

**Le transport de l'énergie électrique et
'Environnement : Champs, Bruits et Perturbations
Electric Power Transmission an the Environment :
Fields, Noise and Interference**

**Groupe de Travail 36.01 (Effet couronne et champs)
Working Group 36.01 (Corona and field Effects)**



LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET L'ENVIRONNEMENT :
CHAMPS, BRUIT ET PERTURBATIONS

ELECTRIC POWER TRANSMISSION AND THE ENVIRONMENT :
FIELDS, NOISE AND INTERFERENCE

Table des Matières

PRÉFACE

1. INTRODUCTION

2. FOURNITURE DE L'ÉLECTRICITÉ

Encart 2.1 Concepts fondamentaux relatifs à l'électricité

Encart 2.2 Préfixes des unités

Encart 2.3 Transport d'énergie à Haute Tension

Encart 2.4 Câbles souterrains à Haute Tension

3. CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

3.1 Concepts

Encart 3.1 Le concept de champ

Encart 3.2 Définition des champs et leurs unités

3.2 Champs naturels

3.3 Fréquence

Encart 3.3 Champs alternatifs

Encart 3.4 Champs pulsés

4. CHAMPS ÉLECTRIQUES À FRÉQUENCE INDUSTRIELLE

4.1 Sources

4.2 Blindage

4.3 Courants induits

4.3.1 Personne dans un champ électrique

4.3.2 Contact avec d'autres objets

4.3.3 Stimulateurs cardiaques

4.4 Tensions induites

4.4.1 Contact transitoire avec des objets

4.5 Perception directe

5. CHAMPS MAGNÉTIQUES À FRÉQUENCE INDUSTRIELLE

5.1 Sources

Encart 5.1 Orientation du champ

Encart 5.2 Blindage et compensation

Encart 5.3 Harmoniques

5.2 Courants induits

Encart 5.4 Interactions directes du champ

5.3 Perception

5.4 Clôtures et conduites enterrées

5.5 Ecrans des terminaux

6. CHAMPS ÉLECTRIQUES, MAGNÉTIQUES ET SANTÉ

6.1 Introduction

6.2 Etudes sur les hommes

6.2.1 Investigations en laboratoire

6.2.2 Etudes épidémiologiques relatives au cancer

6.2.3 Autres aspects sur la santé

6.3 Etudes sur les animaux

Encart 6.1 Recherches sur élevage et cultures

6.4 Etudes sur les cellules

6.4.1 Mécanismes d'interaction

Contents

FOREWORD

1. INTRODUCTION

2. ELECTRICITY SUPPLY

Box 2.1 Some Basic Ideas Concerning Electricity

Box 2.2 Prefixes for Units

Box 2.3 High-Voltage Electric Power Transmission

Box 2.4 High-Voltage Underground Cables

3. ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

3.1 Concepts

Box 3.1 The Concept of Fields

Box 3.2 Definition of Fields and Their Units

3.2 Natural Fields

3.3 Frequency

Box 3.3 Alternating Fields

Box 3.4 Pulsed Fields

4. POWER-FREQUENCY ELECTRIC FIELDS

4.1 Sources

4.2 Screening

4.3 Induced Currents

4.3.1 People in an electric field

4.3.2 Contact with other objects

4.3.3 Pacemakers

4.4 Induced Voltages

4.4.1 Transient contact with objects

4.5 Direct Perception

5. POWER-FREQUENCY MAGNETIC FIELDS

5.1 Sources

Box 5.1 Field Direction

Box 5.2 Shielding and Compensation

Box 5.3 Harmonics

5.2 Induced Currents

Box 5.4 Direct Magnetic-Field Interactions

5.3 Perception

5.4 Fences and Pipelines

5.5 Visual-Display Terminals

6. ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS AND HEALTH

6.1 Introduction

6.2 Human Studies

6.2.1 Laboratory investigations

6.2.2 Epidemiological studies concerning cancer

6.2.3 Other health aspects

6.3 Animals Studies

Box 6.1 Farm investigations

6.4 Cell Studies

6.4.1 Interaction mechanisms

- 6.5 *Le point international*
 - 6.5.1 *Organisation Mondiale de la Santé*
 - 6.5.2 *Association Internationale pour la Protection contre les Radiations*
 - 6.5.3 *CIGRE*
 - 6.6 *Directives d'exposition*
 - Encart 6.2 *Directives de l'IRPA*
 - 6.7 *Le consensus actuel*
7. **EFFET DE COURONNE, DÉCHARGES DE SURFACE, MICROARCS**
- 7.1 *Effet de couronne*
 - Encart 7.1 *Influence des conditions atmosphériques sur l'effet couronne*
 - 7.2 *Décharges sur les isolateurs*
 - 7.3 *Microarcs*
8. **PERTURBATIONS EN RADIO ET TÉLÉVISION**
- 8.1 *Introduction*
 - 8.2 *Caractéristiques des perturbations radio*
 - Encart 8.1 *Mesure des perturbations radioélectriques*
 - 8.2.1 *Bruit d'effet de couronne*
 - 8.2.2 *Décharges sur les isolateurs*
 - 8.2.3 *Microarcs de mauvais contacts*
 - 8.3 *Qualité de la réception en radio et en télévision*
 - 8.4 *Perturbations passives*
9. **BRUIT ACOUSTIQUE**
- 9.1 *Introduction*
 - 9.2 *Bruit d'effet de couronne*
 - 9.2.1 *Caractéristiques*
 - 9.2.2 *Variations statistiques*
 - 9.2.3 *Atténuation latérale*
 - 9.3 *Bruit éolien*
 - Encart 9.2 *Bruit éolien*
 - 9.4 *Evaluation du bruit acoustique*
10. **IONS ET OZONE**
- 10.1 *Ions*
 - 10.2 *Ozone*
11. **RÉFÉRENCES**
- 6.5 **International Reviews**
 - 6.5.1 **World Health Organization**
 - 6.5.2 **International Radiation Protection Association**
 - 6.5.3 **CIGRE**
 - 6.6 **Exposure Guidelines**
 - Box 6.2 **IRPA Guidelines**
 - 6.7 **Present Consensus**
7. **CORONA, SURFACE DISCHARGES AND SPARKING**
- 7.1 **Corona**
 - Box 7.1 **Influence of Weather Conditions on Corona**
 - 7.2 **Discharges on Insulators**
 - 7.3 **Sparking**
8. **RADIO AND TELEVISION INTERFERENCE**
- 8.1 **Introduction**
 - 8.2 **Characteristics of the Radio Interference**
 - Box 8.1 **Radio interference measurements**
 - 8.2.1 **Corona disturbances**
 - 8.2.2 **Discharges on insulators**
 - 8.2.3 **Sparking at bad contacts**
 - 8.3 **Quality of the Radio and Television Reception**
 - 8.4 **Passive Interference**
9. **AUDIBLE NOISE**
- 9.1 **Introduction**
 - Box 9.1 **The Measurement of Noise**
 - 9.2 **Corona Noise**
 - 9.2.1 **Characteristics**
 - 9.2.2 **Statistical variation**
 - 9.2.3 **Lateral attenuation**
 - 9.3 **Aeolian Noise**
 - Box 9.2 **Aeolian Noise**
 - 9.4 **Evaluation of Audible Noise**
10. **IONS AND OZONE**
- 10.1 **Ions**
 - 10.2 **Ozone**
11. **REFERENCES**

PRÉFACE

Le fonctionnement des réseaux électriques et de leur appareillage peut influencer leur environnement électromagnétique. Ainsi, les réseaux de transport et de distribution peuvent avoir des effets perturbateurs sur des installations industrielles voisines, telles que des canalisations de fluides, des circuits de télécommunications, des calculateurs ou d'autres dispositifs électroniques. Les différentes formes de perturbations peuvent s'étendre jusqu'aux fréquences radioélectriques. Elles ont été l'objet d'une attention particulière, ainsi les moyens d'éliminer leurs effets, ou de réduire ceux-ci à des niveaux acceptables. Pour les industries concernées, la situation est aujourd'hui largement satisfaisante, grâce à des règles et procédures mutuellement acceptées, en vue d'assurer ce que l'on désigne par "compatibilité électromagnétique".

Ces questions de compatibilité électromagnétique sont traitées par divers organismes internationaux, incluant la Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), le Comité Consultatif International des Téléphones et Télécommunications (CCITT), ainsi que le Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR).

Il existe d'autres effets, qui intéressent le grand public en général, et que le présent fascicule se propose de traiter plus particulièrement. Ici aussi, des études approfondies ont été menées depuis longtemps, et des remèdes aux principaux effets ont été trouvés. La plupart des gênes recensées résultent de l'induction de tensions dans des structures métalliques ou objets mal connectés à la terre. Pour les lignes de tensions les plus élevées, l'effet de couronne peut générer un bruit acoustique et causer des perturbations radioélectriques.

Plus récemment, certaines inquiétudes ont été exprimées de par le monde au sujet d'éventuels effets sur la santé dus aux champs électriques et magnétiques régnant à proximité des lignes. De semblables inquiétudes se manifestent parfois à propos des ions et de l'ozone produits par les décharges d'effet de couronne. Certaines publications, en présentant ces phénomènes électriques et leurs conséquences possibles de manière alarmiste, ont amplifié ces inquiétudes. C'est pourquoi l'objet principal de ce fascicule est d'exposer de façon simple les phénomènes physiques mis en jeu et les effets qui en résultent. Nous pensons que cet effort de démythification permettra de ramener les faits à leurs justes proportions, et nous sommes persuadés que le seul fait de "comprendre" sera de nature à rassurer des inquiétudes injustifiées.

Ce fascicule est principalement destiné aux responsables des autorités civiles, aux hommes politiques, juristes, médecins, enseignants et autres personnes, pour lesquels ces questions, sous leur aspect technique ou lié à la santé, ne sont pas familières. Il peut aussi aider à la gestion de l'environnement, à la planification de nouvelles lignes, donner des informations à diverses personnes et intéresser une audience plus large.

Pour chaque sujet traité, les différents phénomènes sont expliqués, et des valeurs numériques typiques sont données, afin de permettre une appréciation quantitative des facteurs considérés. Des indications plus détaillées et les concepts plus difficiles à appréhender sont présentés dans des encarts, afin de ne pas rompre l'enchaînement des thèmes principaux. Un chapitre important est consacré au problème des effets possibles des champs électriques et magnétiques à fréquence industrielle sur la santé. Il attire l'attention sur les travaux d'organismes internationaux tels que

FOREWORD

The operation of electrical systems and equipment can affect the electromagnetic conditions in their vicinity. Electric power transmission and distribution systems, for example, may have perturbing effects on other nearby industrial installations, such as pipelines, telecommunication circuits, computers and other electronic systems. Much attention has been paid to the various forms of interference, which may extend up to radio frequencies, and to finding ways of eliminating the effects or reducing them to acceptable levels. The industries concerned now enjoy a broadly satisfactory situation with mutually accepted rules and procedures to ensure 'electromagnetic compatibility'.

These questions of electromagnetic compatibility are dealt with by various international organizations including the International Conference on Large High Voltage Electric Systems (CIGRE - Conférence Internationale des Grandes Réseaux Électriques), the International Telephone and Telecommunications Consultative Committee (CCITT - Comité Consultatif International des Téléphones et Télécommunications) and the Special International Committee on Radio Interference (CISPR - Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques).

There are complementary issues for the general public and it is on these that this booklet focuses. Here too, thorough studies have been carried out over a long period and remedies for the main effects found. Most of the annoying effects reported relate to the induction of voltages on metallic structures or objects which are not well connected electrically to the ground. For the higher-voltage power lines, corona discharges can create audible noise and cause interference with radio reception.

In recent years, some people have expressed concern about possible effects on health of the electric and magnetic fields produced by power lines. Questions are also sometimes asked about the production of ions and ozone by corona discharges. Some alarmist reporting of both the electrical phenomena involved and their possible consequences has raised anxieties. The main purpose of this booklet is to describe the underlying physical mechanisms and the observed effects in a straightforward way. It is hoped that by dispelling some of the apparent mystery, these matters may be seen in their proper perspective. The simple fact of 'understanding' often helps to allay unjustified apprehension.

This booklet is primarily intended for people such as public service officers, politicians, lawyers, doctors, teachers and others who may not be familiar with the technical and health aspects of the areas considered. It may also assist those involved in the management of the environmental issues, in the planning process for new transmission lines and in the provision of information to others, as well as being of interest to a wider audience.

For each topic, the various phenomena are explained and some typical values given for the factors discussed so that a quantitative appreciation may be obtained. The more detailed or difficult ideas are set aside in boxes so as not to impede the main theme. There is a section which considers the question of possible effects on health of power-frequency electric and magnetic fields. This draws on the work of international bodies such as the World Health Organization

l'Organisation Mondiale pour la Santé et l'Association Internationale pour la Protection contre les Radiations. Ces divers Organismes s'accordent à affirmer qu'aucun effet sur la santé n'a pu être établi, en ce qui concerne les champs électriques et magnétiques à fréquence industrielle normalement rencontrés autour des installations et ouvrages électriques.

Le présent fascicule a été rédigé par un groupe d'experts faisant partie du Groupe de Travail "Effets de couronne et effets des champs" de la CIGRE. Il résulte d'un consensus de ce Groupe, dont les membres appartiennent à un grand nombre de pays différents. Le chapitre relatif aux effets possibles sur la santé a également été avalisé par un groupe indépendant de médecins et de biologistes.

En 1991, le Groupe de Travail était composé de Messieurs :

*C. Gary (France), Chef de File
P. Pirotte (Belgique), Secrétaire
A. Britten (Afrique du Sud)
R. Conti (Italie)
D. Cristescu (Roumanie)
J. Daly (Irlande)
F. Hirsch (Allemagne)
B. Hutzler (France)
W. Janischewskyj (Canada)
L. Jermendy (Hongrie)
U. Jonsson (Suède)
I. Kabrhel (Tchécoslovaquie)
B. Maddock (Royaume-Uni), Animateur du Groupe d'experts
S. Maruvada (Canada)
R. Parraud (France)
M. Pilegaard (Danemark)
A. Porrino (Italie)
Y. Shkarin (URSS)
T. Wilson (Australie)
M. Yoshioka (Japon)
L. Zaffanella (Etats-Unis).*

Le Groupe d'experts de médecins et de biologistes était composé des :

*Prof. P. Cerretelli (Italie)
Dr R. Cox (Royaume-Uni)
Prof. E. David (Allemagne)
Dr M. Kato (Japon)
Dr B. Knave (Suède)
Dr J. Lambrozo (France)
Dr M. Repacholi (Australie)
Dr L. Sagan (Etats-Unis).*

and the International Radiation Protection Association. The consensus of these bodies is that no effects on health from power-frequency electric and magnetic fields as normally encountered have been established.

This booklet was prepared by a Task Force of experts drawn from the CIGRE Working Group on Corona and Fields. It presents the consensus view of that Group whose members come from many different countries. The section concerning possible health effects has also been endorsed by a separate group of doctors and biologists.

The membership of the Working Group in 1991 was:

C. Gary (France) Convenor
P. Pirotte (Belgium) Secretary
A. Britten (South Africa)
R. Conti (Italy)
D. Cristescu (Romania)
J. Daly (Ireland)
F. Hirsch (Germany)
B. Hutzler (France)
W. Janischewskyj (Canada)
L. Jermendy (Hungary)
U. Jonsson (Sweden)
I. Kabrhel (Czechoslovakia)
B. Maddock (UK) Leader of the Task Force
S. Maruvada (Canada)
R. Parraud (France)
M. Pilegaard (Denmark)
A. Porrino (Italy)
Y. Shkarin (USSR)
T. Wilson (Australia)
M. Yoshioka (Japan)
L. Zaffanella (USA)

The expert group of doctors and biologists consisted of:

Prof. P. Cerretelli (Italy)
Dr R. Cox (UK)
Prof. E. David (Germany)
Dr M. Kato (Japan)
Dr B. Knave (Sweden)
Dr J. Lambrozo (France)
Dr M. Repacholi (Australia)
Dr L. Sagan (USA)

1. INTRODUCTION

Les lignes aériennes et les câbles souterrains sont indispensables pour la transmission de l'électricité depuis les centrales génératrices jusqu'aux consommateurs. Ces lignes et câbles donnent lieu à des effets de nature électrique dans leur voisinage immédiat qui peuvent avoir une influence sur les équipements ou les personnes. Par exemple, les circuits de télécommunication subiront des perturbations électriques générées par les réseaux voisins de grande puissance, tandis que des personnes pourront sentir de légères décharges électriques en entrant en contact avec des objets métalliques situés sous une ligne. De nombreuses études ont été entreprises, dans le passé, pour s'assurer que ces divers effets ne posaient pas de problème de gêne ou de sécurité, en bref, pour assurer la compatibilité entre l'équipement électrique et son environnement.

Ce document traite des effets dus aux réseaux à courant alternatif qui concernent le grand public, à savoir les effets des champs électriques et magnétiques et, pour les réseaux aériens à haute tension, les effets des décharges électriques à la surface de certains composants des réseaux. Ces décharges produisent un bruit audible et sont à l'origine de perturbations sur les récepteurs radio et les téléviseurs. Il peut également y avoir production de très faibles quantités d'ions et d'ozone. On mentionne également les bruits particuliers produits par le vent soufflant sur les divers composants des lignes aériennes.

Les chapitres qui suivent donnent les mécanismes physiques de base et des ordres de grandeur typiques de ces différents effets, afin de pouvoir les comparer. Pour les champs électriques et magnétiques, un chapitre complémentaire souligne les études biologiques et sur la santé qui ont été entreprises. Il résume l'état actuel des connaissances sur ce sujet.

Cependant, en premier lieu, quelques mots présentent le transport et la distribution de l'énergie électrique basés sur les réseaux maillés, et explique pourquoi les hautes tensions sont nécessaires et pourquoi, aux tensions élevées, les câbles souterrains ne sont pas davantage utilisés.

2. FOURNITURE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

La plupart des réseaux d'énergie électrique font usage du courant alternatif (CA - voir encart 2.1). Le courant continu unidirectionnel (CC) est utilisé à l'occasion, mais la plupart du temps uniquement pour des liaisons spéciales telles que traversées importantes par câbles sous-marins ou très longues lignes aériennes. Les réseaux à courant continu ne seront pas traités dans ce document.

Habituellement, il est plus économique et plus fiable de produire l'énergie électrique dans des centrales de grande capacité situées à proximité de mines de charbon ou de barrages hydrauliques, et de la transporter massivement par intermédiaire d'un réseau de lignes à haute tension vers les centres consommateurs. Le niveau de tension est ensuite réduit grâce aux transformateurs et l'énergie électrique s'écoule dans les réseaux de répartition régionaux, pour se distribuer après plusieurs réductions du niveau de tension et atteindre l'utilisateur terminal en basse tension. L'ensemble du réseau de transport et de distribution, illustré figure 2-1, peut être comparé à un arbre avec un tronc et des branches de dimensions de plus en plus petites qui transportent la sève à partir du sol vers les feuilles les plus éloignées.

1. INTRODUCTION

Overhead lines and underground cables are necessary for the supply of electricity from power stations to consumers. Such lines and cables can give rise to electrically related effects in their vicinity which may have an impact on equipment or people. Telecommunication circuits, for example, may suffer electrical interference from a large power line nearby, while people may sometimes experience small electrical discharges when touching metal objects under such a line. Over the years, many studies have been carried out to ensure that these various effects do not give rise to problems of annoyance or safety, in short, to ensure compatibility between the electrical equipment and its surroundings.

This booklet concentrates on the effects, associated with alternating current systems, of relevance to the general public, that is, those arising from electric and magnetic fields and, for higher-voltage overhead lines, those arising from electrical discharges on the surface of some of the components of the line. These discharges generate audible noise and may cause interference with radio and television. Traces of ions and ozone may also be produced. Particular noises caused by the wind blowing on overhead lines are also mentioned.

For the various effects, the Sections which follow explain the underlying physical mechanisms and give some typical magnitudes so that the effects may be seen in perspective. For electric and magnetic fields, there is also a Section outlining the various health and biological studies which have been carried out and summarizing the present understanding of this subject.

First, however, a brief account is given of the transmission and distribution of electricity based on grid systems, why high voltages are needed and why, at the higher voltages, underground cables are not more widely used.

2. ELECTRICITY SUPPLY

Most electricity supply systems use alternating current (AC - see Box 2.1). Direct (unidirectional) current (DC) is occasionally used, but generally only for special links such as long underwater cables or some very long overhead lines. Direct-current systems are not considered further in this booklet.

It is normally more economic and reliable to generate electricity in large power stations, often near coal fields or sources of water power, and then to transmit it in bulk, via a network or 'grid' of high-voltage power lines, to areas of demand. The voltage is then stepped down by transformers and the electricity passed on to regional distribution systems, which branch out with further voltage reductions, until it reaches the consumer as a low-voltage 'mains' supply. This whole transmission and distribution system, illustrated in Figure 2.1, may be likened to a tree which has a trunk and branches of decreasing size which carry the sap from the ground to the furthest tips of the tree.

Vu l'accroissement des besoins en énergie électrique, il s'est avéré nécessaire d'augmenter le niveau de tension des réseaux de transport pour leur permettre d'écouler des puissances plus importantes sans nécessiter des sections énormes pour les conducteurs ou enregistrer des pertes excessives (voir encart 2.3). Actuellement, en Amérique du Nord et dans plusieurs pays de l'Europe de l'Est, on utilise des tensions jusqu'à 750 kV (kilovolt), alors qu'une très longue ligne dans l'ancienne URSS de 1200 kV a été récemment mise en service. En Europe occidentale, le niveau 400 kV apparaît comme adéquat pour quelques années encore.

Les lignes aériennes de transport, à ces niveaux de tension, sont de dimensions respectables (fig. 2-2) et on peut se poser la question de savoir pourquoi ne pas les enterrer plus souvent. Une raison est économique car le coût du câble souterrain équivalent est beaucoup plus élevé mais il existe aussi d'autres considérations techniques qui rendent impraticable l'utilisation de câbles souterrains de grande longueur (voir encart 2.4)

As the demand for electricity has increased, it has proved necessary to raise the voltage of transmission networks so that they can handle the increased powers without needing enormous conductors or incurring excessive losses (see Box 2.3). Voltages up to the 750 kV (kilovolt) level are now in use in North America and in several East European countries, while one very long line in the former USSR has begun operation at 1200 kV. In Western Europe, 400 kV is likely to prove adequate for some time.

Power transmission lines of these voltages (Figure 2.2) are large and one may well ask why they cannot be put underground more often. One reason is that of greatly increased cost but there are also technical considerations which make the use of long high-power underground cables impracticable (see Box 2.4).

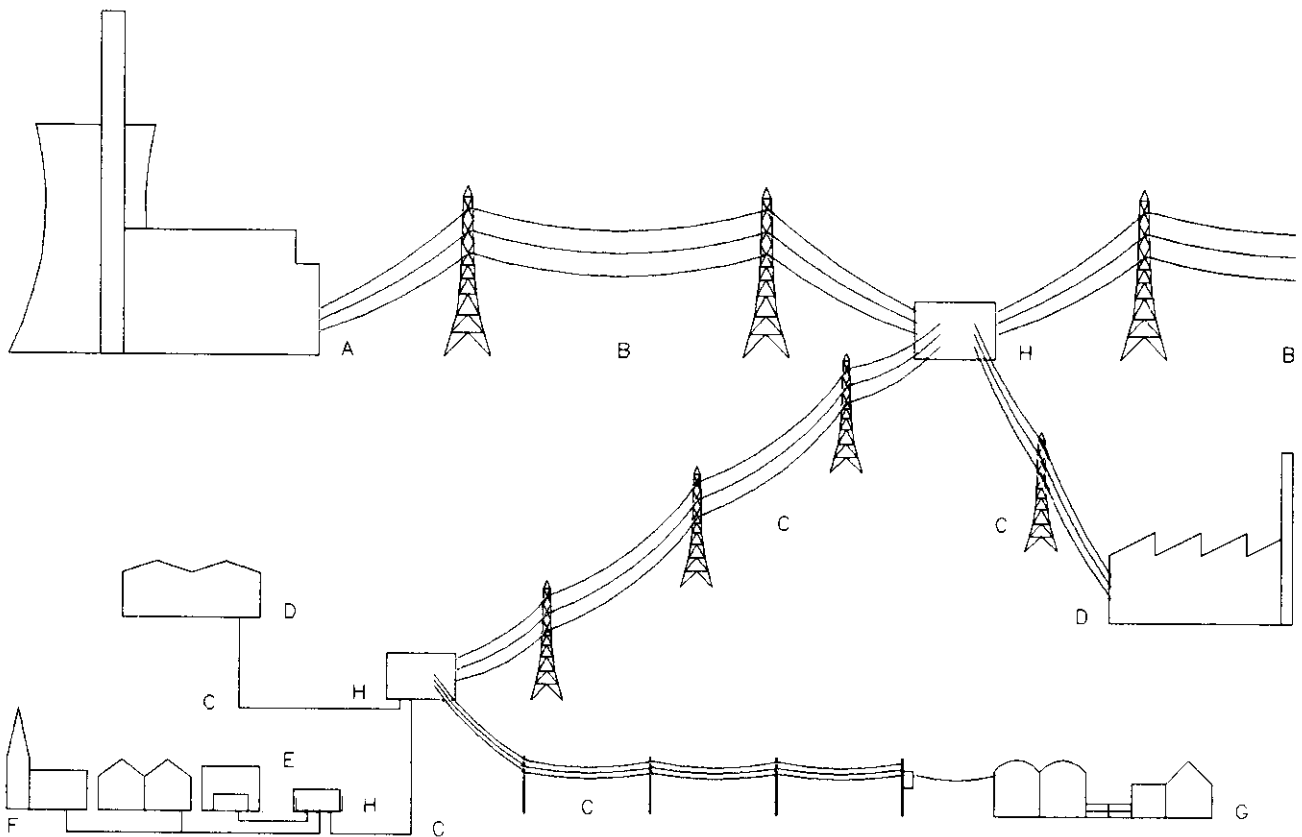


Figure 2.1: Dans un réseau typique, l'énergie électrique est générée dans des centrales (A), transmise par des lignes aériennes à haute tension (B), répartie à des tensions intermédiaires (C) vers les industries (D), villes et villages (E), et finalement distribuée à basse tension aux résidences individuelles, maisons (F) et entreprises agricoles (G). Des transformateurs, habituellement installés dans des postes (H), modifient le niveau de tension. En réalité, un réseau complexe est nécessaire pour réaliser une distribution fiable, et pour ce faire, les installations à haute tension sont organisées la plupart du temps comme un réseau interconnecté.

Figure 2.1 : In a typical electric power system, electricity is generated in power stations (A), transmitted at high voltage by overhead lines (B), distributed at various intermediate voltages (C) to industry (D), towns and villages (E) and finally supplied at a low voltage to individual buildings, homes (F) and farms (G). Transformers, often located in substations (H), change the voltage from one level to the next. In reality, a complex network is needed to provide a reliable supply, with the higher-voltage parts sometimes being arranged as an interconnected 'grid'.

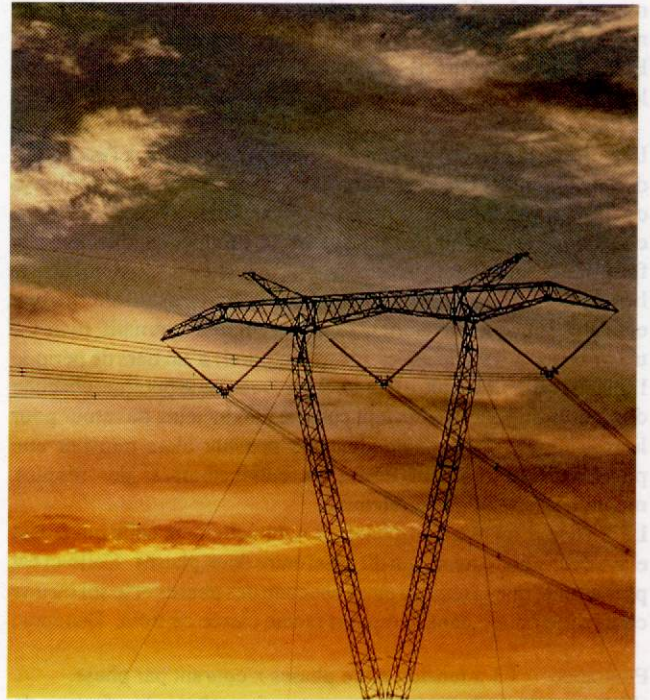
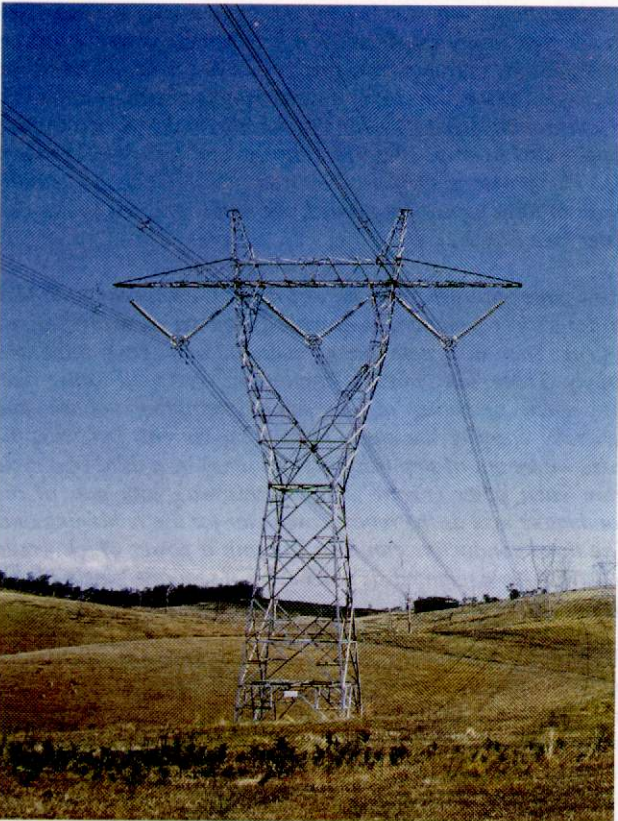
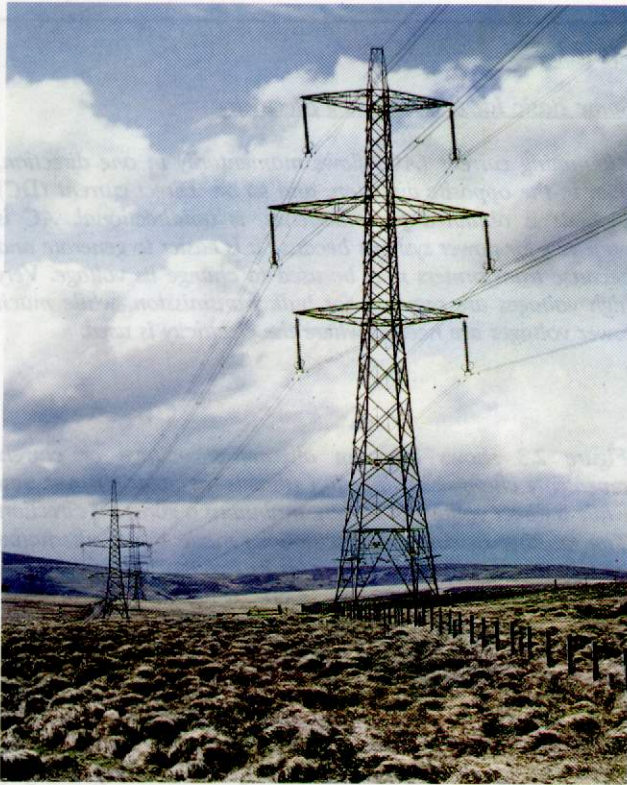


Figure 2.2: Ces exemples de lignes aériennes à haute tension illustrent quelques-unes des réalisations qui résultent de la grande variété des circonstances locales. La plupart du temps, un faisceau est utilisé pour chaque phase en lieu et place d'un conducteur unique. Les conducteurs sont suspendus aux pylônes par des isolateurs qui habituellement sont constitués par une chaîne de disques en porcelaine ou en verre.
(Photographies: NGC-RU, Commonwealth Edison-USA, SECV-Australie, Eskom-Afrique du Sud)

Figure 2.2 : These examples of high-voltage transmission lines illustrate some of the many different designs which have evolved to suit the wide variety of local circumstances. Often, more than one conductor - 'a bundle' - is used for each phase. The conductors are suspended from the towers by insulators, which usually consist of a string of interconnected porcelain or glass discs.
(Photographs : NGC-UK, Commonwealth Edison-USA, SECV-Australia, Eskom-South Africa)

Encart 2.1

Electricité : Notions de base

Comme son nom l'indique le courant alternatif (CA) s'écoule alternativement dans une direction puis dans la direction opposée et ainsi de suite. Le courant continu (CC), tel que celui généré à partir de batteries, est unidirectionnel. On préfère le courant alternatif pour les réseaux d'énergie car il est plus commode de le produire et aussi parce que les transformateurs peuvent être utilisés pour modifier la tension. Des tensions très élevées sont requises pour transporter de grandes quantités d'énergie, alors que des tensions plus basses sont utilisées par les consommateurs.

La figure 2.3 représente comment une tension alternative ou un courant alternatif change périodiquement de direction (polarité) au cours du temps alors que la tension continue ou le courant continu reste constant. Le nombre d'oscillations complètes effectuées par le courant alternatif en une seconde est connu sous le nom de fréquence. Elle s'exprime en «cycles par seconde» ou plus communément en hertz (Hz). La grande majorité des réseaux d'énergie utilise 50 ou 60 Hz.

Il y a différents moyens de caractériser la valeur d'une grandeur alternative. Le plus habituel est la notion de valeur efficace qui pour une grandeur sinusoïdale (tel que montré figure 2.3.) est la valeur de crête de chacune des demi-périodes divisée par la racine carrée de deux. Ce choix conduit à une relation très simple pour la puissance électrique qui devient le produit de la tension par le courant lorsque les valeurs efficaces sont utilisées. La tension, analogue à la pression dans un réseau de distribution d'eau, est mesurée en volts (V), tandis que le courant, analogue au débit, est mesurée en ampères (A). La puissance est mesurée en watts (W). En fonction de l'ordre de grandeur, l'unité est précédée d'une autre lettre (voit encart 2.2).

Le transport et la distribution de l'énergie électrique, à l'exception du raccordement final aux consommateurs domestiques, utilisent ce qui est connu sous le nom de réseau triphasé. Un tel réseau conduit à des économies tant pour la production que pour la fourniture. Trois fils sous tension ou conducteurs* sont utilisés au lieu d'un seul, chacun fonctionnant à la même tension alternative, et le plus souvent transportant le même courant alternatif, mais les trois tensions sont décalées (écart temporel) d'un tiers de période l'une par rapport à l'autre (figure 2.4). Dans cette optique, chacune des paires de conducteurs agit comme conducteurs de retour pour le troisième. Les trois conducteurs peuvent alors transiter une puissance qui aurait nécessité six conducteurs si des réseaux monophasés avaient été retenus.

La tension d'un réseau triphasé est habituellement celle qui existe entre deux conducteurs, on dit aussi entre deux phases. Celle-ci est plus grande que la tension entre chacune des phases et le sol ou une connexion neutre dans le rapport racine carrée de trois. Dès lors :

Puissance = $\sqrt{3}$ x tension entre phases x courant par phase.
(Si la tension et le courant ne sont pas en phase, le «facteur de puissance» correspondant doit être introduit dans l'équation).

Pour l'alimentation des consommateurs domestiques, des réseaux monophasés constitués d'un conducteur de phase et d'un conducteur neutre sont habituels, quoique des dispositions deux phases trois conducteurs soient habituelles en Amérique du Nord. Dans certaines circonstances, les consommateurs domestiques seront alimentés en triphasé.

* Dans ce sens, le mot "conducteur" est celui qui définit le composant métallique qui transporte le courant électrique. Parfois, il se réfère à quelque chose qui conduit l'électricité. "Objet conducteur" est également employé dans le même sens.

Box 2.1

Some Basic Ideas Concerning Electricity

Alternating current (AC) flows momentarily in one direction, then in the opposite direction, and so on. Direct current (DC) such as is obtained from batteries, is unidirectional. AC is preferred for power systems because it is easier to generate and because transformers may be used to change its voltage. Very high voltages are required for bulk transmission, while much lower voltages are needed where the electricity is used.

Figure 2.3 shows how an alternating voltage or current repeatedly changes its direction (that is, its polarity) over time while a direct voltage or current maintains a constant direction. The number of complete oscillations made by an alternating current in one second is known as its frequency. It is expressed in 'cycles per second' or, more usually now, in hertz (abbreviated Hz). Most power systems use 50 or 60 Hz.

There are various ways of characterizing the magnitude of an alternating quantity. That most commonly used is the root-mean-square (rms) value which for a smoothly changing sinusoidal variation (as shown in Figure 2.3) is the peak value in either half-cycle divided by the square root of two. This choice gives a very simple relation for electrical power as voltage multiplied by current when rms values are used. The voltage, analogous to the pressure in a water-supply system, is measured in volts (abbreviated V) while the current, analogous to the flow, is measured in amps (short for amperes and further abbreviated A). The power is measured in watts (W). When particularly small or large values are needed, the unit is prefixed by another letter (see Box 2.2).

Most power transmission and distribution, except the final feed to domestic consumers, uses what is known as a three-phase system. Such a system brings economies in generation and supply. Three 'live' wires or conductors are used rather than one, each operating at the same alternating voltage and generally carrying the same alternating current, but with the three waves out of step (displaced in time) by a third of a cycle from each other (Figure 2.4). In this way, any pair of the conductors acts as the return conductor for the remaining one. The three conductors can then transmit a power which would otherwise have required six conductors if separate 'single-phase' systems had been used.*

The voltage of a three-phase system is normally specified as that between one phase and another. This is larger than the voltage between any one of the phases and the ground or neutral connection by a factor of the square root of three. Then:

*power = $\sqrt{3}$ x phase-to-phase voltage x phase current.
(If the voltage and current are not in step, the corresponding 'power factor' must be added to this equation.)*

For the final feed to domestic consumers, single-phase systems with one live and one neutral conductor are common, though two-phase three-wire arrangements are found in North America. In a few places, domestic consumers may receive a three-phase supply.

* Throughout this booklet, 'conductor' is usually used for the metal component which carries the electric current. Sometimes, it may refer to anything which can conduct electricity. 'Conductive object' is also used in this latter sense.

Les noms de la plupart des unités électriques ont pour origine les noms des grands physiciens à qui sont dues les découvertes de l'électricité. En plus des unités déjà citées, dérivées des noms de Ampère, Hertz, Volta et Watt, le nom de Joule a été associé à l'unité d'énergie, celui d'Ohm à l'unité de résistance et celui de Tesla à l'unité de champ d'induction magnétique. Actuellement on utilise encore volontiers une ancienne, quoique plus petite unité pour le champ d'induction magnétique dérivée du nom du physicien Gauss. Le champ d'induction magnétique (densité de flux magnétique) est une manière particulièrement simple pour caractériser un champ magnétique.

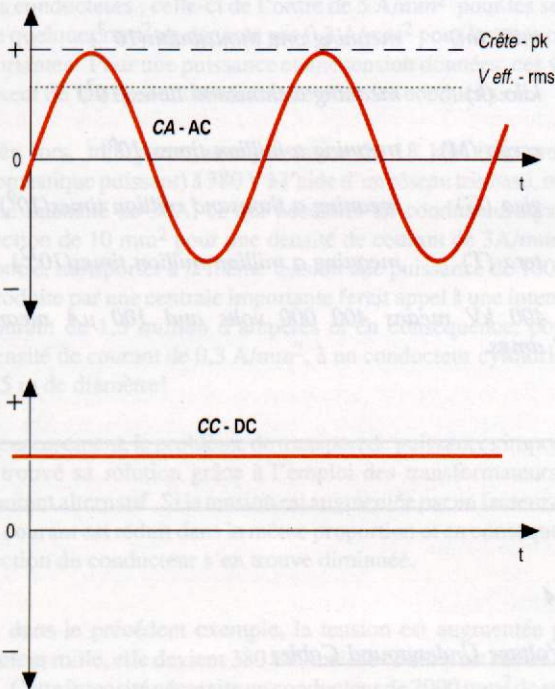


Figure 2.3: Le diagramme supérieur représente un courant alternatif ou une tension alternative tandis que le diagramme inférieur représente une tension continue ou un courant continu. L'axe vertical représente la valeur instantanée de la tension ou du courant et l'axe horizontal représente le temps (t). La valeur de crête et la valeur efficace de l'onde alternative sont aussi indiquées.

Figure 2.3 : The upper diagram shows an alternating voltage or current (AC) while the lower shows a direct voltage or current (DC). The vertical axis represents the instantaneous value of the voltage or current and the horizontal axis represents time (t). The peak (pk) and root-mean-square (rms) values of the alternating wave are marked.

The names of most electrical units are derived from the names of famous discoverers of electrical or related phenomena. In addition to the units already mentioned, derived from Ampere, Hertz, Volta and Watt, Joule's name has been given to the unit of energy, Ohm's to that of resistance and Tesla's to that of magnetic flux density (sometimes known as magnetic induction). An earlier, smaller unit of magnetic flux density, named after Gauss, is still widely used. Magnetic flux density is simply a particular way of characterizing a magnetic field.

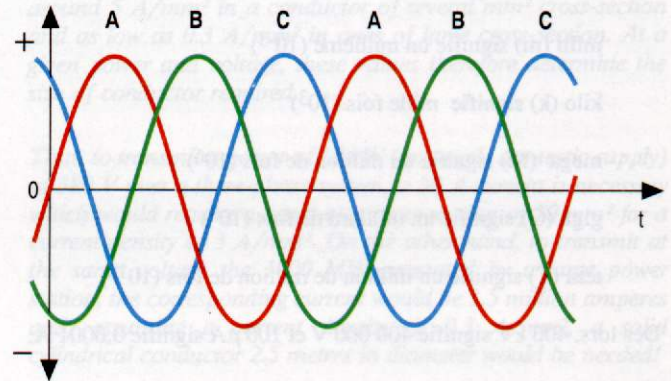


Figure 2.4: Ces trois ondes (A, B et C) représentent les tensions (et courants) dans un réseau triphasé tel qu'utilisé pour la majorité des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique.

Figure 2.4 : These three waves (A, B and C) represent the voltages (and currents) in a three-phase system as used for most electrical power transmission and distribution.

Encart 2.2

Préfixes pour les unités

Lorsqu'une grandeur physique nécessite pour sa représentation un nombre particulièrement grand ou petit, la lettre qui représente l'unité est précédée par une autre lettre qui signifie le changement d'unité, habituellement dans le rapport de un à mille :

nano (n) signifie un milliardième (10^{-9})

micro (μ) signifie un millionième (10^{-6})

milli (m) signifie un millième (10^{-3})

kilo (k) signifie mille fois (10^3)

mega (M) signifie un million de fois (10^6)

giga (G) signifie un milliard de fois (10^9)

tera (T) signifie un million de million de fois (10^{12})

Dès lors, 400 kV signifie 400 000 V et 100 μ A signifie 0,0001 A.

Box 2.2

Prefixes for Units

When particularly small or large values of a quantity are required, the letter representing the unit is prefixed by another to signify its changed size, usually in steps of a thousand, viz:

nano (n) meaning one-thousand-millionth (10^{-9})

micro (μ) meaning one millionth (10^{-6})

milli (m) meaning one thousandth (10^{-3})

kilo (k) meaning a thousand times (10^3)

mega (M) meaning a million times (10^6)

giga (G) meaning a thousand million times (10^9)

tera (T) meaning a million million times (10^{12})

Thus, 400 kV means 400 000 volts and 100 μ A means 0.0001 amps.

Encart 2.4

Câbles souterrains à haute tension

Un câble souterrain à haute tension comprend un conducteur central entouré d'un isolant électrique. Le tout est enfermé dans une gaine de protection laquelle est électriquement mise à la terre. Vu la proximité du conducteur par rapport à la gaine, le câble a une capacité électrique importante - qui est proportionnelle à sa longueur - et absorbe un courant alternatif important qui s'ajoute au courant principal assurant la fourniture. On définit une «longueur critique» lorsque l'intensité du courant capacitif atteint la même valeur que celle admissible dans le câble en fonction des critères thermiques; à partir de cette distance le câble ne peut plus transmettre de puissance. Il est possible de compenser cet effet capacitif mais, en pratique, on ne dépasse pas des distances de plus de 20 km.

Comparé aux lignes aériennes, le coût par kilomètre des câbles souterrains est plus élevé vu l'utilisation de matériaux plus sophistiqués et plus chers et vu les besoins accrus en travaux d'installation et de génie civil. En fonction de la tension et de la puissance, le coût peut être jusqu'à dix fois plus élevé voire plus. Il convient également de tenir compte de la disponibilité des câbles en cours de fonctionnement. A l'occasion ils seront endommagés par des machines excavatrices ou subiront une rupture de leur isolation. La détection et la réparation du défaut pourront demander plusieurs semaines, alors qu'une réparation sur une ligne aérienne pourra s'effectuer en un jour.

Pour ces raisons, les câbles souterrains seront seulement utilisés pour le transport de puissances importantes lorsque les réseaux aériens sont incompatibles avec les activités humaines et dans ces derniers cas seulement sur des distances relativement faibles.

Box 2.4

High-Voltage Underground Cables

A high-voltage underground cable consists of a central conductor surrounded by a complex arrangement of electrical insulation. This in turn is enclosed in a protective sheath which is electrically earthed. Because the conductor is so close to the sheath, the cable has a high electrical capacitance - which is proportional to its length - and this draws a significant alternating current in addition to the main transmitted current. A 'critical length' is reached when the capacitive current becomes equal to the maximum current which the conductor can carry; the cable can then no longer transmit power. Some compensation of the capacitance can sometimes be provided but, in practice, cable lengths rarely exceed 20 kilometres.

Compared with overhead lines, the cost per kilometre of underground cables is higher, because more-expensive, sophisticated materials have to be used and because of the increased civil and installation works. Depending on voltage and power, the cost may be up to ten or more times greater. Allowance must also be made for the reduced time for which a cable may be available for operation. Occasionally they are damaged by excavating equipment or they suffer a breakdown in their electrical insulation. Finding and repairing the fault may require several weeks, whereas a repair can usually be carried out in a day on an overhead line.

For all these reasons, underground cables for high-power transmission are used only where overhead lines cannot co-exist with other human activities - and then only for relatively short distances.

Encart 2.3

Transport de l'énergie électrique à haute tension

Pourquoi les hautes tensions sont-elles nécessaires pour le transport de l'énergie électrique ?

La résistance électrique des conducteurs est à l'origine d'une dissipation calorifique qui conduit à une élévation de leur température. Ce phénomène limite la densité de courant acceptable dans les conducteurs ; celle-ci de l'ordre de 5 A/mm^2 pour les sections de quelques mm^2 ne dépasse pas $0,3 \text{ A/mm}^2$ pour les sections importantes. Pour une puissance et une tension données, ces valeurs fixent de fait la section nécessaire pour les conducteurs.

Dès lors, transporter une puissance de 18 kW (raccordement domestique puissant) à 380 V à l'aide d'un réseau triphasé, requiert une intensité de 30 A , ce qui nécessite un conducteur ayant une section de 10 mm^2 pour une densité de courant de 3 A/mm^2 . Par contre, transporter à la même tension une puissance de 1000 MW produite par une centrale importante ferait appel à une intensité de courant de $1,5$ million d'ampères et en conséquence, pour une densité de courant de $0,3 \text{ A/mm}^2$, à un conducteur cylindrique de $2,5 \text{ m}$ de diamètre!

Heureusement, le problème de transport de puissances importantes a trouvé sa solution grâce à l'emploi des transformateurs et du courant alternatif. Si la tension est augmentée par un facteur donné, le courant est réduit dans la même proportion et en conséquence la section du conducteur s'en trouve diminuée.

Si dans le précédent exemple, la tension est augmentée par un facteur mille, elle devient 380 kV , mais le courant est réduit à 1500 A . Cette intensité nécessite un conducteur de 2000 mm^2 de section. Celle-ci peut être obtenue, par exemple, dans le cas d'une ligne aérienne où chaque phase serait équipée de trois conducteurs de 31 mm de diamètre chacun.

En réalité, cette vision simplifiée doit être considérablement raffinée, en raison des multiples contraintes techniques et des facteurs économiques. Côté conducteur, les limites liées aux pertes et à l'augmentation de la température ont déjà été mentionnées, alors qu'une contrainte majeure dans le cas des tensions élevées est le phénomène connu sous le nom « d'effet de couronne »; celui-ci sera présenté dans le chapitre 7.

Les avantages du transport à haute tension seront également illustrés en remarquant que, actuellement dans les pays développés, la puissance moyenne par habitant est de l'ordre du kW . Une ligne à 20 kV peut alimenter un important village de mille habitants, une ligne à 220 kV est à peine suffisante pour assurer la fourniture d'une ville importante, alors qu'une ligne à 400 ou 500 kV peut desservir un centre provincial. Les villes et leurs agglomérations demanderont, pour l'alimentation en énergie électrique, plusieurs lignes à ce niveau de tension ou encore à des tensions supérieures. La gamme des tensions comprises entre 300 et 800 kV est connue sous le nom de très haute tension (THT), alors que les niveaux supérieurs, tels que le 1050 kV expérimenté en Italie, le 1100 kV en cours de réalisation au Japon et le 1200 kV en fonctionnement dans l'ancienne URSS sont appelés ultra haute tension (UHT).

Box 2.3

High-Voltage Electric Power Transmission

Why are such high voltages needed for power transmission?

The electrical resistance of the line conductors causes a dissipation of energy which produces a rise in their temperature. This limits the current density allowable in the conductors; around 5 A/mm^2 in a conductor of several mm^2 cross-section and as low as 0.3 A/mm^2 in ones of large cross-section. At a given power and voltage, these values therefore determine the size of conductor required.

Thus, to transmit a power of 18 kW (an ample domestic supply) at 380 V over a three-phase system, a 30 A current is necessary which would require a conductor cross-section of 10 mm^2 for a current density of 3 A/mm^2 . On the other hand, to transmit at the same voltage the 1000 MW generated by a large power station, the corresponding current would be 1.5 million amperes and, assuming a current density of 0.3 A/mm^2 , a solid cylindrical conductor 2.5 metres in diameter would be needed!

Fortunately the problem of transmitting high powers has been solved by using transformers and alternating current. If the voltage is increased by some factor, the current is decreased in the same ratio and the necessary conductor cross-section reduced.

To return to the example, if the voltage is increased by a factor of a thousand, it becomes 380 kV , but the current is reduced to 1500 A . This requires a cross-section of 2000 mm^2 which can easily be provided, for example, by an overhead line in which each phase has three conductors, each 31 mm in diameter.

In reality, the simple analysis above must be considerably refined, because of numerous technical constraints and economic factors. As regards the conductors, the limits set by energy loss and temperature rise have already been mentioned, while another major constraint for very high voltages is the phenomenon known as the 'corona effect', which is discussed in Section 7.

The advantages of high-voltage power transmission may also be illustrated by noting that the present power demand in developed countries is around 1 kW per inhabitant on average. One 20 kV line can supply a large village of a thousand inhabitants, one 220 kV line is just enough to supply a large town, while a 400 or 500 kV line can serve a large provincial centre. Cities with their conurbations may require several such lines, or sometimes ones of even higher voltages, for their electricity supply. The range from 300 to 800 kV has become known as the extra-high-voltage (EHV) range, whereas the even higher levels, such as the 1050 kV studied in Italy, the 1100 kV undertaken in Japan and the 1200 kV in operation in the USSR, are called ultra high voltages (UHV).

3. CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE

3.1 Notions de base

Quand on porte sous tension un objet tel un conducteur électrique, il se charge d'électricité et est entouré par un champ électrique. Si les charges s'écoulent le long du conducteur et constituent dès lors un courant, on génère en outre un champ magnétique.

Le concept de champs électrique ou magnétique n'est pas chose aisée. Il est utilisé pour expliquer les effets des sources électriques ou magnétiques dans leur voisinage immédiat. Rappelons comment la poussière est attirée sur un disque longue durée (car il peut aisément se charger d'électricité dès qu'il glisse de sa poche) et comment l'aiguille d'une boussole s'oriente dans la direction nord-sud. Ce sont de simples manifestations respectivement des champs électrique et magnétique (ou champs de force). Ce concept de champ est le même que celui utilisé pour expliquer la gravitation. Le champ gravitationnel est plus familier dans notre vie quotidienne car il est à l'origine de la notion de poids de tous les objets matériels. Une description plus détaillée du concept de champs est reprise dans l'encart 3.1.

A proximité d'un réseau, l'intensité du champ électrique (ou magnétique) dépend en premier lieu de la tension (ou du courant), de la disposition des conducteurs, et de la distance par rapport à ceux-ci. Les valeurs des champs peuvent être aisément calculées, quoique l'aide d'un ordinateur puisse s'avérer nécessaire dans les situations complexes. Deux dispositifs simplifiés qui illustrent la définition des intensités de champ et les unités utilisées sont traités dans l'encart 3.2.

3.2 Champs naturels

On rencontre dans la nature des champs électrique et magnétique. Le champ magnétique terrestre, qui a principalement pour origine les courants circulant dans les couches supérieures du noyau de la Terre, varie de 30 μT (microtesla) à l'équateur à environ 60 μT aux pôles. Ce champ peut être localement modifié par des minerais ferromagnétiques ou par des structures en acier comme dans les immeubles.

A la surface du sol existe également un champ électrique naturel, produit par les charges électriques réparties dans l'ionosphère, et dont l'intensité varie entre 100 et 150 V/m par beau temps. A l'aplomb d'un nuage orageux contenant une quantité importante de charges électriques, l'intensité du champ peut atteindre jusqu'à 20 kV/m sur des surfaces planes, alors que au-dessus de monticules ou autres irrégularités de surface, ou au sommet d'objets élancés tels que les arbres, l'intensité du champ sera nettement plus importante. Par exemple, en montagne, la présence de ce champ produit des décharges électriques et des craquements sur les arêtes acérées et sur l'extrémité des piolets. A travers les siècles, les navigateurs ont observé le même phénomène, connu sous le nom de feu de Saint Elme, au sommet des mâts des navires. La cause du phénomène est l'ionisation locale de l'air, même phénomène qui produit l'effet de couronne à la surface des conducteurs à haute tension (voir chapitre 7).

Les personnes se trouvant dans des champs d'intensités élevées peuvent voir leurs cheveux se dresser sur la tête, résultat des forces générées par le champ électrique. Une situation similaire peut être observée sur les poils de la main, à proximité immédiate d'un récepteur de télévision.

3. ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

3.1 Concepts

When a voltage is applied to an object such as an electrical conductor, the conductor becomes charged and surrounded by an electric field. If charges flow along the conductor and thus form a current, a magnetic field is also created.

The concept of an electric or magnetic field is not an easy one to grasp. It is used to explain the effects in the neighbourhood of electric or magnetic sources. Recall how dust is attracted to a long-playing record (because it easily becomes electrically charged as it is slid out of its sleeve) and how a compass needle aligns north-south. These are simple manifestations respectively of electric and magnetic fields (or fields of force). This concept of field is just the same as that used to explain gravity. The gravitational field is more familiar in everyday life since it gives rise to the weight of all material objects. A further description of the concept of fields is given in Box 3.1.

Near a power line, the strength of an electric (or magnetic) field at any point depends mainly on the voltage (or the current flowing), on the arrangement of the conductors, and on the distance from them. Field strengths can readily be calculated, though the assistance of a computer is needed for complex arrangements. Two simple situations which illustrate the definition of the field strengths and the units used are shown in Box 3.2.

3.2 Natural Fields

Both electric and magnetic fields occur naturally. The Earth's magnetic field, which is due mainly to currents circulating in the outer layer of the Earth's core, varies between about 30 μT (microtesla) at the equator and about 60 μT at the poles. This field may be distorted locally by ferrous minerals or by steelwork such as in buildings.

At the Earth's surface there is also a natural electric field, created by electric charges high up in the ionosphere, and varying between 100 and 150 V/m in fine weather. Below a storm cloud containing large quantities of electric charge, the field may reach intensities up to 20 kV/m over flat surfaces, while above hillocks or other irregularities or near the tops of objects such as trees, the field strength can be considerably higher. In the mountains, for instance, the presence of this field produces electrical discharges and crackling noises on sharp ridges and on the ends of ice picks. Sailors throughout the ages have observed this same phenomenon, known as Saint Elmo's Fire, at the tops of ships' masts. The cause is local ionization of the air, just as occurs with the corona effect at the surface of high-voltage conductors (see Section 7).

People standing in such strong fields may find that their hair stands on end as a result of the forces created by the electric field. A similar, but man-made, situation may be experienced when the hairs on the back of the hand are close to the screen of a television set.

3.3 Fréquence

Comme déjà rappelé, les réseaux d'énergie utilisent des tensions et des courants alternatifs et dès lors les champs produits sont également alternatifs, contrairement aux champs unidirectionnels associés au disque chargé mentionné précédemment ou aux champs naturels terrestres. La fréquence de ces alternances est habituellement de 50 Hz (hertz ou cycles par seconde), alors qu'en Amérique du Nord, dans une partie du Japon et dans quelques autres pays le 60 Hz a été préféré. Des champs électriques et magnétiques de fréquences beaucoup plus élevées peuvent, cependant, être produits comme les transmissions radio-TV et microondes, et il est intéressant de s'attarder un instant sur celles-ci. Les fréquences élevées interagissent avec les objets et les êtres humains de façon très différente que les fréquences industrielles, et il est essentiel de souligner cette distinction.

La figure 3.1 montre ce que l'on désigne par spectre électromagnétique. Ce spectre s'étend depuis les très basses fréquences (TBF), qui incluent les fréquences industrielles, jusqu'aux fréquences radioélectriques et micro-ondes, de l'infra-rouge, la lumière visible et ultra-violette jusqu'aux rayons X et γ .

Pour les rayons X et γ , les photons, quanta corpusculaires, qui transportent l'énergie sont en mesure d'ioniser, autrement dit, de rompre les molécules individuelles ou les atomes. Ces ruptures peuvent parfois endommager les matières vivantes. Pour la lumière visible et aux fréquences inférieures, ce processus n'est pas présent et de ce fait l'expression radiation «non ionisante» est la plus souvent utilisée pour ces fréquences. Aux fréquences industrielles, même le terme «radiation» n'est pas approprié vu qu'il n'y a pas de puissance rayonnée.

Tous les champs alternatifs électriques et magnétiques induisent des courants dans les objets conducteurs, y compris les organismes vivants. Cet effet est traité en détails aux paragraphes 4.3 et 5.2. Aux fréquences élevées ces courants et d'autres effets sont à l'origine d'un échauffement considérable - cuisson par micro-ondes ou traitement diathermique - mais aux fréquences industrielles et pour les intensités de champs qui nous intéressent ici, cet échauffement est totalement négligeable. Les effets tels que ceux qui apparaissent aux basses fréquences sont parfois répertoriés sous le nom de «athermique» - ce qui signifie non thermique. (voir compléments sur les champs alternatifs dans l'encart 3.3).

On rencontre des champs pulsés (plutôt que alternatifs) dans certaines applications industrielles et en médecine - voir encart 3.4.

Dorénavant, dans les chapitres suivants (4 et 5) il sera exclusivement question de la fréquence industrielle

3.3 Frequency

As already noted, power systems generally use alternating voltages and currents and hence the fields they produce are also alternating, in contrast to unidirectional fields such as that associated with the charged record mentioned earlier or the natural fields of the Earth. The frequency of these alternations is usually 50 Hz (hertz or cycles per second), while in North America, part of Japan and in some other countries, 60 Hz is preferred. Electric and magnetic fields at much higher frequencies can, however, be generated - radio and television transmissions and microwaves for example - and it is worth considering them for a moment. These higher frequencies interact with objects and people in a rather different way to power frequencies and it is important to make the distinction.

Figure 3.1 shows what is known as the electromagnetic spectrum. It stretches from extremely low frequencies (ELF), which include power frequencies, through radio and microwaves, infra-red, visible and ultra-violet light to X-rays and gamma-rays.

For X-rays and gamma-rays, the small discrete packets called photons which carry the energy are capable of ionizing, that is, disrupting, individual molecules or atoms. Such disruption can sometimes damage living material. For visible light and all lower frequencies, this process cannot happen and hence the term 'non-ionizing' radiation is often applied to these frequencies. At power frequencies, even the term 'radiation' is not appropriate since power is not radiated away.

All alternating electric and magnetic fields induce currents in electrically conductive objects, including living organisms.

This effect is considered in more detail in Sections 4.3 and 5.2. At high frequencies these currents and other effects can cause significant heating - as in microwave cooking or diathermy treatment - but at power frequencies the heating is quite negligible. Such effects as do occur at low frequencies are sometimes referred to as 'athermal' - that is, not thermal. (Further notes on alternating fields are given in Box 3.3.)

Pulsed (rather than smoothly alternating) fields, are met in some branches of technology and medicine - see Box 3.4.

Sections 4 and 5 that follow concern power frequencies only.

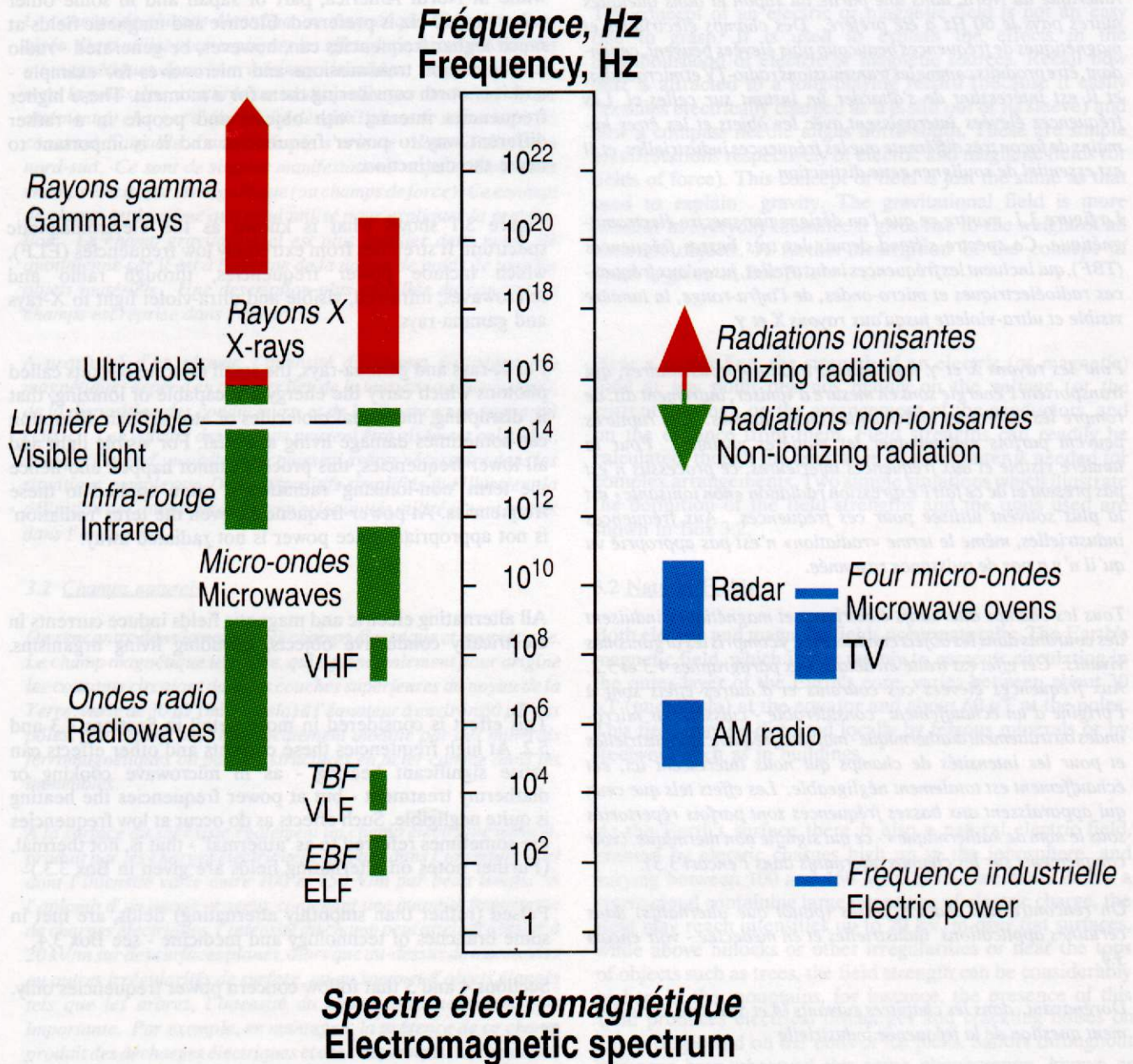


Figure 3.1: Le spectre électromagnétique couvre une gamme énorme de fréquences. Quelques applications sont indiquées ainsi que la ligne de partage entre les radiations ionisantes et non-ionisantes (voir paragraphe 3.3). L'utilisation de «puissance de dix» est illustrée dans l'encart 2.2; 10⁶, par exemple, égale 1000 000 Hz ou 1 MHz.

Figure 3.1: The electromagnetic spectrum covers an enormously wide range of frequencies. The usage of some regions is indicated as well as the division between ionizing and non-ionizing radiation (see Section 3.3). The use of 'powers of ten' is illustrated in Box 2.2; 10⁶, for example, is 1000 000 Hz or 1 MHz.

Encart 3.1

Le concept de champs

La théorie de l'électromagnétisme, qui atteint sa perfection dès le XIXe siècle grâce à J.C. Maxwell et qui est entièrement décrite dans ses équations, recèle le fait expérimental qu'une charge électrique «agit à distance» sous la forme de forces appliquées aux autres charges voisines. Les équations de Maxwell permettent de définir avec précision ces forces et de calculer leurs grandeur et direction.

On distinguera deux types de force : celle qui provient des charges électriques statiques et connue sous le nom de «force électrostatique» et celle qui est générée lorsque les charges sont en mouvement (soit un courant électrique dans un conducteur) et connue sous le nom de «force magnétique». (Pour un aimant permanent, les charges en mouvement sont localisées à l'intérieur des atomes individuels de l'aimant). Pour décrire l'existence et la distribution spatiale de ces forces, les physiciens et les mathématiciens ont créé le concept de «champ». On parlera alors de champs de force, ou plus simplement de champs électrique et magnétique.

Il est parfois utile de visualiser le champ électrique par des lignes de force qui sont exactement la représentation, en chacun des points de l'espace, de la direction de la force qui agira sur une charge placée à l'endroit considéré. La figure 3.2 représente les lignes de forces produites par deux charges électriques différentes (une négative et une positive).

De manière similaire, le champ magnétique sera visualisé par les lignes de force qui représentent la direction de la force qui orientera un petit aimant tel l'aiguille d'une boussole. La figure 3.3 représente les lignes de force d'un aimant permanent.

Box 3.1

The Concept of Fields

Electromagnetic theory, which was developed largely by James Clerk Maxwell in the nineteenth century and is completely described by his equations, stems from the experimental observation that an electric charge gives rise to 'action at a distance' in the form of forces acting on other charges in the vicinity. Maxwell's equations allow one to define these forces precisely and to calculate their strength and direction.

Two types of force may be distinguished: that which arises from stationary electric charges and known as the 'electrostatic force', and that which appears when charges are moving (as in an electric current in a conductor) and known as the 'magnetic force'. (For a permanent magnet, the moving charges are within the individual atoms of the magnet.) To describe the existence and spatial distribution of these forces, physicists and mathematicians have created the concept of 'field'. One then speaks of fields of force, or simply of electric and magnetic fields.

It is sometimes useful to visualize the electric field by lines of force which are just the representation, at each point in space, of the direction of the force that would act on a charge placed at the point considered. Figure 3.2 shows the lines of force which map the electric field generated by two unlike electric charges (one negative and one positive).

The magnetic field may similarly be visualized by lines of force which represent the direction of the force that would align a small magnet such as a compass needle. Figure 3.3 shows the lines of force from a permanent magnet.

Encart 3.2

Champs : définition et unités

La figure 3.4 représente deux plaques métalliques parallèles entre lesquelles une tension a été appliquée. Des charges électriques fournies par le générateur apparaîtront sur les surfaces opposées de ces plaques, et seront à l'origine du champ électrique régnant dans le milieu. Dans ce cas particulier, le champ sera uniforme, excepté près du bord des plaques, et son intensité sera donnée par la tension divisée par la distance entre les plaques. De ce fait, les champs électriques sont habituellement mesurés en volts par mètre (V/m) ou par un multiple, par exemple, kilovolts par mètre (kV/m). Pour les fils, contrairement aux plaques, les facteurs géométriques rendent la relation plus complexe. L'intensité du champ est augmentée près des fils mais est nettement plus faible au milieu de l'intervalle entre les conducteurs.

Quand un courant électrique s'écoule le long d'un fil rectiligne, les lignes du champ magnétique sont des cercles centrés sur le fil (voir figure 3.5). L'intensité du champ est proportionnelle à l'intensité du courant et inversement proportionnelle à la distance par rapport à l'axe du fil. Si on divise l'intensité en ampères par 2π fois la distance en mètres, l'intensité du champ est donnée en ampères par mètre (A/m). Cependant, les champs magnétiques sont souvent définis en densité de flux magnétique (champ d'induction magnétique) pour laquelle l'unité est le tesla (T), dans le Système International (SI). Vu que le tesla est une grande unité, des sous-multiples sont fréquemment utilisés (μT - voir encart 2.2). Une unité plus ancienne, encore que fréquemment employée, est le gauss (G). La relation entre ces deux unités dans des milieux non magnétiques s'exprime par

$$1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG} \sim 0,796 \text{ A/m}$$

Dans le cas de deux fils parallèles transportant des courants identiques mais en directions opposées, le champ, calculé à des distances importantes comparées à l'écartement entre les fils, est encore proportionnel à l'intensité du courant mais est aussi proportionnel à cet écartement entre conducteurs et varie inversement au carré de la distance. Dès lors, si la distance aux fils est multipliée par trois, l'intensité du champ est divisée par neuf.

La mesure des champs à la fréquence industrielle, particulièrement les champs électriques, n'est pas toujours évidente. Un guide utile pour la procédure à adopter se trouve dans les documents de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (voir chapitre 11). Pour les champs alternatifs, les valeurs efficaces (encart 2.1) sont normalement utilisées.

Lorsque les champs provenant de deux ou plusieurs sources doivent être additionnés, on doit tenir compte de leurs directions et phases relatives (somme vectorielle).

Box 3.2

Definition of Fields and Their Units

Figure 3.4 shows two parallel metal plates with a voltage applied between them. Electric charges supplied by the power source will appear on the opposing surfaces of these plates, creating an electric field in the intervening space. In this particular case, the field will be uniform, except near the edges of the plates, and its strength will be given by the voltage divided by the distance between the plates. Thus, electric fields are usually measured in volts per metre (V/m) or a multiple thereof, for example, kilovolts per metre (kV/m). For wires, rather than plates, geometrical factors make the relationship more complex. The field strength is enhanced near the wires but is lower in the middle of the intervening space.

When an electric current flows along a straight wire, the magnetic field lines are circles centred on the wire (see Figure 3.5). The field strength is proportional to the magnitude of the current and inversely proportional to the distance from the wire. If the current in amperes, is divided by 2π times the distance away in metres, the field strength is given in amperes per metre (A/m). However, magnetic fields are often expressed in terms of a quantity called the magnetic flux density for which the modern (Système International) unit is the tesla (T). Since this is a large unit, submultiples of it such as the microtesla (μT - see Box 2.2) are more convenient. An older unit, still widely used, is the gauss (G). The relation between these units (in non-magnetic materials) is

$$1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG} \sim 0.796 \text{ A/m.}$$

For two parallel wires carrying equal currents but in opposite directions, the field, at distances large compared to the separation between the wires, is again proportional to the magnitude of the current but it is also proportional to this separation and varies inversely as the square of the distance from the wires. So, if the distance is increased threefold for example, the field is reduced ninefold.

The measurement of power-frequency fields, especially electric fields, is not always straightforward. Useful guidance on procedures may be found in International Electrotechnical Commission and Institute of Electrical and Electronics Engineers' documents (see Section 11.) For alternating fields, rms values (Box 2.1) are normally used.

When the fields from two or more sources have to be added together, proper account must be taken of their directions and relative phases.

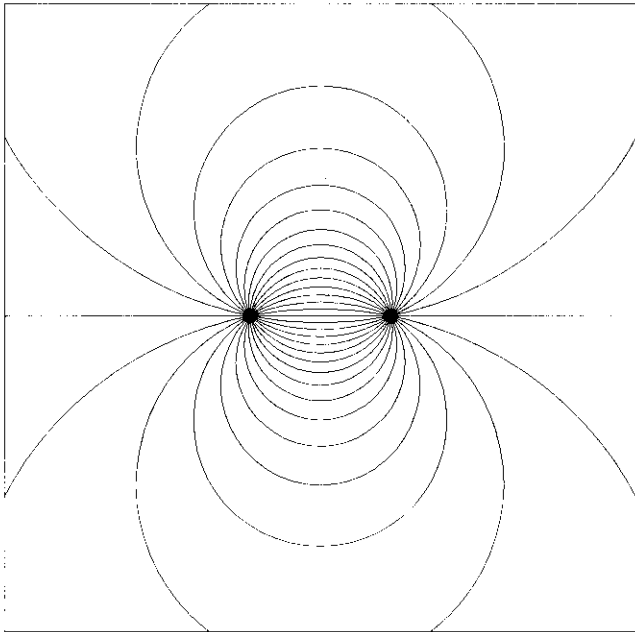


Figure 3.2: Ces courbes représentent les lignes de force d'un champ électrique dans un plan perpendiculaire à deux conducteurs parallèles portant des charges opposées.

Figure 3.2: These curves represent the lines of force of the electric field in a plane perpendicular to two oppositely-charged parallel wires.

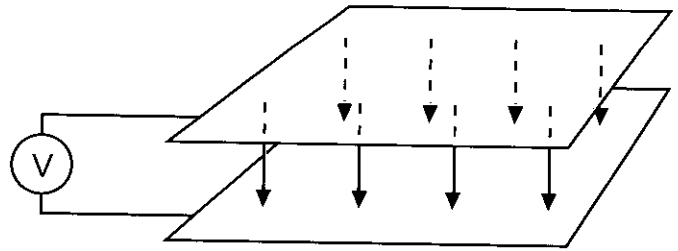


Figure 3.4: Le fait de raccorder une source de tension (V) à deux plaques métalliques parallèles crée un champ électrique entre celles-ci.

Figure 3.4: Connecting a source of voltage (V) to two parallel metal plates creates an electric field between them.

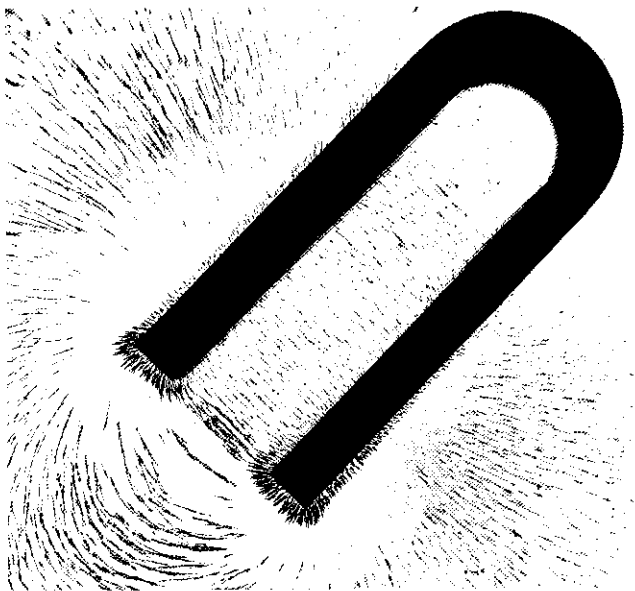


Figure 3.3: De la limaille d'acier visualise les lignes de force du champ magnétique au voisinage d'un aimant permanent en fer à cheval.

(Photographie: Palais de la Découverte-Paris)

Figure 3.3: Iron filings reveal the lines of force of the magnetic field around a horseshoe magnet.

(Photograph : Palais de la Découverte - Paris)

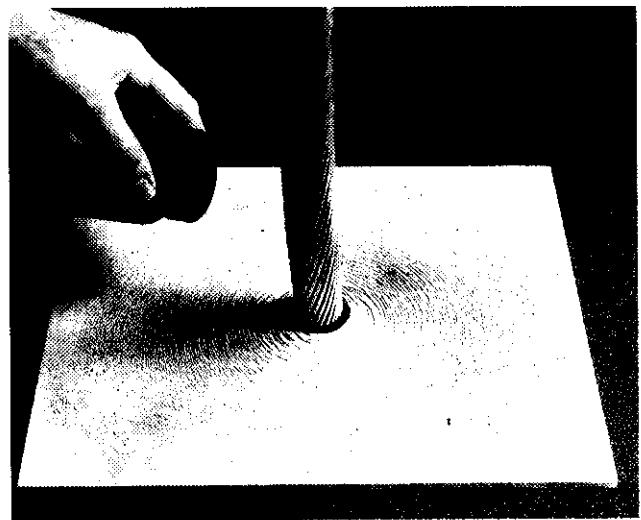


Figure 3.5: De la limaille d'acier visualise la forme circulaire du champ magnétique à proximité d'un conducteur parcouru par un courant.

(Photographie: NGC-RU)

Figure 3.5: Iron filings reveal the circular pattern of magnetic field surrounding a conductor carrying a current.

(Photograph: NGC-UK)

Encart 3.3

Champs alternatifs

Alors que les champs naturels électrique et magnétique sont constants ou varient très lentement, la plupart des champs produits par l'homme sont temporellement variables ou alternatifs. Les champs alternatifs sont classés selon leur fréquence ou longueur d'onde aussi bien que par leurs applications spécifiques. La longueur d'onde en espace libre (en mètres), s'obtient en divisant la vitesse de propagation des ondes électro-magnétiques (3×10^8 m/s) par la fréquence en question (en hertz). La figure 3.1 reprend le spectre électromagnétique - à partir des fréquences très basses (TBF) et extrêmement basses, qui comprennent les fréquences industrielles (50 ou 60 Hz) ainsi que la fréquence 16 2/3 Hz utilisée par quelques réseaux ferroviaires jusqu'aux radiations ionisantes - et indique également les principales applications pour ces gammes de fréquences.

Aux fréquences élevées, et en des endroits situés à plusieurs longueurs d'onde de la source existe une relation constante entre l'intensité du champ magnétique et l'intensité du champ électrique. Cependant aux basses fréquences tous les endroits intéressants (à proximité de la ligne) sont à des distances bien inférieures à la longueur d'onde; dès lors les champs électriques et magnétiques se comportent indépendamment et pourront être calculés séparément. Ceci est certainement le cas pour les fréquences industrielles où les longueurs d'onde valent respectivement 6000 et 5000 km pour 50 et 60 Hz.

Box 3.3

Alternating Fields

Whereas natural electric and magnetic fields are constant or vary very slowly, most man-made fields are time-varying or alternating. Alternating fields are classified according to their frequency or wavelength as well as by their applications. The free-space wavelength (in metres) is obtained by dividing the speed of electromagnetic waves (3×10^8 m/s) by the particular frequency (in hertz). Figure 3.1 shows the electromagnetic spectrum - from sub-ELF and ELF (extremely low frequency) fields, which include those at power frequencies (50 or 60 Hz) and at 16 2/3 Hz as used by some electric railways, to ionizing radiations - and also indicates the main applications of the various frequency ranges.

At the higher frequencies there is generally a close relationship between the electric and magnetic field strengths at points more than a few wavelengths from the source. However, at the lower frequencies any point of interest is normally well within one wavelength from the source of the field, so the electric and magnetic fields behave independently and must be calculated separately. This is certainly the case for power frequencies which have very long wavelengths - 6000 km for 50 Hz and 5000 km for 60 Hz.

Encart 3.4

Champs pulsés

Lorsque le champ n'oscille pas de manière sinusoïdale comme à la figure 2.3 mais présente des impulsions de courtes durées dans sa forme d'onde, alors on doit décrire cette dernière en termes de plusieurs fréquences, et ne plus se contenter d'une seule. Par exemple, une séquence d'impulsions en dents de scie (telle que produite par les récepteurs TV et écrans d'ordinateurs) a une composante fondamentale de fréquence égale à la fréquence de répétition des impulsions mais présente en outre des composantes à fréquences beaucoup plus élevées dont la borne supérieure est inversement proportionnelle au temps de montée ou de descente de l'impulsion la plus brève. Une situation comparable se rencontre quand on souhaite décrire le timbre d'un instrument de musique en termes des différentes fréquences harmoniques produites. Vu que les courants induits dans les corps conducteurs par des champs alternatifs sont proportionnels à la fréquence de ceux-ci aussi bien qu'à leur amplitude, les composantes à très hautes fréquences d'une onde pulsée peuvent conduire à des courants induits importants.

Box 3.4

Pulsed Fields

If the field does not oscillate smoothly as in Figure 2.3 but has sharp steps in its waveform, then it has to be described in terms of several frequencies, rather than just one. For example, a sequence of sawtooth pulses (such as produced by television sets and visual display terminals) has a fundamental component of frequency equal to the frequency of the pulses but it also has higher components reaching up to a value of about the reciprocal of the rise or fall time of the sharpest edges. A comparable situation arises when describing the timbre of a musical instrument in terms of the various harmonic frequencies or overtones produced. Since the currents induced in conductive bodies by alternating fields are proportional to the frequencies of those fields as well as to their magnitudes, the higher frequency components of a pulsed wave may lead to notable induced currents.

4. CHAMPS ÉLECTRIQUES À FRÉQUENCE INDUSTRIELLE

4.1 Sources

Les champs électriques ont pour origine les conducteurs sous tension. Quand on considère les effets des lignes aériennes sur l'environnement, les champs mis en cause se situent au niveau du sol ou à la surface des conducteurs sous tension. Les champs électriques peuvent induire des courants dans les objets conducteurs et les porter sous tension. Au niveau du sol, des champs d'intensité élevée sont, à l'occasion, à l'origine de chocs désagréables et d'autres effets (voir paragraphes 4.3 et 4.4). Les champs à la surface des conducteurs, qui sont des centaines de fois plus intenses que les champs au niveau du sol, sont à la base des perturbations radio et TV, de la gêne acoustique et de la production d'ions (voir chapitres 7, 8, 9 et 10).

L'intensité du champ électrique au niveau du sol, à proximité d'une ligne aérienne, dépend principalement de la tension de la ligne et de la distance par rapport à celle-ci. La distance phase terre et la disposition des conducteurs sont également des facteurs importants qui ont un effet sur l'intensité du champ électrique. La dimension du conducteur de phase et la constitution de celle-ci (conducteurs simples ou faisceaux - voir figure 2.2) influencent également le champ électrique au niveau du sol. Finalement, dans le cas des réseaux à deux (fig. 2.2) ou plusieurs ternes, la disposition relative des trois phases de chacun des ternes est importante, plus particulièrement en ce qui concerne l'intensité maximale du champ électrique. Le sol est un bon conducteur de l'électricité, dès lors le champ électrique est perpendiculaire à celui-ci et sera habituellement vertical.

La figure 4.1 indique pour quelques lignes types de transport les variations latérales ou profils de l'intensité du champ électrique. La fig. 4.2 illustre les courbes isochamps sous une ligne à 400 kV. On remarquera que, vu la variation de la hauteur des conducteurs par rapport au sol entre les supports (pylônes), les champs les plus intenses se retrouvent uniquement dans une petite zone au milieu de la portée, ceux-ci diminuent rapidement en se déplaçant vers les pylônes et encore plus rapidement quand on s'écarte de la ligne.

Les conducteurs aériens qui alimentent certains trains électriques sont portés à 25 kV, ce qui donne naissance à des champs électriques, dans le voisinage, de l'ordre de 1 kV/m. Vu l'écran constitué par la structure métallique des voitures, le champ à l'intérieur du train est de beaucoup inférieur, encore que les fenêtres permettent une certaine pénétration du champ électrique.

Dans le voisinage immédiat de l'équipement électrique domestique, tels que lampes, interrupteurs, mixers et fers à repasser, les intensités du champ électrique atteignent jusqu'à 100 V/m. La figure 4.3 compare les différentes intensités rencontrées.

4.2 Effet d'écran

Les diagrammes des figures 4.1 et 4.2 se réfèrent à une situation hypothétique d'un sol plat sans obstacle. Sous une ligne, en pratique le champ électrique au niveau du sol est très souvent réduit à proximité des objets conducteurs tels que constructions, arbres, clôtures, véhicules et pylônes eux-mêmes vu leurs effets perturbateur et d'écran. Par exemple, la figure 4.4 montre comment un arbre perturbe l'intensité du champ électrique sous une ligne. Le champ est augmenté au sommet de l'arbre mais réduit à sa base. Cet effet résulte des charges électriques attirées au

4. POWER-FREQUENCY ELECTRIC FIELDS

4.1 Sources

Electric fields come from 'live' conductors. The fields of interest in considering the effects of overhead lines on the environment are those near the ground and those at the surface of the live conductors. The ground-level fields may induce currents in and voltages on conductive objects. Very high fields may occasionally lead to unpleasant shocks and other effects (see Sections 4.3 and 4.4). The conductor-surface fields, which are hundreds of times larger than the ground-level fields, may lead to radio and television interference, audible noise, and ion production (see Sections 7, 8, 9 and 10).

Ground-level electric fields near an overhead line are mainly determined by the voltage of the line and how far away one is from the line. The conductor-to-ground clearance and the conductor arrangement are also important factors which have an effect on the electric field. Likewise, the conductor size and type (single or bundled - see Figure 2.2) may influence the ground-level electric fields. Finally, in the case of double-circuit (Figure 2.2) or multiple-circuit lines, the relative arrangement of the three phases of each circuit is important, especially with regard to the maximum field values found. Since the ground is a good electrical conductor, the electric field at the ground is perpendicular to it and thus usually vertical.

Figure 4.1 shows lateral variations or 'profiles' of ground-level electric field for some typical transmission lines. Figure 4.2 shows the field contours under a 400 kV line. It can be seen that, because of the variation in height of the conductors between the towers ('pylons'), the higher fields exist only in a small area near the middle of the span, decreasing rapidly towards the towers and even more rapidly away from the line.

The overhead wires providing power for some electric trains operate at 25 kV, which gives rise to fields of about 1 kV/m nearby. Because of screening by the metalwork of the coaches, the field inside a train is much less, though the windows do allow some penetration.

In the immediate vicinity of domestic electrical equipment, such as lights, switches, food mixers and irons, electric-field strengths up to about 100 V/m may be found. A comparison of typical fields encountered is given in Figure 4.3.

4.2 Screening

The diagrams in Figures 4.1 and 4.2 refer to a hypothetical situation of clear flat ground beneath a line; in practice, the ground-level electric field is often reduced in the vicinity of conductive objects such as buildings, trees, fences, vehicles and the pylons themselves, because of their perturbing and screening effects. For example, Figure 4.4 shows how a tree perturbs the electric field beneath a power line. The field is increased at the top of the tree but reduced around its sides.

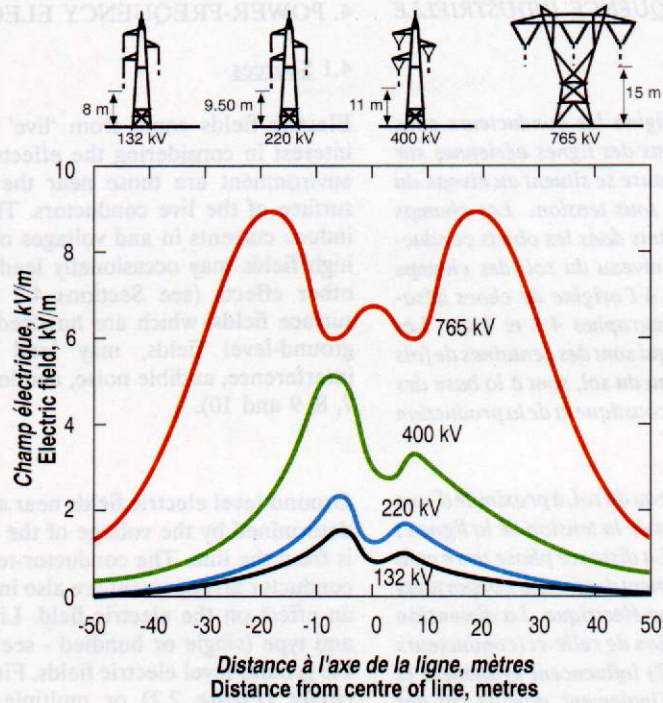


Figure 4.1: Ces profils représentent l'intensité du champ électrique à proximité du sol pour différentes lignes typiques à un terna.

Figure 4.1: These profiles show the electric field near the ground for some typical single-circuit lines.

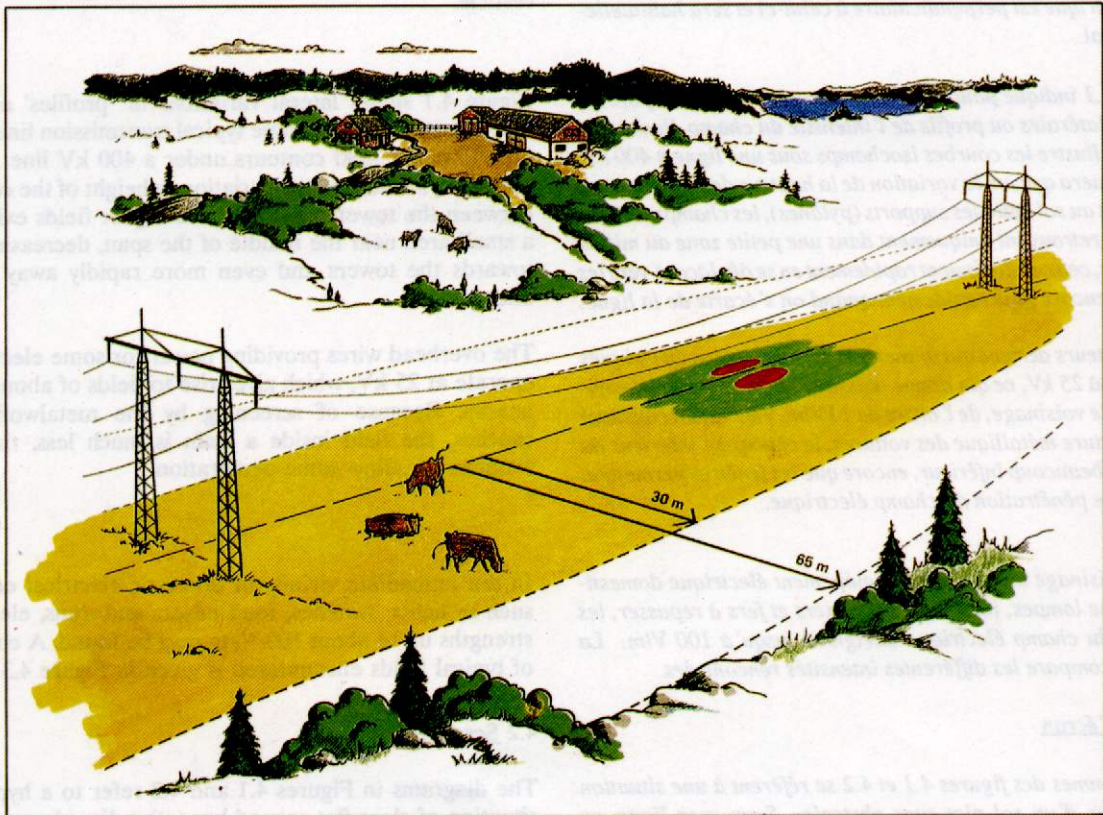


Figure 4.2: L'intensité du champ électrique sous une ligne aérienne est la plus élevée au milieu des portées (comme indiqué par les zones rouges et vertes) où la flèche est la plus grande (point bas). L'intensité diminue rapidement dès qu'on s'éloigne de la ligne. Pour celle-ci, le champ à 30 m est de l'ordre de 1 kV/m tandis qu'à 65 m, il est de l'ordre de 0,1 kV/m. (Photographie: Vattenfall-Suède)

Figure 4.2: The electric field under a power line is strongest in the middles of the spans (as indicated by the red and green areas) where the conductors hang lowest. It decreases rapidly as one moves away from the line. For this line the field at 30 m is about 1 kV/m while at 65 m it is about 0.1 kV/m. (Photograph: Vattenfall-Sweden)

sommet de l'arbre, ou de tout autre objet conducteur, par le champ électrique. Les personnes perturbent le champ électrique de la même manière, le champ extérieur au sommet de la tête sera augmenté jusqu'à quinze fois alors que au niveau des chevilles il sera réduit par trois. Quand on mesure ou quantifie les champs électriques, il est habituel de se référer à la valeur non perturbée, autrement dit, la valeur en l'absence de personne.

Les constructions font office d'écrans de bonne qualité. Des mesures réalisées à l'intérieur des maisons ont indiqué des champs ne dépassant pas le dixième du champ extérieur. De ce fait, à l'intérieur des constructions voisines des lignes aériennes, le champ électrique produit par la ligne est rarement supérieur à celui produit par l'équipement électrique domestique habituel. Les véhicules agissent également comme écran pour l'intérieur de l'habitacle.

La plupart des conducteurs souterrains comportent une gaine électrique extérieure qui élimine virtuellement tout champ électrique extérieur. Même les câbles sans gaine électrique ne produisent pas de champ électrique significatif au niveau du sol vu que le sol lui-même est un bon écran pour les champs électriques.

4.3 Courants induits

Comme déjà noté, un champ électrique produit un déplacement de charges électriques dans un objet conducteur (y compris les personnes) et comme le champ est alternatif, il en résultera un courant alternatif «induit» à l'intérieur de l'objet. Il est important de noter que ce courant dépend seulement de la forme et de la dimension de l'objet et de l'intensité du champ non perturbé appliqué, et qu'il est dans une large mesure indépendant de la bonne ou mauvaise conductibilité électrique de l'objet.

4.3.1 Personne dans un champ électrique. Le champ à l'intérieur d'une personne sera pratiquement nul, car il résulte de la petite différence de potentiel produite par l'intensité du courant induit. Dès lors, tandis qu'en l'absence de la personne le champ électrique non perturbé se mesure dans la gamme des kilovolts par mètre, le champ électrique intérieur est défini en millivolts, voire fractions de millivolts, par mètre.

Pour une personne se tenant debout sur un sol plan (portant des chaussures avec semelles en cuir, par exemple, donc mauvaise isolation électrique par rapport au sol) les calculs et mesures indiquent que le courant induit passant via les pieds est de l'ordre de 15 μA par kV/m de champ non perturbé à 50 Hz et 18 μA par kV/m à 60 Hz. La figure 4.5 illustre une répartition typique de l'intensité de courant. Le courant au niveau du cou vaut le tiers de celui mesuré au niveau des pieds. Cependant, même sous une ligne importante, le courant total dans le corps dépassera rarement 100 μA . La densité de courant correspondant à cette valeur au-niveau du torse est de l'ordre de 2 mA/m^2 . Des courants produits naturellement par exemple par action musculaire, conduisent à des densités de l'ordre de 10 mA/m^2 .

De tels courants ne sont pas détectés par les personnes, car ils sont d'un niveau dix fois ou plus inférieur au seuil de perception (environ 1 mA entre main et main) quoique suffisant pour donner un faible halo à un tube fluorescent lorsque celui-ci se trouve sous une ligne à haute tension (figure 4.6). Des intensités comparables se rencontrent dans la vie de chaque jour, tels les courants de fuite du petit matériel portatif. Les normes nationales acceptent généralement pour ce dernier des intensités de quelques centaines de microampères comme courant de fuite.

This effect arises because of the charges attracted from within it to the top of the tree, or other conductive object, by the field. People perturb electric fields in the same way, the external field at the top of the head being increased about fifteenfold while that at the ankles being reduced perhaps threefold. When measuring or quoting electric fields, it is customary to give the unperturbed value, that is, the value in the absence of the person.

Buildings act as good screens for their interiors. Measurements made inside houses have shown at least a tenfold reduction of the external field. Thus, inside buildings close to power lines, the electric field from the line will rarely exceed that produced by common domestic electrical equipment. Vehicles also act as screens for their interiors.

Most underground cables contain some form of outer electrical sheath and this virtually eliminates any external electric field. Even those without such a sheath do not give rise to a field above ground because the ground itself is a good screen for electric fields.

4.3 Induced Currents

As noted in the previous section, an electric field causes a displacement of electric charges in a conductive object (including a person) and, because the field is alternating, these move to and fro. The result is an 'induced' alternating current inside the object. It is important to note that this current depends only on the shape and size of the object and the strength of the unperturbed field applied, and is to a very large degree independent of whether the object is a good or a poor conductor of electricity.

4.3.1 People in an electric field. The field inside a person will be virtually zero, since it arises only from the small voltage difference created by the flow of induced current. Therefore, while in the absence of the person the unperturbed field could be in the kilovolts-per-metre range, their internal field is measured in terms of millivolts, or even fractions of millivolts, per metre.

For a person standing on flat ground (and poorly isolated electrically from it - for example, by wearing leather-soled shoes), calculations and measurements show that the induced current passing through their feet is around 15 μA per kV/m of unperturbed field at 50 Hz and 18 μA per kV/m at 60 Hz. A typical pattern of current flow is shown in Figure 4.5. The current through the neck is about one-third of that through the feet. Therefore, even under a large power line, the total body current will only occasionally exceed 100 μA . The corresponding average current density in the torso is about 2 mA/m^2 . Naturally occurring current densities in the body, due for example to muscle action, are typically up to about 10 mA/m^2 .

Such currents cannot be detected by people, since they are ten or more times less than the threshold of perception (around one milliamperere from hand to hand) though they can be sufficient to make a fluorescent tube glow faintly when held up beneath a large power line (Figure 4.6). Comparable power-frequency currents through the body may also occur in everyday life - as leakage from hand-held electrical appliances, for example. National standards generally permit such currents to be up to a few hundred microamperes.

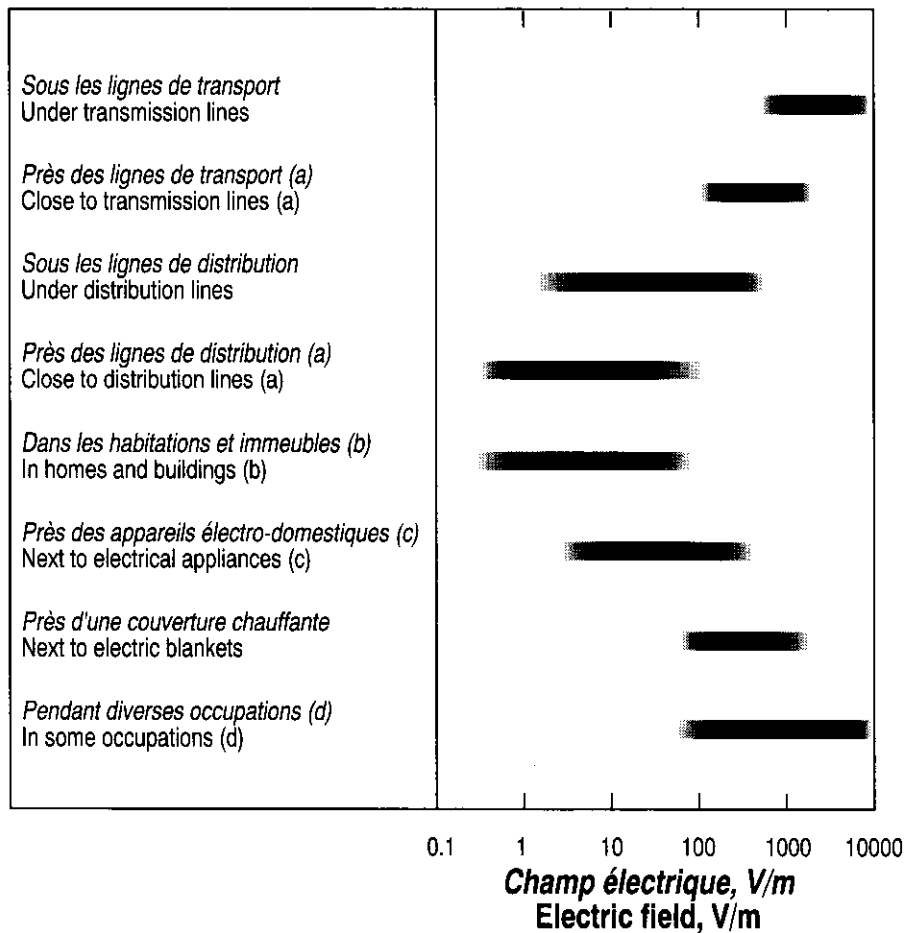


Figure 4.3: Les champs électriques à fréquence industrielle relèvent d'une gamme de variations importante. Pour chaque situation répertoriée, la gamme des valeurs typiques pour les champs électriques rencontrés est indiquée par les zones pleines des barres, mais d'autres valeurs peuvent être obtenues dans les zones ombrées et même au-delà. Pour couvrir une gamme importante de champs, une échelle logarithmique est utilisée dans laquelle chaque division correspond à dix fois la précédente. Une telle échelle est également utilisée dans les illustrations ultérieures.

Remarques: (a) distance habituelle: 10 à 20 m; (b) à un mètre au moins des appareils électroménagers; (c) aux distances habituelles d'utilisation; (d) travaux nécessitant du matériel haute tension ou courant élevé.

Figure 4.3: The power-frequency electric fields encountered span a wide range. For each situation listed, the range of typical field values found is indicated by the solid parts of the bars, though values within, and even beyond, the shaded regions may occur. To cover the wide range of field, a "logarithmic" scale is used in which each step is ten times the previous one. Such a scale is also used in some of the later figures.

Note: (a) typically 10-20 m distant - at the edge of the right-of-way for example; (b) at least one metre away from electrical appliances; (c) at typical usage distances; (d) occupations using high-voltage or high-current equipment.

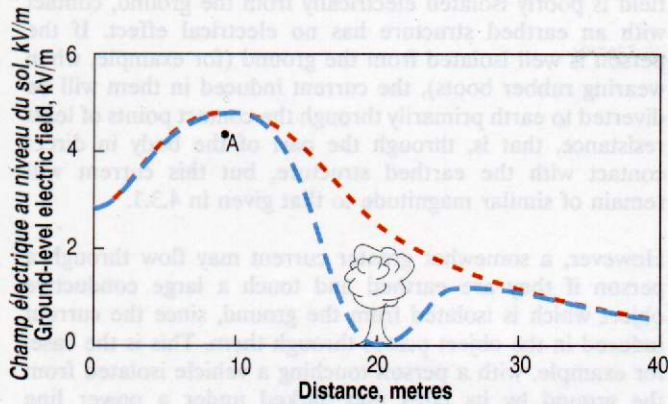


Figure 4.4: Les objets conducteurs perturbent les champs électriques et, dans cet exemple, on représente l'effet d'un arbre de 5 m de hauteur situé à 20 m du centre de la ligne. La courbe supérieure donne le profil du champ au niveau du sol en l'absence de l'arbre tandis que la courbe inférieure indique la réduction en sa présence. (Le conducteur le plus proche est en A).

Figure 4.4: Conductive objects perturb electric fields and in this example the effect of a 5 m tree growing 20 m from the centre of a line is shown. The upper curve is the ground-level field profile in the absence of the tree while the lower curve shows the reduction in the presence of the tree. (The nearest conductor is at A.)

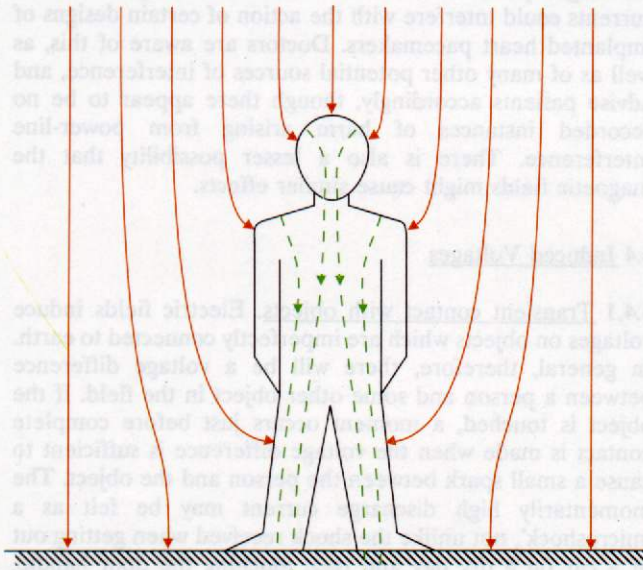


Figure 4.5: De petits courants imperceptibles (représentés par des traits en pointillés) sont induits dans une personne en présence d'un champ électrique alternatif (traits pleins). La personne perturbe également le champ électrique uniforme tel qu'indiqué par la courbure des lignes de champ.

Figure 4.5: Small imperceptible currents (signified by the dashed lines) are induced in a person when they are in an alternating electric field (solid lines). The person also perturbs the uniformity of the electric field as indicated by the bending of the field lines.



Figure 4.6: Le petit courant induit dans une personne qui tient un tube fluorescent dans un champ électrique de forte intensité ne peut normalement être perçu quoiqu'il soit suffisant pour donner au tube fluorescent une lueur de faible intensité. (Photographie: BPA - USA)

Figure 4.6: The small current induced in a person holding a fluorescent tube in a strong electric field cannot normally be felt, though it may be sufficient to make the tube glow faintly.

(Photograph: BPA-USA)

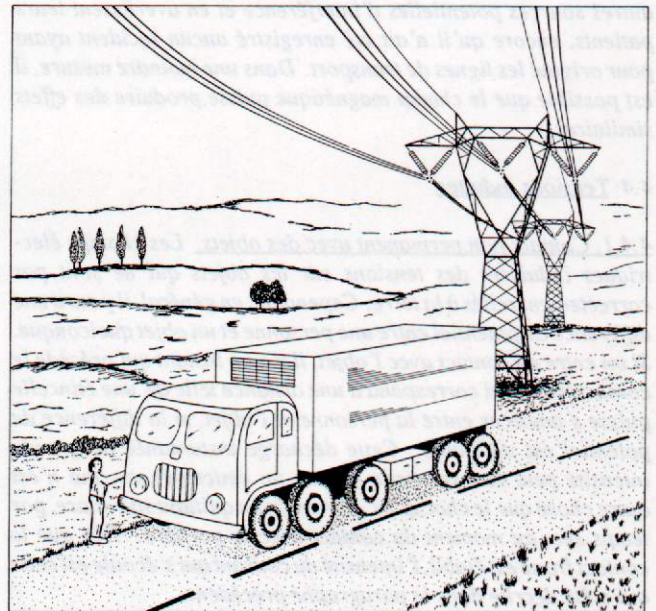


Figure 4.7: Lorsqu'une personne touche un autre objet dans un champ électrique de forte intensité, il peut ressentir un léger choc au moment du contact (voir paragraphe 4.4.1). Si l'objet est de grandes dimensions, tel un camion remorque, et que le contact est maintenu, le courant continue de s'écouler et dans certaines circonstances peut être perçu (voir paragraphe 4.3.2).

Figure 4.7: When a person touches another object in a strong electric field, they may experience a small shock at the moment of contact (see Section 4.4.1). If the object is large, such as a lorry, and contact is maintained, the current which continues to flow may, under some conditions, be felt (see Section 4.3.2).

4.3.2 Contact avec d'autres objets. Si une personne placée dans un champ électrique n'est pas électriquement isolée du sol, le contact avec une structure reliée à la terre n'a aucun effet électrique sur elle. Si cette personne est bien isolée du sol (par exemple portant des chaussures en caoutchouc), le courant induit s'écoulera à la terre premièrement par le chemin de plus faible résistance, qui sera, la partie du corps en contact direct avec la structure reliée à la terre, mais l'intensité de ce courant restera du même ordre de grandeur que celle discutée en 4.3.1.

Cependant, un courant de grande intensité peut apparaître si une personne reliée à la terre entre en contact avec un objet métallique de grandes dimensions lui-même isolé du sol, vu que le courant induit dans l'objet s'écoulera via la personne. C'est le cas par exemple lorsqu'une personne touche un véhicule isolé du sol grâce à ses pneus et stationné sous une ligne aérienne (fig. 4.7). En certaines circonstances, la personne pourra ressentir ce courant mais il n'y aura aucun danger pour la personne si le courant n'excède pas 5mA. A partir de cette intensité, certaines personnes ne seront plus en mesure de lâcher l'objet si celui-ci était tenu fermement plutôt que seulement en contact avec celles-ci. Pour éviter cette éventualité, les objets métalliques de grandes dimensions situés au voisinage des lignes à haute tension seront soigneusement reliés à la terre. En pratique, les courants réels seront toujours plus petits que les valeurs calculées car les pneus des véhicules ne sont pas spécialement de bons isolants.

4.3.3 Stimulateurs cardiaques. Dans certains cas, les courants induits par les lignes aériennes ou par contact pourront perturber le fonctionnement de certains types de stimulateurs cardiaques. Les médecins sont avertis de ce phénomène, aussi bien que des autres sources potentielles d'interférence et en avertissent leurs patients, encore qu'il n'ait été enregistré aucun incident ayant pour origine les lignes de transport. Dans une moindre mesure, il est possible que le champ magnétique puisse produire des effets similaires.

4.4 Tensions induites

4.4.1 Contact non permanent avec des objets. Les champs électriques induisent des tensions sur les objets qui ne sont pas correctement reliés à la terre. Cependant, en général, il y aura une différence de potentiel entre une personne et un objet quelconque. Si on entre en contact avec l'objet, il y a un instant qui précède le contact franc qui correspond à une distance telle qu'une étincelle puisse s'amorcer entre la personne et l'objet, si la différence de potentiel est suffisante. Cette décharge instantanée de grande intensité peut être ressentie comme un «micro-choc», qui n'est autre chose que le choc que l'on ressent en quittant sa voiture, par temps sec, au moment du contact avec la portière. Dès que le contact franc est établi, l'intensité du courant qui s'écoule est celle qui a été décrite dans le paragraphe précédent.

Ces décharges transitoires sont davantage perçues lorsque l'intensité du champ est élevée et que le degré de mise à la terre de l'objet et de la personne sont très différents - par exemple une personne portant des chaussures avec semelle en caoutchouc se déplaçant dans l'herbe ou touchant une clôture mise à la terre située en-dessous d'une ligne à haute tension. Des décharges transitoires pourront également être observées par quiconque porte des chaussures suffisamment conductrices et qui entre en contact avec une structure métallique isolée du sol, soit un véhicule ou un toit métallique de ferme ou une clôture non électrifiée située sous une ligne. Si ces micro-chocs s'avèrent gênants, la compagnie d'élec-

4.3.2 Contact with other objects. If a person in an electric field is poorly isolated electrically from the ground, contact with an earthed structure has no electrical effect. If the person is well isolated from the ground (for example, when wearing rubber boots), the current induced in them will be diverted to earth primarily through the contact points of least resistance, that is, through the part of the body in direct contact with the earthed structure, but this current will remain of similar magnitude to that given in 4.3.1.

However, a somewhat greater current may flow through a person if they are earthed and touch a large conductive object which is isolated from the ground, since the current induced in the object passes through them. This is the case, for example, with a person touching a vehicle isolated from the ground by its tyres and parked under a power line (Figure 4.7). In some circumstances, a person would feel the current but it is not until about 5 mA is exceeded that any hazard may arise. Above this level some people might not be able to let go if they were grasping, rather than just touching, the object. To avoid this possibility, large metal objects under or close to the higher-voltage lines should be well connected to the earth. In practice, the currents are invariably lower than calculated because vehicle tyres are not especially good insulators.

4.3.3 Pacemakers. In some instances the currents induced by the larger power-line electric fields or arising as contact currents could interfere with the action of certain designs of implanted heart pacemakers. Doctors are aware of this, as well as of many other potential sources of interference, and advise patients accordingly, though there appear to be no recorded instances of harm arising from power-line interference. There is also a lesser possibility that the magnetic fields might cause similar effects.

4.4 Induced Voltages

4.4.1 Transient contact with objects. Electric fields induce voltages on objects which are imperfectly connected to earth. In general, therefore, there will be a voltage difference between a person and some other object in the field. If the object is touched, a moment occurs just before complete contact is made when the voltage difference is sufficient to cause a small spark between the person and the object. The momentarily high discharge current may be felt as a 'microshock', not unlike the shock received when getting out of a car on a dry day and then touching the door handle. Once firm contact is made, the current which flows is as described in the previous section.

These transient discharges are most noticeable when the field is strong and the degree of earthing of the object and the person are quite different - for example, a person, wearing rubber-soled shoes, brushing against vegetation or touching an earthed wire-fence directly beneath a high-voltage line. Transient discharges may also be experienced when someone with damp or otherwise fairly well-conducting shoes touches an unearthed metal structure such as a vehicle or an iron roof of a farm building or an unenergized electric fence beneath a line. If these microshocks prove annoying, the local electricity company is usually able to provide an appropriate

tricité locale peut améliorer la situation par une mise à la terre adéquate ou tout autre système. Remplir le réservoir des véhicules à proximité immédiate d'une ligne aérienne sera dans le pire des cas à éviter, à moins que l'alimentation en carburant ne soit raccordée électriquement au véhicule pour annihiler le faible risque de décharge susceptible d'enflammer le carburant.

4.5 Perception directe

Dans les champs électriques intenses, il est possible de percevoir directement celui-ci. Cet effet s'avère de première importance dans les études qui ont pour objet les animaux de laboratoire (paragraphe 6.3) et dans le cas du personnel travaillant à proximité des lignes sous tension et dans les postes.

Le principal effet provient des charges électriques qui agissent sur la surface du corps, plus spécialement sur les cheveux, sur le dos de la main ou dans le cou; ces charges induites par le champ lui-même font vibrer les cheveux ou les poils à une fréquence double de la fréquence industrielle. L'attraction apparaît à chaque demi-période, ce qui explique le doublement de la fréquence de vibration.

Pour les personnes, la sensation est celle d'un chatouillement superficiel, qui peut se transformer en léger picotement dans les champs intenses. Le seuil de perception varie de manière considérable entre les individus dont la majorité ne ressent aucun effet sous la plupart des lignes.

Des personnes ont également observé des décharges aux extrémités des habits, plus spécialement lorsque la peau est en contact avec le col ou à l'extrémité des manches. De telles décharges sont également observées entre les montures métalliques des lunettes et le nez et entre le bracelet montre et le poignet. Ces sensations sont le résultat de micro-décharges, produites par des différences de potentiel telles que précédemment décrites, et devenant perceptibles lorsque le champ dépasse 15 kV/m. De telles intensités ne sont pas habituellement accessibles au public.

earth or other device to eliminate the difficulty. Refuelling of vehicles very close to large power lines is best avoided, unless the source of the fuel is first electrically connected to the vehicle to preclude the slight risk of a spark igniting the fuel.

4.5 Direct Perception

Occasionally, in strong electric fields, the field itself may be sensed directly. This effect becomes important in some of the studies carried out using laboratory animals (see Section 6.3) and in the strong fields to which personnel are sometimes exposed when working near live conductors and in substations.

The principal action is that of electric forces acting on the surface of the body, particularly on fine hair such as on the back of a raised hand or on the back of the neck. These forces arise from the attraction of the surface charges, induced by the field, by the field itself and cause the hair to vibrate at a frequency twice that of the electricity supply. Attraction occurs each half cycle, hence the doubling in frequency.

For people, the sensation is of superficial tickling, changing to a light prickling in stronger fields. The threshold field for perception of this effect varies greatly between individuals with the majority of people not being aware of any effect under most power lines.

People may also experience a tingling at the edges of clothing, particularly where the skin touches the collar or at the ends of sleeves. Such tingling has also been noted between metal spectacle frames and the nose and between watch straps and the wrist. These sensations are due to microdischarges, caused by voltage differences as outlined in the previous Section, and become noticeable when the field exceeds about 15 kV/m. Such levels are not normally encountered by members of the public.

5. CHAMPS MAGNÉTIQUES À FRÉQUENCE INDUSTRIELLE

5.1 Sources

Ces champs sont générés par les courants qui circulent dans les conducteurs. Les champs magnétiques qui nous intéressent du point de vue des effets des réseaux d'énergie électrique sont ceux à proximité du sol, compte tenu de leur interaction avec les corps conducteurs, y compris les personnes, qui se manifestent sous la forme de courants induits comme il sera décrit au paragraphe 5.2.

A proximité d'une ligne aérienne, l'intensité du champ magnétique au niveau du sol dépend principalement de la distance à la ligne et de l'intensité des courants dans les conducteurs de phase (qui, contrairement à la tension, peut varier de manière considérable en cours de journée et en fonction de la saison suivant en cela la demande d'énergie). Le champ dépend également de la hauteur des conducteurs, de l'ordre des phases et de leur disposition spatiale. En outre, d'autres sources peuvent contribuer (encore que de manière moins importante) à l'intensité du champ à savoir le courant dans le conducteur neutre, ou induit dans les câbles de garde (blindage) du réseau, dans le sol voisin, ou dans les circuits de télécommunications, les pipelines ou autres structures métalliques qui ont un parcours parallèle à la ligne. Les facteurs importants qui conduiront à prédire le champ magnétique sont la localisation et la grandeur des différents courants et la nécessité de les décrire de manière statistique vu leur variation temporelle.

A titre d'exemple, la figure 5.1 représente les profils latéraux de l'intensité du champ magnétique à proximité du sol pour quelques dispositions typiques de ligne aérienne. La variation de ce champ le long de la ligne est pratiquement similaire à celle du champ électrique représentée à la figure 4.2. (Voir encart 5.1, commentaires sur la direction du champ).

Alors que les câbles souterrains ne génèrent pas de champs électriques à l'extérieur du câble (paragraphe 4.2) ils sont à l'origine de champs magnétiques dans leur voisinage. Certains réseaux souterrains de grande puissance sont constitués de câbles monopolaires habituellement disposés en nappe horizontale. De tels réseaux peuvent conduire à des champs magnétiques à la surface du sol ayant une intensité aussi élevée qu'une centaine de microtesla ou plus, cette valeur est fonction de la profondeur d'enfouissement et du courant de charge (fig. 5.2). Dans la plupart des cas (moyenne et basse tensions), cependant, les trois phases sont torsadées ensemble avec le conducteur neutre ou dans une gaine faisant fonction de neutre, ou disposée en trèfle. Les champs produits à partir de ces dispositions sont négligeables, vu que les courants dans le neutre équilibrent exactement le courant résultant des phases. Tout déséquilibre donne naissance à un champ dont la grandeur est inversement proportionnelle à la distance. Cependant, les valeurs typiques du champ magnétique produit par des courants déséquilibrés sont généralement faibles, bien que vu leur plage de variation importante, il apparaît que dans certaines circonstances ils constituent la principale contribution aux champs de référence dans les habitations.

La majorité des objets et des constructions ne présentent qu'un faible ou aucun effet d'écran pour les champs magnétiques; il en résulte que le champ à l'intérieur d'une habitation, par exemple, est le plus souvent le résultat tant des sources extérieures que des sources intérieures à l'habitation. Cependant, les appareils domestiques et les procédés industriels produisent des champs magnétiques dans leur voisinage immédiat qui peuvent parfois être

5. POWER-FREQUENCY MAGNETIC FIELDS

5.1 Sources

These fields come from the currents flowing in conductors. The magnetic fields of interest from the point of view of the environmental effects of electric power transmission are those near ground level, since they can interact with conductive bodies, including people, inducing electric currents in them as described in Section 5.2 below.

In the vicinity of an overhead line, the strength of the magnetic field near ground level depends mainly on the distance from the line and on the currents flowing in the phase conductors (which, unlike the voltage, may change considerably during the day and with the season according to the demand for energy). The field also depends on the heights, phasing and arrangement of the conductors. In addition, there may be significant (albeit smaller) contributions to the field from currents such as those flowing in any neutral conductor, or induced in the shield or earth wires of the line, in the ground nearby, or in communication circuits, pipelines and other metallic structures which may run parallel to the line. The important factors in predicting the magnetic field are thus the location and magnitude of the various currents and the need to describe them statistically because they are continually changing.

By way of an example, Figure 5.1 shows lateral profiles of the magnetic-field strength near ground level for some typical transmission lines. The variation of the field along the line is broadly similar to that of the electric field shown in Figure 4.2. (See Box 5.1 for some comments on the field direction).

Whereas underground cables do not produce external electric fields (see Section 4.2), they do generate magnetic fields in their vicinity. Some high-power underground circuits use individual cables for each phase, usually in a horizontal array. Such circuits can give rise to magnetic fields at the ground surface with strengths as high as a hundred microteslas or more, depending on their depth and current loading (see Figure 5.2). In most underground cables (medium and low voltage), however, the three phase-conductors are twisted together with a neutral conductor or within a neutral sheath, or arranged in a close trefoil pattern. The fields from such cables are negligible, provided that the neutral currents exactly balance the net phase currents. Any unbalance will give a field falling inversely with distance. However, typical values of magnetic fields due to out-of-balance currents are generally low, though because of their long range it appears that in some situations they are the main contribution to the background fields in homes.

Most objects and buildings provide little or no screening of magnetic fields so the field inside a house, for example, may often arise as much or more from sources outside as from sources inside. However, household appliances and industrial machinery generate magnetic fields in their vicinity which may sometimes be much higher than those produced near overhead lines and cables. Indeed, magnetic fields of a tenth

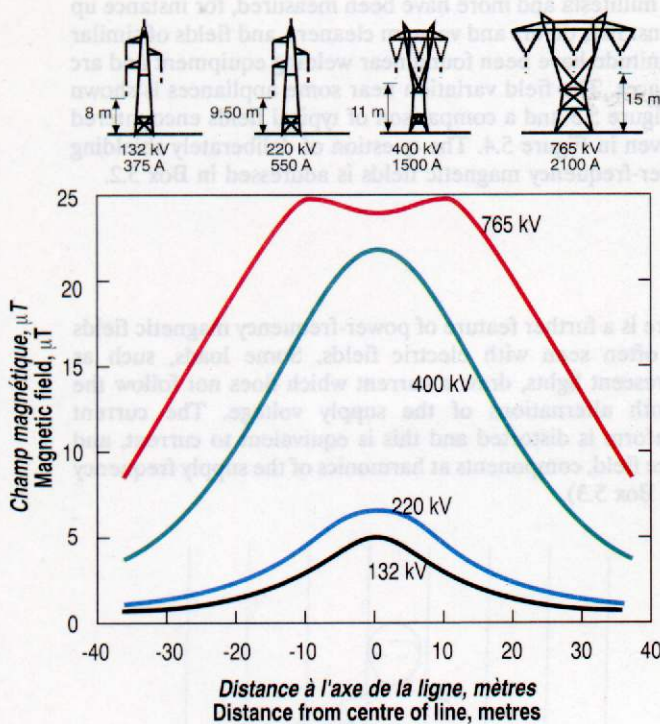


Figure 5.1: Ces profils représentent l'intensité du champ magnétique au niveau du sol pour différentes lignes aériennes typiques à un terre.

Figure 5.1: These 'profiles' show the magnetic field near the ground for some typical single-circuit lines.

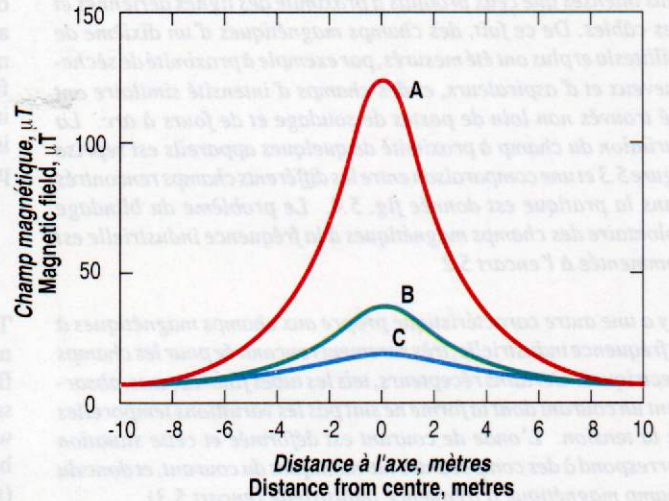


Figure 5.2: Le champ magnétique généré par un câble souterrain à grande puissance décroît rapidement avec la profondeur d'enfouissement et la distance. Dans cet exemple, les trois câbles, transportant chacun 1000 A, sont espacés horizontalement de 0,4 m et enfouis à une profondeur de 1 m. A - champ au niveau du sol; B - champ à 1 m au-dessus du sol; C - champ à 2 m au-dessus du sol.

Figure 5.2: The magnetic field from high-power underground cable circuits falls rapidly with height and distance. In this example the three cables, each carrying 1000 A, are spaced 0.4 m apart horizontally and buried 1 m below the surface. A - field at ground level; B - field 1 m above ground; C - field 2 m above ground.

Encart 5.1

Direction du champ

Dans un plan perpendiculaire à la ligne, on observe que le champ magnétique présente habituellement une composante horizontale et une composante verticale. Contrairement au champ électrique qui est toujours perpendiculaire à la surface du sol, la direction du champ magnétique fait à un instant donné un angle quelconque avec l'horizontale. Dans le cas de réseaux triphasés ou multiphasés, les deux composantes du champ magnétique ne sont généralement pas en phase; il en résulte que la direction du champ tourne à la même fréquence que celle du courant; on dit alors que le champ est elliptique. Le calcul de ces champs à partir de plusieurs sources est de ce fait relativement complexe.

Box 5.1

Field Direction

The direction of the magnetic field at any instant may be at any angle within the plane perpendicular to the line, that is, the field usually has a horizontal as well as a vertical component, in contrast to the electric field which is always perpendicular to the ground surface. For three-phase and other multiphase sources, the two components of the magnetic field will in general not be in phase with one another so that the field direction rotates at the same frequency as the current; the field is then said to be 'elliptically polarized'. The calculation of fields from multiple conductors can thus be quite complicated.

plus intenses que ceux produits à proximité des lignes aériennes et des câbles. De ce fait, des champs magnétiques d'un dixième de millitesla et plus ont été mesurés, par exemple à proximité de sèche-cheveux et d'aspirateurs, et des champs d'intensité similaire ont été trouvés non loin de postes de soudage et de fours à arc. La variation du champ à proximité de quelques appareils est reprise figure 5.3 et une comparaison entre les différents champs rencontrés dans la pratique est donnée fig. 5.4. Le problème du blindage volontaire des champs magnétiques à la fréquence industrielle est commentée à l'encart 5.2

Il y a une autre caractéristique propre aux champs magnétiques à la fréquence industrielle, très rarement rencontrée pour les champs électriques. Certains récepteurs, tels les tubes fluorescents, absorbent un courant dont la forme ne suit pas les variations temporelles de la tension. L'onde de courant est déformée et cette situation correspond à des composantes harmoniques du courant, et donc du champ magnétique à fréquence industrielle (encart 5.3).

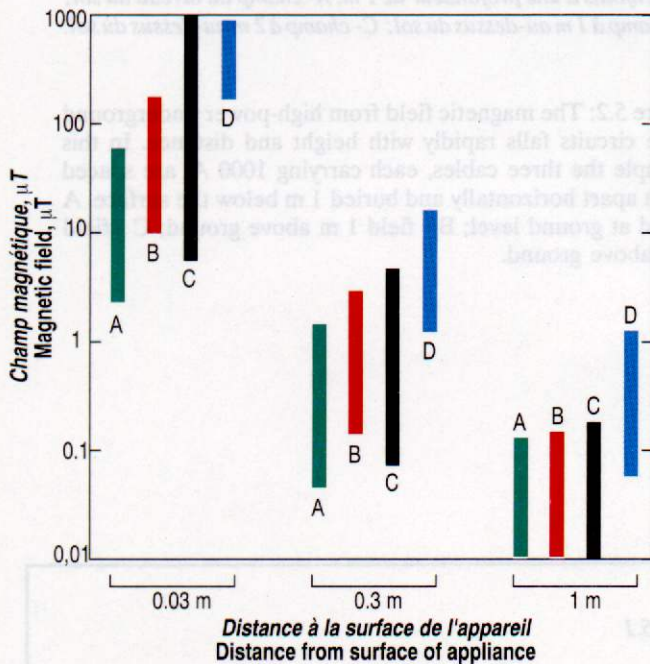


Figure 5.3: Ces exemples indiquent que le champ magnétique produit par les appareils électroménagers couvrent une large gamme mais décroissent rapidement dès que l'on s'éloigne des appareils. Les longueurs des barres indiquent l'étalement de la valeur des champs entre différents modèles. A- récepteurs de télévision; B- chauffeuses portables; C- sèche-cheveux; D- aspirateurs.

Figure 5.3: These examples show that the magnetic fields generated by electrical appliances cover a wide range but fall off rapidly as one moves away from the appliances. The lengths of the bars indicate the spread of fields between different models. A - television sets; B - portable heaters; C - hair dryers; D - vacuum cleaners.

of a millitesla and more have been measured, for instance up against hair dryers and vacuum cleaners, and fields of similar magnitude have been found near welding equipment and arc furnaces. The field variation near some appliances is shown in Figure 5.3 and a comparison of typical fields encountered is given in Figure 5.4. The question of deliberately shielding power-frequency magnetic fields is addressed in Box 5.2.

There is a further feature of power-frequency magnetic fields not often seen with electric fields. Some loads, such as fluorescent lights, draw a current which does not follow the smooth alternations of the supply voltage. The current waveform is distorted and this is equivalent to current, and hence field, components at harmonics of the supply frequency (see Box 5.3).

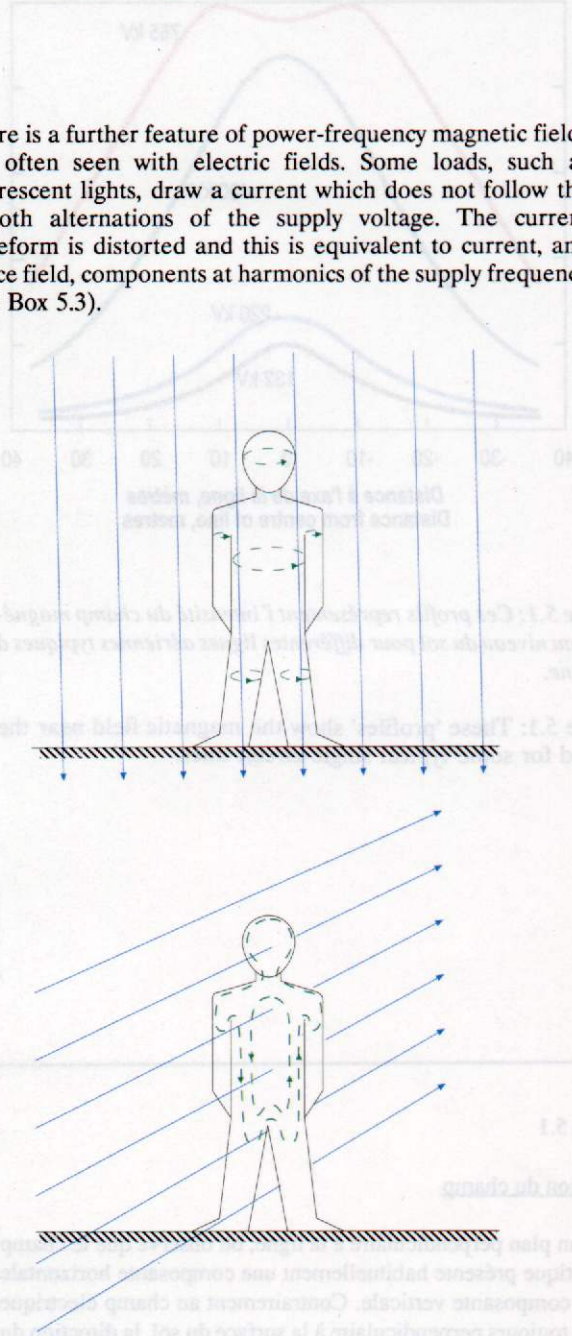


Figure 5.5: De petits courants imperceptibles (représentés par des traits pointillés) sont induits dans une personne lorsqu'elle se trouve dans un champ magnétique alternatif (traits pleins). Les lignes de courant sont des circuits fermés perpendiculaires à la direction du champ.

Figure 5.5: Small imperceptible currents (signified by the dashed lines) are induced in a person when they are in an alternating magnetic field (solid lines). The current flows in loops perpendicular to the direction of the field.

5.2 Courants induits

Une action indirecte des champs magnétiques à fréquence industrielle est l'induction de courants à la même fréquence dans les objets conducteurs ou dans les circuits électriques. C'est ce phénomène qui est à l'origine de la production de l'énergie électrique dans les centrales et de ses transformations ultérieures d'une tension à une autre. Un champ magnétique variable ou alternatif induit un champ électrique qui conduit à une différence de potentiel (tension) dans tout circuit fermé entourant les lignes de flux du champ magnétique. Si ce circuit fermé est électriquement conducteur (une boucle du fil conducteur ou une partie d'un objet conducteur) un courant de circulation sera induit. Des détecteurs de métaux fonctionnent sur ce principe. Un autre exemple est la production d'un «ronflement» dans les circuits électroniques sensibles, par exemple, lorsque la tête de lecture d'un enregistreur se trouve à proximité d'un récepteur TV ou d'un appareil électrique.

L'amplitude du courant induit est proportionnelle à l'intensité du champ, à sa variation dans le temps (et donc à sa fréquence) et à la surface du circuit considéré. De ce fait, des courants plus importants sont induits dans les personnes par rapport à ceux induits dans les souris par exemple et la densité de ces courants est plus élevée à la périphérie extérieure du corps. Ces considérations doivent être présentes à l'esprit dès qu'il est question d'expériences en laboratoire sur des animaux. Contrairement à la situation relative aux champs électriques, la conductivité électrique interne du corps est importante dans la détermination du courant induit par le champ magnétique. L'amplitude du courant est proportionnelle à la conductivité électrique.

5.2. Induced Currents

An indirect action of power-frequency magnetic fields is the induction of currents of the same frequency in conductive objects or circuits. It is this phenomenon which makes possible the generation of electric power in the first place and its later transformation from one voltage to another. A changing or alternating magnetic field induces an electric field which leads to a voltage appearing round any loop through which the magnetic field passes. If the loop is electrically conducting (a loop of wire or part of a conductive object) a circulating current is produced. Metal detectors work on this principle. Another example is the generation of 'hum' in sensitive electronic circuits, for example, when the pick-up head of a record player gets too close to a television set or other electrical appliance.

The magnitude of the induced current is proportional to the strength of the field, how quickly it is changing (and hence to its frequency) and the area of the loop in question. Larger circulating currents are therefore induced in people than in mice for instance and the local density of these currents is greatest at the periphery of the body. These features must be borne in mind when considering laboratory studies using animals. Unlike the situation for electric fields, the internal electrical conductivity of the body is important in governing the current induced by a magnetic field. The magnitude of this current is proportional to the conductivity.

Encart 5.2

Blindage et compensation

On demande parfois si un moyen existe pour blinder les champs magnétiques à fréquence industrielle. Une épaisseur importante d'acier est nécessaire et cette solution est rarement praticable. A petite échelle, on utilise à l'occasion un métal spécial le «mumetal», encore que celui-ci soit coûteux et malaisé à mettre en forme. Dans certains cas, il est possible de générer un champ opposé dans le but d'annuler le champ initial. Cependant pour que cette solution soit satisfaisante dans une zone raisonnable, des courants presque aussi intenses que les premiers sont requis pour produire le champ en opposition. Pour les champs produits par les lignes, tout ce qui peut être envisagé est d'installer les conducteurs aussi près que possible l'un de l'autre en tenant compte des autres contraintes de conception, de sorte que les champs produits par les courants «aller» et «retour» s'équilibreront autant que possible. Pour d'autres raisons, cette conception «compacte» est habituellement un objectif dans la conception même des lignes. Parfois on peut obtenir de petites réductions de la valeur du champ grâce à une réorganisation particulière des conducteurs. Dans les câbles souterrains, les conducteurs sont voisins l'un de l'autre, mais on peut habituellement s'approcher à proximité immédiate des câbles et les champs rencontrés ne sont pas différents, encore que leur étendue soit moindre.

Box 5.2

Shielding and Compensation

It is sometimes asked if power-frequency magnetic fields can be screened or shielded in some way. Generally, a substantial thickness of steel is required and this is scarcely practicable. On a small scale, the special metal 'mumetal' is occasionally used, though it is expensive and difficult to work with. In a few instances it may be possible to generate an opposite field in an attempt to annul the original one. However, for this to be satisfactory over any reasonable area, currents almost as large as the original are required to generate the counterbalancing field. For power-line sources, all that is practicable to do is to place the conductors of the line as close together as other design constraints allow, so that the fields from the 'go' and 'return' currents cancel each other as much as possible. Such compactness is normally a design objective for other reasons. Sometimes small reductions in the field can be achieved by particular rearrangements of the conductors. In underground cables the conductors are closer together, but one can usually get closer to cables and so the fields encountered are not greatly different, though their range is less.

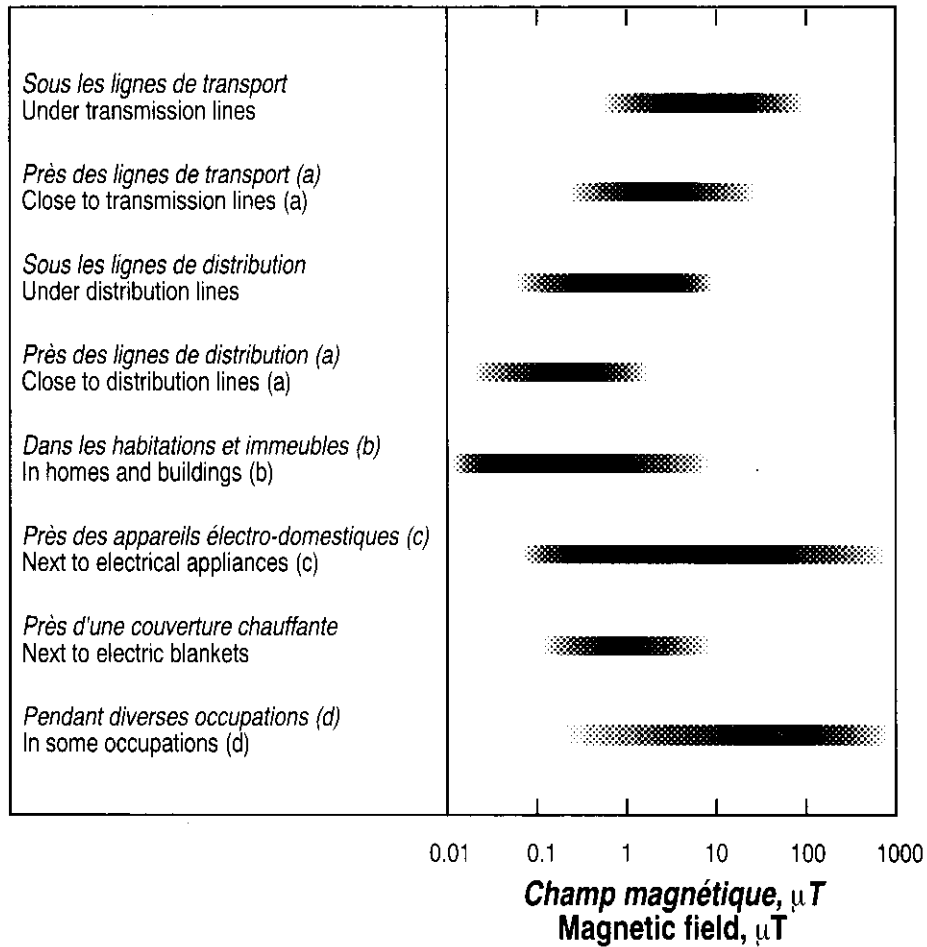


Figure 5.4: Les champs magnétiques à fréquence industrielle rencontrés se situent dans une large gamme de variations. Pour chaque situation répertoriée, la gamme des valeurs typiques pour les champs magnétiques rencontrés est indiquée par les zones pleines des barres, mais d'autres valeurs peuvent être obtenues dans les zones ombrées et même au-delà. Pour l'explication des remarques (a) à (d), voir figure 4.3.

Figure 5.4: The power-frequency magnetic fields encountered span a wide range. For each situation listed, the range of typical field values found is indicated by the solid parts of the bars, though values within, and even beyond, the shaded regions may occur. For the notes (a) to (d), see Figure 4.3.

Dans les corps solides, le courant circule dans des plans perpendiculaires à la direction du champ. Des représentations typiques des lignes de courant circulant dans une personne debout dans un champ horizontal sont dessinées à la figure 5.5. Dans le cas d'un champ vertical, la représentation est plus simple, il s'agit de circuits fermés autour de la tête, du torse et des membres. Dans ce cas, un champ de 10 μT conduit à des densités de courant de l'ordre de 40 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ et à des courants de circulation au niveau du torse de 2 μA . Pour une situation donnée, les densités de courant induites par les champs électriques sont habituellement plus grandes que celles induites par les champs magnétiques. Le problème relatif à l'action directe des champs magnétiques est développée brièvement à l'encart 5.4.

5.3 Perception

Les champs à fréquence industrielle ne sont pas directement perçus pas plus que les personnes ne perçoivent les courants induits par champ magnétique. Pour des intensités supérieures à 5 mT une sensation de rapides fluctuations lumineuses au niveau des yeux peut apparaître, appelées magnétophosphènes, mais de tels champs sont nettement supérieurs à ceux rencontrés habituellement. Des champs encore plus intenses sont nécessaires pour induire des courants d'une intensité suffisante pour stimuler les cellules nerveuses et dès lors être perçus (ces derniers champs sont d'un ordre de grandeur mille fois supérieur aux intensités les plus élevées observées sous les lignes).

5.4 Clôtures et conduites enterrées

Des structures métalliques de grandes longueurs raccordées électriquement à la terre en un ou très peu d'endroit et situées parallèlement aux lignes aériennes à haute tension seront le siège de tensions induites par le champ magnétique produit par la ligne. Des clôtures métalliques sur piquets en bois, ou des conduites enterrées recouvertes d'une protection contre la corrosion sont les dispositions habituellement rencontrées. La tension qui apparaît est le résultat du flux du champ d'induction magnétique dans les boucles constituées par la structure, le sol et les mises à la terre occasionnelles. Si une personne entre en contact avec le fil de clôture ou la conduite, elle ferme la boucle et de ce fait pourra recevoir un choc électrique. La tension est habituellement très basse - de l'ordre de quelques dizaines de volts - et ne pose pas de problème, mais le courant qui en découle pourrait être déplaisant, voire dangereux, en présence d'humidité. Il reste la possibilité de décharges électriques qui pourraient s'avérer dangereuses en présence de fuites de produit inflammable de la conduite. Le remède consiste à raccorder électriquement la structure à la terre à intervalles réguliers et d'installer des joints isolants le long de celle-ci. Il s'agit d'une pratique habituelle qui permet de réduire la dimension de boucles et par conséquent des tensions et des courants en-dessous des valeurs à l'origine des difficultés.

L'avis de la compagnie d'électricité locale sera sollicité avant d'installer ou de travailler sur une longue structure métallique parallèle à une importante ligne de transport. Ceci s'applique également dans le cas de l'emploi de longs fils pour la commande électrique à distance de détonateurs à proximité immédiate de telle ligne.

For solid bodies, the current circulates in planes at right angles to the direction of the field. Typical patterns of current flow in a person standing in a field are shown in Figure 5.5. For a vertical field the pattern is simple, just loops of current circulating around the head, torso and each of the limbs. For this case, a field of 10 μT gives rise to current densities of about 40 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ and circulating currents of about 2 μA in the torso. For a given situation, the current densities induced by electric fields are usually greater than for magnetic fields. The question of any direct action of the magnetic field is considered briefly in Box 5.4.

5.3 Perception

These power-frequency magnetic fields are not perceived directly nor does a person normally feel the currents they induce. At fields above about 5 mT a flickering sensation in the eyes - magnetophosphenes - can be produced, but such field strengths are far above those normally encountered. Even higher fields (about a thousand times stronger than the largest encountered under power lines) would be required to induce currents large enough to stimulate nerve cells and hence be felt.

5.4 Fences and Pipelines

Long metal structures which are connected electrically to the ground at one or just a few places and which run parallel to overhead power lines will have voltages induced along them by the magnetic field from the line. Wire fences on wooden posts, or buried pipelines coated for corrosion protection, are the usual structures of this type encountered. The voltage arises from the magnetic field passing through the loops formed by the structure, the ground and the occasional connections to the ground. If a person should touch such a fence or pipeline, thereby completing a loop, they may receive an electric shock. The voltage is usually quite low - perhaps a few tens of volts - and of little concern, but the current which flows could be unpleasant, even dangerous, in wet conditions. There is also the possibility of sparking, which could be hazardous if there are any leaks of flammable gas from the pipeline. The remedy is to connect the structure electrically to ground at regular intervals and to add insulating breaks along it. This is standard practice and ensures that the loop sizes, and hence the induced voltages and currents, are kept small and below values which cause difficulties.

Advice should be sought from the local electricity company before installing or working on a long metal structure parallel to any large transmission line. This also applies to the use of long wires for electrically detonated blasting in the vicinity of such lines.

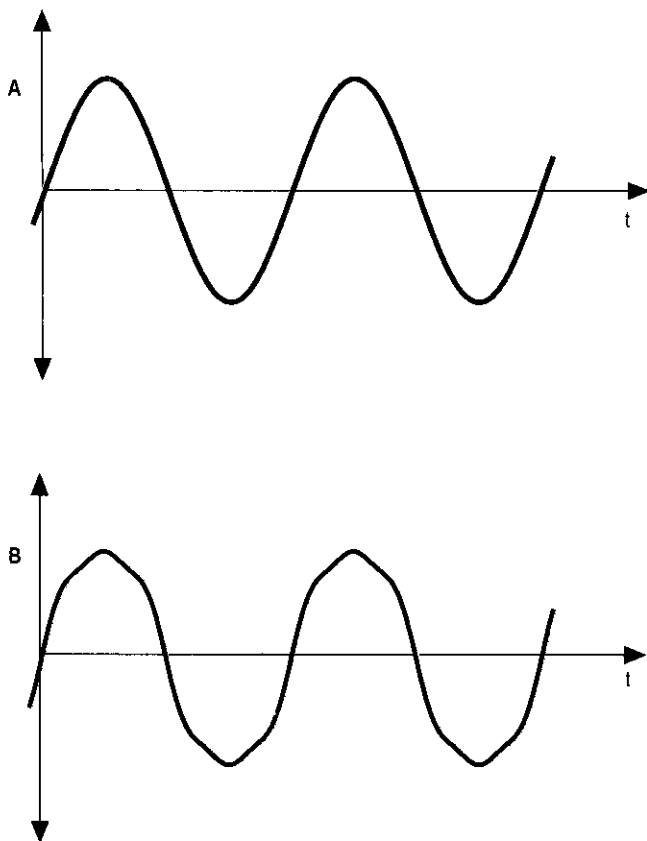
Encart 5.3

Harmoniques

Les tensions et les courants ont habituellement une forme sinusoïdale comme représenté à la fig. 5.6. Si une charge non linéaire (charge pour laquelle le courant n'est pas exactement proportionnel à la tension) est raccordée au réseau, l'onde sinusoïdale de la tension ou plus spécialement du courant sera déformée. Parmi les charges non linéaires typiques, on notera les machines commandées par thyristors, les redresseurs et les tubes fluorescents. Un exemple d'une grandeur déformée est également reprise à la figure 5.6.

On peut représenter une onde déformée comme la somme d'une onde purement sinusoïdale, la fondamentale à la fréquence du réseau, ainsi que d'autres ondes sinusoïdales aux fréquences harmoniques. Le rang de ces harmoniques peut dépasser le vingtième mais, en général, plus le rang de l'harmonique est élevé plus petite est son amplitude, avec une prédominance pour les multiples des nombres impairs. L'amplitude des harmoniques de rang élevé excède rarement quelques pourcents. Par ailleurs, dans un réseau, plus la tension est élevée, plus petit est le contenu harmonique.

Dans le réseau, dès lors que le courant contient des harmoniques, le champ magnétique produit contient également des composantes harmoniques et, en conséquence, les courants induits dans les corps conducteurs auront également des composantes harmoniques. Ceux-ci seront amplifiés comparés au courant du réseau car les courants induits sont proportionnels à la fréquence.



Box 5.3

Harmonics

Power-system voltages and currents usually have a sinusoidal waveform as shown in Figure 5.6. If a nonlinear load (i.e. one for which the current is not exactly proportional to the voltage) is connected to the system, the sinusoidal waveform of voltage or particularly current may be distorted. Typical nonlinear loads are thyristor-controlled machines, rectifiers and fluorescent lights. An example of a distorted waveform is also plotted in Figure 5.6.

Such a distorted wave may be expressed as the sum of a pure sinusoidal wave, the fundamental with a frequency equal to that of the power system, plus sinusoidal waves at harmonic frequencies (integral multiples of the fundamental). The frequency range of these harmonics may extend beyond the twentieth but, generally, the higher the harmonic the lower its amplitude, with the odd-numbered multiples predominating. The amplitudes of even the lower harmonics rarely exceed a few per cent of the fundamental. Also, within a system, the higher the voltage level, the lower is the harmonic content.

Since the current in the system may contain harmonics, the magnetic field produced may contain harmonic components too, and consequently the currents induced in conductive bodies may also contain harmonic components. These will be enhanced relative to those of the system current because induced currents are proportional to frequency.

Figure 5.6: Les tensions et les courants dans les réseaux de transport ont habituellement une forme d'onde voisine d'une sinusoïde pure telle que représentée en A. Cependant, la présence d'harmoniques conduit à une distorsion telle que représentée par exemple en B, qui contient 10% d'harmonique trois et 5% d'harmonique cinq. Ces taux d'harmoniques sont nettement plus grands que ceux habituellement rencontrés dans la pratique.

Figure 5.6: Power-system voltages and currents usually have waveforms close to that of a pure sinusoid as in A. However, the presence of harmonics leads to some distortion as, for example, in B, which contains 10% third harmonic and 5% fifth harmonic. These harmonic levels are greater than those likely to be found.

5.5 Ecrans de visualisation pour terminaux

Le champ magnétique à fréquence industrielle peut, en certaines circonstances, affecter la stabilité de l'image des écrans. Ce phénomène peut apparaître si la fréquence du balayage de l'image est différente de la fréquence industrielle. L'effet qui en résulte est une dérive légère de l'image à une fréquence égale à la différence entre la fréquence de balayage et la fréquence industrielle. Parfois la situation peut être rétablie grâce à une orientation adéquate de l'écran ou grâce à l'utilisation d'un dispositif spécial, mais généralement il est préférable d'installer ces terminaux là où le champ magnétique est inférieur au seuil d'apparition du phénomène. Celui-ci est de l'ordre de 1 μ T pour les modèles les plus sensibles.

5.5. Visual-Display Terminals

A power-frequency magnetic field may, in some circumstances, affect the steadiness of the image on visual-display terminals. This can occur if the frame-repetition frequency of the display is different from the power frequency. The effect is a slight wobbling of the image at a rate equal to the difference between the frame and power frequencies. The problem can sometimes be overcome by suitable orientation of the unit or by the use of special screening, but in general it is preferable to operate these terminals in places where the magnetic field is less than the threshold for the effect. This is about 1 μ T for the most sensitive models.

Encart 5.4

Actions directes du champ magnétique

Les champs magnétiques à fréquence industrielle produits par les équipements électriques sont généralement trop faibles pour avoir une quelconque action directe, telle une force d'attraction, sur les objets habituels, même ceux constitués de matériaux magnétiques, et encore moins sur les tissus vivants, qui sont virtuellement non magnétiques. De minuscules cristaux de magnétite ont été découverts dans certains organismes mais les forces magnétiques sur ceux-ci seront également très petites. Certaines molécules biologiques sont faiblement magnétiques: ici aussi, les forces agissant sur elles sont infinitésimales comparées aux autres forces auxquelles elles sont soumises.

Box 5.4

Direct Magnetic-Field Interactions

The magnetic fields from power-frequency electrical equipment are generally too weak to have any direct effect, such as an attractive force, on everyday objects, even those made of magnetic materials, and still less on living tissue, which is virtually non-magnetic. Tiny crystals of magnetite have been found in a few organisms but the magnetic forces on these will also be very small. Some biological molecules are feebly magnetic but the forces on them are minute compared to the other forces to which they are subject.

6. CHAMPS ÉLECTRIQUES, MAGNÉTIQUES ET SANTÉ

6.1 Introduction

Certaines craintes concernant l'électricité se sont manifestées dès les premières installations électriques publiques. De fait, depuis cette époque, le public est exposé aux champs électriques et magnétiques associés à ces installations.

Aujourd'hui, ces champs et particulièrement les champs magnétiques à fréquence industrielle, existent partout où l'électricité est distribuée ou utilisée, et non seulement à proximité des réseaux de transport.

Les questions qui se posent actuellement à propos de possibles effets de ces champs remontent aux débuts des années 1970, à la suite de certains rapports soviétiques concernant les travailleurs des postes à haute tension. Certains symptômes ont été notés chez quelques uns de ces travailleurs, tels que lassitude, modification de la pression artérielle, ou perte de libido, et il a été suggéré que les champs électriques intenses pourraient en être la cause (bien que, par la suite, d'autres explications aient été données). Il s'en suivit des travaux approfondis dans le monde entier, mais ceux-ci se concentrèrent sur le champ électrique et sur son influence. Aucun effet défavorable sur la santé des hommes, des animaux domestiques ou sur les cultures ne fut confirmé, bien que certains effets physiologiques restant toutefois dans les plages normales de variation, furent observés lors d'études sur des animaux exposés en laboratoire. Il semble probable que nombre de ces effets résultent de la perception directe, par les animaux, des champs électriques intenses utilisés en laboratoire. Certains effets sur des cellules de culture en laboratoire ont également été rapportés.

Au cours de la décennie 1980, l'intérêt pour les champs électriques s'estompa, remplacé par certaines inquiétudes relatives aux champs magnétiques; celles-ci furent stimulées en particulier par les résultats de deux enquêtes, qui semblaient lier des cas de cancers chez des personnes à la proximité de lignes aériennes de distribution à basse et à moyenne tension. Les travaux consacrés à des études sur des cellules en laboratoire se sont également développés, et actuellement, un vigoureux débat scientifique est en cours.

La situation scientifique est complexe, par ce qu'il n'existe aucun mécanisme bien compris qui pourrait expliquer une interaction entre les champs à faible intensité et des tissus vivants: ces champs sont bien trop faibles pour produire le moindre échauffement, et ils sont incapables de briser directement (par ionisation) toute molécule. Les connaissances actuelles sont partielles et insuffisantes pour pouvoir expliquer ce qui est observé; c'est pourquoi les opinions de la communauté scientifique sont partagées quant à l'interprétation et à la valeur des observations. Il convient aussi d'admettre qu'il n'est jamais possible de prouver l'absence de tout effet défavorable, puisqu'il n'est jamais possible d'investiguer tous les paramètres ou d'éliminer tous les facteurs confondants.

Si quelqu'effet défavorable sur la santé, dû aux champs électrique ou magnétique, devait être mis en évidence, alors, comme ces champs sont omniprésents, il deviendrait nécessaire, pour la société tout entière, de peser, par un processus d'évaluation des risques, les effets négatifs par rapport aux immenses bénéfices de l'électricité.

La suite de ce chapitre sera consacrée aux études sur les hommes (en se focalisant sur la question du cancer, puisque c'est celle-ci qui engendre les plus grandes inquiétudes et les efforts de recherche les plus importants), sur les animaux, sur les cellules, ainsi qu'à

6. ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS AND HEALTH

6.1 Introduction

There has been apprehension about some aspects of electricity ever since public supplies were first provided and indeed people have been exposed to the associated electric and magnetic fields since that time. To-day, these fields, especially power-frequency magnetic fields, are found wherever electricity is supplied or used, not just near power transmission systems.

The present questions about the possible effects on health of power-frequency fields can be traced back to the early 1970s following some reports from the USSR concerning high-voltage sub-station workers. Symptoms, such as lassitude, changes in blood pressure and loss of sexual drive, were noted in some of these workers and it was suggested that the strong electric fields encountered were the cause (though alternative explanations were later given). Extensive studies around the world ensued and these concentrated on the electric field and its influence. No adverse health effects on people, farm animals or crops were confirmed, though some physiological effects, within the normal range of variation, were found in some studies of animals exposed in the laboratory. It seems likely that many of these arise because the animals are responding to direct perception of the strong electric fields used. Several effects on cells cultured in the laboratory were also reported.

During the 1980s, interest in electric fields waned, to be replaced by concern over magnetic fields, stimulated particularly by the results of two surveys which seemed to link the incidence of cancer to living near low-voltage and medium-voltage overhead electricity distribution wires. The effort devoted to cellular studies in the laboratory has also increased and a vigorous scientific debate is in progress.

The scientific position is complex, not least because there is no fully understood mechanism by which the low-strength fields in question can interact with living material: they are far too weak to cause any heating and they are incapable of disrupting (ionizing) any molecules directly. Current knowledge is fragmentary and insufficient to explain everything that is observed; there are, therefore, differing views within the scientific community on its interpretation and weight. One must also recognise that it is never possible to prove the absence of adverse effects because it is never possible to investigate all circumstances or to eliminate all obscuring factors.

Should any adverse effects on health of electric or magnetic fields become established, then, since these fields are widespread, it would be for society as a whole, through a process of risk assessment, to balance the effects against the many benefits of electricity.

The remainder of this Section is devoted to human studies (with the focus on the cancer issue since this is where the major concern and major research effort lie), animal studies, cellular effects, international assessments of the health

l'examen des positions internationales sur la question, des directives internationales sur l'exposition aux champs, et donnera finalement un résumé de la situation actuelle. (Les travaux relatifs aux champs pulsés ou aux radio-fréquences ne sont pas considérés ici). On donnera également des extraits de trois importants documents internationaux, ainsi que d'autres cités au chapitre 11.

6.2 Etudes sur les hommes

6.2.1 Investigations en laboratoire. *Plusieurs études approfondies et détaillées ont été menées sur des volontaires exposés à des champs électriques ou magnétiques dans des conditions contrôlées en laboratoire (Fig.6.1). Des intensités de champ atteignant 20 kV/m et 5 mT - bien supérieures à celles normalement rencontrées par le public - furent utilisées, avec des expositions de plusieurs heures. Un grand nombre de tests et d'analyses de sang furent effectués. Aucun effet marqué dû à une exposition ne fut observé. Dans certains tests, de faibles variations physiologiques, telles que le rythme cardiaque, furent notées, mais restant bien à l'intérieur des plages de variations normales. De telles modifications physiologiques ne sont généralement pas considérées comme néfastes en termes de santé.*

6.2.2 Etudes épidémiologiques relatives au cancer. *Plusieurs dizaines d'enquêtes épidémiologiques relatives à des expositions, ou expositions présumées, à des champs électriques ou magnétiques, en tant que causes possibles de cancers, ont été menées et publiées.*

L'épidémiologie est l'étude de l'occurrence de maladies chez les populations humaines, et est utilisée pour obtenir et pour tester des hypothèses sur les origines des maladies, en corrélation avec les caractéristiques et l'environnement des populations concernées. De nombreux facteurs peuvent induire une maladie, et il n'est jamais possible de les appréhender en totalité. Le résultat d'une étude épidémiologique est donc tout au plus une association statistique entre un facteur et l'occurrence d'une maladie et en donne la signification statistique. De plus, le terme "association" n'implique pas nécessairement "cause", en particulier lorsque cette association est relativement faible (ce qui est le cas pour les études considérées ici) et pour établir une cause, les scientifiques exigent généralement une corrélation dose-réponse bien établie, une évidence prouvée à partir d'études sur des animaux, et de préférence une compréhension des mécanismes sous-jacents. Aucune de ces conditions n'existent dans le cas des champs électriques et magnétiques.

Les études relatives aux champs n'ont pas toutes le même poids, en raison de diverses déficiences dans leur conception, aussi un simple compte de celles à résultats apparemment "positifs" et de celles à résultats "négatifs" n'est pas une bonne manière d'évaluer une influence. Les principales déficiences de ces études sont l'absence d'une évaluation adéquate de l'exposition d'une personne aux champs pendant un certain temps; on utilise souvent, à la place de l'exposition réelle, une estimation de proximité de fils ou d'équipements. Même la mesure de l'intensité du champ est insuffisante, car les champs peuvent varier considérablement d'une place à l'autre et d'un instant à l'autre. En outre, en l'absence d'une action biologique du champ clairement identifiée, à un niveau donné, on ne sait pas quelle est la caractérisation de l'exposition qui est importante - moyenne, valeur de crête ou autre - de telle sorte qu'il est impossible de définir une "dose".

question, international exposure guidelines and finally a summary of the present position. (Work relating to pulsed or radio-frequency fields is not considered.) Extracts from three important international documents are given and others listed in Section 11.

6.2 Human Studies

6.2.1 Laboratory investigations. Several thorough and detailed studies have been carried out with human volunteers exposed to either electric or magnetic fields under controlled laboratory conditions (Figure 6.1). Field strengths up to at least 20 kV/m and 5 mT - much stronger than people normally encounter - were used, with exposures of several hours. A wide range of performance and blood tests were made. No marked effects of the exposure were observed. In some tests, small physiological changes, for example in heart rate, were seen, but these were well within the normal range of variation. Such physiological changes are not generally regarded as adverse in terms of health.

6.2.2 Epidemiological studies concerning cancer. Several tens of epidemiological investigations relating to exposure or presumed exposure to power-frequency electric and magnetic fields as a possible cause of cancer have now been conducted and published.

Epidemiology is the study of the occurrence of illness in human populations and is used to obtain and test ideas about the origins of illnesses in relation to the characteristics and environment of the people concerned. Many factors can influence an illness and it is never possible to make allowance for them all. The result of an epidemiological study indicates to what extent some factor is statistically associated with the occurrence of an illness and with what statistical significance. Association does not necessarily imply cause and to establish a cause, particularly when the association is relatively weak (as for the studies considered here), scientists generally require a clear 'dose/response' relationship, good supporting evidence from animal studies and, preferably, an understanding of the underlying biological mechanism. None of these exists for electric and magnetic fields.

Not all of the studies relating to fields are of equal weight because of various deficiencies in their design, so a simple 'count' of those with apparently 'positive' and those with apparently 'negative' results is not a sound means of balancing the evidence. The major deficiency in these studies is the lack of an adequate assessment of a person's exposure to the fields over a period of time; usually some surrogate for exposure, such as proximity to wires or equipment, is used. Even a measurement of field strength is insufficient since fields can vary markedly from place to place and moment to moment. Furthermore, in the absence of any firmly established biological action of the field at the levels involved, it is not known what features of the exposure may be important - the average, the peak value, or what - so it is not possible to define a 'dose'.

Il convient de distinguer deux catégories d'études: les études en milieu résidentiel, et les études sur des adultes dont l'exposition à des champs électriques et magnétiques est probable en milieu professionnel.

Les études en milieu résidentiel souffrent d'une évaluation insuffisante de l'exposition, d'un faible nombre de personnes prises en compte, et d'incohérence.

L'estimation d'une exposition antérieure, en particulier des enfants, reste un problème majeur. Sauf rares exceptions, l'évaluation de l'exposition a été basée sur un "code de filerie", obtenu à partir du type et de la proximité de lignes aériennes (Fig.6.2), ou sur leur seule proximité. Donc, en général, les corrélations avancées (statistiquement significatives pour certaines études), sont obtenues à partir de codes ou de distances, et non à partir d'une mesure directe de l'exposition. Deux études ont inclus des mesures des champs magnétique et électrique; les mesures du champ électrique n'ont montré aucune corrélation avec un cancer, les mesures du champ magnétique ont montré une corrélation statistiquement non significative avec le cancer (c'est-à-dire qui a pu être le fait du hasard). Lorsqu'une étude comporte de nombreux tests statistiques, même certaines corrélations statistiquement significatives peuvent résulter du hasard.

Le fait de ne disposer que d'un petit nombre de personnes sur lesquelles baser l'étude pose inévitablement un problème lorsque l'affection est rare, tel le cancer chez l'enfant, et cette insuffisance a faussé toutes les études en milieu résidentiel jusqu'à ce jour. Elle conduit à un faible poids statistique, et par conséquent à une incertitude sur les résultats. La difficulté de prendre en compte d'autres facteurs causaux (les facteurs confondants) ajoute à cette incertitude.

Il y a beaucoup d'incohérence dans les études résidentielles, c'est-à-dire dans l'estimation du risque (certaines études ne trouvent aucune augmentation), ou dans le type de cancer qui pourrait être associé à l'exposition au champ magnétique à fréquence industrielle. Par exemple, alors que certaines études montrent un accroissement de la fréquence des leucémies chez des populations exposées, une autre étude montre un effet protecteur d'une telle exposition.

Afin de lever les incohérences et le manque de conclusions des études menées à ce jour, de nouvelles recherches sont en cours, utilisant des méthodes plus élaborées et une meilleure définition de l'exposition au champ.

Les études en milieu professionnel, comme en milieu résidentiel, souffrent d'une mauvaise évaluation de l'exposition. Ces études ont presque toutes utilisé la "fonction professionnelle" comme mesure de l'exposition. Bien qu'il y ait une certaine logique dans cette pratique, il est évident que la fonction n'est qu'une façon simpliste d'évaluer l'exposition d'un individu. De mauvaises mesures d'exposition peuvent conduire à des résultats falsifiés, dans un sens ou dans l'autre, avec pour conséquence des associations non valides ou le masquage de risques réels.

Dans leur ensemble, ces études professionnelles semblent montrer un risque légèrement accru de certains cancers, en particulier de leucémies et de cancers du cerveau, chez des travailleurs des professions "électriques". Ces observations sont suivies de près dans plusieurs pays, en vue de déterminer si le facteur en cause est bien l'exposition aux champs électriques ou magnétiques (Fig.6.3) ou si d'autres facteurs de l'environnement professionnel sont en jeu.

It is convenient to consider the reported studies in two categories: residential studies and studies of adults presumably exposed to electric and magnetic fields in the workplace.

The residential studies suffer from poor exposure assessment, relatively small numbers of people included, and inconsistency.

Estimating past exposure, particularly for children, remains a major problem. With few exceptions, exposure assessment has been based on 'wire codes' derived from the type and proximity of local overhead power wires (Figure 6.2), or on proximity alone, as surrogate for exposure. Generally then, the association (statistically significant in some studies) which is indicated is with wire codes or distances and not with exposure to magnetic fields directly. Two studies have included measurements of both magnetic and electric fields; the electric field measures showed no relationship to cancer, the magnetic field measures showed a statistically non-significant relationship to cancer (that is, it may have arisen by chance). Even some statistically significant relationships may arise by chance when a study contains many statistical tests.

Having only a relatively small number of people on which to base the study is inevitably a problem with a rare disease, such as childhood cancer, and has affected all residential studies to date. It leads to low statistical power and consequent uncertainty in the result. The difficulty of taking other possible causative ('confounding') factors into account adds to this uncertainty.

There is a good deal of inconsistency among the residential studies, that is, in the magnitude of the risk estimates (some studies find no increase), or in the cancer types which appear to be associated with power-frequency magnetic field exposure. For example, while some studies report an increase in the frequency of leukaemia among the exposed populations, one study reports a protective effect of such exposure.

To clarify the inconsistencies in the studies and the inconclusive nature of the research to date, more comprehensive studies are proceeding with refined methods of exposure assessment.

The occupational studies, like the residential, also suffer from poor exposure assessment. These studies have almost universally used the 'job title' as a measure of exposure. While there may be some logic in this practice, job title is clearly a primitive exposure assessment for the individual. Poor exposure measures can produce spurious results in either direction, resulting in invalid associations or possibly the masking of real risks.

Taken overall, these occupational studies do appear to show a slightly increased risk of certain cancers, particularly leukaemia and brain cancer, for workers in 'electrical' occupations. These observations are being followed up in several countries in an attempt to determine whether the relevant factor is exposure to electric or magnetic fields (Figure 6.3) or some other feature of the working environment.

6.2.3 Autres aspects sur la santé. Plusieurs études relatives à d'autres aspects de la santé - état de santé général, accidents de naissances, dépression, par exemple - ont été menées sur les effets des champs électriques et magnétiques "résidentiels" mais ici encore, aucune mesure fiable de l'exposition ne fut faite. Les effets qu'elles suggèrent restent non concluants et spéculatifs. Une importante étude sur des travailleurs de réseaux de transport et de distribution électriques a utilisé des enregistreurs portatifs, afin de déterminer l'exposition individuelle au champ électrique. Aucun effet défavorable sur la santé ne fut trouvé associé à l'exposition à des champs électriques élevés. Bien que l'exposition au champ magnétique ne fut pas évaluée, il peut être supposé que des niveaux élevés de champ magnétique étaient probablement associés au niveau élevé du champ électrique.

6.3 Etudes sur des animaux

Les études sur des animaux sont souvent utilisables pour les investigations sur les effets sur la santé humaine, car le contrôle de l'exposition est aisé en laboratoire. Il y a cependant des difficultés à déterminer l'exposition équivalente de l'homme. Ceci est notamment le cas si les courants induits sont le facteur important, car les courants induits par un champ donné dépendent fortement de la taille et de la forme de l'animal. Il y a également des difficultés d'ordre biologique à extrapoler à l'homme tout effet observé. Des espèces variées ont été utilisées, bien que la majorité des travaux ait été faite sur des rats et des souris; de nombreux effets ont été recherchés.

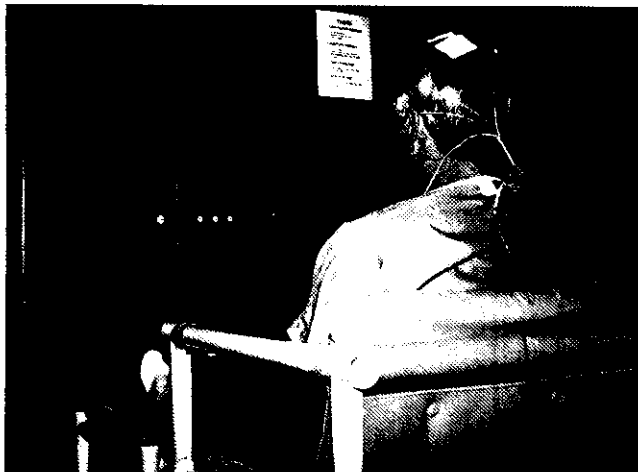


Figure 6.1. : Diverses études de laboratoire ont été effectuées avec des personnes volontaires, sur lesquelles de nombreux paramètres physiologiques et psychométriques ont été examinés. (Photographie : MRI-USA)

Figure 6.1: Various laboratory studies have been carried out with human volunteers in which many physiological and psychometric factors have been examined. (Photograph: MRI-USA)

6.2.3 Other health aspects. Several studies of other aspects of health - general health, birth outcome, and depression, for example - have been conducted in relation to residential electric and magnetic fields, but here again reliable measures of exposure were not used. The effects suggested remain inconclusive and speculative. One large study of electricity transmission and distribution workers used personal monitors to determine individual exposure to electric fields. No adverse health effects were associated with the higher electric-field exposures. Although magnetic field exposures were not assessed, it may be surmised that higher levels would probably also have been associated with the higher electric field exposures.

6.3 Animal Studies

Animal studies are often valuable for the investigation of effects on human health because good control of exposure is possible in the laboratory. There are, however, difficulties in determining the equivalent human exposure. This is especially so if induced currents are the important factor because the currents induced by a given field depend markedly on the size and shape of the animal. There are also biological difficulties in extrapolating any effects found to humans. Various species have been used, though most of the work has been done with rats or mice, and numerous biological effects sought.



Figure 6.2. : Dans la plupart des études en milieu résidentiel relatives aux cancers, l'estimation de l'exposition aux champs était basée sur le type et la proximité de lignes électriques, comme montré sur cette photographie.

Figure 6.2: In most of the residential studies concerning cancer, exposure assessment has been based on the type and proximity of local overhead power wires such as those shown here.

Un grand nombre d'études se rapportent au système nerveux. Certaines citent des effets, par exemple sur le comportement ou sur les niveaux de certaines hormones neuronales, telle la mélatonine et certains neurotransmetteurs, mais avec des résultats contradictoires. Néanmoins, aucun effet pathologique n'a été établi. La plupart des travaux sur l'animal ont utilisé des champs électriques de forte intensité, jusqu'à 200 kV/m et au-delà, de sorte qu'il est probable que certains des effets observés avaient simplement pour cause la perception du champ et la stimulation de l'animal, celui-ci recevant même des petits chocs dus aux tensions induites. Une analyse en cinématographie ultra-rapide a montré que l'extrémité des moustaches de souris et de rats vibraient avec des amplitudes de plusieurs millimètres dans un champ de 50 kV/m.

La reproduction et la croissance ont aussi été l'objet d'études approfondies, la majorité de celles-ci n'indiquant aucune influence nuisible des champs.

Au cours des études sur des animaux, aucun accroissement reproductible de cancers n'a été observé, bien que peu d'études aient jusqu'à présent été conduites avec des expositions prolongées à des champs électriques et (ou) magnétiques, dans l'intention d'examiner la question spécifique des cancers. De nouvelles études seront nécessaires pour évaluer ces champs en tant que promoteurs de cancers; plusieurs sont en cours. La plupart des agents carcinogènes connus sont aussi la cause de naissances défectueuses, mais, comme noté plus haut, aucun effet néfaste des champs sur la reproduction n'a été établi.

Les animaux de ferme, les cultures et les abeilles sont examinés dans l'encart 6.1.

6.4 Etudes sur les cellules

Les études sur des cultures de cellules ou de tissus en laboratoire sont désignées comme in-vitro (en verre), alors que le terme in-vivo (en vie) s'applique aux études sur des animaux. Un grand nombre d'études in-vitro ont été effectuées, certaines rapportant des effets des champs, de nombreuses autres non, et la situation reste complexe et non concluante. La plupart de ces études ont utilisé des intensités de champ bien supérieures, ou des conditions de champ (pulsés ou micro-ondes modulées par exemple), considérablement différentes de celles que l'on rencontre en environnement domestique ou professionnel. Ces conditions sont souvent tout à fait arbitraires et rendent l'interprétation ou la signification des diverses expérimentations biologiques très difficiles. De plus, il n'est pas possible de prévoir, sur la base d'observations sur des cultures cellulaires, si des effets similaires vont apparaître chez l'animal ou l'homme, pas plus que si ces effets vont avoir une implication sur la santé. Les organismes complets possèdent des mécanismes de contrôle et de réparation qui presque toujours font défaut dans les cellules de culture.

Certains effets cités semblent n'apparaître que pour des plages particulières (ou "fenêtres") de fréquences, de durées ou d'intensités de champ, telles que "plus" ne produit pas d'effet plus important. Aucune "fenêtre" spécifique n'a été confirmée jusqu'à présent. Il a également été rapporté que des champs magnétiques statiques comparables à ceux de la terre influencent les expérimentations cellulaires.

Il est important de ne pas porter trop d'attention aux résultats d'une étude scientifique individuelle, aussi convaincante qu'elle paraîsse. Ce n'est que quand elle a été reproduite dans plusieurs laboratoires différents, et que les résultats ont été compris, qu'elle

Many of the studies relate generally to the nervous system. Some have reported effects, for example on behaviour and on the levels of certain hormones, such as melatonin, and some neurotransmitters, but with inconsistent results. No pathological effects, however, have been established. Much of the animal work has been done with strong electric fields, even up to 200 kV/m and more, so that it is likely that some of the effects seen were simply caused by the animal perceiving and being stimulated by the field, or even by receiving small shocks from induced voltages. One high-speed-film analysis has shown the ends of mouse and rat whiskers moving several millimetres to and fro in a field of 50 kV/m.

Reproduction and development have also been extensively investigated, with the majority of studies indicating no deleterious influence from the field.

No reproducible increase in cancer has been observed in animal studies, though few studies have yet been carried out with extended exposure to electric and/or magnetic fields specifically for the purpose of examining for cancer. Further studies are needed to evaluate these fields as a cancer promoter; several are underway. Many known carcinogenic agents also lead to birth defects but, as noted above, no adverse effects of fields on reproduction have been established.

Farm animals, crops and bees are considered in Box 6.1.

6.4 Cell Studies

Studies of cell and tissue cultures in the laboratory are often described as in-vitro (in glass) while in-vivo (in live state) is applied to animal studies. A great many in-vitro studies have been carried out - some reporting effects of fields, many not, and the picture is complex and inconclusive. Most studies have used field strengths much greater than, or field conditions (pulses and modulated microwaves for instance) considerably different from, those which are found in the domestic environment or work place. These conditions often appear to be quite arbitrary and make interpretation of the significance of the various biological experiments difficult. Furthermore, it is not possible to predict, on the basis of observations on cell cultures, whether similar effects will occur in animals or people, still less whether these effects would have any implications for health. Whole organisms have control and repair mechanisms, which, in most cases, are lacking in cell cultures.

Some effects reported appear to occur only within particular ranges or 'windows' of frequency, time or field strength such that 'more' does not produce a greater effect. No specific windows have yet been confirmed. Static magnetic fields comparable to that of the earth have also been reported to influence some cell experiments.

It is important not to place too much emphasis on the result of an individual scientific study, however convincing it may appear to be. Only when it has been replicated in several different laboratories and fitted into the current

peut devenir une part acceptée de la science. Peu d'entre les nombreux effets de champs à très basse fréquence trouvés in-vitro ont été reproduits de façon indépendante. Il y a cependant un consensus général sur un point, à savoir que ces champs ne sont pas mutagènes, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas initiateurs de cancers. Une propriété des agents (telles les radiations ionisantes) qui initient un cancer est leur capacité à produire des modifications dans le matériel génétique de la cellule, soit sous forme d'un dommage visible aux chromosomes, soit de mutations génétiques. Les études de laboratoires en champs électrique ou magnétique n'ont pas établi de tels effets. L'hypothèse testée est que ces champs peuvent accélérer ou promouvoir le développement de cancers de cellules, qui par ailleurs sont ou sont devenues prédisposées au cancer.

6.4.1 Mécanismes d'interaction. Les champs électriques et magnétiques à fréquence industrielle en milieu habituel sont incapables de briser des molécules par ionisation ou de produire un échauffement significatif dans les tissus. Le seul mécanisme établi d'une action de ces champs passe par les courants induits. Quand ceux-ci sont suffisamment intenses, ils peuvent stimuler les cellules des nerfs et des muscles, par exemple. D'autres mécanismes ont été suggérés, principalement centrés sur des effets à la surface des cellules ou sur le transport des ions, notamment de calcium, qui peuvent agir comme messagers biochimiques à travers les membranes cellulaires. Plusieurs explications théoriques ont été proposées, et il semble concevable que plusieurs mécanismes puissent exister. Cependant, aucune théorie complète et expérimentalement confirmée n'a jusqu'à présent été proposée.

6.5 Le point international

A plusieurs reprises, la question d'effets possibles sur la santé des champs électriques et magnétiques à très basse fréquence a fait l'objet d'une mise au point par des organismes internationaux. Leurs conclusions ont un poids considérable, car elles sont considérées comme l'opinion de groupes d'experts plutôt que comme les vues de personnes individuelles. Des extraits des conclusions de trois de tels organismes sont donnés ci-dessous. De nombreux organismes scientifiques nationaux ayant également étudié la question sont arrivés à des conclusions similaires.

understanding does it become an accepted part of science. Few of the many reported in-vitro effects of extremely-low-frequency fields have been independently replicated. There is, however, general consensus on one point - that these fields are not mutagenic, that is they are not initiators of cancer. A characteristic of agents (such as ionizing radiation) which initiate cancer is their ability to produce changes in the genetic material of the cell, either visible damage to chromosomes or genetic mutations.

Laboratory studies with electric and magnetic fields have not established such effects. The hypothesis being tested is that these fields might accelerate or promote the development of cancers in cells which are or have become otherwise predisposed to cancer.

6.4.1 Interaction mechanisms. Environmental power-frequency electric and magnetic fields are incapable of disrupting molecules by ionization or of causing any significant heating in tissue. The only established mechanisms of action of these fields is via induced currents. When large enough, these currents can stimulate nerve and muscle cells, for example. Other mechanisms have been suggested and these mainly centre on effects at the cell surface or on the transport of ions, especially calcium which can act as a biochemical 'messenger' across the cell membrane. Several theoretical explanations have been proposed, and it seems conceivable that more than one mechanism may exist. However, no comprehensive and experimentally confirmed theory has yet been proposed.

6.5 International Reviews

From time to time the question of possible effects on health of extremely-low-frequency electric and magnetic fields is reviewed by some international body. The findings carry considerable weight since they are the considered judgments of groups of experts rather than the views of individuals. Excerpts from the conclusions of three such bodies are given below. Many national scientific bodies which have also reviewed this question have come to similar conclusions.

Encart 6.1

Recherches sur élevage et cultures

Plusieurs études de grande ampleur ont été effectuées sur du bétail vivant sous ou à proximité de lignes à haute tension (Fig.6.4). Aucun effet significatif sur la fécondité, la croissance, ou la production de lait n'a été observé. Plusieurs études ont également montré que les champs des lignes n'affectent pas la croissance de cultures et d'autres types de végétation. Les pointes de branches d'arbres poussant près des conducteurs peuvent être endommagées par des décharges couronne induites par des champs intenses, mais la croissance et la vie des arbres ne sont pas affectées.

Les champs électriques intenses, autour de ruches d'abeilles installées près de grandes lignes de transport, peuvent induire des tensions à l'intérieur, et affecter le comportement des abeilles et la production de miel. Ce problème peut être évité en écartant un peu les ruches de la ligne, ou en les recouvrant d'un grillage métallique mis à la terre.

Box 6.1

Farm Investigations

Several large investigations have been carried out on livestock living under and near high-voltage power lines (Figure 6.4). No significant effects on fertility, growth or milk production have been found. Various field studies have also shown that power-line fields do not affect the growth of crops and other low-growing vegetation. The tips of tree branches allowed to grow near the conductors can be damaged by the corona discharge induced by strong electric fields, although overall tree growth and survival appear unaffected.

Strong electric fields acting on beehives beneath large power lines may induce internal voltages which affect bee behaviour and honey production. The problem can be avoided by moving the hives a little to the side of the line or by covering the hive with wire mesh connected to the ground.

6.5.1 Organisation Mondiale de la Santé. En 1989, l'OMS publiait la deuxième édition de son livre "Protection contre les radiations non-ionisantes". Les conclusions du chapitre sur les champs électriques et magnétiques à très basse fréquence se terminent avec ce paragraphe:

"L'exposition aux champs électriques et magnétiques à très basse fréquence produit des effets biologiques. Cependant, à l'exception de champs assez intenses pour induire des densités de courants supérieures au seuil de stimulation des tissus nerveux, il n'y a pas consensus pour décider si ces effets constituent ou non un risque pour la santé de l'homme. Les données sur l'homme provenant d'études épidémiologiques, y inclus les effets cités sur la promotion des cancers, les malformations congénitales, la reproduction et la santé générale, et bien que certains effets néfastes sur la santé aient été suggérés, ne sont pas concluantes."

6.5.2 Association Internationale pour la Protection contre les Radiations. En 1990, le Comité International pour les Radiations Non-ionisantes de l'IRPA publiait ses "Directives provisoires sur les limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques à 50/60 Hz". Les principales conclusions sont:

"Les limites d'exposition sont basées sur des effets établis ou prédictibles des effets d'une exposition aux champs à 50/60 Hz. Bien que certaines études épidémiologiques suggèrent une association entre l'exposition à des champs à 50/60 Hz et cancer, d'autres aucunement. Non seulement cette association n'est pas prouvée, mais les données actuelles ne fournissent aucune base d'évaluation d'un risque pour la santé, utilisable pour développer des limites d'exposition."

Les études de laboratoire en cours testent l'hypothèse que les champs à 50/60 Hz agiraient comme, ou avec, un promoteur de cancer. Ces études restent de nature exploratoire et n'ont établi aucun risque pour la santé de l'homme venant d'une exposition à ces champs.

Ces limites ont été développées à partir des connaissances actuelles, mais elles sont toujours du domaine de la recherche où se posent des questions qui doivent être abordées. Des efforts de recherche restent nécessaires afin de compléter nos connaissances des conséquences sur la santé, s'il y en a, d'une exposition continue de longue durée de l'homme à des champs à 50/60 Hz de faible niveau."

6.5.3 CIGRE. En 1991, le Groupe d'Experts de la CIGRE, qui est composé principalement de médecins et de biologistes, et qui a été créé pour l'examen des questions de champs et de santé, publiait une mise au point sur "L'état actuel de la recherche sur les champs électriques et magnétiques générés par le courant alternatif et leur rapport avec le cancer".

Leur principale conclusion était:

"En résumé, l'opinion du Groupe d'Experts de la CIGRE est que rien ne permet d'affirmer que l'exposition aux champs électriques et magnétiques générés par le courant alternatif soit une cause de cancer, et que la question de savoir s'il y a un rapport entre les deux reste posée."

Il s'agit cependant d'un problème suffisamment important pour que les recherches se poursuivent."

6.5.1 World Health Organization. In 1989 the WHO published the second edition of its book 'Nonionizing Radiation Protection'. The conclusions to the chapter on electric and magnetic fields at extremely low frequencies end with the paragraph:

'Exposure to ELF electric and magnetic fields does produce biological effects. However, except for fields strong enough to induce current densities above the threshold for the stimulation of nerve tissues, there is no consensus as to whether these effects constitute a hazard to human health. Human data from epidemiological studies, including reported effects on cancer promotion, congenital malformations, reproductive performance and general health, though somewhat suggestive of adverse health effects, are not conclusive.'

6.5.2 International Radiation Protection Association. In 1990 the International Non-ionizing Radiation Committee of IRPA published its 'Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields'. The principal concluding remarks are:

'The exposure limits are based on established or predicted effects of exposure to 50/60 Hz fields. Although some epidemiological studies suggest an association between exposure to 50/60 Hz fields and cancer, others do not. Not only is this association not proven, but present data do not provide any basis for health risk assessment useful for the development of exposure limits.'

'Current laboratory studies are testing the hypothesis that 50/60 Hz fields may act as, or with, a cancer promoter. These studies are still exploratory in nature and have not established any human health risk from exposure to these fields.'

'These limits have been developed from present knowledge, but there are still areas of research where questions have been raised that need to be addressed. A major research effort to supplement our knowledge on the health consequences, if any, of long-term continuous exposure of humans to low-level 50/60 Hz fields is required.'

6.5.3 CIGRE. In 1991, the CIGRE Expert Group, which consists mainly of doctors and biologists and which was set up to consider the fields and health question, published a statement on the 'Current Status of Research on Power-Frequency Electric and Magnetic Fields and Cancer'.

Their principal conclusion was:

'In summary, the view of the CIGRE Expert Group is that the evidence for exposure to power-frequency electric and magnetic fields as a cause of cancer is not persuasive, and that any such relationship remains questionable.'

'The matter is of sufficient importance, however, to deserve continued research.'

6.6 Directives d'exposition

Toute directive pour restreindre l'exposition de personnes à un agent exige un fondement solide. La seule interaction certaine entre un champ électrique ou magnétique et une personne est l'induction d'un courant dans le corps (cf § 4.3.1 et 5.2). Des champs électriques intenses peuvent aussi causer des effets perceptibles, tels que vibration des poils et petits chocs au moment de toucher d'autres objets (cf § 4.5 et 4.4.1). Dans les Critères sur l'Environnement pour la Santé, relatifs aux champs magnétiques, l'Organisation Mondiale pour la Santé (1987) indiquait qu'au-dessous d'une densité de courant induit de 10 mA/m², seuls des effets biologiques mineurs ont été rapportés. Notons que les densités de courants naturels circulant dans le corps, causés par exemple par l'action des muscles cardiaques, sont d'une amplitude similaire.

Ces facteurs constituent la base des directives de l'Association Internationale pour la Protection contre les Radiations (les seules au niveau international à ce jour), dans lesquelles le critère fondamental est la limitation à une valeur inférieure à 10 mA/m² des densités de courants induits dans la tête et dans le tronc, au cours d'une exposition prolongée à des champs électriques et magnétiques à 50/60 Hz. Les directives pour les limites des intensités des champs électriques et magnétiques sont ensuite déterminées à partir de cette densité de courant, tant pour l'exposition professionnelle que du public général et tant en exposition de courte durée que permanente. Ces déterminations incluent divers facteurs de réduction, quelque peu arbitraires, et pour les champs électriques, prennent en compte les effets perceptibles. Les recommandations de l'I.R.P.A. sont données dans l'encart 6.2.



Figure 6.3. : Des enregistreurs portables sont maintenant utilisés afin d'obtenir une meilleure compréhension et une meilleure évaluation de l'exposition individuelle aux champs magnétiques. (Photographie : NGC-RU)

Figure 6.3: Personal monitors are now being used to provide a better understanding and assessment of an individual's exposure to magnetic fields. (Photograph: NGC-UK)

6.6 Exposure Guidelines

Any guideline for restricting the exposure of people to some agent requires a sound basis. The only certain interaction of power-frequency electric and magnetic fields with people is the induction of currents in the body (see 4.3.1 and 5.2). Strong electric fields may also cause perceptible effects such as hair vibration and small shocks when touching other objects (see 4.5 and 4.4.1). In its Environmental Health Criteria review of magnetic fields, the World Health Organization (1987) stated that up to an induced current density of 10 mA/m² only minor biological effects have been reported. Also, naturally occurring current densities within the body, caused for example by the action of heart muscles, are of a similar value.

The above factors form the basis of the International Radiation Protection Association's guidelines (the only international ones to date) for which the basic criterion is to limit current densities induced in the head and trunk by continuous exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields to no more than about 10 mA/m². Guideline limits for electric and magnetic field strengths are then derived from this current density for both occupational and general public exposure and for short term and continuous exposure. The derivations incorporate various somewhat arbitrary reduction factors and, for electric fields, take note of perceptible effects. The IRPA recommendations are given in Box 6.2.



Figure 6.4. : Ces moutons sont utilisés pour rechercher si les champs électriques et magnétiques ont un effet sur des hormones du sang.

(Photographie : BPA-USA)

Figure 6.4: These sheep are being used in an investigation of whether electric and magnetic fields have any effects on hormones in their blood. (Photograph: BPA-USA)

6.7 Le consensus actuel.

Le consensus entre les organisations internationales citées en 6.5 indique qu'aucun effet sur la santé, dû aux champs électriques et magnétiques à fréquence industrielle aux intensités normalement rencontrées, n'a pu être établi. Les preuves de tels effets sont ténues et souvent contradictoires, et en l'absence d'un quelconque mécanisme plausible d'un effet défavorable sur la santé, elles restent non convaincantes.

Néanmoins, ces champs sont omniprésents, et les travaux antérieurs posent des questions qui nécessitent une réponse. La poursuite des recherches reste donc essentielle pour clarifier le problème, et plusieurs années vont encore être nécessaires, pendant lesquelles le débat scientifique continuera.

6.7 Present Consensus

The consensus of the international bodies quoted in 6.5 is that no effects on health from power-frequency electric and magnetic fields as normally encountered have been established. The evidence for such effects is tenuous and often contradictory and, in the absence of any plausible mechanism for an adverse effect on health, remains unconvincing.

However, these fields are widespread and past work raises questions which need to be answered. Further research is thus essential to clarify the issue, though it will necessarily take some years yet during which the process of scientific debate will continue.

Encart 6.2

Directives de l'IRPA

Limites d'exposition aux champs électriques et magnétiques à 50/60 Hz		
Type d'exposition	Champ élect. kV/m (eff)	Ind. magn. mT (eff)
Professionnel		
Journ.Trav.	10	0,5
Court terme	30 ^a	5 ^b
Membres	---	25
Public		
Permanent ^c	5	0,1
Court terme ^d	10	1

- ^a La durée de l'exposition à des champs compris entre 10 et 20 kV/m peut être calculée par la formule $t = 80/E$, où t est la durée en heures par journée de travail et E l'intensité du champ électrique en kV/m.
- ^b La durée d'exposition maximale est de 2 heures par journée de travail.
- ^c Cette restriction s'applique à des espaces extérieurs, où on peut raisonnablement s'attendre à ce que le public séjourne pendant une partie substantielle de la journée, tels qu'aires de loisir, lieux de réunion, etc.
- ^d Ces valeurs peuvent être dépassées pendant quelques minutes par jour, à condition que des mesures soient prises pour éviter des effets indirects de couplage.

Box 6.2

IRPA Guidelines

Limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields		
Exposure characteristics	Electric field strength kV m ⁻¹ (rms)	Magnetic flux density mT (rms)
Occupational		
Whole working day	10	0.5
Short term	30 ^a	5 ^b
For limbs	-	25
General public		
Up to 24 h d ⁻¹ ^c	5	0.1
Few hours per day ^d	10	1

- ^a The duration of exposure to fields between 10 and 30 kV m⁻¹ may be calculated from the formula $t \leq 80/E$, where t is the duration in hours per work day and E is the electric field strength in kV m⁻¹.
- ^b Maximum exposure duration is 2 h per work day.
- ^c This restriction applies to open spaces in which members of the general public might reasonably be expected to spend a substantial part of the day, such as recreational areas, meeting grounds, and the like.
- ^d These values can be exceeded for a few minutes per day provided precautions are taken to prevent indirect coupling effects.

7. EFFET DE COURONNE, DÉCHARGES DE SURFACE, MICROARCS

L'effet de couronne, décrit dans ce qui suit, peut générer du bruit électro-magnétique (qui peut perturber la réception radio et télévision - voir section 8), du bruit acoustique (section 9), et des traces d'ozone et d'ions (section 10). Certaines autres formes de décharges et de microarcs peuvent également produire des perturbations en radio et télévision.

7.1 Effet de couronne.

Des champs électriques intenses peuvent exister à la surface des conducteurs et d'autres composants sous tension de systèmes à haute tension. Dans certaines circonstances, ceci conduit à une ionisation et à des décharges dans l'air au voisinage immédiat des conducteurs. Ce phénomène est connu sous le nom d'«effet de couronne» (Fig.7.1). Les feux de St-Elme mentionnés dans la section 3.2 sont un exemple d'effet de couronne naturel.

La présence à la surface des conducteurs d'aspérités, même petites, telles que gouttes d'eau, flocons de neige, insectes, ou éraflures du métal, produit un fort renforcement local du champ. En conséquence, l'activité couronne varie considérablement avec l'état de surface et les conditions atmosphériques (voir encart 7.1).

L'effet de couronne sur les conducteurs est minimisé par l'emploi soit de gros conducteurs, soit de faisceaux (deux ou plusieurs sous-conducteurs légèrement écartés - voir Fig.2.2). D'autre part, les différentes phases ne doivent pas être trop proches l'une de l'autre, ni trop proches du sol. Des arrangements particuliers des phases dans le cas de lignes à deux terres, ou l'emploi de faisceaux non-symétriques, peuvent aussi réduire l'activité couronne. En ce qui concerne les pièces métalliques, telles que les pinces, éléments de suspension etc, l'activité couronne est limitée par l'emploi de surfaces polies, de courbures appropriées, et au moyen d'écrans métalliques.

Il est impossible d'éliminer entièrement l'effet de couronne; cependant, cet effet n'existe normalement pas sur les réseaux de tensions inférieures à environ 200 kV.

7.2 Décharges sur les isolateurs.

Les isolateurs sont indispensables pour suspendre les conducteurs sous tension aux poteaux ou aux pylônes des lignes. Les isolateurs sont constitués d'un matériau isolant, souvent de la porcelaine ou du verre, et forment une chaîne de disques; on les appelle «isolateurs capot-tige». Dans certaines conditions, des décharges peuvent se produire à leur surface, notamment lorsqu'ils sont pollués et mouillés.

7.3 Microarcs.

Des mauvais contacts entre éléments à haute tension peuvent produire des petites étincelles dans les interstices, en particulier par temps sec et venteux (l'humidité tend à «court-circuiter» ces interstices). Ce phénomène perturbateur très occasionnel, peut presque toujours être éliminé en réarrangeant ou en remplaçant l'élément défectueux.

7. CORONA, SURFACE DISCHARGES AND SPARKING

Corona, described below, can generate high-frequency electromagnetic noise (which may interfere with radio and television reception - see Section 8), audible noise (Section 9) and traces of ozone and ions (Section 10). Certain other forms of discharge and sparking can also give rise to radio and television interference.

7.1 Corona

Intense electric fields may occur at the surfaces of conductors and other 'live' components of high-voltage systems. In some circumstances, this leads to ionization and electrical breakdown of the air immediately surrounding the conductor. This effect is known as a corona discharge, or simply 'corona' (see Figure 7.1). The St. Elmo's fire referred to in Section 3.2 is an example of naturally occurring corona.

The presence on the conductor surface of even small protrusions, such as water drops, snow flakes, insects, or the raised edges of nicks in the metal, produce strong local enhancements of the field. The corona activity consequently varies markedly with surface and atmospheric conditions (see Box 7.1).

Corona on conductors is minimized by using either large conductors or bundled conductors (conductors made up of two or more sub-conductors spaced apart a little - see Figure 2.2) and also by not having the different phases too close together or to the ground. Particular phase arrangements for double-circuit lines or the use of non-symmetrical bundles can also reduce corona generation. As regards the metal fittings, such as clamps, suspension links and the like, corona is controlled by using smooth, suitably curved surfaces and by means of screening devices.

It is not possible to eliminate corona altogether; however, it is not normally encountered on systems below about 200 kV.

7.2 Discharges on Insulators

Insulators are needed to support the live conductors of overhead power lines from the poles or towers of the line. The insulators consist of some electrically insulating material, often porcelain or glass, arranged in a series of interconnected discs known as cap-and-pin units. Under certain conditions, discharges may occur on the surface of the insulators, especially when they are polluted and wet.

7.3 Sparking

Bad contact between components at high voltage can lead to sparking across the gaps, especially in dry, windy weather. (Dampness tends to 'short circuit' the small gaps.) Such disturbances, which are not common, can almost always be eliminated by adjustment or replacement of the offending component.

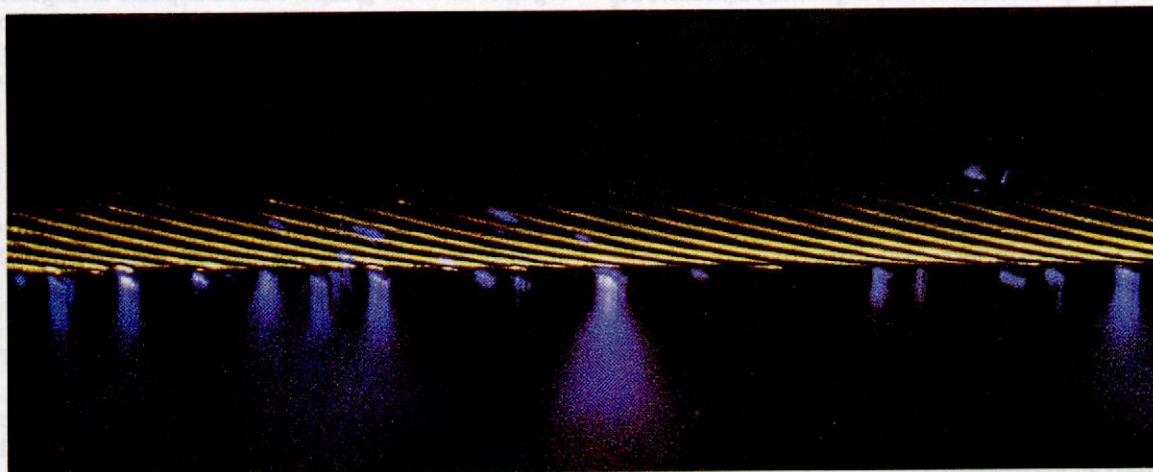
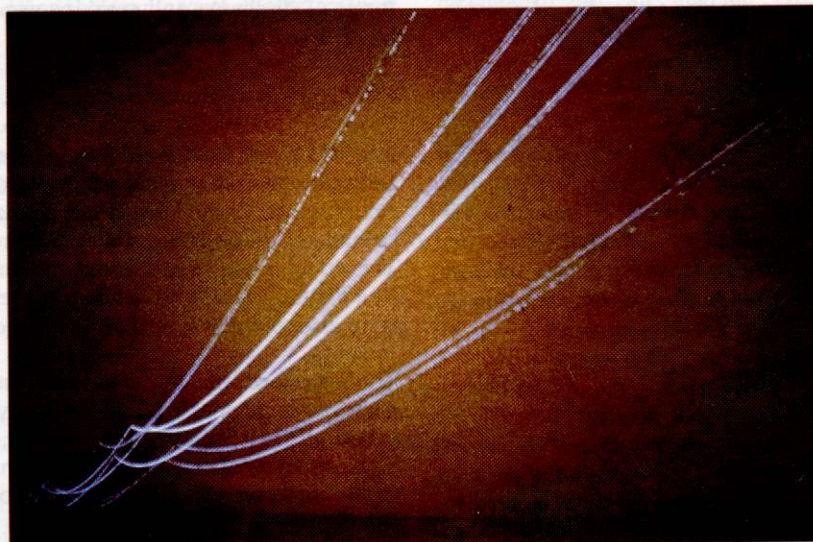


Figure 7.1. : Des petites décharges électriques (effet de couronne) peuvent parfois apparaître sur les conducteurs des lignes à haute tension. Sur ces photographies, elles sont vues à faible distance d'un conducteur, ainsi que sur une ligne par conditions météorologiques exceptionnelles (temps de pose de longue durée). (Photographies : EDF-France, Vattenfall-Suède)

Figure 7.1: Small electrical discharges ('corona') may sometimes occur on high-voltage transmission lines. Here they are seen in close-up on a conductor and also on a line in exceptional weather conditions (recorded with a long exposure). (Photographs : EDF- France, Vattenfall-Sweden)

Encart 7.1

Influence des conditions atmosphériques sur l'effet de couronne

Par temps sec, les décharges couronne sont relativement peu nombreuses, de sorte que les perturbations ou le bruit sont généralement faibles et non gênants. Dans les rares cas où un effet de couronne notable apparaît par temps sec, les investigations révèlent qu'il est dû à une défectuosité locale du conducteur, qui, une fois rectifiée, élimine la difficulté, ou à des dépôts inhabituels de poussières ou d'insectes, qui seront lavés par les prochaines pluies fortes. La graisse (utilisée pour la prévention de corrosion interne), qui peut exsuder des conducteurs, peut alors exacerber cette situation.

Par temps pluvieux, de nombreuses gouttes d'eau s'accumulent et pendent sous les conducteurs. Le champ électrique est renforcé autour de ces gouttes, et il en résulte une forte augmentation du nombre de décharges couronne. De plus, des microarcs se produisent entre le conducteur et les gouttes, juste avant leur impact. C'est pourquoi l'activité couronne dépend fortement de l'intensité de la pluie.

Par temps neigeux, les conditions sont généralement semblables à celles sous pluie. En effet, si la température des conducteurs est au-dessus du point de congélation, comme c'est probablement le cas à cause de l'échauffement dû au courant circulant dans ceux-ci, la neige fond en gouttes d'eau qui se rassemblent sous les conducteurs.

Par brouillard épais, de l'eau peut se condenser à la surface des conducteurs, dans la mesure où leur température n'est pas trop élevée.

Pendant les premiers mois de mise en service de nouveaux conducteurs, l'activité couronne est souvent légèrement supérieure au niveau prévu ou définitif. La raison en est que la surface des conducteurs met un certain temps pour «vieillir» et ainsi pour permettre aux gouttes d'eau de s'étaler sur elle. De même, de la saleté du début ou des éraflures seront lavées ou érodées au cours de cette période. C'est pourquoi il est nécessaire d'installer de nouveaux conducteurs avec beaucoup de soins, afin de réduire la contamination et les défauts de surface.

Box 7.1

Influence of Weather Conditions on Corona

In dry weather the corona discharges are relatively few in number so that any interference or noise is generally weak and of no concern. In the few cases in which noticeable corona occurs in dry weather, investigations usually reveal that it is caused by a local conductor defect, which when rectified eliminates the difficulty, or unusual deposits of dust or insects which will be washed off by the next heavy rain. Grease (used for internal corrosion prevention) exuding from within the conductor may exacerbate this situation.

In wet weather many water droplets collect on the underside of the conductors. The electric field at the drops is enhanced, resulting in a large increase in the number of corona discharges. Discharges can also occur between a conductor and incident raindrops just before they impact. The corona activity, therefore, depends markedly on the intensity of the rain.

In snow the conditions are usually similar to those for rain. If the temperature of the conductors is above freezing point, as is likely because of the heating caused by the current flowing in them, the snow flakes melt to water droplets which collect on the underside of the conductor.

In thick fog also, water can condense on the surface of the conductors provided that their temperatures are not too high.

During the few months after new conductors are first energized, the corona activity is often slightly greater than the expected or ultimate level. This is because it takes time for the surface of the conductors to age and so permit water drops to flow freely over them. Also, any initial dirt or surface abrasions get washed off or eroded away during this time. Care is, however, necessary when installing new conductors to minimize surface contamination and damage.

8. PERTURBATIONS EN RADIO ET TÉLÉVISION

8.1 Introduction

Une perturbation radio est l'effet que produit un bruit radio-électrique superposé à un signal utile à l'intérieur du spectre des fréquences radiophoniques. Une perturbation télévision se produit lorsque le bruit affecte la gamme des fréquences utilisées pour la télévision. Le bruit radio-électrique perturbe principalement les systèmes à modulation d'amplitude (radio AM et signaux vidéo en télévision), alors que les autres formes de modulation (par ex. modulation de fréquence FM) utilisées en VHF et pour le son TV sont généralement beaucoup moins perturbées.

Divers phénomènes naturels (décharges atmosphériques, activité des taches solaires par ex.) et nombre d'appareils (électroménagers, allumage auto, systèmes électroniques), peuvent aussi produire des perturbations. Les lignes électriques peuvent perturber du fait de l'effet de couronne, des décharges sur les isolateurs, et des microarcs, comme indiqué à la section 7. Les perturbations «passives» seront examinées dans la section 8.4.

8.2 Caractéristiques des perturbations radio.

Les trois phénomènes indiqués ci-dessus produisent chacun des effets perturbateurs différents (s'agissant de parasites radioélectriques), car les petites impulsions de courant générées par l'ionisation locale présentent différentes formes, amplitudes et fréquences de répétition. Ce sont ces impulsions, qui sont en partie injectées dans la ligne, qui sont responsables des perturbations. Celles-ci sont donc caractérisées par différents spectres de fréquence, différents modes de propagation (guidée le long de la ligne ou directement rayonnée), et par différentes variations statistiques (liées aux conditions ambiantes variables), selon le mécanisme source. Le niveau perturbateur s'exprime généralement en décibels (dB), dont la définition est donnée dans l'encart 8.1.

8.2.1 Bruit d'effet de couronne. Ce bruit se caractérise par un spectre de fréquence ne s'étendant pas au-delà de quelques MHz, et par conséquent ne perturbe pas les fréquences TV. La figure 8.1 montre l'allure typique de tels spectres. Dans le seul cas de certaines lignes, où les conducteurs sont soumis à des champs électriques très intenses (supérieurs à environ 20 kV/cm,) et où les conditions atmosphériques sont défavorables (forte neige ou pluie), on a pu observer des perturbations en télévision, dans la bande 40-60 MHz.

Comme les fréquences considérées ici sont relativement basses, la propagation du bruit est principalement guidée par la ligne. Pour les longueurs usuelles des lignes, le niveau de bruit reste le même tout le long, et s'atténue latéralement suivant un profil, qui dépend de la configuration de la ligne et des caractéristiques du sol (propriétés électriques et relief). La figure 8.2 montre des exemples de profils.

Comme déjà indiqué, les perturbations produites dépendent fortement des conditions de surface des conducteurs, et en particulier de la présence de gouttes d'eau. Pour cette raison, il convient de représenter le niveau de bruit en termes statistiques, par exemple sous forme de courbes de distribution cumulatives, comme celles qu'illustre la figure 8.3, qui se réfère à une période annuelle d'observations. Ces courbes sont généralement identifiées par plusieurs valeurs caractéristiques de la courbe «tout-temps»: valeurs dépassées pendant 50 % du temps (niveau L50) et valeurs

8. RADIO AND TELEVISION INTERFERENCE

8.1 Introduction

Radio interference is any effect on the reception of a wanted radio signal due to an unwanted disturbance within the radio-frequency spectrum. Television interference is a special case of radio interference for disturbances affecting the frequency ranges used for television broadcasting. Radio interference is primarily of concern for amplitude-modulated systems (AM radio and television video signals) since other forms of modulation (such as frequency modulation (FM) used for VHF radio broadcasting and television audio signals) are generally much less affected by disturbances.

Several natural phenomena (lightning discharges and sun-spot activity, for example) and man-made devices (such as some electrical appliances, automobile ignition systems and electronic devices) may produce radio interference. Power lines may also lead to such interference because of corona, discharges on insulators and sparking as outlined in Section 7. 'Passive' interference is discussed in Section 8.4.

8.2 Characteristics of the Radio Interference

The three electrical phenomena just noted each lead to different effects in terms of radio interference (radio noise) because the small current pulses produced by the local ionization have differing shapes, amplitudes and repetition rates. It is these pulses, which are in part injected into the line, which give rise to the interference. The interference is thus characterized by different frequency spectra, different modes of propagation (guided along the conductors or directly radiated) and different statistical variations (because of varying ambient conditions) depending on the source. The expression of radio interference levels in terms of decibels (dB) is explained in Box 8.1.

8.2.1 Corona disturbances. These are characterized by frequency spectra that generally extend up to only a few MHz, and thus do not interfere with television frequencies. Typical spectra are shown in Figure 8.1. Only in certain cases for transmission lines operating at very high electric-field strengths on the conductors (higher than about 2 MV/m) under unfavourable atmospheric conditions (heavy snow or rain) has interference with television signals been experienced in the 40-60 MHz band.

Because of the relatively low frequencies involved, the propagation of the disturbance is mainly guided along the line. For typical lengths of lines, the disturbance is constant along them and is attenuated laterally according to a profile that depends on the line configuration and on the ground characteristics (electrical properties and shape). Such profiles are shown in Figure 8.2.

As already noted, the radio interference generated depends strongly on the surface condition of the conductors and in particular on the presence of water drops. For this reason it is appropriate to represent the interference level in statistical terms, for example in the form of cumulative distribution curves such as the ones indicated in Figure 8.3, which refer to an observation period of one year. These curves are generally identified by some characteristic values of the 'all-weather' curve, such as the value exceeded for 50% of the

dépassées pendant 5% du temps (niveau L5). Différents facteurs, tels que le champ électrique superficiel des conducteurs, leur état de surface, (neuf, vieilli, gras, etc), le climat local, influencent la plage de variation du niveau de bruit. Cependant, pour les lignes de conception usuelle et pour des climats moyens, les écarts entre L5 et L50 sont de l'ordre de 15 à 22 dB.

8.2.2 Décharges sur les isolateurs. Deux conditions principales peuvent être identifiées:

-Isolateurs propres à l'état sec ou mouillé, et isolateurs pollués à l'état sec. Dans ces cas, la plage des fréquences impliquées et les caractéristiques de propagation sont tout-à-fait semblables à celles de l'effet couronne des conducteurs. Dans le cas des lignes à haute tension, la distribution globale des perturbations dues aux chaînes d'isolateurs ne contribue pas de façon significative à la perturbation totale due à la ligne. Ceci parce qu'il n'y a généralement pas de difficultés à concevoir des chaînes d'isolateurs dont le niveau de bruit à l'état sec soit inférieur à celui produit par les conducteurs, et parce que l'augmentation du bruit des isolateurs lorsqu'ils sont mouillés est inférieure à celle du bruit des conducteurs.

-Isolateurs pollués et mouillés. Les impulsions dues aux arcs superficiels sont caractérisées par une raideur plus forte que celles dues à l'effet de couronne et aux autres types de décharges considérées jusqu'ici. Comme conséquence, les spectres de fréquence s'étendent vers des valeurs plus élevées, jusqu'à plusieurs dizaines de MHz, et donc affectent les bandes inférieures de télévision. A ces fréquences élevées, la propagation des perturbations est essentiellement rayonnée directement, elles n'ont donc qu'un effet local, dans un rayon de quelques centaines de mètres autour de l'isolateur. Il est difficile de remédier à ce phénomène, sauf à laver périodiquement les isolateurs (quand c'est possible), à utiliser des isolateurs de forme spéciale, ou par l'emploi d'isolateurs de caractéristiques spéciales (par ex. à base de polymères, revêtus de graisse, ou revêtus d'un émail semi-conducteur).

time (L50 level) and the value exceeded for 5% of the time (L5 level). Different factors, such as the electric field on the conductor, the local climate, the surface conditions of the conductors (new, aged, greased, and so on), influence the range of variation of the disturbance level. However, for lines of more usual design and for average climates, the differences between L5 and L50 are in the range 15 - 22 dB.

8.2.2 Discharges on insulators. Two main conditions can be identified:

- Clean insulators under dry or wet conditions and polluted insulators in dry conditions. In these cases the frequency ranges involved and the propagation characteristics are very similar to those for corona on conductors. For high-voltage transmission lines the overall distribution of the disturbance due to insulator strings usually does not contribute significantly to the total disturbance due to the line. This is because it is generally not difficult to design the insulator strings to have a disturbance in dry conditions lower than that produced by the conductors and because the increase of corona on insulators under wet conditions is lower than that on conductors.

- Polluted insulators under wet conditions. The pulses due to sparking on the surface are characterized by greater steepness than for corona and the other types of discharges already considered. As a consequence, the corresponding frequency spectra extend to higher values, up to some tens of MHz, therefore affecting the lower bands of television broadcasting. For these higher frequencies the propagation of the disturbance is mainly directly radiated and so has only a local effect within a radius of a few hundred metres around the insulator. This phenomenon is difficult to remedy but may be controlled by periodic washing (where possible) of the insulator, by using special insulator shapes, or by using insulators with special characteristics (polymer-based, grease-coated, semiconductor-glazed, for example).

Encart 8.1

Mesure des perturbations radioélectriques

Le niveau des perturbations radioélectriques est généralement donné en champ électrique à haute fréquence (E), exprimé en décibels (dB). Il représente le rapport entre la valeur du champ considéré (E) et une valeur de référence normalisée (E_0). On emploie une échelle logarithmique, de telle sorte que $E(\text{dB}) = 20 \log (E/E_0)$, avec $E_0 = 1 \mu\text{V/m}$. Un rapport inférieur à l'unité donne une valeur négative en dB.

La même définition d'un rapport (niveau relatif) exprimé en dB est utilisée dans les figures de ce paragraphe pour illustrer, par exemple, les variations du niveau perturbateur en fonction de la fréquence ou de la distance.

Le bruit audible est également souvent exprimé d'une façon similaire (voir encart 9.1).

Box 8.1

Radio Interference Measurements

Levels of radio interference are usually given in terms of the high-frequency electric field E expressed in decibels (dB) which represent the ratio of the level of interest (E) to some standard reference level (E_0). A logarithmic scale is used so that E in dB = $20 \log (E/E_0)$, with $E_0 = 1 \mu\text{V/m}$. Ratios less than one give negative dB values.

The same idea of ratios or relative levels expressed in dB is used in the Figures in this Section to show, for example, the variations of radio noise with frequency and distance.

Audible noise is also often expressed in a similar way (see Box 9.1).

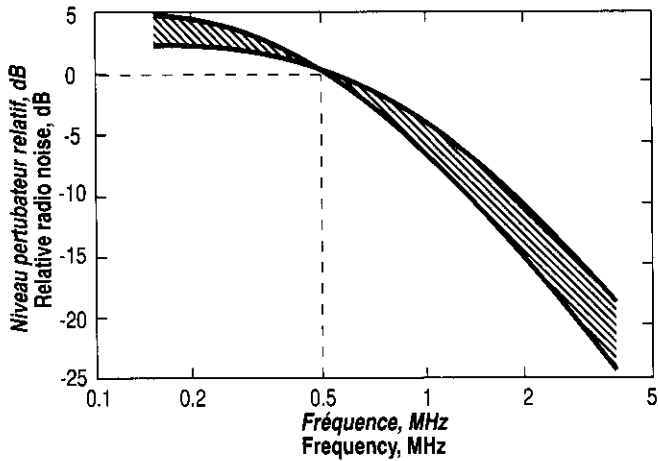


Figure 8.1 : Le niveau des perturbations radioélectriques produites par l'effet de couronne varie généralement en fonction de la fréquence comme montré ici. La dispersion prend en compte des spectres légèrement différents, qui s'appliquent à diverses configurations de lignes. Le niveau perturbateur est exprimé en dB (cf. encart 8.1), et la fréquence de référence est de 0,5 MHz.

Figure 8.1: The radio noise produced by corona varies with frequency generally as shown here. The spread indicated takes account of the slightly different spectra which apply for different line configurations. The radio noise is expressed in dB (see Box 8.1) relative to that at the reference frequency of 0.5 MHz.

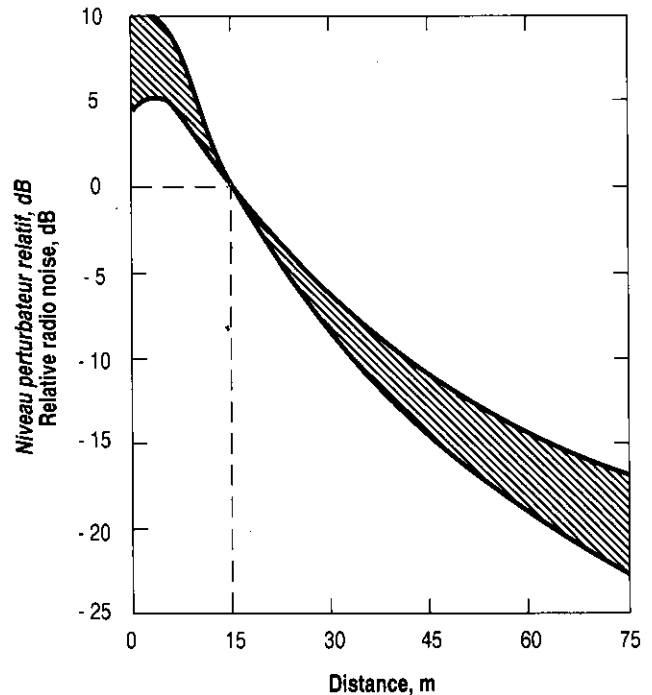


Figure 8.2 : Le niveau des perturbations radioélectriques produites par l'effet de couronne décroît rapidement lorsqu'on s'éloigne de la ligne. La dispersion des profils prend en compte diverses configurations de lignes et diverses caractéristiques des sols. Le niveau perturbateur (à 0,5 MHz) est exprimé en dB, et le point de référence est situé à 15 m de la projection au sol du conducteur extérieur.

Figure 8.2: The radio noise produced by corona falls quite rapidly as the distance from the line increases. The spread of profiles indicated takes account of different line configurations and ground characteristics. The radio noise (at 0.5 MHz) is expressed in dB relative to that at 15 m (measured from a point directly under the outer phase conductor).

8.2.3 Microarcs de mauvais contacts. Ce problème n'existe pratiquement que pour les réseaux à moyenne et à basse tensions. Les caractéristiques du spectre et de la propagation sont similaires à celles des perturbations dues aux arcs sur les isolateurs mouillés et pollués. Cependant, ces perturbations peuvent toujours être évitées par une conception, une mise en place et un entretien corrects.

8.2.3 Sparking at bad contacts. This problem is largely confined to medium-voltage and low-voltage systems. The spectral and propagation characteristics are similar to those of interference from sparking on the surface of wet polluted insulators. However, these disturbances can almost always be avoided by good design, installation and maintenance.

8.3 Qualité de la réception en radio et en télévision

8.3 Quality of the Radio and Television Reception

Le degré de gêne causée par le bruit radioélectrique est déterminé par ce que l'on désigne par «rapport signal/bruit» au niveau du récepteur. Lorsque l'on établit des limites pour les émissions de perturbations en radio ou en télévision, dues aux lignes, l'intensité minimale du signal qui doit être protégé doit être déterminée. Ceci est laissé au soin des administrations nationales concernées, les normes internationales ne donnant que des directives sur la méthode d'établissement de ces limites (voir Publication CISPR 18.2).

The degree of annoyance caused by radio noise is determined by the so-called 'signal-to-noise ratio' at the receiving installation. When establishing limits for the emission of radio and television interference from power lines, the minimum signal strength to be protected has to be determined. This is left to the relevant national authorities, with the international standards giving guidance only on how to establish limits (see CISPR Publication 18.2).

Pour les perturbations dues à l'effet de couronne et pour les décharges sur les isolateurs à l'état propre, sec ou mouillé, ainsi que pour les isolateurs pollués mais secs, différentes échelles de dégradation de la réception AM ont été proposées, en fonction du rapport signal/bruit. L'échelle établie par la CIGRE est donnée dans le tableau suivant. Ce tableau indique qu'un rapport de 30 dB garantit une bonne réception.

For corona disturbances and for discharges on clean insulators in dry or wet conditions or on polluted insulators in dry conditions, different scales for the degradation of AM radio reception as a function of the signal-to-noise ratio have been reported. The scale set up by CIGRE is given in the following Table. It indicates that a ratio of 30 dB is adequate for good reception.

Qualité de la réception	Rapport Signal/bruit (dB)
Bruit non audible	30
Bruit juste perceptible	24
Bruit audible, parole bien reçue	18
Inacceptable pour la musique, parole intelligible	12
Parole compréhensible avec effort	6
Parole incompréhensible, complètement noyée dans le bruit	0

Quality of reception	Signal-to-noise ratio (dB)
Interference not audible	30
Interference just perceptible	24
Interference audible, but speech perfectly received	18
Unacceptable for music, but speech intelligible	12
Speech understandable only with severe concentration	6
Spoken word unintelligible; noise swamps speech totally	0

En se basant sur un choix acceptable du rapport signal/bruit, sur une valeur minimale spécifiée du signal utile, et en tenant compte du profil latéral convenable du bruit radioélectrique, il est possible de définir un couloir, centré sur la ligne, à l'intérieur duquel la réception ne sera pas satisfaisante pendant un pourcentage spécifié du temps (Fig.8.4). La largeur de ce couloir dépend du signal minimal spécifié et de la conception de la ligne. Le corridor qui en résultera dérive ainsi de considérations techniques et économiques, dans lesquelles les coûts d'une conception améliorée de la ligne et d'un renforcement du signal radio doivent être comparés.

On the basis of a chosen acceptable signal-to-noise ratio, a specified minimum signal to be received, and the appropriate lateral profile of the radio noise, a corridor, centred on the power line, may be defined within which reception will be unsatisfactory for a specified percentage of the time (Figure 8.4). The width of this corridor depends, in particular, on the specified minimum signal and on the line design. Thus, the resulting corridor width derives from technical and economic considerations in which the costs of an improved line design and of an increase in the broadcast signal have to be compared.

En ce qui concerne les perturbations dues aux microarcs de mauvais contacts, ou de décharges à la surface d'isolateurs pollués (qui interfèrent aussi avec les fréquences AM de télévision), la détermination d'une échelle de dégradation de la qualité de réception est plus difficile. Les résultats de divers tests indiquent qu'un rapport signal/bruit de 40 dB devrait permettre une réception satisfaisante.

For disturbances generated by sparking at bad contacts or discharges on the surface of polluted insulators (which interfere with television AM frequencies) the determination of a scale of the degradation of the quality of reception is more difficult. The results of the tests so far performed indicate that a signal-to-noise ratio of 40 dB should be adequate for satisfactory reception.

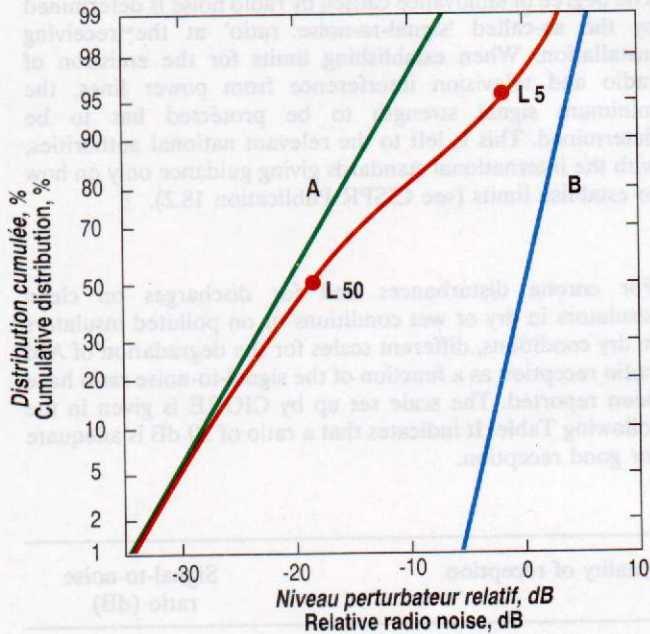


Figure 8.3. : Les courbes de distribution cumulée telles que montrées ici sont utilisées pour déterminer la probabilité d'un niveau donné. Si l'on se donne un certain niveau, on peut déterminer la proportion du temps (en %) pendant lequel le niveau réel reste inférieur à ce niveau. La courbe au centre est relative à l'ensemble de toutes les conditions météorologiques, et fournit les niveaux dépassés pendant 50% et 5% du temps (L50 et L5, voir le texte); les deux autres courbes sont relatives au «beau temps» (A) et aux «fortes pluies» (B).

Figure 8.3: Cumulative distribution curves as shown are used to describe the level of radio noise likely to be encountered. Having chosen a particular noise level, the fraction of time (as a %) for which the noise will be less than this level can be determined. The central curve shown is for all weathers taken together and has the 50% and 5% exceedance levels (L50 and L5 - see text) marked; the other two lines are for fair weather (A) and heavy rain (B).

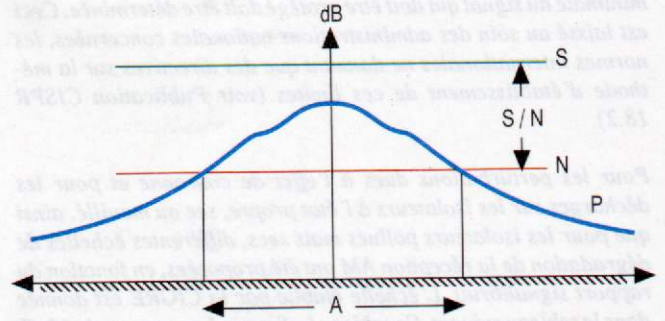


Figure 8.4. : A l'intérieur d'une zone (A) de part et d'autre d'une ligne à haute tension, la réception radio en modulation d'amplitude peut ne pas être satisfaisante, à cause des perturbations dues à l'effet de couronne. La largeur de ce corridor, qui n'excède que rarement quelques dizaines de mètres de chaque côté, dépend du signal utile (S), du profil latéral (P) du bruit de la ligne, et du niveau maximal acceptable de bruit (N), qui se déduit du rapport signal/bruit (S/N) accepté.

Figure 8.4: Within a region (A) either side of a high-voltage transmission line, AM radio reception may be unsatisfactory because of interference from corona. The width of this corridor, which does not often exceed some tens of metres either side, depends on the broadcast signal (S), the lateral profile (P) of the radio noise from the line, and the maximum acceptable noise level (N) set by the acceptable signal-to-noise ratio (S/N).

8.4 Perturbations passives

Les types de perturbations en radio et en télévision examinées jusqu'ici sont dites «perturbations actives», puisque c'est la ligne elle-même qui est la source primaire du signal perturbateur. Mais une ligne électrique peut aussi causer des perturbations «passives», en réfléchissant et en re-rayonnant des signaux électromagnétiques. Ces effets, qui dépendent des dimensions de la ligne, sont aussi causés par d'autres grandes structures (bâtiments, tours et mâts) qui n'ont rien à voir avec les lignes électriques.

La réflexion d'un signal télévision par un objet peut produire une image fantôme, due au retard du signal réfléchi par rapport au signal principal. Le re-rayonnement est un phénomène qui se produit lorsqu'un pylône se trouve à proximité d'une antenne d'émission TV. Le pylône, selon ses dimensions, joue le rôle d'une antenne auxiliaire, modifiant ainsi les caractéristiques de la station d'émission.

Les difficultés provoquées par une perturbation passive peuvent souvent être écartées en améliorant soit l'antenne de réception, soit sa position. Dans des cas plus critiques, il reste possible d'utiliser un système câblé, voire de passer à une émission à fréquence plus élevée.

8.4 Passive Interference

The forms of radio and television disturbance discussed above are described as 'active' interference, because the line itself acts as the primary source of the disturbing signal. A power line may also cause 'passive' interference by reflecting and by reradiating broadcast radio signals. Such effects, which are related to the dimensions of the line, are also caused by other large structures (buildings, towers and poles, for example) not related to power transmission.

Reflection of a television signal from some object may give rise to a ghost image due to the time delay between the arrival of the main and the reflected signals. Reradiation is a phenomenon that occurs when a tower of a line is in the vicinity of a broadcasting aerial. The tower, depending on its dimensions, may act as a subsidiary aerial, thus changing the radiation pattern of the broadcasting station.

Difficulties from passive interference can often be alleviated by improving the receiving aerial or its position. In more severe cases, a cabled television system may be used or a change made to a higher-frequency transmission.

9. BRUIT ACOUSTIQUE

9.1 Introduction

Deux types de bruit acoustique peuvent être générés par les lignes à haute tension: par effet de couronne et éolien. Ces bruits sont décrits ci-dessous, et l'encart 9.1 donne quelques informations sur la mesure d'un bruit.

9.2 Bruit d'effet de couronne

9.2.1 Caractéristiques. Le bruit acoustique d'effet de couronne comporte un spectre à large bande (crépitements) et des sons purs (ronflements).

La composante à large bande est le bruit dominant et est responsable des particularités du bruit d'effet de couronne, comparé aux autres bruits environnants habituels. Il est particulier, parce que les autres bruits ont leur énergie concentrée dans la bande basse des fréquences audibles, alors que le bruit couronne à large bande contient une énergie significative dans les moyennes et hautes fréquences audibles, c'est-à-dire au-dessus de 500 Hz. Ce bruit est constitué de crépitements ou de grésillements caractéristiques.

Les sons purs apparaissent à des fréquences qui sont des multiples, principalement pairs, de la fréquence industrielle. Le son dominant est au double de la fréquence industrielle et est semblable au ronflement des transformateurs ou des lampes fluorescentes. Ce ronflement est variable en direction et en intensité, souvent il n'est pas discernable. Quand il existe, il peut fortement varier sur de petites distances, de sorte que le choix du point de mesure peut significativement influencer la valeur obtenue.

Le contenu en fréquences du bruit acoustique est généralement présenté sous forme d'un spectre, c'est-à-dire une courbe montrant comment le bruit varie dans la plage des fréquences audibles. Dans la figure 9.1, on compare le spectre de fréquence du bruit d'effet de couronne d'une ligne à 765 kV, par mauvais temps, avec le bruit ambiant en zones rurale et urbaine par temps sec. Un son pur au moins apparaît dans cet exemple, et se présente sous forme d'un pic pointu dans le spectre, dont le bruit à large bande s'étend jusque vers 16 kHz.

En général, le bruit acoustique n'est un facteur majeur de conception que pour les lignes fonctionnant à des tensions d'environ 300 kV et au-dessus. A ces hautes tensions, les accessoires sont conçus, ou munis d'écrans, de telle sorte que seul l'effet couronne des conducteurs est une source potentielle de bruit acoustique.

9.2.2 Variations statistiques. Comme le bruit acoustique peut notablement varier avec les conditions météorologiques (même pour un type de temps donné), il n'est pas possible de caractériser le bruit d'une ligne par un seul spectre de fréquences ou par un seul niveau dBA (voir l'encart 9.1 pour la définition des niveaux dBA). Il est plus approprié de définir les niveaux de bruit en termes statistiques. En fait, comme les niveaux de bruit sont toujours supérieurs par mauvais temps que par temps sec, et comme la pluie constitue le pourcentage le plus grand du mauvais temps, il est courant de ne caractériser le bruit d'une ligne que par les statistiques du bruit sous pluie. Une mesure usuelle est celle du niveau de bruit qui est dépassé pendant 50 % du temps lorsqu'il pleut (L50). Une mesure également utilisée est le L5, c'est-à-dire le niveau de bruit qui est dépassé pendant 5% du temps lorsqu'il pleut.

9. AUDIBLE NOISE

9.1 Introduction

Two types of audible noise may arise from overhead high-voltage transmission lines: corona and aeolian. These are described below, while some notes on the measurement of noise are given in Box 9.1.

9.2 Corona Noise

9.2.1 Characteristics. The audible noise from corona consists of both broadband noise ('crackling') and discrete tones ('humming').

The broadband component is the dominant noise and is responsible for the uniqueness of corona noise compared to other common noises in the environment. It is unique because these other noises have their energy concentrated in the lower range of audio frequencies, whereas corona broadband noise contains significant energy in the mid-audio and high-audio frequencies, that is, above 500 Hz. This noise has a characteristic crackling or sizzling sound.

Discrete tones occur at frequencies which are multiples, mainly the even ones, of the power frequency. The dominant tone occurs at twice the power frequency and is similar to the 'humming' sound from power transformers or fluorescent lights. This hum varies in its incidence and intensity and is often not discernible. When it does occur, it can vary widely over quite short distances, so the choice of measurement location can significantly influence the value obtained.

The frequency content of audible noise is commonly presented in the form of a spectrum, that is, a graph showing how the noise varies over the audio-frequency range. In Figure 9.1, the frequency spectrum of the corona noise from a particular 765 kV line during wet weather is compared with that of both rural and suburban ambient noise during dry weather. At least one discrete tone is present in this example and appears as a sharp spike in the spectrum, with the broadband noise extending up to about 16 kHz.

In general, audible noise is a major design consideration only for overhead lines operating at voltages of about 300 kV and above. For these high voltages the line fittings are designed or screened so that only corona on the conductors is a potential source of audible noise.

9.2.2 Statistical variation. Because the audible noise can vary significantly with weather conditions (and even for the same type of weather conditions) it is not possible to characterize the noise from a line with one particular frequency spectrum or one dBA level. (See Box 9.1 for an explanation of dBA levels.) Instead it is more appropriate to determine noise levels in statistical terms. Indeed, because wet-weather noise levels are always higher than fair-weather levels and because rain constitutes the largest percentage of wet weather, it is quite common to characterize the noise from a power line with statistics of its noise during rain only. A common measure is the noise level which is exceeded 50% of the time when it is raining, L50. A similar measure also used is L5, the noise level which is exceeded 5% of the time when it is raining.

Encart 9.1

La mesure du bruit

Le bruit est mesuré avec un microphone sensible à la pression acoustique; son instrumentation associée prend en compte la variation de sensibilité de l'oreille humaine moyenne. Dans son principe, l'appareil est réglé de telle sorte à donner plus ou moins de poids à certaines fréquences. Ces niveaux pondérés sont ensuite combinés pour fournir une valeur unique. La pondération dite «A», qui pondère les différentes fréquences de façon similaire à l'oreille humaine, est la méthode de pondération la plus couramment utilisée pour la mesure des bruits. Sa caractéristique est donnée à la figure 9.4. Comme on peut le voir, la pondération «A» favorise les fréquences moyennes et hautes, c'est-à-dire au-dessus de 500 Hz, aux dépens des fréquences basses.

La sensibilité de l'oreille humaine dépend autant de l'amplitude de la pression sonore que de la fréquence. La variation de pression sonore des diverses sources est immense, et pour cette raison les pressions sonores sont généralement exprimées en échelle logarithmique en décibels (dB), qui est la méthode la plus commode et la plus appropriée pour mesurer des quantités variant dans un très large domaine. (voir encart 8.1 pour la définition et l'utilisation des décibels en mesure des perturbations radio). La figure 9.3 donne les niveaux sonores typiques en dBA (le «A» indique que ce sont des niveaux pondérés), de quelques bruits familiers. Notons que le seuil d'audibilité est défini par 0 dBA, et que le seuil de douleur est d'environ 120 dBA. Le niveau zéro de référence correspond à une pression de 20 micropascals (20 micronewtons par mètre carré).

En raison de l'importance particulière de la gêne due aux bruits, et de la durée de sa perception, il est courant, dans le domaine de l'acoustique, de définir une moyenne temporelle de niveau d'un bruit fluctuant. On utilise un concept appelé «niveau sonore équivalent» ou L_{eq} . De façon semblable, le «niveau sonore équivalent jour-nuit», ou L_{dn} , donne une plus forte pondération aux bruits nocturnes, les gens y étant alors plus sensibles. L_{eq} et L_{dn} sont des méthodes d'évaluation du bruit et non des mesures. Ces méthodes intègrent et établissent la moyenne des bruits pondérés «A» pendant une période de 24 heures (ou toute autre) pour fournir une valeur unique.

Box 9.1

The Measurement of Noise

Noise is measured with a microphone sensitive to the acoustic pressure and the associated instrumentation takes account of the varying sensitivity of the average human ear. Basically, the equipment is adjusted so that certain frequencies are given more or less weight than others. These weighted levels are then combined to yield a single number. The so-called 'A-weighting' weights the different frequencies in a manner similar to that of the human ear and is the most common weighting method used for noise measurements. Its characteristic is shown in Figure 9.4. As can be seen, A-weighting favours the mid-audio and high-audio frequencies, that is, above 500 Hz, at the expense of the low frequencies.

The sensitivity of the human ear also depends on the magnitude of the sound pressure, as well as on its frequency. The variation in sound pressure of different sources is immense and for this reason sound pressures are generally expressed on a logarithmic scale in decibels (dB), which is both a common and convenient method of measuring quantities which vary over a very wide range. (See Box 8.1 for more about decibels and their use in the measurement of radio interference.) Typical dBA sound levels (the 'A' denotes that it is an A-weighted level) for some everyday sounds are shown in Figure 9.3. Note that the threshold of hearing is defined as 0 dBA and the threshold for pain is approximately 120 dBA. The zero-dB reference level is a pressure of 20 micropascals (20 micronewtons per square metre).

Because of the particular importance of noise incidence and duration to noise perception, it is common in the acoustics field to time-average levels of fluctuating noise using a concept called 'Equivalent Sound Level' or L_{eq} . A similar measure, called 'Equivalent Day-Night Sound Level', or L_{dn} , weights noise intrusion at night more heavily since people are more sensitive to noise at night. L_{eq} and L_{dn} are noise rating methods, not noise measures. These noise rating methods integrate and average A-weighted noise levels over a 24-hour (or some other) period into a single number.

9.2.3 Atténuation latérale. *Lorsqu'on s'éloigne d'une ligne à haute tension, le bruit décroît à peu près en proportion inverse de la racine carrée de la distance. Cela signifie qu'exprimé en dB, le niveau de bruit décroît d'environ 3 à 4 dBA pour chaque doublement de la distance. Un exemple de profil latéral de bruit est montré à la figure 9.2. Cependant, l'atténuation est affectée par la nature du sol, la présence de constructions et de végétation, ainsi que par les conditions atmosphériques. L'atténuation est plus forte aux fréquences élevées, de sorte que le spectre du bruit se modifie avec la distance, et finit par ressembler au spectre typique de bruit ambiant, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la ligne.*

9.3 Bruit éolien

En plus du bruit d'effet de couronne, qui est d'origine électrique, les lignes à haute tension peuvent engendrer un autre type de bruit acoustique. Ce deuxième type de bruit apparaît dans des conditions de vent bien définies, et est causé par le vent frappant différents composants de la ligne, comme par exemple les pylônes d'acier, les conducteurs ou les isolateurs. Les deux facteurs météorologiques qui affectent le niveau et la fréquence de ce bruit sont la vitesse et la direction du vent. Les différents composants produisent différents types de bruit. Ce bruit est indépendant du fait que la ligne soit sous tension ou non. La production de bruit éolien par les divers composants d'une ligne à haute tension n'est toutefois pas habituelle, car les conditions de génération sont très spécifiques, bien que dans des situations particulières ce bruit puisse apparaître plus fréquemment. L'encart 9.2 donne plus de détails sur le bruit éolien.

9.4 Évaluation du bruit acoustique

Dans des zones rurales ou résidentielles généralement calmes, on note occasionnellement des plaintes concernant du bruit dû à des lignes voisines; ces plaintes constituent une estimation approximative de la façon dont la collectivité réagit à ce type de bruit acoustique. A titre d'exemple, une entreprise publique a reçu quelques plaintes dans un site où le niveau L50 de bruit couronne n'excédait pas 53 dBA par temps humide à proximité de plusieurs lignes à 500 kV. Par ailleurs, de nombreuses plaintes ont été enregistrées pour des niveaux dépassant 58 dBA.

Bien que fournissant une indication générale d'un niveau «acceptable» de bruit acoustique des lignes, ces observations ne peuvent pas être appliquées systématiquement à toutes les situations. D'autres facteurs importants vont varier d'un site à un autre. Par exemple, un mauvais temps fréquent, le niveau normal du bruit ambiant, le nombre et la situation de riverains de lignes, jouent un rôle dans la détermination de l'impact du bruit. De même l'heure dans la journée, la fréquence et la durée du bruit (l'encart 9.1 décrit diverses mesures servant à définir un niveau de bruit équivalent). Une autre approche simple d'évaluation du bruit consiste à comparer des niveaux de bruits acoustiques typiques de lignes à des niveaux typiques de bruits couramment rencontrés, comme le montre la figure 9.3. Cependant, de telles comparaisons doivent être faites avec précaution. Le bruit d'effet de couronne diffère des bruits les plus courants par le fait qu'il contient une proportion relativement plus grande d'énergie aux fréquences audibles élevées. Des études montrent que cette différence rend le bruit couronne quelque peu plus gênant que ces autres bruits, à niveau dBA égal. Le bruit couronne est de plus extrêmement variable avec le temps, et il n'y a pas de méthode bien établie pour chiffrer ces bruits variables. Il n'apparaît pas clairement s'il faut retenir la valeur moyenne sur 24 heures relative à tous les jours, ou

9.2.3 Lateral attenuation. *As one moves away from a high-voltage line the audible noise decreases approximately in inverse proportion to the square root of the distance. In terms of decibels this means that the noise level decreases at a rate of about 3 to 4 dBA for every doubling of the distance. An example of a lateral profile of noise is shown in Figure 9.2. However, the attenuation is affected by the nature of the ground, the presence of buildings and vegetation and by atmospheric conditions. Attenuation is greater at higher frequencies, so the spectrum of the audible noise changes with lateral distance and begins to resemble typical ambient noise as one moves further away from the line.*

9.3 Aeolian Noise

In addition to corona noise, which is of electrical origin, another type of acoustic noise may be produced by high-voltage overhead transmission lines. This second type of noise occurs under well-defined wind conditions and is caused by the wind impinging on the different components of a line, for example, the steel towers, conductors and insulators. The two meteorological factors which affect the level and frequency of this noise are the wind speed and direction. The different line components give rise to different types of noise. The noise is not dependent on whether or not the line is energized. The occurrence of aeolian noise from the various components of a high-voltage line is uncommon, since the conditions under which the noise occurs are very specific, though in particular localities it may occur more frequently. Box 9.2 gives more detail about aeolian noise.

9.4 Evaluation of Audible Noise

People in otherwise quiet rural or residential areas occasionally complain to utilities about noise from nearby transmission lines and this complaint experience forms a crude measure of community reaction to this type of audible noise. For example, one utility has found few complaints where the L50 corona noise level in wet weather did not exceed 53 dBA in the vicinity of several 500 kV lines. On the other hand, numerous complaints were registered where this level exceeded 58 dBA.

Although providing a general guide for 'acceptable' levels of transmission-line audible noise, the experience just noted cannot be universally applied to all situations. Other important factors will vary from one location to another. For example, the frequency of occurrence of wet weather, the normal levels of ambient noise, and the number and location of people living in the vicinity all play a role in determining noise impact. So too does the time of day that the noise occurs, how often it occurs, and how long it lasts. (Various measures of equivalent sound level which are used are outlined in Box 9.1.) Another limited approach to noise evaluation is to compare typical transmission-line audible-noise levels with typical levels of commonly encountered sounds, as shown in Figure 9.3. However, such comparisons must be undertaken cautiously. Corona noise is different from most commonly encountered noise in that it contains a relatively greater proportion of energy at the higher audio frequencies. Studies show that this difference makes corona noise somewhat more annoying than these other noises at equal dBA levels. Corona noise is also highly variable with weather, and there is no well accepted method for rating such variable noises. It is not clear whether one should average 24-hour Ldn values for all days or just the

seulement pour les jours de pluie, afin de définir une moyenne. De plus, les niveaux de bruit couronne les plus élevés apparaissent sous pluie, et sont de ce fait souvent masqués par la pluie elle-même tombant sur les arbres, les toits etc. La pluie, aussi, dissuade d'ouvrir les fenêtres et de se livrer à des activités extérieures.

Il n'y a que peu d'informations concernant une gêne pour le sommeil, ou des réactions négatives de la collectivité, que le bruit des lignes (soit par effet de couronne soit éolien) aurait causé de façon significative. En conséquence, il n'y a que peu d'études de gêne ou de perturbations sur ce type de bruit à faible niveau.

rainy days to find the average Ldn. Furthermore, the highest levels of corona noise occur during rain and are thus often masked by the sound of the rain itself falling on trees, roofs and so on. The rain also discourages open windows and outdoor activities.

There is little evidence that power-line noise (either corona or aeolian) has caused interference with sleep or adverse community reaction to a significant degree. Consequently, annoyance or interference studies with this kind of low-level noise are few.

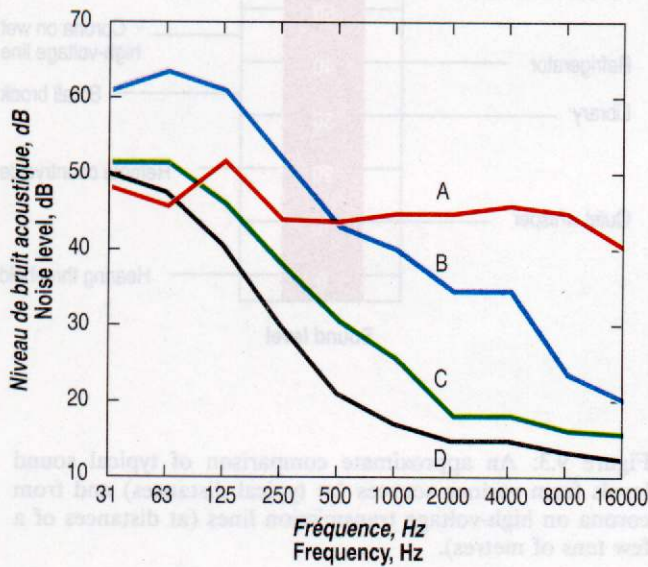


Figure 9.1. : Sur cette figure, le spectre du bruit acoustique d'une ligne à 765 kV sous pluie (A) est comparé aux spectres du bruit ambiant d'une zone suburbaine (de jour, près d'une zone commerciale) (B), d'une zone rurale de jour (C) et de nuit (D).

Figure 9.1: Here the spectrum of the audible noise from a 765 kV line during rain (A) is compared with spectra for ambient noise for suburban daytime (near a commercial area) (B), rural daytime (C) and rural nighttime (D).

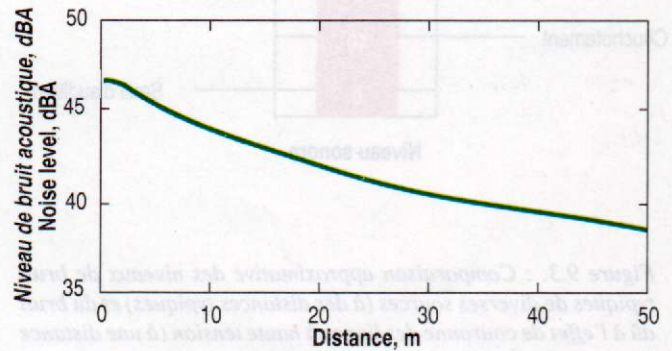


Figure 9.2. : Le bruit acoustique dû à l'effet de couronne décroît lorsqu'on s'éloigne de la ligne. Dans l'exemple de profil latéral présenté ici, la distance est mesurée à partir d'un point situé directement sous un conducteur extérieur.

Figure 9.2: The audible noise from corona decreases as the distance from the transmission line increases. In this example of such a lateral profile, the distance is measured from a point directly below the outer conductor.

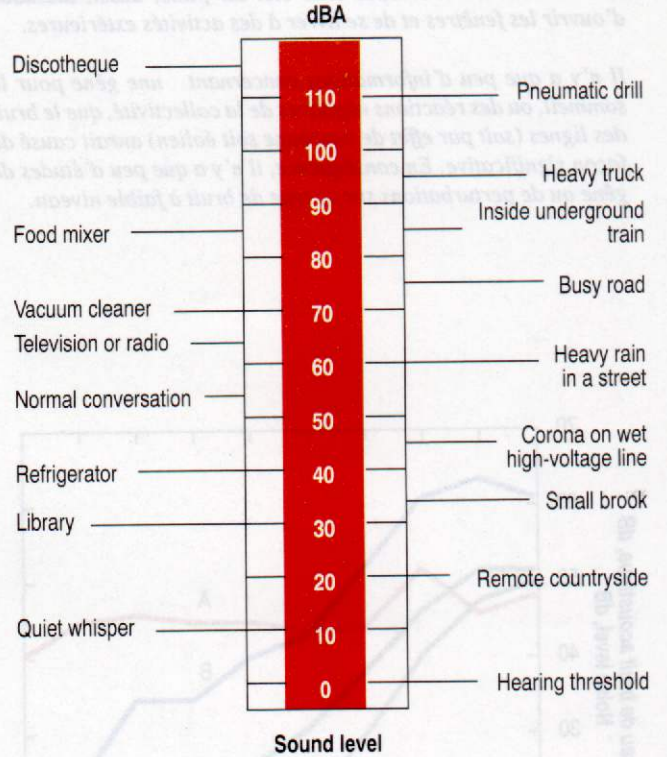
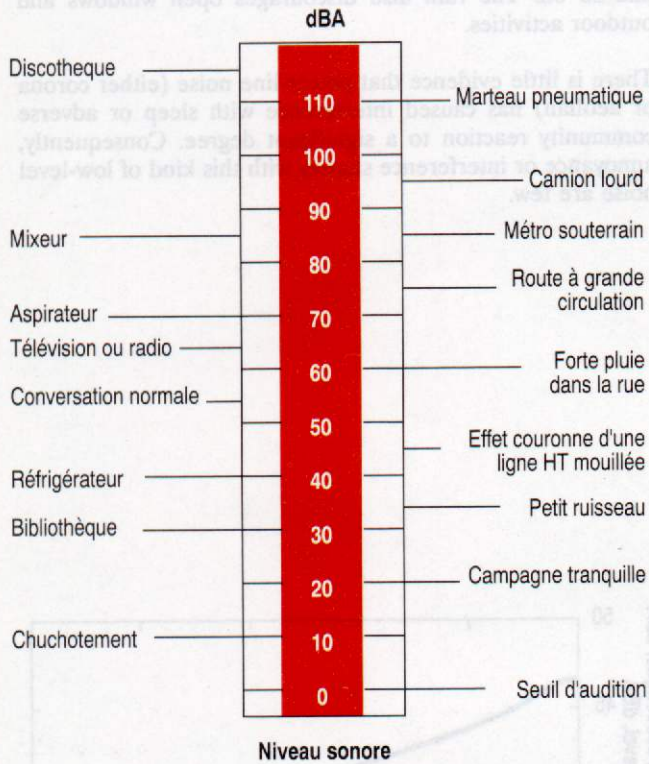


Figure 9.3. : Comparaison approximative des niveaux de bruit typiques de diverses sources (à des distances typiques) et du bruit dû à l'effet de couronne des lignes à haute tension (à une distance de quelques dizaines de mètres).

Figure 9.3: An approximate comparison of typical sound levels from various sources (at typical distances) and from corona on high-voltage transmission lines (at distances of a few tens of metres).

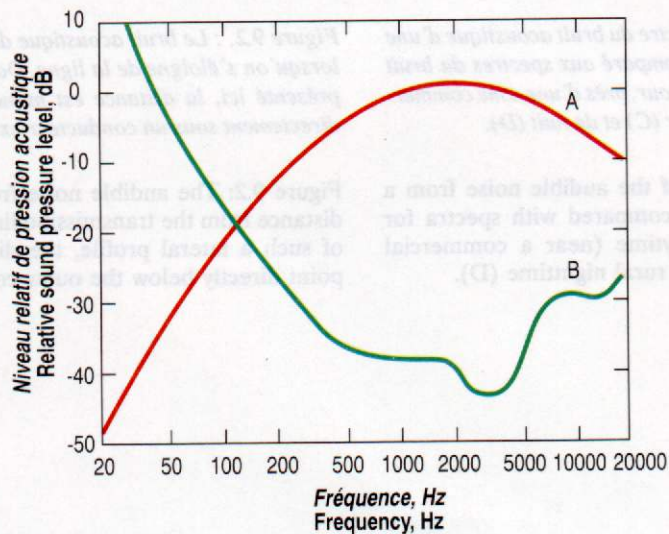


Figure 9.4. : La caractéristique en pondération A (courbe A) reflète correctement la variation en fonction de la fréquence de la sensibilité à bas niveau de l'oreille humaine (courbe B). Dans cette figure, le niveau de référence en dB relatif à la courbe B est arbitraire.

Figure 9.4: The A-weighting characteristic (A) broadly mirrors the variation with frequency of the low-level sensitivity of the human ear (B). (The dB reference level for B is arbitrary in this drawing.)

Encart 9.2

Bruit éolien

Un bruit éolien peut occasionnellement être généré lorsque le vent souffle à travers un pylône d'une ligne à haute tension, ou à travers des composants creux comme les cornes de garde. Cependant, un bruit plus important est celui qui est quelquefois produit, dans des conditions très spécifiques, par le vent soufflant sur les conducteurs ou les isolateurs.

Conducteurs. Le bruit est causé par le délestage régulier dus aux tourbillons d'air, lorsque le vent s'écoule autour des conducteurs. Aux vitesses relativement faibles du vent, c'est-à-dire inférieures à environ 10 mètres/seconde, un bruit de sifflement peut se produire, mais à un niveau bas rarement gênant. A des vitesses de vent supérieures, le bruit est semblable au grondement d'un escadron d'avions volant à une certaine distance, et peut atteindre des niveaux aussi élevés que 70 dBA. Ce type de bruit peut être à l'origine de plaintes, mais on peut généralement le réduire par un délestage irrégulier des tourbillons d'air, par exemple en enroulant un fil en spirale autour des conducteurs.

Isolateurs. Ce bruit est un son pur de quelques centaines de hertz et peut être de forte intensité. Des niveaux atteignant 70 dBA à 100 mètres ont été mesurés. Ils n'apparaissent cependant que pour des vitesses de vent élevées et à des angles d'incidences spécifiques, et seulement avec certains types et arrangements d'isolateurs. La formation de ce bruit n'est pas aisée à prévoir, mais il est généralement possible de le réduire ou de l'éliminer en s'assurant qu'une résonance acoustique suffisante ne puisse pas se produire. En pratique, cela peut être obtenu en insérant des bagues de caoutchouc spéciales dans la chaîne d'isolateurs ou en remplaçant quelques isolateurs par d'autres qui ont un profil de nervures complètement différent. Malheureusement, le nombre et la position des isolateurs à changer dans la chaîne doivent être déterminés par tâtonnement pour chaque type particulier de chaîne.

Box 9.2

Aeolian Noise

Aeolian noise may occasionally occur when wind blows through a steel tower of an overhead high-voltage line or across hollow components such as arcing horns. More important, however, is the noise that is sometimes produced under rather specific conditions by the wind blowing over conductors and insulators.

Conductors. The noise is caused by the regular shedding of air vortices as the wind flows across the conductor. At relatively low wind speeds, that is, below approximately 10 metres/second, a 'swishing' noise may occur but at a low level that is seldom troublesome. At higher wind speeds, the noise is similar to the 'rumbling' sound of a squadron of aeroplanes flying overhead in the distance, and may be at a level as high as 70 dBA. Complaints may arise because of this type of noise but it can usually be reduced by ensuring that the shedding of the air vortices is irregular, for example by wrapping a wire spirally along the conductor.

Insulators. This noise has a pure tone of several hundred hertz and may be of high intensity. Levels up to 70 dBA at 100 metres have been measured. However, it occurs only for specific high wind speeds and angles of incidence and only for certain designs and arrangements of insulators. The occurrence of this type of noise is difficult to anticipate but it is usually possible to reduce or eliminate it by ensuring that sufficient acoustic resonance does not occur. Sometimes this may be achieved by fitting special rubber bushes within the insulator strings, otherwise some units in the strings have to be replaced by ones with a completely different 'rib' profile. Unfortunately, the number and location of the units in the string to be replaced must be determined by trial for each particular design of insulator string.

10. IONS ET OZONE

10.1 Ions

Les ions sont des atomes ou des molécules électriquement chargés. En général, les ions positifs résultent de la perte d'un électron (parfois plus qu'un) par un atome ou une molécule, alors que les ions négatifs sont formés par attachement d'un ou plusieurs électrons. Il existe en permanence dans l'atmosphère des ions des deux polarités; ils sont en majorité formés par l'action ionisante des rayons cosmiques, de la radioactivité naturelle, et par les orages. La concentration normale des ions dans l'air varie entre environ 100 et 1000 ou plus d'ions par centimètre cube (cm³). Jusqu'à 20 000 ions par cm³ peuvent être trouvés par temps d'orage, près d'une combustion (feux d'extérieur, cigarettes allumées, brûleur à gaz, par exemple), ainsi que dans les gaz d'échappement des véhicules.

Des ions sont également générés par les décharges d'effet de couronne, mais dans le cas des lignes à courant alternatif, peu d'entre eux s'échappent du voisinage des conducteurs. Il y a deux raisons principales à cela. En premier lieu, le champ électrique alternatif intense qui existe près des conducteurs entraîne un mouvement continu de va-et-vient des ions qui ont été formés. En deuxième lieu, de nombreux ions entrent en collision avec les ions de polarité opposée, se neutralisant ainsi mutuellement. L'importance de l'effet de couronne dépend grandement du champ électrique superficiel des conducteurs, de leur état de surface et des conditions météorologiques (voir section 7 et encart 7.1).

Les mesures ont montré qu'au niveau du sol, il était rarement possible de détecter le moindre changement dans la concentration naturelle des ions, qui serait dû à l'effet de couronne d'une ligne à courant alternatif. De temps à autre, des bouffées d'ions venant d'une ligne peuvent être détectées directement au-dessous d'elle, mais leur concentration n'excède généralement pas 1000 par cm³.

10.2 Ozone

L'ozone est une forme instable de l'oxygène, qui possède trois au lieu de deux atomes par molécule. Dans un air protégé de toute activité urbaine ou industrielle, on le trouve en concentration jusqu'à environ 50 parties par milliard (ppm). (Un ppm représente une molécule d'ozone pour mille millions de molécules d'air). Dans les grandes zones urbaines, les concentrations peuvent être plus élevées et atteindre occasionnellement quelques centaines de ppm pendant plusieurs heures. Dans la basse atmosphère, l'ozone se forme principalement à partir de réactions photochimiques qui dépendent du rayonnement solaire.

L'ozone est également généré par les décharges couronne dans l'air, bien que l'augmentation de la concentration soit normalement négligeable près d'une ligne à haute tension. Dès leur formation, les molécules d'ozone se mettent à réagir avec d'autres composantes de l'air, à savoir les NO_x naturels et les hydrocarbures. Dans les conditions atmosphériques normales, la durée de demi-vie de l'ozone est d'environ une heure, alors qu'en présence d'humidité elle tombe à environ 20 minutes et moins.

Au niveau du sol, les concentrations d'ozone produites par l'effet de couronne dépendent du taux de formation, des conditions atmosphériques, de la vitesse et de la direction du vent, des turbulences de l'air, et du taux de décroissance de l'ozone. Des modèles mathématiques de pollution de l'air prenant en compte tous ces

10. IONS AND OZONE

10.1 Ions

Ions are electrically charged atoms or molecules. In general, positive ions are formed by the removal of an electron (occasionally more than one) from an atom or molecule, while negative ions are formed by the attachment of one or more electrons. Ions of both polarities exist in the atmosphere all the time, being formed largely by the ionizing action of cosmic rays, natural radioactivity and thunderstorms. The normal background concentration of ions in the air varies between about 100 and 1000 or more ions per cubic centimetre (cm³). Up to 20,000/cm³ may be found under storm conditions, close to combustion (open fires, lighted cigarettes and gas burners, for example) and in the exhaust gases from vehicles.

Ions are also generated in corona discharges, but for AC power lines few escape from the vicinity of the conductors. There are two main reasons for this. First, the strong alternating electric field close to the conductor continually repels and attracts back the ions which have been formed. Second, many ions then collide with others of the opposite polarity and neutralize each other. The incidence of corona depends markedly on the electric field at the surface of the conductors, on their surface condition and on the weather (see Section 7 and Box 7.1).

Measurements have shown that, at ground level, it is rarely possible to detect any change in the natural background level of ions caused by corona on an AC line. From time to time, under particular conditions, bursts of ions from the line can be detected directly below it but their concentrations do not often exceed 1000/cm³.

10.2 Ozone

Ozone is an unstable form of oxygen which has three, rather than two, atoms in each molecule. In air substantially unaffected by urban or industrial activity, it is found in concentrations of up to about 50 parts per billion (ppb). (One ppb means one ozone molecule for every thousand million air molecules.) In large urban areas, concentrations may be higher and occasionally reach a few hundred ppb for a few hours. In the lower atmosphere, ozone is formed principally by complex photochemical reactions which depend on sunlight.

Ozone is also generated in corona discharges in air, though the increased concentration beneath a high-voltage line is normally negligible. After formation, the ozone molecules immediately start to react with other components in the air, natural NO_x or hydrocarbons for instance. Under normal atmospheric conditions, the half-life of the ozone is approximately one hour, while in the presence of moisture it decreases to about 20 minutes or less.

Ground-level concentrations of ozone due to the corona depend on the generation rate, weather conditions, wind speed and direction, air turbulence and ozone decay rate. Mathematical air-pollution models taking into account all of these factors have been used to estimate the ozone

facteurs ont été utilisés pour estimer la concentration d'ozone au voisinage des lignes à haute tension. Ils ont montré que la majorité des lignes à haute tension, jusqu'à des tensions d'environ 345 kV ne produisaient pas d'ozone détectable.

Des modifications mesurables des concentrations naturelles d'ozone n'ont été prédites que dans des cas de pires conditions. Celles-ci incluent des très hautes tensions (765 kV), une pluie forte, un vent faible de direction parallèle aux conducteurs, et des mesures effectuées aussi près des conducteurs que le permet la sécurité électrique. Des valeurs de 7 à 9 ppm ont été calculées et vérifiées dans ces conditions. Un accroissement plus typique, mais généralement non mesurable, de la concentration d'ozone serait de 1 ppm au niveau du sol, à proximité d'une ligne à haute tension, par temps de pluie, et bien moins par temps sec.

Les mesures réelles sous des lignes existantes sont difficiles, car les variations du niveau de fond sont beaucoup plus grandes que la contribution de l'ozone formé par effet de couronne, et les valeurs prévues sont à la limite de la plupart des appareils de mesure.

Rien n'indique donc que la production d'ozone par les lignes à haute tension pourrait influencer de façon significative le niveau ambiant normal. Des traces d'oxydes d'azote sont également produites par les décharges couronne, mais en quantités encore moindre que l'ozone.

concentration near high-voltage lines. These showed that most high-voltage lines up to a voltage level of about 345 kV would not produce detectable ozone.

Measurable alterations to the natural background ozone concentrations were predicted only under 'worst-case' conditions. These included a very high voltage level (765 kV), heavy rain, a light wind blowing parallel to the conductors and measurement as close to the conductors as would be electrically safe. Values of 7 to 9 ppb have been calculated and verified under these conditions. A more typical, but generally unmeasurable, increase in ozone concentration would be 1 ppb at ground level close to a high-voltage line in wet conditions, and even less for dry-weather conditions.

Actual measurements under existing lines are difficult since variations in the background level are far higher than the contribution of corona-originated ozone, and the expected values are at the limit of most measuring systems.

There is thus no indication that ozone production by high-voltage lines significantly influences the normal ambient level. Traces of oxides of nitrogen are also produced in corona discharges but in quantities even less than for ozone.

11. REFERENCES

Références citées:

	<u>Sections Corresp.</u>
"Mesures des champs électriques à fréquence industrielle", CEI 833, 1987	3
"IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines", ANSI/IEEE Std 644-1987	3
"Protection contre les radiations non-ionisantes" Ed. Suess et Benwell-Morison, Publications Régionales de l'OMS, Séries européennes n°25, Copenhague, 1989	6 et 4, 5
"Directives Provisoires des Limites à l'Exposition aux Champs Electriques et Magnétiques à 50/60 Hz", Comité International pour les Radiations Non-Ionisantes de l'Association Internationale pour la Protection contre les Radiations, Health Physics, 58, 113-122, 1990	6
"Etat Actuel de la Recherche sur les Champs Electriques et Magnétiques générés par le Courant Alternatif et leur Rapport avec le Cancer", Electra, CIGRE, n°135, 8-10, 1991	6
"Caractéristiques des lignes et des équipements à haute tension relatives aux perturbations radioélectriques", 1 ^è partie 1982, 2 ^è et 3 ^è parties 1986, CISPR, Genève	8
<u>Autres références:</u>	
"Corona and Field Effects of AC Overhead Transmission Lines : Information for Decision Makers", IEEE Power Engineering Society, New York, 1985	3, 4, 5 7, 8, 9, 10
"Transmission Line Reference Book : 345 kV and Above", EPRI, EL-2500, Second Edition, Revised, 1987	4, 5, 7 8, 9, 10
"Champs électriques et magnétiques engendrés par les réseaux de transport" CIGRE, 1980	4, 5
"Critères d'Environnement pour la Santé" : 35 Champs à Très Basses Fréquences (TBF), 1984, OMS, Genève	6
"Critères d'Environnement pour la Santé" : 69 Champs Magnétiques, 1987, OMS, Genève	6
"Perturbations engendrées par l'effet couronne des réseaux de transport", CIGRE 1974	7, 8

11. REFERENCES

References cited:

	<u>Related Sections</u>
'Measurement of Power-Frequency Electric Fields', IEC 833, 1987	3
'IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines', ANSI/IEEE Std 644-1987	3
'Non-ionizing Radiation Protection', ed. Suess and Benwell-Morison, WHO Regional Publications, European Series No.25, Copenhagen, 1989	6 also 4, 5
'Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60 Hz Electric and Magnetic Fields', International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association, Health Physics, 58, 113-122, 1990	6
'Current Status of Research on Power-Frequency Electric and Magnetic Fields and Cancer', Electra, CIGRE, N°135, 9-11, 1991	6
'Radio Interference Characteristics of Overhead Power Lines and High-Voltage Equipment', Part 1 1982, Parts 2 and 3 1986, CISPR, Geneva	8
<u>Other references:</u>	
'Corona and Field Effects of AC Overhead Transmission Lines: Information for Decision Makers', IEEE Power Engineering Society, New York, 1985	3, 4, 5, 7, 8, 9, 10
'Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above', EPRI, EL-2500, Second Edition, Revised, 1987	4, 5, 7, 8, 9, 10
'Electric and Magnetic Fields Produced by Transmission Systems', CIGRE, 1980	4, 5
'Environmental Health Criteria: 35 Extremely Low Frequency (ELF) Fields', 1984, WHO, Geneva	6
'Environmental Health Criteria: 69 Magnetic Fields', 1987, WHO, Geneva	6
'Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems', CIGRE, 1974	7, 8

Le CIGRÉ a apporté le plus grand soin à la réalisation de cette brochure thématique numérique afin de vous fournir une information complète et fiable.

Cependant, le CIGRÉ ne pourra en aucun cas être tenu responsable des préjudices ou dommages de quelque nature que ce soit pouvant résulter d'une mauvaise utilisation des informations contenues dans cette brochure.

Publié par le CIGRÉ
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tél. : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99

Copyright © 2000

Tous droits de diffusion, de traduction et de reproduction réservés pour tous pays.

Toute reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, est interdite sans autorisation préalable. Cette interdiction ne peut s'appliquer à l'utilisateur personne physique ayant acheté ce document pour l'impression dudit document à des fins strictement personnelles.

Pour toute utilisation collective, prière de nous contacter à sales-meetings@cigre.org

The greatest care has been taken by CIGRE to produce this digital technical brochure so as to provide you with full and reliable information.

However, CIGRE could in any case be held responsible for any damage resulting from any misuse of the information contained therein.

*Published by CIGRE
21, rue d'Artois
FR-75 008 PARIS
Tel : +33 1 53 89 12 90
Fax : +33 1 53 89 12 99*

Copyright © 2000

All rights of circulation, translation and reproduction reserved for all countries.

No part of this publication may be produced or transmitted, in any form or by any means, without prior permission of the publisher. This measure will not apply in the case of printing off of this document by any individual having purchased it for personal purposes.

For any collective use, please contact us at sales-meetings@cigre.org