la CIGRÉ auront fourni des données concluantes et acceptées.

7. Arcs dus aux mauvais contacts

7.1 Aspects physiques du phénomène des perturbations radioélectriques

Des pièces conductrices mal connectées d'une ligne de tension ou d'un poste, ou même des clôtures métalliques ou des gouttières proches, si elles se trouvent au sein d'un fort champ électrique engendré par des lignes à haute tension ou de l'appareillage associé, peuvent se charger électriquement et la différence de potentiel entre des pièces conductrices voisines augmentera, même si ces pièces sont à potentiel flottant, c'est-à-dire même si elles ne sont pas raccordées à un conducteur de la ligne ou à la terre.

Si la distance séparant les pièces conductrices est faible, l'intensité croissante du champ dans l'espace intermédiaire risque d'atteindre le niveau critique et de conduire à un claquage de l'intervalle. L'ionisation par avalanche provoque la naissance d'un arc, une décharge de type éclateur se produit, la différence de potentiel entre les deux surfaces chargées tombe alors à une valeur basse et l'arc s'éteint. Toute cette série d'événements peut se répéter si les pièces se rechargent parce que l'espace qui les sépare est à nouveau contraint, et, à ce moment-là, une nouvelle décharge de type éclateur se produit.

6.2.3 Example of application

An example using the analytical method described above has been worked out with reference to a 420 kV line of infinite length having an average span length of 400 m and insulator strings producing a radio noise voltage, when referred to 300 Ω , of 49.5 dB above 1 μV , that is, a current of 1 μA per string. These calculations have been performed by using suitable computing programs and the results are summarized in Figure 10, page 104, which also gives the data assumed in the calculations.

If the calculations are repeated using the semi-empirical formula (6), with reference to the C.I.S.P.R. position of 20 m from the nearest conductor and assuming an average value for D of 11 dB, the following value is obtained for the electric field:

$$E = 0 - 6 + 11 - 10 \lg \frac{400}{500} + 20 \lg 60 \left(\frac{2 \times 9}{20^2} \right) = 14.5 \text{ dB above } 1 \mu\text{V/m}$$

This is in good agreement with the value of 13.5 dB calculated by the analytical method (see Figure 10).

6.3 Influence of ambient conditions

Sub-clause 6.1 gives qualitative information on the effect of the ambient conditions; humidity, rain, fog, pollution, on the radio noise levels of insulators and fittings. This information is based essentially on a simplified analysis of the physical phenomena involved in the various situations. The knowledge of these physical phenomena is generally sufficient to establish qualitative variation laws of the radio noise levels as a function of the main parameters characterizing the surface conditions of the insulators and fittings. On the other hand, some uncertainties still exist on the quantitative effects of these parameters. In particular some results of radio noise tests performed by different experimenters on lightly polluted insulators, especially in dry conditions, are not quite consistent. There is at present no agreed procedure for simulating in the laboratory the most common service conditions of lightly polluted insulators nor the implementation of any relevant test results as referred to in Sub-clause 10.4 of C.I.S.P.R. Publication 18-2.

The matter is under consideration and will be reviewed when the results of studies within CIGRÉ yield agreed and conclusive data.

7. Sparking due to bad contacts

7.1 Physical aspects of the radio noise phenomenon

Unbonded conducting parts of a power line or substation, or even such items as nearby metal fences or rain-water guttering, when in the strong electric field of high voltage power lines and associated equipment, can become electrically charged and the potential difference between adjacent conducting parts will increase even if both parts are floating, that is to say they are not connected to a line conductor or to earth.

If the distance separating the conducting parts is small, the increasing field strength in the intervening space may reach the critical level and lead to a complete breakdown of the gap. Avalanche ionization initiates the development of an arc, gap discharge occurs, the potential difference across the gap then falls to a low level and the arc extinguishes. The whole sequence of events can be repeated when the parts become re-charged, as the space is once again electrically stressed and the next gap discharge takes place.

La fréquence de répétition de la séquence dépend des constantes de temps de charge et de décharge du circuit, et de l'intensité du champ électrique environnant, ainsi que de la dimension de l'intervalle. Des étincelles peuvent apparaître entre plusieurs centaines et quelques milliers de fois par seconde. La fréquence de répétition, toutefois, est d'au moins un ordre de grandeur au-dessous de la gamme des fréquences de répétition des décharges par effet de couronne.

La probabilité d'une décharge de type éclateur dans un espace donné est naturellement plus élevée au voisinage de la crête de la tension à fréquence industrielle. Lorsque la tension de ligne et, par conséquent, l'intensité du champ dans l'espace dépassent une valeur critique, un train ou une rafale d'étincelles est engendré à chaque demi-cycle.

Le principal facteur de la forme de l'impulsion de décharge est son front de montée très raide, ce qui implique la production et l'émission d'une large gamme de hautes fréquences. Une comparaison entre les spectres de fréquence des champs perturbateurs engendrés par les décharges par effet de couronne et les décharges de type éclateur, à une distance donnée de la ligne, est fournie par la figure 11, page 105. Les fréquences émises peuvent s'étendre à quelques centaines de mégahertz. Si le processus de décharges excite un accessoire ou une pièce susceptible d'osciller à une fréquence particulière, en raison de ses dimensions géométriques, un rayonnement énergétique à bande étroite pourra se produire à la fréquence en question, l'accessoire ou la pièce agissant comme le ferait un aérien accordé. Autrement dit, les décharges de type éclateur peuvent perturber la réception des signaux radio AM et aussi des signaux vidéo de la télévision. En revanche, les signaux radio FM, dans la bande des très hautes fréquences, et les signaux «son» de télévision sont beaucoup moins susceptibles d'être touchés par ce type de perturbations.

La propagation le long de la ligne, avec les champs électriques et magnétiques qui s'y associent, et les rayonnements, constituent les voies par lesquelles les fréquences radio-électriques perturbatrices atteignent l'aérien récepteur. Il a été observé qu'en pratique les bruits aux fréquences correspondant aux bandes d'ondes longues et moyennes se propageaient sur quelques dizaines de kilomètres le long de la ligne. Aux fréquences TV et FM, la propagation le long de la ligne est moins importante que le rayonnement depuis la source. La géométrie de la ligne, la résistance du sol sous-jacent et la fréquence jouent un rôle primordial dans la propagation. Aux fréquences les plus élevées, l'atténuation le long de la ligne est plus forte et la distance de propagation plus courte.

Les niveaux importants du champ perturbateur sont normalement confinés au voisinage immédiat de la ligne, parvenant à la rigueur à quelques centaines de mètres de chaque côté. Si, toutefois, une résonance se manifeste au niveau d'un accessoire ou d'une pièce, une bande étroite de rayonnement peut être mesurée à des distances de l'ordre de quelques kilomètres. Une courbe indiquant une relation typique entre l'intensité du champ et la distance apparaît à la figure 12, page 105. Les fluctuations sont la conséquence de l'interaction entre les ondes directes et les ondes réfléchies par le sol.

7.2 Exemples de sources de décharges de type éclateur

Les décharges de type éclateur sur les lignes aériennes peuvent être causées par des isolateurs de type à capot et tige trop peu chargés, où la charge mécanique de l'isolateur ne suffit pas à empêcher les surfaces métalliques en contact de s'oxyder, ou bien par des pièces métalliques corrodées ou des raccords défectueux. Dans le cas des chaînes d'isolateurs en porcelaine, il a été observé que des étincelles pouvaient être produites par des décharges naissant dans les petites cavités de la porcelaine. Des isolateurs brisés, des couches de peinture ou même des objets étrangers à la ligne de transport, par exemple des clôtures métalliques ou des gouttières non mises à la masse, peuvent provoquer des décharges de type éclateur.

The repetition rate of this sequence depends on the charging and discharging time constants of the circuit and the value of the surrounding electric field, as well as on the length of the gap. Individual sparks can occur at many hundreds to a few thousands of times per second. The repetition rate is, however, at least one order of magnitude lower than the range of repetition rates of corona discharges.

The probability of a particular gap sparking over is, of course, greater around the peaks of the power frequency voltage. When the line voltage and consequently the field strength in the gap, exceeds a critical value, a train or burst of sparks is generated during each half-cycle.

The significant factor in the shape of the discharge pulse is its steep rise time and, consequently, a broad range of high frequencies is produced and emitted. A comparison between the frequency spectra of the radio noise field from corona and gap-type discharges, at a particular distance from the line, is shown in Figure 11, page 105. The emitted frequencies may extend to a few hundred megahertz. If the discharge process excites a fitting or component which is capable of oscillating at a particular frequency, due to its geometrical dimensions, energetic narrow-band radiation at this frequency may occur as the fitting or component acts as a tuned aerial. Therefore, gap-type discharges may cause interference to the reception of both a.m. radio signals and the vision signals of television. By contrast, f.m. radio, in the v.h.f. band, and the audio signals of television are less likely to be affected by this type of interference.

Propagation along the line, with the associated electric and magnetic fields, and radiation are the routes by which the disturbing radio frequencies reach the receiving aerial. It has been observed, in practice, that noise at frequencies corresponding to the long and medium wave bands propagates some tens of kilometres along the line. At television and f.m. radio frequencies the propagation along the line is less important than radiation from the source. Line geometry, resistance of the underlying ground and the frequency are of major importance to propagation. For the higher frequencies, the attenuation along the line is greater and the distance of propagation is shorter.

Significant levels of the radio noise field are normally confined to the immediate vicinity of the line, possibly reaching out to a few hundred metres on either side. If, however, a resonant condition occurs in a fitting or component, a narrow band of radiation may be measured at distances of up to a few kilometres. A curve showing a typical relationship between field strength and distance is shown in Figure 12, page 105. The fluctuations are the result of the interaction of the direct wave with the ground-reflected wave.

7.2 *Examples of gap sources*

Gap sources on overhead lines may be due to lightly weighted cap and pin insulators, where the weight of the insulator is insufficient to prevent the metal contact surfaces from oxidizing, or with corroded metal parts or faulty joints. In the case of porcelain string insulator units, it has been found that sparks can be produced by discharges in small voids in the porcelain. Broken insulators, paint layers and even objects not forming part of a transmission line, such as nearby unbonded metal fences or gutters, may give rise to gap discharges.

Lorsqu'on utilise des poteaux de bois pour les lignes de distribution, des claquages peuvent intervenir entre les accessoires métalliques et imposer de graves perturbations à la réception TV. Cela se produit en général à la suite de la contraction et de la dilatation du bois, consécutives aux variations d'humidité. Lorsque le bois se contracte, les écrous et boulons servant à maintenir les traverses, ou à fixer les tiges des isolateurs sur le poteau ou une traverse, se desserrent légèrement. S'il y a corrosion entre l'écrou et le boulon, ou une rondelle éventuelle, le contact cessera d'être bon et un claquage se produira.

Les perturbations TV dues aux lignes de distribution sur poteaux de bois peuvent aussi être causées par les cavaliers servant à fixer le fil de terre au poteau. Etant donné qu'il existe des différences de potentiel entre des sections du poteau, il peut y avoir claquage entre les cavaliers et le fil de terre, en particulier en présence de corrosion entre ces éléments.

Finalement, le contact entre un isolateur rigide et un conducteur de phase peut être à l'origine d'un claquage au niveau du fil d'attache, lorsque le conducteur repose sur le sillon supérieur ou au niveau des étriers, s'il passe par le sillon latéral. Le problème vient de ce que les petites poches d'air, fortement contraintes, entre le conducteur et l'isolateur, peuvent subir des amorçages.

Il importera de prendre toutes les précautions possibles aussi bien durant la construction de la ligne, pour que les travaux soient exécutés correctement, que pendant l'entretien ultérieur, pour s'assurer que tous les défauts, dus par exemple au vandalisme, soient identifiés et que les réparations qui s'imposeront soient effectuées. Une attention toute particulière devra être réservée à la conception et à l'entretien de l'appareillage, afin de s'assurer de la longévité et de la qualité des contacts, par exemple dans les sectionneurs dans l'air: connexions souples, barrettes de fusibles et raccords de conducteurs.

Les décharges de type éclateur sont fortement influencées par le temps. C'est seulement par temps sec qu'un petit intervalle, par exemple entre deux pièces conductrices, fournit une isolation susceptible de se décharger. Par temps humide, l'espace peut être shunté par l'eau, ce qui a pour effet d'établir une voie conductrice. En conséquence, les perturbations causées par les décharges de type éclateur sont un phénomène normalement associé au beau temps et habituellement absent par temps humide. C'est pourquoi ce type de perturbations est souvent appelé bruit sec.

8. Effets spéciaux en courant continu

8.1 Généralités

Les réseaux de transport en courant continu à haute tension peuvent engendrer des perturbations radioélectriques de deux manières tout à fait différentes. Premièrement, par le fonctionnement normal des redresseurs, qui peuvent être à vapeur de mercure ou à thyristors et, deuxièmement, par effet de couronne et phénomènes associés sur les appareillages haute tension, jeux de barres et lignes aériennes. Il convient donc de prendre en considération:

- a) l'effet de couronne en courant continu;
- b) l'effet de commutation.

Comparativement aux systèmes de transport en courant alternatif à haute tension, le problème des perturbations radioélectriques causées par les systèmes en courant continu à haute tension n'a pas la même importance, étant donné que, de toute manière, il y a relativement peu de systèmes de ce genre en exploitation dans le monde actuellement. De ce

Where wood poles are used for power lines, sparking may occur between items of metal fittings which can lead to severe interference to television reception. This usually occurs due to the shrinking or swelling of the wood with variations in the humidity. As the wood shrinks, nuts and bolts used to hold the cross-arms in place, or to fasten insulator pins to the pole or cross-arm, can become slightly loose. If any corrosion is present between the nut and bolt, or the washer if one is used, an imperfect contact results and sparking takes place.

Another source of television interference from wood-pole lines can arise from the staples used to fasten the earth wire to the pole. As there are potential differences between sections of the pole, the staples may spark over to the earth wire, particularly if there is any corrosion between them.

Finally, the contact between a pin-type insulator and phase conductor can be a source of sparking at the tie-wire, where the conductor rests in the top groove, or at the stirrups in the side groove. The problem is the small, highly stressed, pockets of air between the conductor and the insulator that may spark over.

Care must be taken both during the erection of the line to ensure good workmanship throughout and, in the subsequent maintenance, to ensure that any defects caused, for example by vandalism, are found and the necessary remedial action taken. Special attention should be given to the design and maintenance of equipment to ensure the durability and adequacy of contacts at, for example, air-break isolating switches, the flexible connections provided in the design of such switches, fuse-mounts and line taps.

Gap discharges are strongly influenced by the weather. It is only in dry weather that a small gap between, for example, two conducting parts provides insulation which can break down. In wet weather the gap may be bridged with water thereby establishing a conducting path. Therefore, interference caused by gap discharges is a phenomenon that is normally associated with fair weather and it is usually absent in wet weather. Consequently, this type of interference is often referred to as dry noise.

8. Special d.c. effects

8.1 General

High voltage d.c. transmission systems can generate radio noise in two quite different ways: firstly, by the normal operation of the main convertor valves, which may be of the mercury arc type or thyristors and, secondly, by corona discharge and associated phenomena on the high voltage equipment, busbars and overhead lines. It is therefore necessary to take into consideration:

- a) the effect of d.c. corona;
- b) the effect of valve firing.

Compared with high voltage a.c. transmission systems, the problem of radio noise from high voltage d.c. systems is not so important, as only relatively few are in operation throughout the world. Consequently, experience of radio interference problems associated with high voltage d.c. systems is less than that with high voltage a.c. systems. Most of the information on

fait, l'expérience acquise à propos des problèmes de perturbations radioélectriques provoquées par les systèmes en courant continu est bien moindre qu'à propos des systèmes en courant alternatif. La majorité des renseignements que nous possédons sur les perturbations radioélectriques causées par les systèmes en courant continu à haute tension a été obtenue sur des lignes et des nasses d'essai, et le reste sur des lignes en exploitation.

Les systèmes en courant continu à haute tension opèrent normalement à des tensions atteignant ± 500 kV et, à l'avenir, des tensions encore supérieures seront certainement employées.

8.2 *Effet de couronne causé par les conducteurs*

Bien que les causes des perturbations radioélectriques sur les systèmes en courant continu, dues à l'effet de couronne sur les conducteurs, les isolateurs et les accessoires des lignes, soient les mêmes que pour les systèmes en courant alternatif, on observe certaines différences notables entre les effets.

L'aspect physique de l'effet de couronne en courant alternatif a été exposé au paragraphe 5.1, mais le mécanisme est différent en courant continu, parce que:

- a) un manchon d'ionisation stationnaire se crée autour de chaque conducteur;
- b) une charge d'espace se constitue dans l'espace restant entre les conducteurs et le sol et entre les conducteurs eux-mêmes.

L'ionisation agit en partie comme un écran et modifie le champ électrique au voisinage du conducteur, et, en raison de la charge d'espace, le champ électrique effectif diffère notablement du champ statique théorique.

Pour une ligne à courant alternatif, il n'existe pas de charge d'espace stationnaire et les effets de l'ionisation autour du conducteur sont différents.

Les décharges par effet de couronne commencent toujours à la suite des collisions entre des électrons libres et des atomes stables. Ces électrons existent dans l'atmosphère dans toutes les conditions normales, et ils s'éloignent du conducteur négatif pour se diriger vers le conducteur positif, ce qui entraîne une différence importante entre les deux formes d'effet de couronne qui en résultent. Les décharges négatives par effet de couronne se produisent à une fréquence de répétition élevée et à une amplitude modérée, alors que les décharges au voisinage du conducteur positif sont moins fréquentes et d'une amplitude bien plus étendue.

Les caractéristiques du bruit radioélectrique, le niveau, le spectre des fréquences et le profil latéral pour une ligne à courant continu et à haute tension, sont déterminés par:

- les paramètres de construction;
- la tension de la ligne, ou le gradient superficiel de tension du conducteur et la polarité;
- les conditions atmosphériques.

Les effets subjectifs d'un champ perturbateur engendré par un courant continu sont moins gênants que ceux d'un champ, d'amplitude égale, produit par une ligne à courant alternatif, en raison de la distribution différente dans le temps des impulsions de courant.

Paramètres de construction

Contrairement aux lignes à courant alternatif, les lignes à courant continu sont normalement monopolaires, avec retour terre ou mer/terre, ou bien bipolaires avec des conducteurs simples ou en faisceau. La longueur des isolateurs et la distance entre phases peuvent être relativement réduites, car les surtensions internes sont nettement plus basses qu'en courant alternatif, en raison de la suppression rapide du défaut par blocage des redresseurs, et généralement la longueur des isolateurs est plus déterminée par la pollution que par les surtensions.

high voltage d.c. interference has been obtained from test lines and cages, and the remainder from existing systems.

High voltage d.c. transmission systems are at present operating at voltages up to ± 500 kV and, in the near future, even higher voltages will be used.

8.2 *Effects of corona from conductors*

Although the causes of radio noise from high voltage d.c. systems, due to corona discharges on line conductors, insulators and fittings, is the same as for a.c., there are some noticeable differences in the effects.

The physical aspects of a.c. corona were discussed in Sub-clause 5.1 but the corona mechanism with d.c. is different because:

- a) a stationary ionization sheath is created around each conductor;
- b) a space charge is built up in the remaining space between the conductors and ground and between the conductors themselves.

The ionization acts partly as a shield, which modifies the electric field close to the conductor and, due to the space charge, the actual electric field differs markedly from the theoretical static field.

For an a.c. line, no stationary space charge exists and the ionization effects around the conductor act in a different manner.

Corona discharges are always initiated by collisions of free electrons with stable atoms. These electrons exist in the atmosphere under all normal conditions and move away from the negative conductor and towards the positive conductor. This leads to a significant difference between the two resulting forms of corona. Negative corona discharges occur at a high repetition frequency and moderate amplitude, whilst those near the positive conductor are less frequent and have a much larger amplitude.

The radio noise characteristics: level, frequency spectrum and lateral profile of a high voltage d.c. line are determined by:

- design parameters;
- line voltage, or conductor surface voltage gradient and polarity;
- weather conditions.

The subjective effects of a d.c. noise field are less than those from the field, of identical strength, from an a.c. line because of the different character of the noise.

Design parameters

Unlike a.c. lines, a d.c. line is normally either monopolar, with earth or sea/earth return, or bipolar, with single or bundle conductors. The insulator length and the pole spacing can be relatively small because the internal overvoltages are significantly lower than with a.c., due to rapid fault clearance by valve blocking, and usually the insulator length is determined more by pollution than by overvoltages.

Tension de ligne, ou gradient superficiel de tension du conducteur et polarité

Dans le cas des lignes à courant continu, le choix de la tension est influencé non seulement par des raisons économiques, mais aussi par la disposition des stations de conversion et des redresseurs. Bien qu'il n'y ait pas de normalisation de cette tension, les lignes à courant continu actuellement en service opèrent habituellement entre ± 200 kV et ± 450 kV. Toutefois, dans le proche avenir, les niveaux de tension risquent de s'élever considérablement. La tension de toute ligne à haute tension a une très forte influence sur la génération de perturbations radioélectriques. Cette influence dépend de la contrainte superficielle, ou gradient, des conducteurs. Si, pour une ligne à courant alternatif, un gradient de E kV/cm en valeur efficace est employé, un gradient comparable pour une ligne en courant continu serait de $\sqrt{2} E$ kV/cm. La ligne en courant continu produira cependant un niveau perturbateur moindre que la ligne en alternatif.

Compte non tenu des effets de l'ionisation et de la charge d'espace, le gradient théorique peut être calculé de la même manière que pour une ligne en alternatif (article 5), et sa valeur sert de même pour le calcul du bruit radioélectrique. L'influence de ce gradient sur le niveau perturbateur a été étudiée sur de nombreuses lignes d'essai, et les résultats révèlent que, dans la gamme de 20 kV/cm à 27 kV/cm, le niveau augmente d'environ 1,6 dB par kV/cm, et qu'au-delà de 27 kV/cm il s'élève plus lentement.

Le profil latéral d'une ligne bipolaire à courant continu, équipée de fils de terre exempts d'effet de couronne, est à peu près symétrique par rapport au conducteur positif. Ce comportement peut s'expliquer du fait que le conducteur négatif produit un moindre niveau perturbateur que le positif, en raison des mécanismes d'ionisation différents dont nous avons parlé dans ce paragraphe. Avec le même gradient pour les deux conducteurs, la différence entre leurs contributions au niveau perturbateur est d'au moins 6 dB. On peut donc considérer que la contribution d'un conducteur négatif au niveau perturbateur global d'une ligne bipolaire est négligeable. Pour une ligne monopolaire négative, le niveau perturbateur peut même être inférieur de 20 dB à celui d'une même ligne à polarité positive.

Conditions atmosphériques

Il est bien connu que le niveau perturbateur engendré par les lignes à courant alternatif est fortement influencé par les conditions atmosphériques. Entre les conditions beau temps et les conditions forte pluie, ce niveau peut s'élever au maximum de 25 dB; pour les lignes à courant continu, toutefois, on observe une réduction du niveau sous pluie.

Ainsi, les niveaux perturbateurs les plus élevés d'une ligne à courant continu apparaissent normalement dans les conditions de beau temps. Au début d'une chute de pluie ou pendant une précipitation de neige sèche, le niveau peut temporairement s'élever, mais, lorsque les conducteurs seront complètement mouillés, il retombera de 10 dB et, dans certains cas, même davantage. Le niveau peut également être influencé par la configuration de la ligne et le gradient de tension, et cela s'applique aux lignes bipolaires et aux lignes monopolaires positives. Cependant, le critère 80%/80% exposé au paragraphe 9.4 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2 reste toujours valable.

Pour tenter d'expliquer ces différences de comportement par rapport aux lignes à courant alternatif, de nombreuses hypothèses ont été formulées, mais aucune n'a reçu confirmation et des travaux doivent encore être entrepris.

Un autre domaine dans lequel le comportement des lignes à courant continu diffère de celui des lignes à courant alternatif est l'influence du vent. Certains travaux ont indiqué que, pour un vent se dirigeant du conducteur négatif vers le positif, le niveau perturbateur s'élève avec la vitesse du vent à partir de 3 m/s d'environ 0,3 dB à 0,5 dB par m/s supplémentaire. Pour un vent inverse, l'effet est nettement moindre.

Line voltage, or conductor surface voltage gradient and polarity

In the case of d.c. lines, the choice of the line voltage is influenced not only by economic reasons but also by the layout of the converter stations and valves. Although there is no standardization of this voltage, d.c. lines at present in service usually operate between ± 200 kV and ± 450 kV. However, in the near future, the voltage level will be raised considerably. The voltage of any high voltage line has a most important influence on the generation of radio noise. This influence depends on the surface stress, or gradient, of the conductors. If, for an a.c. line, a gradient of E kV/cm r.m.s. is used, the comparable gradient for a d.c. line would then be $\sqrt{2} E$ kV/cm. The d.c. line will, however, produce a lower noise level than the a.c. line.

Disregarding the effects of ionization and space charge, the theoretical gradient can be calculated as for a.c. lines (Clause 5) and this value is also used for radio noise calculations. The influence of this gradient on the radio noise level was investigated on several test lines and the results show that over the range 20 kV/cm to 27 kV/cm the radio noise level increases at approximately 1.6 dB for each 1 kV/cm increment and above about 27 kV/cm the noise level increases at a lower rate.

The lateral profile of a bipolar d.c. line, with corona-free earth wires, is nearly symmetrical about the positive conductor. This behaviour can be explained by the fact that the negative conductor produces a lower level of radio noise than the positive conductor, because of the different ionization mechanisms indicated in this sub-clause. With the same gradient for both conductors the difference in their radio noise level contributions is at least 6 dB. Hence the contribution from the negative conductor to the aggregate radio noise level of a bipolar line may be considered to be negligible. For a negative monopolar line, the noise level may be even 20 dB lower than for the same line with positive polarity.

Weather conditions

It is well known that the radio noise level from a.c. lines is significantly influenced by the weather conditions. Between fine weather and heavy rainfall this level may increase by up to 25 dB but in the case of d.c. lines the noise level actually reduces in rain.

Thus the highest radio noise level of a d.c. line normally occurs under conditions of fair weather. At the beginning of rainfall and for dry snow precipitation, this level may rise for a short time but when the conductors are fully wet it will decrease by up to 10 dB and in some cases even more. The level may also be influenced by the line configuration and the voltage gradient and the above remarks apply to bipolar and to positive monopolar lines. However, the 80%/80% criteria discussed in Sub-clause 9.4 of C.I.S.P.R. Publication 18-2, are still valid.

As an explanation of this difference in behaviour, when compared with a.c. lines, various hypotheses could be given, but they still have to be proven and further investigations are necessary.

Another area where the performance of d.c. lines differs from a.c. lines is the influence of wind. Some investigations have indicated that for a wind direction from the negative to the positive conductor the radio noise level increases with wind speeds above 3 m/s from 0.3 dB to 0.5 dB for each 1 m/s increment. For a wind direction from the positive to the negative conductor this effect is significantly lower.

En outre, le niveau perturbateur à long terme d'une ligne à courant continu est influencé par les effets saisonniers; en été, le niveau est normalement plus élevé qu'en hiver, d'environ 5 dB. Cela pourrait être dû aux insectes ou aux particules en suspension dans l'air qui se posent à la surface du conducteur, ou à l'humidité absolue de l'air.

Spectre de fréquences

Dans le cas des lignes à courant alternatif, le spectre du champ perturbateur est l'une des principales caractéristiques d'une ligne à haute tension. Le spectre de fréquences pour les lignes à courant continu semble avoir une forme similaire pour les bandes d'émissions radiophoniques en grandes ondes et en ondes moyennes, mais des études sont encore nécessaires.

Effets subjectifs

Des recherches ont révélé que, pour les lignes à courant continu, on pouvait admettre un rapport signal/bruit plus faible que pour les lignes à courant alternatif, ainsi qu'il est dit au paragraphe 10.3 de la Publication C.I.S.P.R. 18-2. Pour une valeur donnée fournie par un mesureur C.I.S.P.R., la gêne subjective dans le cas d'une ligne à courant continu semble inférieure de 10 dB à celle qui est éprouvée avec une ligne à courant alternatif.

Calcul du niveau perturbateur dû à l'effet de couronne sur les conducteurs

Le niveau perturbateur des lignes à courant alternatif, dû à l'effet de couronne, peut être calculé par des méthodes analytiques ou des formules expérimentales. Les deux s'appuient sur les nombreuses valeurs mesurées sur les lignes expérimentales, les nasses ou les lignes en exploitation. Dans le cas des lignes à courant continu, l'expérience est relativement limitée, et les renseignements proviennent presque en totalité d'installations expérimentales. Les méthodes analytiques applicables aux lignes à courant continu sont, en principe, similaires à celles qui sont citées à l'article 5 pour les lignes à courant alternatif. Il y aura naturellement lieu, dans ce cas, d'exploiter les résultats concernant la fonction excitatrice (paragraphe 5.2), les mesures faites sur les lignes d'essai en courant continu et les nasses, et de tenir compte des caractéristiques de propagation des lignes à courant continu.

De même que pour les lignes à courant alternatif, différentes formules empiriques ont été élaborées pour calculer le niveau perturbateur des lignes à courant continu. S'appuyant sur de très nombreuses mesures effectuées sur des lignes [55] à configurations différentes, la formule ci-après est proposée pour une ligne bipolaire:

$$E = 38 + 1,6 (g_{\max} - 24) + 46 \lg r + 5 \lg n + \Delta E_f + 33 \lg \frac{20}{D} + \Delta E_w \text{ en dB } (\mu\text{V/m})$$

où:

- E = champ perturbateur
- $g_{\max}$ = gradient superficiel maximal de la ligne, en kilovolts par centimètre
- r = rayon du conducteur ou sous-conducteur, en centimètres
- n = nombre de sous-conducteurs
- D = distance entre l'antenne et le plus proche conducteur, en mètres
- ΔE_w = conditions atmosphériques différentes, en décibels
- ΔE_f = fréquence de mesures différente (voir ci-après)

La valeur $g_{\max}$ est calculée de la même façon que pour les lignes à courant alternatif. La première ligne de la formule indique le niveau à la fréquence de référence du C.I.S.P.R. de 0,5 MHz et à la distance de référence C.I.S.P.R. de 20 m au conducteur le plus proche, par beau temps, cela lorsque ΔE_f , $\lg \frac{20}{D}$ et ΔE_w sont tous nuls.

Furthermore, the long-term radio noise level of a d.c. line is influenced by seasonal effects; in summer the level is normally higher than in winter by approximately 5 dB. This may be caused by insects and airborne particles on the conductor surface, or by the absolute humidity of the air.

Frequency spectrum

In the case of a.c. lines, the radio noise spectrum is one of the main characteristics of a high voltage line. The frequency spectrum for d.c. lines seems to show a similar shape over the long and medium wave broadcast bands but further investigations should be made.

Subjective effects

Investigations have shown that for d.c. lines, a lower signal to noise ratio may be acceptable than for a.c. lines given in Sub-clause 10.3 of C.I.S.P.R. Publication 18-2. For a particular reading on a C.I.S.P.R. meter, the subjective annoyance of a d.c. line could be less than for an a.c. line by as much as 10 dB.

Calculation of the radio noise level due to conductor corona

The radio noise level of a.c. lines, due to conductor corona, can be calculated by using analytical methods or experimental formulae. Both are based on the results of many measured values derived from test lines, test cages and operational lines. In the case of d.c. lines, experience is relatively scanty, the data coming almost entirely from test facilities. The analytical methods that can be applied to d.c. lines are similar, in principle, to those described in Clause 5 for a.c. lines. Obviously, in this case, use shall be made of the excitation function results (Sub-clause 5.2), measurements on d.c. test lines or cages, and account should be taken of the propagation characteristics of d.c. lines.

As for a.c. lines different empirical formulae for the calculation of the radio noise level for d.c. lines have been evolved. Based on extensive measurements on lines [55], with various configurations, the following formula is suggested for a bipolar line:

$$E = 38 + 1.6 (g_{\max} - 24) + 46 \lg r + 5 \lg n + \\ + \Delta E_f + 33 \lg \frac{20}{D} + \Delta E_w \text{ in dB } (\mu\text{V/m})$$

where:

- E = radio noise field
- $g_{\max}$ = maximum surface gradient of the line, in kilovolts per centimetre
- r = radius of conductor or subconductor, in centimetres
- n = number of subconductors
- D = distance between aerial and nearest conductor, in metres
- ΔE_w = different weather condition, in decibels
- ΔE_f = different measurement frequency (see below)

The value $g_{\max}$ is calculated as for a.c. lines. The first line of the formula gives the level for the C.I.S.P.R. reference frequency of 0.5 MHz and for the C.I.S.P.R. reference distance of 20 m from the nearest conductor in fair weather, when ΔE_f , $\lg \frac{20}{D}$ and ΔE_w are all zero.

La formule ci-dessus a été essentiellement élaborée pour les lignes bipolaires. Mais elle peut également servir pour les lignes monopolaires positives si le gradient de tension de conducteur correct est appliqué. Pour la même tension de phase appliquée, le bruit sera plus faible que sur une ligne bipolaire, de 3 dB à 6 dB. En ce qui concerne les lignes de transport bipolaires, construites comme s'il s'agissait de deux lignes monopolaires distinctes, le caractère monopolaire dominera si la distance entre pôles est supérieure à environ 20 m.

Les mesures ont montré que l'atténuation latérale des lignes en continu était similaire à celles des lignes en alternatif. Pour une bonne approximation, dans la gamme des fréquences de 0,4 MHz à 1,6 MHz et à une distance voisine de $\frac{300}{2\pi f}$ m, où f est en mégahertz, la formule approchée suivante a donné des résultats satisfaisants:

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{1,65}$$

où E_2 et E_1 sont les niveaux perturbateurs aux distances D_2 et D_1 , respectivement, et où E_1 et D_1 sont les valeurs de référence. Pour la distance de référence C.I.S.P.R. de 20 m au conducteur le plus proche, cette formule pourrait se lire comme suit:

$$E_2 = E_1 + 33 \lg \frac{20}{D_2}$$

L'expression de la distance $33 \lg \frac{20}{D}$ est une approximation qui tend à fournir une correction trop faible jusqu'à environ 100 m et une correction trop forte au-delà.

Jusqu'ici, une variation considérable dans les mesures du spectre de fréquences en des lieux différents a été enregistrée, particulièrement aux basses fréquences. Toutefois, le spectre de fréquences apparaissant à la figure B12, page 91, et analysé au paragraphe 4.2.1, qui est valable pour les lignes à courant alternatif, devrait également assez bien convenir pour les lignes à courant continu; aussi proposons-nous qu'il soit utilisé en attendant que des données plus fiables soient disponibles. La correction d'après ce spectre devrait être:

$$\Delta E_f = 5 (1 - 2 (\lg 10f)^2)$$

où f = fréquence de mesures, en mégahertz

Cette expression peut être utilisée entre 0,15 MHz et environ 3 MHz.

Pour une ligne monopolaire négative, le niveau perturbateur engendré par le conducteur de pôle lui-même est normalement faible, mais, si l'on utilise un fil de terre, celui-ci agira comme un conducteur positif et le niveau parasite pourra être calculé comme ci-dessus.

8.3 *Perturbations radioélectriques dues aux isolateurs, aux accessoires et aux appareillages des postes*

Nous manquons de données à propos du niveau perturbateur engendré par les isolateurs, les accessoires et l'appareillage des postes. Le peu d'expérience dont nous disposons, cependant, nous révèle qu'il ne devrait pas y avoir de différence notable par rapport à ce que nous savons des lignes à courant alternatif, et dont il est question à l'article 7.

Par conditions de temps sec, le niveau perturbateur par effet de couronne risque d'être le plus important pour les gradients de tension élevés. Toutefois, le niveau parasite d'un conducteur de ligne à courant continu diminue lorsque le conducteur est mouillé, ce qui est à l'opposé de ce que l'on constate pour les isolateurs de ligne, étant donné que le courant de fuite sur ces isolateurs est déterminé par la résistance ohmique de la pollution. D'après ce que l'on sait des lignes en exploitation, même dans les zones à pollution industrielle relativement faible, la surface des isolateurs des lignes à courant continu se pollue en un délai relativement bref. Lorsque cette surface polluée est mouillée, des décharges partielles se produisent.

The above formula is basically intended to be used for bipolar lines. It can also be used for positive monopolar lines if the correct conductor voltage gradient is applied. For the same applied pole voltage, the noise will be lower than on the bipolar line by 3 dB to 6 dB. Regarding bipolar transmission lines, built as two separate monopolar lines, the monopolar character will dominate if the pole distance is greater than about 20 m.

Measurements have shown that the rate of lateral attenuation for d.c. lines is similar to that for a.c. lines. Over the frequency range 0.4 MHz to 1.6 MHz and for a distance of around $\frac{300}{2\pi f}$ m, where f is in megahertz, the following approximate formula will give satisfactory results:

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{1.65}$$

where E_2 and E_1 are the noise levels at the distances D_2 and D_1 , respectively and where E_1 and D_1 are the reference values. For the C.I.S.P.R. reference distance of 20 m from the nearest conductor, this formula may be written as:

$$E_2 = E_1 + 33 \lg \frac{20}{D_2}$$

The distance expression $33 \lg \frac{20}{D}$ is an approximation which tends to give a low correction up to about 100 m and high correction beyond this distance.

A considerable variation in the measured results of the frequency spectrum at different locations has so far been obtained, particularly at low frequencies. However, the frequency spectrum shown in Figure B12, page 91, and discussed in Sub-clause 4.2.1, which is valid for a.c. lines, seems also to constitute a good average relationship for d.c. lines and it is, therefore, suggested that this spectrum be used until more reliable material is available. The correction according to this spectrum can be written:

$$\Delta E_f = 5(1 - 2(\lg 10f)^2)$$

where f = measurement frequency, in megahertz

This expression can be used from 0.15 MHz up to about 3 MHz.

For a negative monopolar line, the radio noise level from the pole conductor itself is normally low but, if an earth wire is used, the earth wire will act as a positive conductor and the noise level can be calculated as above.

8.3 *Radio noise due to insulators, fittings and substation equipment*

There is a lack of information concerning the radio noise level produced by insulators, fittings and substation equipment. Available experience indicates, however, that there will be no significant difference from the equivalent level of a.c. lines given in Clause 7.

Under dry weather conditions, the radio noise level produced by conductor corona may dominate for the higher voltage gradients. However, the radio noise level of a d.c. line conductor decreases when the conductor is wetted, and this is in contrast to the level produced by the line insulators, as the leakage current on these insulators is determined by the ohmic resistance of the pollution. From service experience it is known that, even in districts with a relatively low level of industrial pollution, the surface of d.c. insulators becomes polluted in a relatively short time. When this polluted surface becomes wet, partial discharges occur which may cause a relatively high increase in the radio noise level. Hence it is possible that the

susceptibles d'entraîner une augmentation assez importante du niveau perturbateur. Il est donc possible que les écarts constatés dans la réduction du niveau perturbateur des lignes à courant continu, sous certaines conditions (voir les conditions atmosphériques ci-dessus), soient influencés par le comportement des isolateurs pollués. Mais la confirmation de cette hypothèse réclame davantage de renseignements.

8.4 *Effets de commutation des valves*

Outre les lignes aériennes, les câbles souterrains et les postes, les réseaux de transport en courant continu et à haute tension comprennent des stations de conversion équipées de redresseurs. Ces redresseurs peuvent engendrer des parasites en raison de leur mode spécial de fonctionnement, puisqu'ils opèrent comme des commutateurs extrêmement rapides.

Un groupe convertisseur comprend normalement six redresseurs allumés cycliquement à la fréquence du réseau, et une station de conversion complète peut être constituée de plusieurs de ces groupes. Chaque fois qu'un redresseur s'allume, la tension aux bornes s'effondre et un large spectre de bruits radioélectriques est engendré, allant des très basses fréquences à quelques mégahertz en fonction des dimensions physiques des connexions. En raison de la présence de capacités et d'inductances localisées et distribuées dans les connexions et les appareillages associés, des boucles locales peuvent résonner, ce qui produira des crêtes à certaines fréquences.

Ces bruits radioélectriques peuvent être émis directement par les redresseurs et les appareillages associés comprenant, dans ce cas, principalement les barres d'alimentation et les barres de la station de conversion. Ces barres sont souvent d'une longueur considérable et parfaitement capables de faire office d'antennes importantes. Le convertisseur est naturellement raccordé à des circuits de départ et d'arrivée en courant alternatif et en courant continu qui peuvent, les uns et les autres, aboutir à des lignes aériennes. Les bruits radioélectriques se trouveront alors guidés et rayonnés par ces lignes aériennes.

Si rien n'est entrepris pour les réduire, les niveaux perturbateurs peuvent se révéler intolérables; il est donc indispensable de les ramener à des valeurs acceptables. Cela peut être réalisé de différentes manières en fonction du type de redresseur et de l'installation technique du poste.

Pour la plupart des premiers dispositifs en courant continu à haute tension mis en exploitation, les redresseurs employés étaient du type à vapeur de mercure. La conception technique de ces redresseurs exigeait la construction d'un édifice pour les protéger des influences ambiantes et maintenir la température dans des limites bien déterminées. Par un blindage électromagnétique de ces édifices, il est possible de réduire considérablement le niveau perturbateur à l'extérieur. Si l'on emploie des feuilles métalliques pleines, ou des grillages métalliques, une atténuation de 40 dB à 50 dB peut être obtenue à des fréquences allant de 0,15 MHz à 5 MHz. Pour réduire les parasites traversant les manchons des parois protectrices, des filtres doivent être montés à tous les départs de lignes, et le filtrage des lignes à courant continu doit être particulièrement efficace. Les transformateurs des convertisseurs, placés entre le groupe des redresseurs et les lignes à courant alternatif, et les circuits de filtrage du côté alternatif, peuvent réduire la conduction éventuelle des parasites entre la station de conversion et ces lignes à courant alternatif.

Dans le cas de redresseurs à thyristors, le problème des perturbations radioélectriques risque d'être un peu moins grave. Les redresseurs à thyristors, au moment de l'allumage, voient leur tension baisser en l'espace de 25 μ s, contre 1 μ s pour les redresseurs à vapeur de mercure. L'une des raisons est l'utilisation de circuits amortisseurs au sein du redresseur à thyristors. Avec un temps de chute de tension aussi long, il peut s'avérer inutile de blinder l'édifice abritant les redresseurs; les filtres suffiront ou même, à la rigueur, ceux-ci pourront-ils également être évités.

difference found in the reduction of the noise level from d.c. lines, under some conditions (see under weather conditions, above), may be influenced by the behaviour of the polluted insulators. For confirmation of this assumption, more information is necessary.

8.4 *Valve firing effects*

As well as overhead lines, underground cables and substations, high voltage d.c. transmission systems include convertor stations with their valve equipment. These valves can generate radio noise by their special operational performance, as they are acting as very fast switches.

A convertor group normally comprises six valves fired cyclically at the power frequency and a complete convertor installation may be made up of several such convertors. Each time a valve is fired the voltage across it collapses and a wide spectrum of radio noise is generated extending from very low frequencies to a few megahertz depending on the physical dimensions of the connections. Because of lumped and distributed capacitances and inductances in the associated connections and equipment, local loops may resonate and this will produce peaks at certain frequencies.

This radio noise may be emitted directly from the valves and associated equipment comprising, in this instance, mainly the feeders and the busbars of the convertor station. These busbars will often be of considerable length and well able to act as efficient radiators. The convertor will be, of course, connected to incoming and outgoing a.c. and d.c. circuits and these may both be of overhead line construction. The radio noise will be guided and emitted from such overhead lines.

Without any suppression measures, the radio noise level could be intolerable and it is, therefore, necessary to reduce this level to an acceptable value. This can be achieved by different methods which depend on the valve type and the technical installation of the substation.

In most of the earlier operational high voltage d.c. schemes, mercury valves were used. The technical layout of this valve type requires a hall which protects the valves against environmental influences and makes it possible to keep temperature limits within a specified range. By electromagnetic screening of these halls the radio noise level outside can be reduced considerably. Using solid metal sheets or wire mesh, an attenuation value of 40 dB to 50 dB for frequencies between 0.15 MHz and 5 MHz is possible. To reduce the noise passing through the valve hall bushings, filters should be installed in all outgoing lines and the filtering of the d.c. lines must be especially effective. The convertor transformers, between the valve group and the a.c. lines, and the filter circuits on the a.c. side, may reduce the possible conduction of radio noise from the convertor station to these a.c. lines.

In the case of thyristor valves the radio noise problem may be somewhat less severe. Thyristor valves, when fired, may have a voltage collapse time of up to 25 μ s, compared with 1 μ s for mercury-arc valves. One reason for this is the use of damping circuits within the thyristor valve. With such a long voltage collapse time, it may not be necessary to screen the valve, hall, and radio noise filters may be simpler or even unnecessary.

Une autre solution pour réduire le rayonnement direct d'un redresseur consiste à installer le redresseur à thyristors à l'intérieur d'un bac d'acier qui fera office de blindage efficace. Il faudra, cependant, s'assurer que le bac ne rayonne pas comme un dipôle ou un résonateur.

Les futures stations de conversion seront plus compactes, les connexions seront plus courtes entre les groupes de redresseurs, les transformateurs des convertisseurs et les postes. Cela aura une influence favorable sur la réduction des parasites émis par les stations de conversion.

Généralement, il est possible de réduire le niveau perturbateur des redresseurs et des équipements auxiliaires à un niveau raisonnable. Le coût de l'opération est essentiellement fonction du type de redresseurs et de la conception de la station.

IEC NORM.COM Click to view the full PDF of CISPR 18-1:1982

A possible solution for reducing direct radiation from a valve is the installation of the thyristor valve within a steel tank which acts as an effective screen. Care should be taken that the tank does not radiate as a dipole or resonator.

The further development of high voltage d.c. convertor stations will tend towards more compact layouts with shorter connections between valve groups, convertor transformers and substations. This will have a favourable influence on the reduction of radio noise from convertor stations.

Generally, it is possible to reduce the radio noise produced by convertor valves and their auxiliaries to an acceptable level. The costs of such a reduction largely depend on the valve type and the convertor station design.

Withdrawing
IECNORM.COM Click to view the full PDF of C.I.S.P.R. 18-1:1982

— Page blanche —

— Blank page —

IECNORM.COM Click to view the full PDF of CISPR 18-1:1982

BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHY AND REFERENCES

- [1] *Interference Produced by Corona Effect of Electric Systems* (Description of Phenomena, Practical Guide for Calculation), International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRÉ), Paris 1974.
- [2] D. E. Hedman: *Propagation on Overhead Transmission Lines*, IEEE Transactions on PAS, vol. 84, March 1964, pp. 200-211.
- [3] F. L. Taylor, C. J. Crockford, R. V. Nicolson: *Investigation of radio noise from existing lines and equipment to aid in the design of future extra-high voltage lines*, IEEE PAS, August 1957, pp. 436-445.
- [4] C. Gary, M. Moreau: *Predetermination of the Radio Noise Level under Rain of an Extra-High-Voltage Line*, IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. PAS-88, pp. 653-660, May 1969.
- [5] G. W. Juette, L. E. Zaffanella: *Radio Noise Currents and Audible Noise on Short Sections of UHV Bundle Conductors*, IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. PAS-89, No. 5, pp. 902-913, May/June 1970.
- [6] N. Giao Trinh, P. Sarma Maruvada, B. Poirier: *A comparative Study of the Corona Performances of Conductor Bundles for 1200 kV Transmission Lines*, IEEE Transactions, vol. PAS-93, May/June 1974, pp. 940-949.
- [7] G. W. Juette, L. E. Zaffanella: *Radio Noise, Audible Noise and Corona Loss of EHV and UHV Transmission Lines under Rain: Predetermination based on Cage Test*, IEEE Transactions, vol. PAS-89, Nov./Dec. 1970, pp. 1168-1178.
- [8] M. R. Moreau, C. H. Gary: *Predetermination of the Radio Interference Level of High Voltage Transmission Lines, Parts I and II*, IEEE Transactions, vol. PAS-91, pp. 284-304, Jan./Feb. 1972.
- [9] N. G. Trinh, P. S. Maruvada: *A Method of Predicting the Corona Performance of Conductor Bundles Based on Cage Test Results*, IEEE Transactions, vol. PAS-96, pp. 312-325, Jan./Feb. 1977.
- [10] G. D. Lippert, W. E. Pakala, S. C. Barlett, C. D. Fahrnkopf: *Radio Influence Tests in Field and Laboratory — 500 kV Test Project of American Gas and Electric Company*, AIEE Transactions, vol. 70, Part I, pp. 251-269, 1951.
- [11] L. M. Robertson, W. E. Pakala, E. R. Taylor, Jr.: *Leadville High Altitude Extra-High-Voltage Test Project: Part III — Radio Influence Investigations*, AIEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. 80, pp. 732-743, Dec. 1961.
- [12] J. Reichman, J. R. Leslie: *A Summary of Radio Interference Studies Applied to EHV Lines*, IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. 83, No. 3, pp. 223-228, March 1964.
- [13] J. J. LaForest, C. B. Lindh, D. D. McCarthy, F. Olsen, M. W. Schultz, Jr.: *Radio Noise and Corona Loss Results from Project EHV*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 82, pp. 735-750.
- [14] V. L. Chartier, D. F. Shankle, N. Kolcio: *The Apple Grove 750 kV Project — Statistical Analysis of Radio Influence and Corona Loss Performance of Conductors at 775 kV*, IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. 89, May/June 1970.
- [15] E. R. Taylor, Jr., W. E. Pakala, N. Kolcio: *The Apple Grove 750 kV Project — 515 kV Radio Influence and Corona Loss Investigation*, IEEE Transactions (Power Apparatus and Systems), vol. PAS-84, No. 7, pp. 561-573, July 1965.
- [16] Y. Sawada: *Calculating Method of Radio Noise Level and Its Application to Design of AC Power Transmission Line*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 89, pp. 844-853, May/June 1970.
- [17] M. Magnien, J. Clade, C. Gary: *The Electricité de France Test Station for Corona Studies on Future EHV Lines*, CIGRÉ, 1966, Paper No. 427.
- [18] N. Knudsen, H. Bergqvist, P. Forsgren: *Results from 3-Year Operation of the HVDC Test Station in Anneberg*, CIGRÉ Report, No. 31-04, 1970.
- [19] F. W. Hirsch, E. Schafer: *Progress Report on the HVDC Test Line of the 400 kV — Forschungsgemeinschaft: Corona Losses and Radio Interference*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 88, pp. 1061-1069, July 1969.
- [20] E. H. Gehrig, A. C. Peterson, C. F. Clark, T. C. Redmour: *BPA's 1100 kV DC Test Project, Part II, Radio Interference and Corona Loss*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 86, March 1967.
- [21] N. Knudsen: *Corona Loss and Radio Interference Measurements at High Voltage AC on Test Lines in Sweden*, Paper No. 411, CIGRÉ, 1964.

- [22] R. Bartenstein, G. Lesch: *Measurements of Corona Losses and Interference Levels at the 400 kV Research Station in Mannheim — Rheinau (Germany) with Special Reference to Bundle Conductors*, CIGRÉ Report, No. 402, 1956.
- [23] R. Keitley, et al.: *Corona Power Loss and Radio Interference Measurements at 400 kV and 750 kV on the Leatherhead Experimental Line*, CIGRÉ Paper, No. 419, 1966.
- [24] J. G. Anderson, J. M. Schamberger: *UHV Transmission Research Results from Project UHV, 1968-1969*, CIGRÉ Paper, No. 31-07, August 1970.
- [25] M. G. Comber, J. R. Doyle, H. M. Schneider, L. E. Zaffanella: *Three-phase Test Facilities at EPRI's Project UHV*.
- [26] R. M. Morris, B. Rakoshdas: *An Investigation of Corona Loss and Radio Interference from Transmission Line Conductors at High Direct Voltages*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 83, pp. 5-16, January 1964.
- [27] S. A. Annestrand, G. A. Parks, D. E. Perry: *Bonneville Power Administration's 1200 kV Transmission Line Project*, CIGRÉ Paper, No. 31-09, 1978.
- [28] P. S. Maruvada, N. G. Trinh, D. Dallaire, N. Rivest: *Corona Performance of a Conductor Bundle for Bipolar HVDC Transmission at ± 750 kV*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 96, pp. 1872-1881, Nov./Dec. 1977.
- [29] Y. Sawada, T. Sasano, Y. Sunaga, T. Tsurzura: *The Radio Interference Characteristics of Four and Three-Conductor Bundles of HVDC Line: Shiobara 600 kV Laboratory*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 96, 1901-1907, Nov./Dec. 1977.
- [30] E. Bagala, F. Galli, C. Malaguti, L. Paris, M. Sforzini, M. Valtorta: *Italian 1000 kV Project and Related Test Facilities*, CIGRÉ 1978, Report 31.16.
- [31] J. J. Clade, C. H. Gary, M. R. Moreau: *Usage and Checking of the Theoretical Relations Between Fields, Currents, and Excitation Functions in Radio Frequencies in the Case of Short Test Lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 88, pp. 1501-1511, October 1969.
- [32] C. W. Helstrom: *The Spectrum of Corona near a Transmission Line*, AIEE Transactions, Part III (Power Apparatus and Systems), vol. 80, Dec. 1961, pp. 831-837.
- [33] C. R. Bond, W. E. Pakala, R. E. Graham, J. E. O'Heill: *Experimental Comparisons of Radio Influence Fields from Short and Long Transmission Lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 82, April 1963, pp. 175-185.
- [34] Report of Working Group 1 of CIGRÉ Study Committee 36: *Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRÉ-IEEE Survey Results*, CIGRÉ-Electra, No. 22, May 1972.
- [35] CIGRÉ-IEEE Committee Report: *Comparison of Radio Noise Prediction Methods with CIGRÉ-IEEE Survey Results*, IEEE Transactions PAS, May/June 1973, vol. 92, pp. 1029-1042.
- [36] *Report by the Swedish National Committee on Recordings of Radio Interference from a 400 kV Power Line*, TELE (English edition), vol. 26, No. 2, 1974, pp. 14-21, published by the Swedish Telecommunications Administration.
- [37] R. Cortina, W. Serravalli, M. Sforzini: *Radio Interference Long-term Recording on a 420 kV Operating Line*, IEEE Transactions, on PAS, vol. 89, May/June 1970, pp. 881-892.
- [38] R. Bartenstein, E. Schafer: *Continuous Measurements of the High Frequency Interference Level of HV Transmission — Lines and their Statistical Evaluation*, Paper 409, CIGRÉ, 1962.
- [39] *CIGRÉ-IEEE Survey on Extra High Voltage Transmission Radio Noise*, CIGRÉ SC 36-WG 01 and IEEE Radio Noise Sub-Committee WG 01, IEEE Trans PAS, May/June 1973, vol. 92, pp. 1019-1028.
- [40] *A survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients*, IEEE Corona and Field Effects Sub-Committee Report, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, Nov./Dec. 1979, pp. 1996-2014.
- [41] L. Paris, M. Sforzini: *RI Problems in HV Line Design*, IEEE Transactions on PAS, April 1968.
- [42] Transmission line reference book, 345 kV and above, Electric Power Research Institute, 1975.
- [43] M. C. Perz: *Propagation analysis of HF currents and voltages on lossy power lines*, IEEE Transactions on PAS, Nov./Dec. 1973.
- [44] G. N. Juette, G. M. Roe: *Modal Components in Multiphase Transmission Line Radio Noise Analysis*, IEEE Transactions on PAS, Mar./Apr. 1971.

- [45] J. Meyer de Stadelhofen, W. Walter: *Contribution Relative à l'estimation du pouvoir radioperturbateur de lignes à très haute tension*, Bulletin technique PTT, N 11-1957.
- [46] W. Serravalli, M. Sforzini: *Il radiodisturbo prodotto di linee ad alta tensione, alcuni risultati di indagini sperimentali*, Rendiconti AEI di Palermo, 1964, Report No. 113.
- [47] G. E. Adams, T. W. Liao, M. G. Poland, F. J. Trebby: *Radio noise propagation and attenuation tests on Bonneville Power Administration McNary-Ross 345 kV line*, AIEE Transactions, Part III, vol. 78, June 1959, pp. 380-388.
- [48] L. O. Barthold, J. J. La Forest, R. H. Schlomann, F. J. Trebby: *Radio noise attenuation and field factor measurements on the American Electric Power Corporation Breed-Olive 345 kV line*, AIEE Transactions, Part III, vol. 79, June 1960, pp. 303-309.
- [49] J. Davey, H. L. Deloney, J. J. La Forest: *Effect of station radio noise sources on transmission line noise levels, Experimental results*, IEEE Transactions on PAS, vol. 86, No. 8, August 1967, pp. 1007-1011.
- [50] P. B. Barber, J. M. Cranmer, E. M. Dembinski, J. S. T. Looms: *Measurements of acoustic and radio noise from UK transmission lines*, CIGRÉ Rep. 36-05, 1972.
- [51] H. Witt: *Insulation Levels and Corona Phenomena on HV DC Transmission Lines*, Techn Dr dissertation Gothenburg (Sweden) 1961.
- [52] E. H. Gehrig, A. C. Peterson, C. F. Clark, T. C. Rednour: *Bonneville Power Administration's 1100 kV direct current test project, Radio Interference and Corona Loss*, IEEE Transactions PAS, vol. 36, No. 3, March 1967.
- [53] Stig A. Annestrand: *Radio Interference from HV DC Converter Stations*, IEEE PAS, vol. 91, No. 3, May/June 1972.
- [54] G. L. Reiner, E. H. Gehrig: *Celilo-Sylmar ± 400 kV Line RI Correlation with Short Test Line*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 96, No. 3, May/June 1977.
- [55] Transmission Line Reference Book HV DC TO + 600 kV, published by Electric Power Research Institute, 3412 Hillview Avenue, Palo Alto, CA 94304.

ANNEXE A

CALCUL DU GRADIENT DE POTENTIEL À LA SURFACE D'UN CONDUCTEUR DE LIGNE AÉRIENNE

Il existe plusieurs méthodes de calcul du gradient de potentiel à la surface d'un conducteur de ligne aérienne. Ces méthodes donnent toutes des résultats très semblables, dans les cas où le conducteur de phase est unique et dans le cas de faisceaux symétriques constitués d'un petit nombre de sous-conducteurs: jusqu'à trois ou quatre. Pour les faisceaux comportant un plus grand nombre de sous-conducteurs et pour les faisceaux asymétriques, les méthodes les mieux appropriées sont celles qui sont basées sur le principe des images successives [A1]. Avec l'avènement des calculateurs numériques, on emploie maintenant très largement des codes de calcul fondés sur ces méthodes. Pour la majorité des configurations de lignes, pour lesquelles la hauteur des conducteurs au-dessus du sol et la distance entre phases (ou pôles) sont grandes par rapport au diamètre des conducteurs ou des faisceaux, et où l'écartement des sous-conducteurs est grand par rapport au diamètre de ceux-ci, une méthode à une seule image peut être utilisée.

Une autre approximation de cette approche consiste à calculer la charge de chaque conducteur ou sous-conducteur, en adoptant la méthode des coefficients de potentiel de Maxwell, puis à déterminer le gradient de potentiel à la surface du conducteur ou du sous-conducteur en considérant uniquement la charge portée par ceux-ci. Dans le cas d'un faisceau, celui-ci peut être représenté par un conducteur équivalent unique ayant la même capacité électrostatique. Pour les conducteurs simples et pour les faisceaux symétriques comportant un petit nombre de sous-conducteurs, il existe des formules très simples permettant la détermination du gradient de potentiel à partir de la charge.

Le gradient moyen g_{moy} est obtenu par application du théorème de Gauss, selon lequel le champ électrique à la surface d'un conducteur est égal à la densité de charge superficielle σ divisée par la permittivité ϵ_0 :

$$g_{\text{moy}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 n \pi d} \quad (\text{A1})$$

où:

q = charge superficielle par unité de longueur

n = nombre de sous-conducteurs du faisceau

d = diamètre du sous-conducteur, en centimètres

$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi \cdot 10^9}$, permittivité du vide, en farads par mètre

Dans le cas d'une ligne monophasée avec retour par la terre, ou dans le cas d'une ligne à courant continu monopole, le calcul de la charge q en fonction de la tension appliquée U est très simple, la capacité C par unité de longueur étant donnée par

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_{\text{équ}}}}$$

où:

h = hauteur du conducteur au-dessus du sol, en centimètres. On adopte généralement une hauteur moyenne; celle-ci est obtenue en considérant la hauteur d'accrochage au pylône (ou la moyenne des hauteurs de deux pylônes adjacents si ces hauteurs sont différentes) et en soustrayant $\frac{1}{3}$ de la flèche au point le plus bas du conducteur.

$r_{\text{équ}}$ = rayon du conducteur ou rayon du conducteur équivalent au faisceau, en centimètres

$r_{\text{équ}} = \frac{d}{2}$ dans le cas d'un conducteur unique

$r_{\text{équ}} = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{n d}{b}}$ dans le cas d'un faisceau

où b est le diamètre du cercle passant par les centres de tous les sous-conducteurs.

APPENDIX A

CALCULATION OF THE VOLTAGE GRADIENT AT THE SURFACE OF A CONDUCTOR OF AN OVERHEAD LINE

Various methods are available for the calculation of the voltage gradient at the surface of a conductor of an overhead line. All these methods give very similar results for both non-bundle conductors and symmetrical bundles consisting of a small number of subconductors; up to three or four. For bundles with a greater number of subconductors and for asymmetrical bundles the most suitable methods are those based on the principle of successive images [A1]. With the advent of the digital computer, extensive use is now made of calculation programs based on these methods. For the majority of line configurations, that is where the height of the conductors above ground and the spacing between phases or poles is large compared with the conductor diameter or bundle dimensions and the subconductor spacing is large compared with the subconductor diameter, a single-image method can be used.

A further approximation to this approach is to calculate the charge on each conductor or subconductor, adopting the Maxwell potential coefficient method, and then to compute the voltage gradient at the surface of the conductor or subconductor considering only the charge on the conductor under consideration. In the case of a conductor bundle, it may be represented by an equivalent single conductor which has the same capacitance as the bundle. For single conductors and symmetrical bundles with a small number of subconductors, very simple formulae can be used for the determination of the voltage gradient from the charge.

The average gradient, g_{av} , is obtained by applying Gauss's theorem, from which the electric field at the surface of a conductor is equal to the surface charge density σ divided by the permittivity ϵ_0 :

$$g_{av} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 n \pi d} \quad (A1)$$

where:

- q = surface charge per unit length
- n = number of subconductors in the bundle
- d = diameter of subconductor, in centimetres
- $\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi \cdot 10^9}$ permittivity of free space, in farads per metre

In the case of a single phase line with earth return or a monopolar d.c. line, the calculation of the charge q as a function of the applied voltage U is very simple since the capacitance per unit length C is given by:

$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_{eq}}}$$

where:

- h = height of the conductor above ground in centimetres. Usually an average height is used and it is found by taking the conductor height at the tower, or the mean of the heights at the two towers of the span if the heights differ, and subtracting $\frac{2}{3}$ of the sag at the lowest point of the conductor.
- r_{eq} = radius of conductor or radius of bundle equivalent conductor in centimetres
- $r_{eq} = \frac{d}{2}$ in the case of a single conductor
- $r_{eq} = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{n d}{b}}$ in the case of a conductor bundle

where b is the pitch-circle diameter of the subconductors.

Alors

$$g_{\text{moy}} = \frac{q}{\pi \varepsilon_0 n d} = \frac{CU}{\pi \varepsilon_0 n d} = \frac{U}{\frac{nd}{2} \ln \frac{2h}{r_{\text{equ}}}} \quad (\text{A2})$$

Pour obtenir g_{moy} en kilovolts par centimètre, U doit être exprimé en kilovolts; dans le cas des lignes à tension alternative, on utilise habituellement les valeurs efficaces.

Dans le cas général des lignes polyphasées ou des lignes à courant continu multipôles, le calcul des charges de chaque conducteur ou de chaque faisceau nécessite la résolution du système d'équations suivant:

$$[p] \cdot [q] = [U] \quad (\text{A3})$$

où $[q]$ et $[U]$ sont les matrices unicolonnes des charges et des tensions de conducteurs ou de faisceaux, et $[p]$ est la matrice carrée des coefficients de potentiel de la configuration multiconducteurs:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{\text{eqi}}}$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

où:

D_{ij} = distance entre conducteurs ou faisceaux i et j

D'_{ij} = distance entre conducteur ou faisceau i et image par rapport à la surface au sol du conducteur ou faisceau j

En ce qui concerne la matrice des tensions, les éléments suivants doivent être pris en considération, selon les cas pratiques rencontrés:

a) Ligne triphasée à un seul terna

$$[U] = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \text{ avec } a = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} j \sqrt{3}$$

où U est le module de la tension simple (phase-terre) de la ligne. La matrice ci-dessus est valable pour une ligne sans câbles de garde. Pour prendre la présence de câbles de garde en compte, il convient d'incorporer le potentiel de ceux-ci, égal à zéro, dans la matrice des tensions. L'ordre de la matrice est augmenté, mais cela ne présente pas de difficulté pour la résolution des équations (A3). Il est toutefois possible, en subdivisant la matrice des coefficients de potentiel en sous-matrices relatives aux conducteurs de phases, aux câbles de garde et en sous-matrices de couplage, de réduire l'ordre de la matrice à celle d'une ligne sans câble de garde. La présence des câbles de garde augmente le gradient de potentiel des conducteurs, mais, pour les configurations usuelles, cette augmentation est relativement faible, de l'ordre de 1% à 3%.

b) Lignes triphasées à plusieurs ternes

Dans ce cas, la matrice des tensions $[U]$ inclut des ternes qui prennent en compte tous les conducteurs ou faisceaux des phases ainsi que, le cas échéant, les câbles de garde de la ligne. A titre d'exemple, la matrice des tensions d'une ligne triphasée à deux ternes, comportant deux câbles de garde, sera une matrice unicolonne d'ordre 8. La matrice correspondante des coefficients de potentiel sera une matrice carrée d'ordre 8, dont l'inversion nécessite l'emploi d'un ordinateur approprié. Cependant, il existe maintenant une gamme suffisante d'ordinateurs dont les performances permettent de calculer les gradients de potentiel de tous les types de lignes triphasées multitermes.

Il convient de noter que la position relative des indices de phase sur chaque terna affecte la charge des conducteurs; il est important d'en tenir compte lors du calcul des gradients d'une ligne multitermes. Ainsi, la disposition horizontale de deux ternes définies par 1, a , a^2 et 1, a , a^2 entraînera des gradients plus élevés que la disposition 1, a , a^2 et a^2 , a , 1.

Then

$$g_{av} = \frac{q}{\pi \varepsilon_0 nd} = \frac{CU}{\pi \varepsilon_0 nd} = \frac{U}{\frac{nd}{2} \ln \frac{2h}{r_{eq}}} \quad (A2)$$

To obtain g_{av} in kilovolts per centimetre, U must be expressed in kilovolts and, in the case of a.c. lines, r.m.s. values are usually used.

In the general case of multiphase lines or multipole d.c. lines the calculation of the charges on each conductor or bundle requires the solution of the following set of equations:

$$[p] \cdot [q] = [U] \quad (A3)$$

where $[q]$ and $[U]$ are the one-column matrices of charges and voltages on the conductors or bundles and $[p]$ is the square matrix of the potential coefficient of multiconductor configuration:

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_{eqi}}$$

$$p_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

where:

D_{ij} = distance between conductors or bundles i and j

D'_{ij} = distance between conductor or bundle i and ground image of conductor or bundle j

As regards the matrix of voltages, the following elements are to be considered for the following practical cases:

a) Single-circuit three-phase lines

$$[U] = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \text{ with } a = -\frac{1}{2} + \frac{j}{2}\sqrt{3}$$

where U is the modulus of the phase-to-earth voltage of the line. The above matrix refers to lines without an earth wire or wires. To take into account the presence of earth wires, the voltages, which are equal to zero on these wires, have to be inserted into the voltage matrix. The order of the matrix is increased but this does not present a great problem in the solution of the equations (A3). However, it is possible, by dividing the matrix of potential coefficients into submatrices relating to phase conductors and earth wires and coupling matrices, to reduce the matrix order to that for a line without earth wires. The presence of the earth wires increases the voltage gradient at the conductors but, with usual configurations, this increase is relatively small, 1% to 3%.

b) Multicircuit three-phase lines

In this case the voltage matrix $[U]$ includes a series of elements which takes into account all the phase conductors or bundles and, when present, the earth wires of the line. As an example, the voltage matrix of a double-circuit three-phase line with two earth wires is an eight-order column matrix. The corresponding potential coefficient matrix is an eight-order square matrix, the inversion of which requires the use of a suitable computer. However, a sufficient range of computer capabilities now exists for the calculation of the voltage gradient of any type of multicircuit three-phase line.

It should be noted that the relative positions of the corresponding phases in the different circuits affect the charges on the conductors and it is important to take them into account when calculating the gradients of a multicircuit line. For example, the flat formations of two circuits defined by 1, a , a^2 and 1, a , a^2 will result in higher gradients than the configuration 1, a , a^2 and a^2 , a , 1.

c) Lignes bipolaires à courant continu

$$[U] = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

où U est la valeur de la tension pôle-terre.

La présence de câbles de garde peut être prise en compte de la même manière que pour les lignes triphasées à courant alternatif.

Le gradient de potentiel obtenu par la formule (A1) est un gradient moyen g_{moy} , autour de la circonférence du conducteur ou sous-conducteur, puisqu'il est calculé à partir de la densité de charge moyenne sur le conducteur:

$$\left(\sigma = \frac{q}{n \pi d} \right)$$

Pour les conducteurs uniques, cette densité de charge peut être considérée comme uniforme autour de la circonférence et, par conséquent, il est admis que le gradient est constant. En ce qui concerne les sous-conducteurs d'un faisceau, la densité de charge n'est pas uniforme, en raison de l'effet d'écran mutuel des sous-conducteurs, de telle sorte que la densité de charge et, par conséquent, le gradient sont plus élevés vers l'extérieur et plus faibles vers l'intérieur du faisceau.

La formule suivante donne une approche simplifiée de la variation du gradient autour de la circonférence:

$$g_{\theta} = g_{\text{moy}} \left(1 + \frac{(n-1)d}{b} \cos \theta \right)$$

où θ est l'angle formé par:

- le rayon passant par le centre du sous-conducteur et un point quelconque de la surface de celui-ci
- la droite passant par le centre du faisceau et le point du sous-conducteur considéré où le gradient est maximal

En particulier, le gradient maximal g_{max} est donné par:

$$g_{\text{max}} = g_{\text{moy}} \left(1 + \frac{(n-1)d}{b} \right)$$

Référence:

- [A1] IEEE Corona and field effects Sub-Committee Report — Radio noise Working Group: *A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients* (Une enquête sur les méthodes de calcul des gradients de potentiel superficiels des conducteurs de lignes de transmission), IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, n° 6, nov./déc. 1979, pp. 1996-2014.

c) *Bipolar d.c. lines*

$$[U] = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

where U is the value of the pole-to-earth voltage.

The presence of earth wires can be taken into account in the same way as for a.c. three-phase lines.

The voltage gradient derived from formula (A1) is an average value g_{av} around the circumference of the conductor or subconductor, in as much as it is calculated on the basis of the average charge density on the conductor:

$$\left(\sigma = \frac{q}{n \pi d} \right)$$

For single conductors this charge density can be considered uniform around the circumference and, therefore, the gradient is assumed to be constant. For the subconductors in a bundle, the charge density is not uniform, due to the mutual shielding effect of the subconductors, and the charge density and consequently the gradient, is larger towards the exterior and smaller towards the interior of the bundle.

A simplified approach to obtain the variation of this gradient around the circumference is given by the following formula:

$$g_{\theta} = g_{av} \left(1 + \frac{(n-1)d}{b} \cos \theta \right)$$

where θ is the angle between:

- the radius from the centre of a subconductor to a chosen point on the surface of the subconductor
- the line passing through the centre of the bundle and the point where the maximum gradient occurs on the same subconductor

In particular, the maximum gradient g_{max} is given by:

$$g_{max} = g_{av} \left(1 + \frac{(n-1)d}{b} \right)$$

Reference:

- [A1] IEEE Corona and Field Effects Sub-Committee Report — Radio Noise Working Group: *A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, No. 6, Nov./Dec. 1979, pp. 1996-2014.

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

La présentation dans ce catalogue d'une ligne d'un type déterminé ne signifie pas que cette ligne soit acceptable du point de vue des perturbations.

Liste des profils

(Profils au milieu des portées; les niveaux correspondent à la tension indiquée en tête de figure)

		Figures	Origine
I.	<i>Lignes 225 kV</i>		
	Triangle	B1 et B2	} Réf. 8
	Nappe	B3	
	Nappe voûte	B4	
	Nappe large	B5	
II.	<i>Lignes 362 kV</i>		
	Nappe	B6	Réf. 35, 39
III.	<i>Lignes 380 kV</i>		
	Nappe	B7	Réf. 8
	Nappe voûte	B8	Réf. 8
IV.	<i>Lignes 525 kV</i>		
	Nappe	B9	Réf. 35, 39
V.	<i>Lignes 750 kV</i>		
	Nappe voûte	B10	Réf. 8
VI.	<i>Lignes 765 kV</i>		
	Nappe	B11	Réf. 35, 39

Corrections:

I.	Fréquence	B12	Réf. 8
II.	Catégories de temps	B13	Réf. 8

APPENDIX B

CATALOGUE OF PROFILES OF RADIO NOISE FIELD
DUE TO CONDUCTOR CORONA
FOR CERTAIN TYPES OF POWER LINE

The appearance of a given line in the catalogue does not purport that this line generates an acceptable radio noise level.

List of profiles

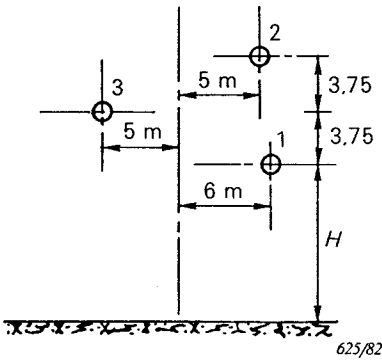
(These profiles refer to the middle of the spans and the levels are related to the voltage given at the top of each figure)

		Figures	Origin
I.	225 kV lines		
	Triangular formation of conductors	B1 and B2	Ref. 8
	Flat formation	B3	
	Arched formation	B4	
	Flat (wide) formation	B5	
II.	362 kV lines		
	Flat formation	B6	Ref. 35, 39
III.	380 kV lines		
	Flat formation	B7	Ref. 8
	Arched formation	B8	Ref. 8
IV.	525 kV lines		
	Flat formation	B9	Ref. 35, 39
V.	750 kV lines		
	Arched formation	B10	Ref. 8
VI.	765 kV lines		
	Flat formation	B11	Ref. 35, 39

Corrections:

I.	Frequency	B12	Ref. 8
II.	Weather categories	B13	Ref. 8

Ligne 225 kV
Line

Fréquence Frequency 0,5 MHz	Conducteurs Conductors				Gradients maximaux Maximum gradients			Correction de niveau Level correction
	Nombre de conducteurs Number of conductors	Distance entre phases Phase spacing	Rayon du faisceau Radius of bundle	Rayon du conducteur Radius of conductor	Phase 1	Phase 2	Phase 3	
H moy. 15 m H min. 11 m  625/82	1	—	—	13,2	15,40	15,05	14,60	0
	1	—	—	15,5	13,45	13,15	12,75	-6,4
	1	—	—	16,2	12,95	12,55	12,30	-8,0

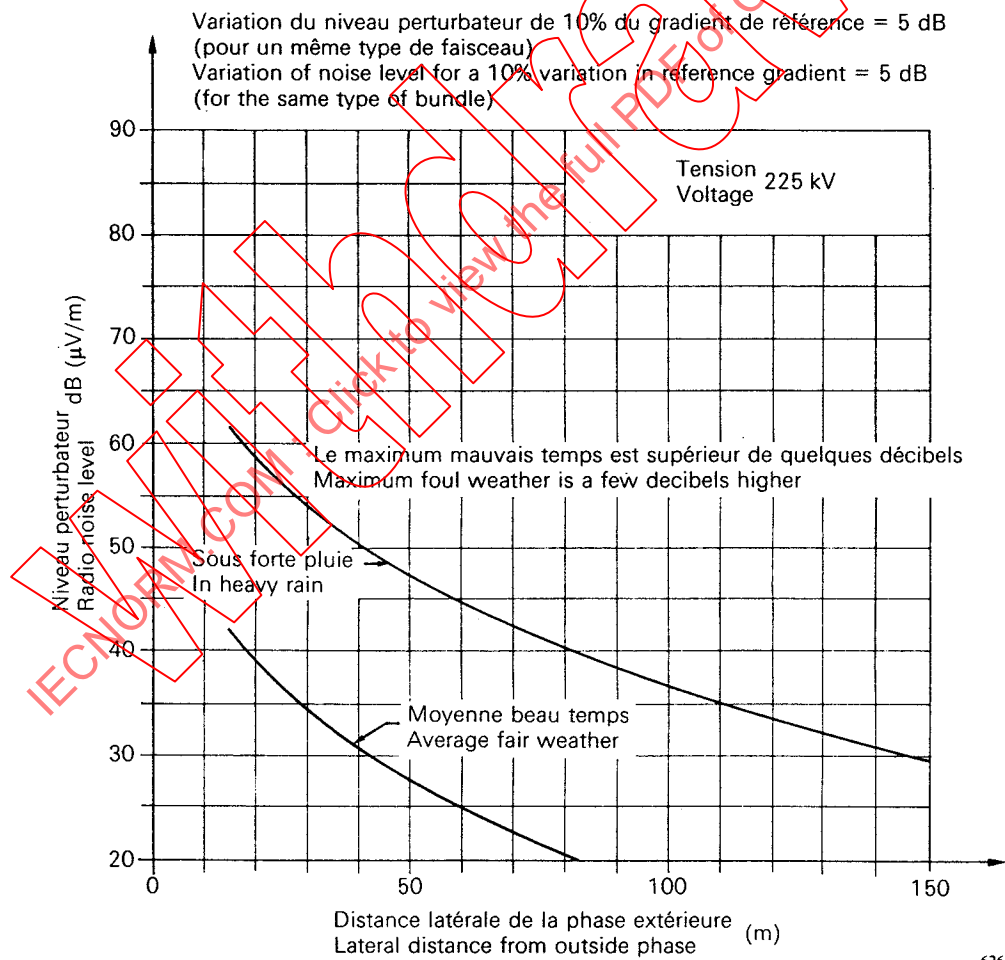
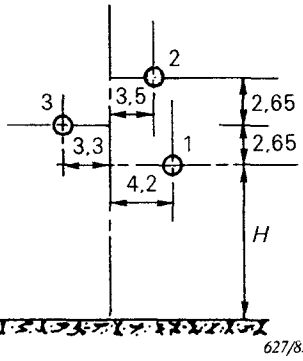
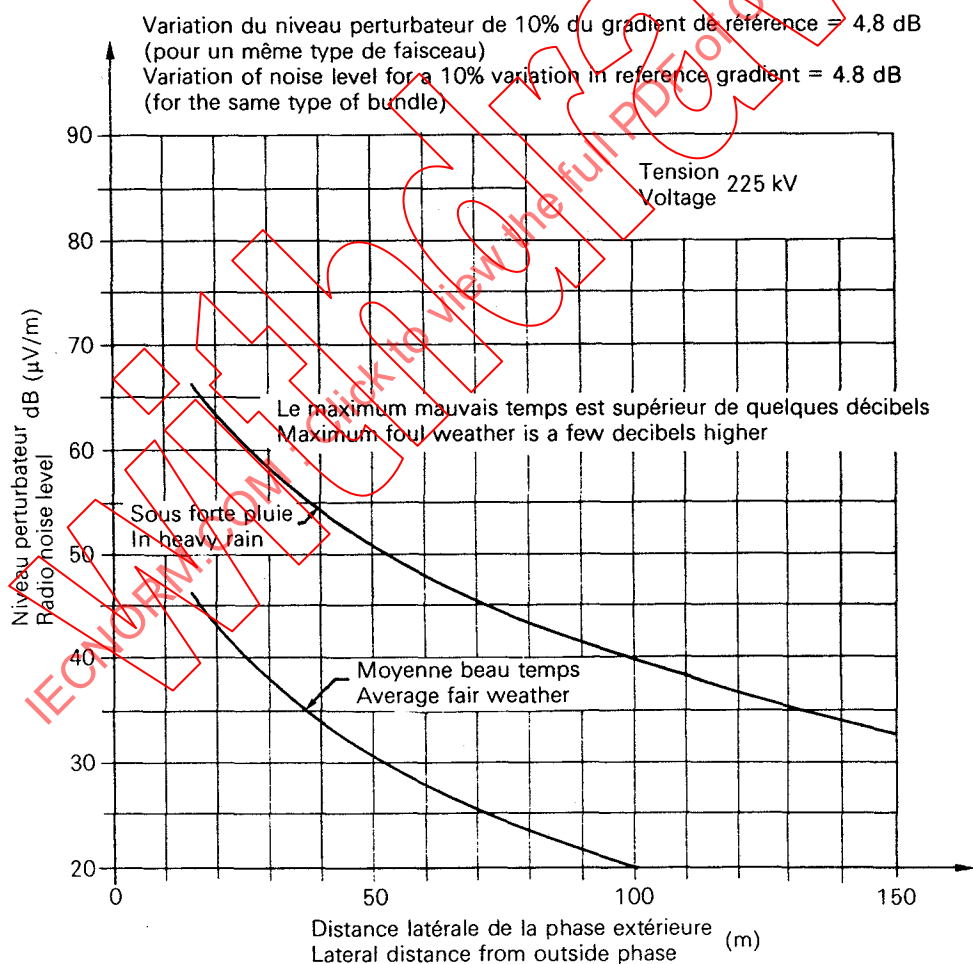


FIG. B1. — Triangle (1).
Triangular formation (1).

626/82

Ligne 225 kV
Line

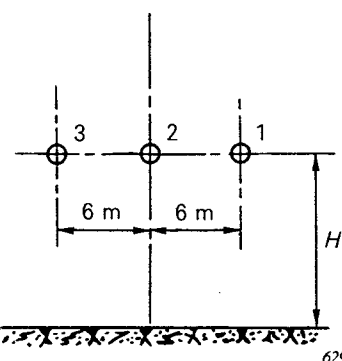
Fréquence Frequency 0,5 MHz	Conducteurs Conductors				Gradients maximaux Maximum gradients			Correction de niveau Level correction
	Nombre de conducteurs Number of conductors	Distance entre phases Phase spacing	Rayon du faisceau Radius of bundle	Rayon du conducteur Radius of conductor	Phase 1	Phase 2	Phase 3	
H moy. 15 m H min. 11 m 	1	—	—	13,2	16,15	16,00	15,45	0
	1	—	—	15,5	14,15	14,00	13,50	-6
	1	—	—	16,2	13,65	13,50	13,00	-7,6



628/82

FIG. B2. — Triangle (2).
Triangular formation (2).

Ligne 225 kV
Line

Fréquence Frequency 0,5 MHz	Conducteurs Conductors				Gradients maximaux Maximum gradients			Correction de niveau Level correction (dB)
	Nombre de conducteurs Number of conductors	Distance entre phases Phase spacing S (m)	Rayon du faisceau Radius of bundle R (mm)	Rayon du conducteur Radius of conductor r (mm)	Phase 1 (kV eff./cm)	Phase 2 (kV eff./cm)	Phase 3 (kV eff./cm)	
H moy. 15 m H min. 11 m  629/82	1	6	—	13,2	15,35	16,40	15,35	0
	1	6	—	15,5	13,40	14,35	13,40	-6
	1	6	—	16,2	12,90	13,85	12,90	-7,5

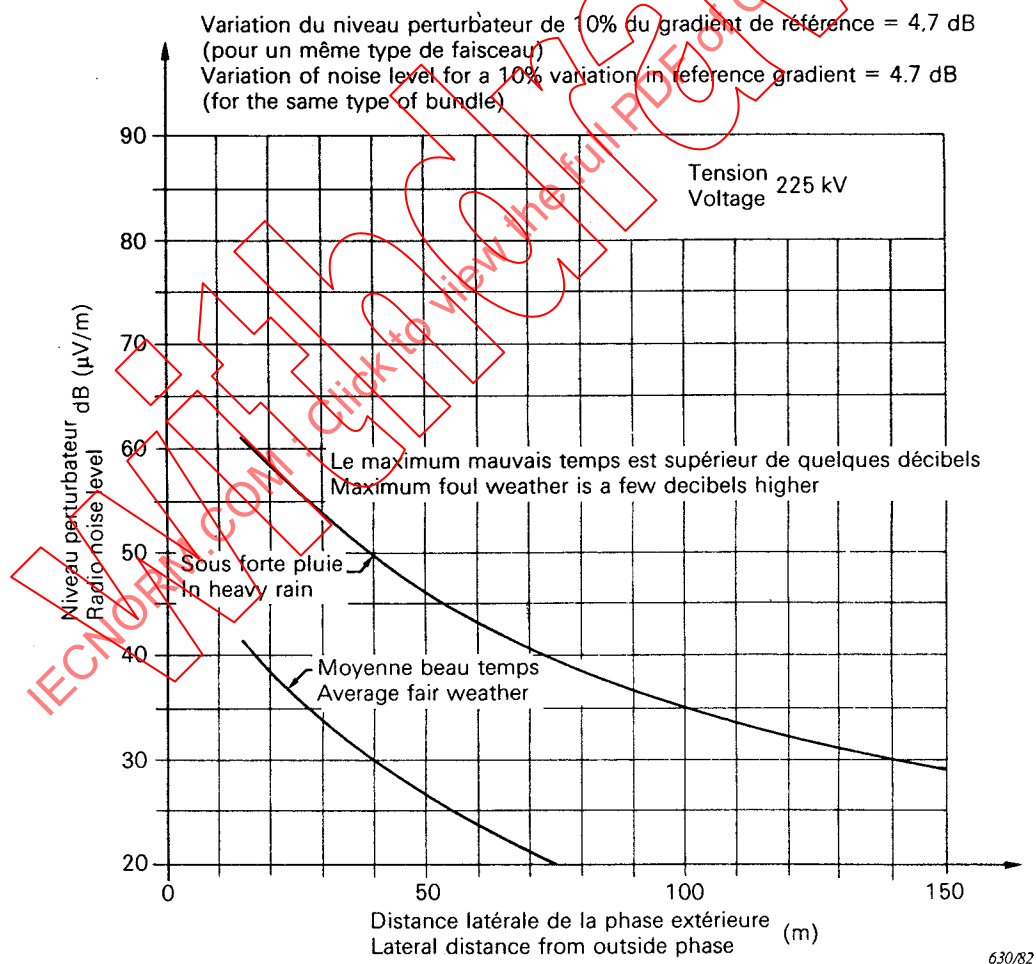
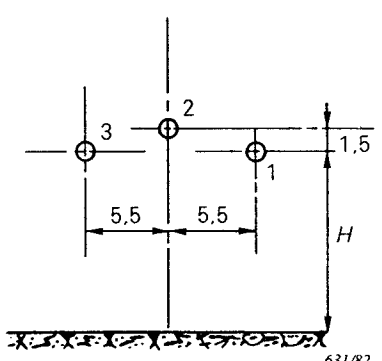


FIG. B3. — Nappe.
Flat formation.

Ligne 225 kV
Line

Fréquence Frequency 0,5 MHz	Conducteurs Conductors				Gradients maximaux Maximum gradients			Correction de niveau Level correction
	Nombre de conducteurs Number of conductors	Distance entre phases Phase spacing	Rayon du faisceau Radius of bundle	Rayon du conducteur Radius of conductor	Phase 1	Phase 2	Phase 3	
H moy. 15 m H min. 11 m  631/82		S (m)	R (mm)	r (mm)	(kV eff./cm)	(kV eff./cm)	(kV eff./cm)	(dB)
	1	5,5	—	13,2	15,55	16,45	15,55	0
	1	5,5	—	15,5	13,60	14,40	13,60	-6
	1	5,5	—	16,2	13,10	13,90	13,10	-7,6

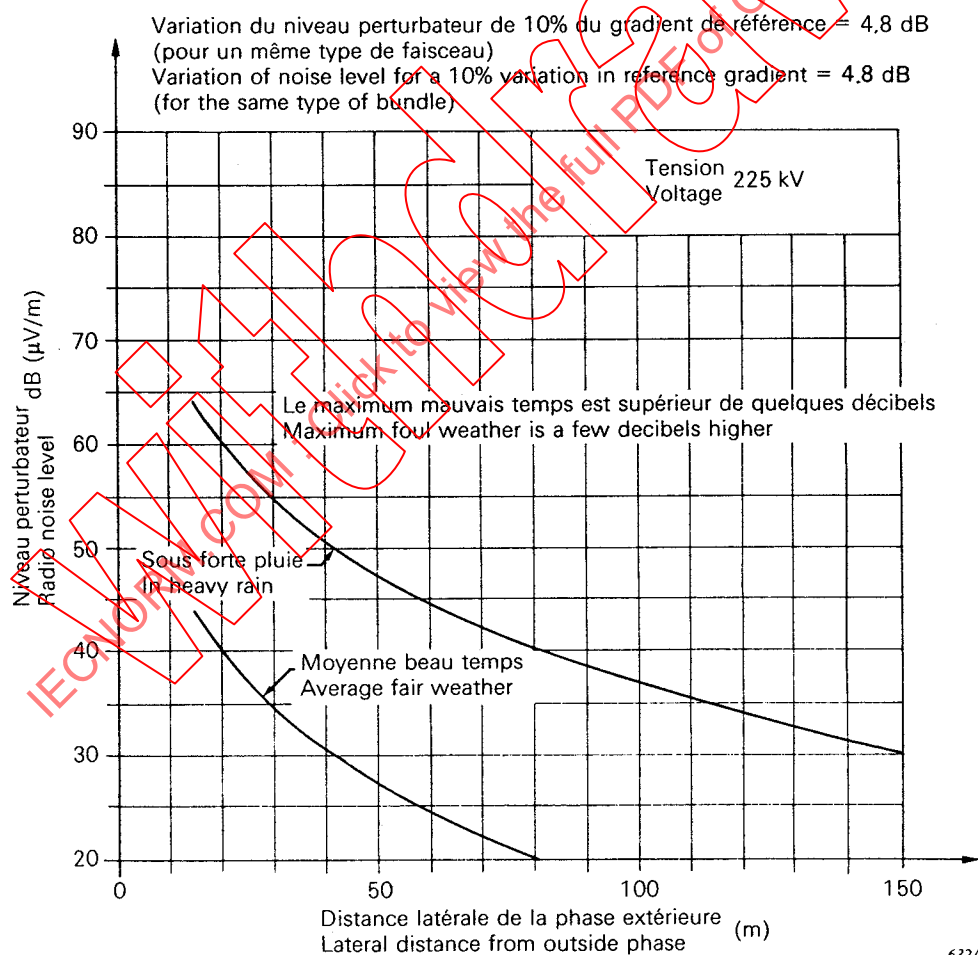
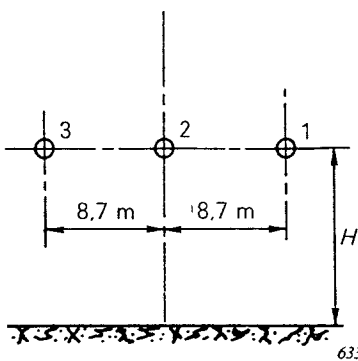


FIG. B4. — Nappe voûte.
Arched formation.

Ligne 225 kV
Line

Fréquence Frequency 0,5 MHz	Conducteurs Conductors				Gradients maximaux Maximum gradients			Correction de niveau Level correction
	Nombre de conducteurs Number of conductors	Distance entre phases Phase spacing	Rayon du faisceau Radius of bundle	Rayon du conducteur Radius of conductor	Phase 1	Phase 2	Phase 3	
H moy. 15 m H min. 11 m  633/82		S (m)	R (mm)	r (mm)	(kV eff./cm)	(kV eff./cm)	(kV eff./cm)	(dB)
	1	8,7	—	13,2	14,60	15,45	14,60	0
	1	8,7	—	15,5	12,75	13,50	12,75	-6,3
	1	8,7	—	16,2	12,30	13,00	12,30	-8,0

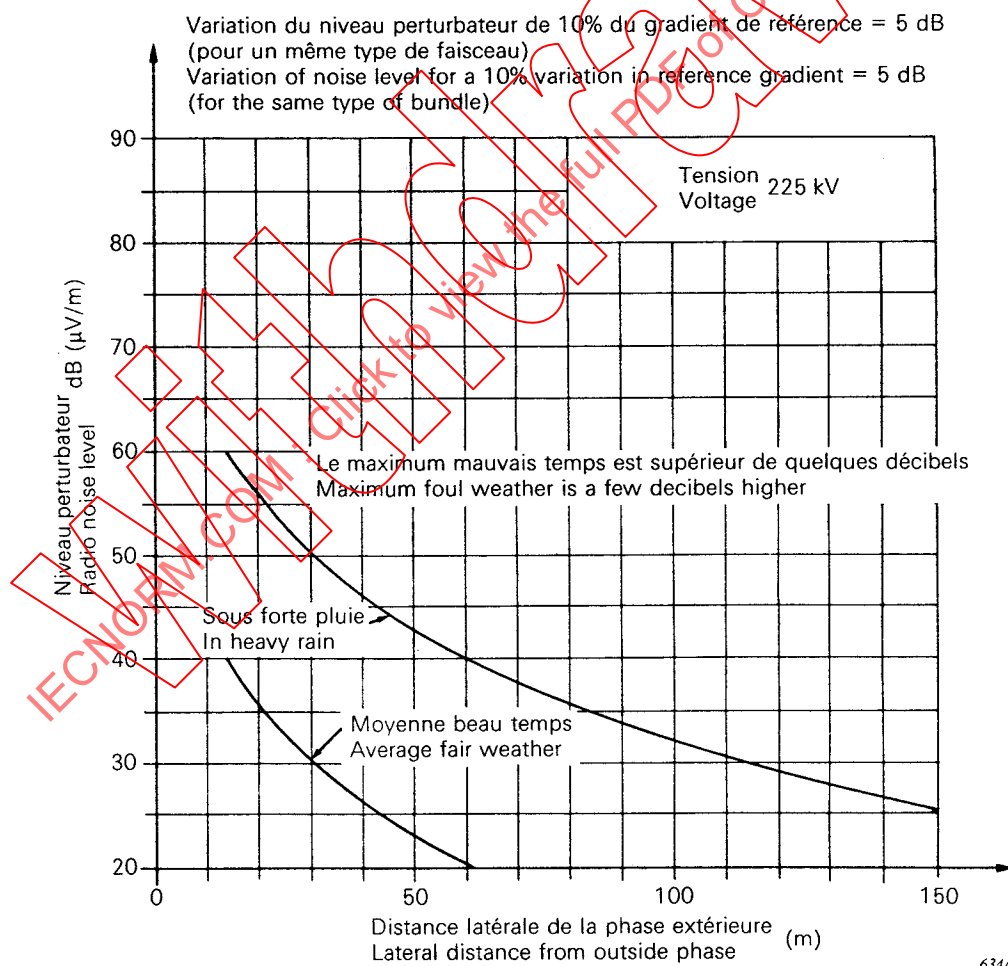


FIG. B5. — Nappe large.
Flat wide formation.