

**CHAMPS ELECTRIQUES ET MAGNETIQUES
ENGENDRES PAR LES RESEAUX DE
TRANSPORT**

**DESCRIPTION DES PHENOMENES – GUIDE PRATIQUE
DE CALCUL**

***ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS
PRODUCED BY TRANSMISSION SYSTEMS***

***DESCRIPTION OF PHENOMENA – PRATICAL GUIDE FOR
CALCULATION***

**Groupe de travail 01 (Perturbations et Champs)
du Comité d'Etudes 36 (Perturbations)
*Working Group 01 (Interference and Fields)
of Study Committee 36 (Interference)***

1980



SOMMAIRE

	Pages
1. INTRODUCTION	10
2. CALCUL DES CHAMPS ELECTRIQUES	18
2.1. Quelques rappels-Champs non perturbés et champs perturbés	18
2.1.1. Définition d'un champ électrique quasi-statique	18
2.1.2. Phénomène d'influence — Champ perturbé	18
2.1.3. Le courant d'influence	20
2.2. Méthodes de détermination de l'intensité du champ électrique	20
2.2.1. Charges équivalentes	22
2.2.2. Différences finies	22
2.2.3. Eléments finis	24
2.2.4. Méthode de Monte-Carlo	24
2.3. Champ sous une ligne	26
2.4. Champ sous un jeu de barres	36
2.5. Effet d'écran — Cas des lignes	40
2.6. Effet d'écran — Cas des jeux de barres	42
2.7. Effet d'écran des habitations situées près des lignes	42
2.7.1. Résultats des mesures	42
Annexe : Le champ elliptique	44
3. TENSIONS ET COURANTS INDUITS DANS LES OBJETS PLACES AU VOISINAGE DE CONDUCTEURS SOUS TENSION	48
3.1. Equations générales des phénomènes	48
3.2. Calcul de V_0 , C_0 , i_0	52
3.2.1. Calcul de V_0	52
3.2.2. Calcul de C_0	52
3.2.3. Calcul de i_0	56
3.3. Influence de la résistivité de l'objet	60
3.4. Application à quelques cas fréquents	62
3.4.1. Véhicules	62
3.4.2. Fils de vignes et clôtures	64
3.4.3. Homme debout dans un champ	68
3.4.4. Comparaison avec des mesures	72
3.5. Régime de charges et de décharges transitoires	74
3.5.1. Analyse du phénomène	74
3.5.2. Valeurs numériques	78

Document établi par le Groupe de Travail 36-01 (Perturbations et champs).

Document prepared by Working Group 36-01 (Interference and Fields).

Composé de

Composed of

MM. Messrs	C. GARY (Chef de file – <i>Convener</i>) (France)
	R. CORTINA (Italie – <i>Italy</i>)
	F. HIRSCH (R.F. d'Allemagne – <i>FR of Germany</i>)
	B. HOLMGREN (Suède – <i>Sweden</i>)
Mme Mrs	D. KOHOUTOVA (Tchécoslovaquie – <i>Czechoslovakia</i>)
MM. Messrs	N. KOLCIO (Etats-Unis – <i>U.S.A.</i>)
	J. LOOMS (Royaume-Uni – <i>United Kingdom</i>)
	C. MALAGUTI (Italie – <i>Italy</i>)
	P. PIROTTE (Secrétaire – <i>Secretary</i>), (Belgique – <i>Belgium</i>)
	A.W. VAN DER WEEGEN (Pays-Bas – <i>Netherlands</i>)

SUMMARY

	<i>Pages</i>
1. INTRODUCTION	11
2. CALCULATION OF ELECTRIC FIELDS	19
2.1. Sundry reminders – unperturbed and perturbed fields	19
2.1.1. Definition of a quasi static electric field	19
2.1.2. Phenomenon of induction – perturbed field	19
2.1.3. The induced current	21
2.2. Methods of determination of the intensity of the electric field	21
2.2.1. Equivalent charges	23
2.2.2. Finite differences	23
2.2.3. The Finite Element Method	25
2.2.4. The Monte Carlo Method	25
2.3. Field under a line	27
2.4. Field under busbars	37
2.5. Shielding effect : transmission lines	41
2.6. Shielding effect : busbar array	43
2.7. Shielding by houses located near lines	43
2.7.1. Shielding-results	43
Appendix : The elliptic field	45
3. INDUCED VOLTAGES AND CURRENTS IN OBJECTS LOCATED NEAR LIVE CONDUCTORS	49
3.1. General equations for the phenomena	49
3.2. Calculation of V_0 , C_0 , i_0	53
3.2.1. Calculation of V_0	53
3.2.2. Calculation of C_0	53
3.2.3. Calculation of i_0	57
3.3. Influence of the resistivity of the object	61
3.4. Application to some common cases	63
3.4.1. Vehicles	63
3.4.2. Vineyard wires and fences	65
3.4.3. Man standing in a field	69
3.4.4. Comparison with measurements	73
3.5. Transient charge and discharge conditions	75
3.5.1. Analysis of the phenomenon	75
3.5.2. Numerical values	79

	Pages
4. LE CHAMP MAGNETIQUE D'UNE LIGNE	82
4.1. Calcul du champ magnétique	82
4.1.1. Magnétostatique	82
4.1.2. Champ magnétique dû aux lignes de transport	82
4.2. Mesure du champ magnétique	86
4.2.1. Caractéristiques générales des mesureurs de champ magnétique	86
4.2.2. Etalonnage des mesureurs de champ magnétique	88
4.2.3. Paramètres affectant la précision des mesures de champ magnétique	88
4.2.4. Procédure de mesure du champ magnétique au voisinage des lignes de transport	88
4.3. Les effets et le blindage du champ magnétique	90
5. METHODES DE MESURE DES CHAMPS ELECTRIQUES	94
5.1. Principe des mesureurs de champ	94
5.1.1. Le dipôle sphérique	94
5.1.2. Dipôles à boîtier	94
5.1.3. Appareils à plaques parallèles	96
5.1.4. Sonde au sol	96
5.1.5. Emploi des divers types d'appareils	96
5.1.6. Dosimètres de champ	98
5.2. Conditions requises pour l'étalonnage des mesureurs	98
5.2.1. Directives générales	98
5.2.2. Réalisation d'un champ homogène dans un volume suffisant	98
5.2.3. Effet de proximité des électrodes planes	102
5.3. Paramètres affectant la précision des mesureurs de champ	104
5.3.1. Inclinaison de l'appareil	104
5.3.2. Non-uniformité (divergence) du champ	104
5.3.3. Humidité ambiante	106
5.3.4. Présence de l'opérateur	106
5.3.5. Influence du support électrique	106
5.4. Qualités requises pour un appareil de mesure de champ	108
5.4.1. Domaine d'application du mesureur	108
5.4.2. Propriétés du circuit électrique	110
5.4.3. Dimensions	110
5.5. Emploi de modèles	110
5.5.1. Principe de la méthode	110
5.5.2. Source de tension	112
5.5.3. Sondes de mesure	112
5.5.4. Fidélité de représentation du modèle	112
6. LES EFFETS DES CHAMPS ET DES COURANTS	116
6.1. Les manifestations physiques du champ	116
6.2. Effets perceptibles	118
6.3. Effets spéculatifs	122
7. CONCLUSIONS	126

	<i>Pages</i>
4. THE MAGNETIC FIELD OF A LINE	83
4.1. Calculation of the magnetic field	83
4.1.1. Magnetostatics	83
4.1.2. Magnetic fields of power lines	83
4.2. Measurement of the magnetic field	87
4.2.1. General characteristic of magnetic field meters	87
4.2.2. Calibration of magnetic field meters	89
4.2.3. Parameters affecting accuracy of magnetic field measurements	89
4.2.4. Procedure for measuring the magnetic field near transmission lines	89
4.3. Magnetic field effects and screening	91
5. METHODS OF MEASUREMENT OF ELECTRIC FIELD	95
5.1. Principle of field meters	95
5.1.1. The spherical dipole	95
5.1.2. Housed dipole types	95
5.1.3. Parallel plate instrument	97
5.1.4. Ground probe	97
5.1.5. Use of the various types of instrument	97
5.1.6. Field dosimeters	99
5.2. Requisite conditions for the calibration of field meters	99
5.2.1. General rules	99
5.2.2. Production of a homogeneous field in a sufficient volume	99
5.2.3. Effect of proximity of the plane electrodes	103
5.3. Parameters affecting the accuracy of field measurements	105
5.3.1. Inclination of the instrument	105
5.3.2. Non-uniformity (divergence) of the field	105
5.3.3. Ambient humidity	107
5.3.4. Presence of the operator	107
5.3.5. Influence of the dielectric support	107
5.4. Qualities required in field-meters	109
5.4.1. Application of meter	109
5.4.2. Properties of the electric circuit	111
5.4.3. Dimensions	111
5.5. Use of models	111
5.5.1. Principle of the method	111
5.5.2. Voltage source	113
5.5.3. Measuring probes	113
5.5.4. Accuracy of representation of the model	113
6. EFFECTS OF FIELDS AND CURRENTS	117
6.1. Physical manifestations of fields	117
6.2. Perception of fields	119
6.3. Speculative effects	123
7. CONCLUSIONS	127

AVANT-PROPOS

Les six chapitres de ce guide présentent les problèmes posés par l'existence des champs électriques, selon une manière de voir commune aux auteurs appartenant à neuf pays différents.

Les premier et dernier chapitres (1 : Introduction et 6 : Effets des champs électriques et des courants) présentent ces problèmes sous leur aspect le plus général, alors que les chapitres intermédiaires (2 à 5) sont strictement techniques. Ceux-ci exposent l'aspect physique des phénomènes, développent les méthodes mathématiques nécessaires au calcul des champs et de leurs divers effets, et fournissent un grand nombre de données numériques.

Aussi, le lecteur non-spécialiste, qui souhaite simplement s'informer sur la nature de ces problèmes et la façon dont ils sont abordés aujourd'hui, pourra-t-il se contenter de parcourir les chapitres 1 et 6. Une lecture préliminaire de ceux-ci est par ailleurs vivement conseillée à qui veut aborder les chapitres techniques en connaissance de cause.

FOREWORD

The six chapters of this guide set out the common view, on the problems posed by the existence of electric fields, of expert contributors from nine nations.

The first and last chapters (1 : Introduction ; 6 : Effects of fields and currents) set out the general aspects of the matter. The intermediate chapters (2 to 5) are strictly technical in nature. These latter cover the physical concepts and the mathematical methods needed to calculate the fields and assess their effects. Substantial numerical data are included.

The non-specialist reader, seeking information about the problems and the ways in which they are being tackled, may well find all that he needs in chapters 1 and 6. In any case, the authors recommend a preliminary study of these chapters to those who will read the intermediate ones in search of detailed information.

1. INTRODUCTION

S'il est évident que le champ électrique à fréquence industrielle est un phénomène qui existe autour de tout ouvrage de Transport d'Energie Electrique, lignes et postes aériens, c'est la valeur de plus en plus élevée des tensions utilisées, avec l'avènement des Ultra Hautes Tensions, qui conduit à prendre désormais les conséquences de ce phénomène en considération.

Le présent guide se propose d'apporter au concepteur et à l'exploitant de ces ouvrages des éléments de réponse aux problèmes que pose cette contrainte, et qui sont essentiellement de deux sortes.

Les premiers ont trait à la détermination des intensités des champs, c'est-à-dire leur calcul et leur mesure, ainsi qu'à l'analyse de leur mode d'action, à savoir la détermination des courants induits dans les objets, y compris les organismes vivants, plongés dans un champ, de leur potentiel, etc. . . et de leurs conséquences. Ils ont un caractère strict d'objectivité scientifique.

Les seconds problèmes sont liés aux questions plus délicates de l'action des champs sur les organismes vivants en général et sur la personne humaine plus particulièrement ; encore faudra-t-il distinguer ici certaines actions simplement déplaisantes (picotements, microdécharges) et les actions dites "bio-physiologiques", dont l'existence même est encore très incertaine et dont en tout cas la nature éventuelle est l'objet de spéculation et controverses.

Le propos de ce guide est donc de fournir les divers éléments permettant d'apprécier, et en fin de compte de minimiser l'impact des ouvrages sur l'environnement, en ce qui concerne l'existence d'un champ électrique. D'une façon semblable mais beaucoup plus sommaire, la question de l'effet des champs magnétiques sera également abordée.

Voyons maintenant brièvement comment ces divers problèmes ont évolué au cours des quinze à vingt dernières années, et comment ils se posent aujourd'hui.

Historique

Déjà aux tensions inférieures, mais surtout lors de l'apparition du 400 kV, on avait remarqué que, lorsqu'une personne touchait, dans certaines circonstances, un objet métallique, il se produisait à l'instant du contact une petite étincelle s'accompagnant d'une sensation désagréable de picotement à son point d'impact, telle l'extrémité des doigts. On avait observé que ce phénomène était beaucoup plus marqué si l'objet métallique était isolé du sol, alors que la personne elle-même était mise à la terre, par exemple par des chaussures faiblement isolantes. C'était le cas de véhicules stationnant sous une ligne ou dans un poste, de clôtures métalliques sur supports en bois, etc. . .

Toutefois, pour ces types d'objets, et comme nous le montrerons plus loin, seule la décharge transitoire était perceptible ; une fois le contact franc établi, le courant permanent restait bien au-dessous du seuil de perception humaine. On savait, par contre que, si l'objet métallique considéré présentait une grande surface (tel par exemple le toit d'un hangar situé à proximité immédiate d'une ligne), sa mise à la terre s'imposait comme obligatoire, sous peine d'une secousse électrique violente, voire dangereuse : le courant capacitif permanent pouvant alors atteindre plusieurs milliampères.

Un autre risque qui a été évoqué est celui de l'inflammation de vapeurs d'hydrocarbures sous l'effet de ces décharges, par exemple lors du remplissage du réservoir d'un véhicule dans une station-service placée près d'une ligne : ce risque est resté jusqu'à présent tout théorique, et aucun cas réel n'a heureusement jamais été signalé. Des craintes ont de même été émises en ce qui concerne les perturbations au fonctionnement de certains équipements sensibles de laboratoires ou d'hôpitaux, voir de stimulateurs cardiaques.

Ces diverses gênes avaient bien suscité quelques travaux sommaires, mais restées mineures et extrêmement rares jusqu'ici, n'avaient pas massivement attiré l'attention des ingénieurs.

Cependant, la nécessité, pour certains personnels de maintenance de travailler dans des champs relativement intenses (> 20 kV/m), avait conduit à entreprendre, dès 1963, des études sur les courants de décharge capacitifs au cours de la manipulation des outils, et à se poser la question d'un éventuel effet physiologique de ces champs.

1. INTRODUCTION

Although it is well known that an electric field at power frequency is a phenomenon which exists around all electrical power transmission installations, overhead lines and substations, the fact that higher and higher voltages are now being used, with the arrival of UHV, leads to renewed interest in the consequences of this phenomenon.

The purpose of the present guide is to make available, to the designer and user of these installations, some of the answers to the problems posed by this constraint, which are essentially of two kinds.

The first relate to the determination of the intensities of the fields, that is, their calculation and measurement, as well as the analysis of their mode of action, namely the determination of the currents induced in objects (including living organisms) immersed in a field, their potentials etc. and their consequences. These problems are strictly objective and scientific in character.

The second class of problems is related to the more delicate questions of the action of fields on living organisms in general and on human beings in particular ; here it is necessary to distinguish between certain effects which are merely unpleasant, such as tingling and small discharges, and the so-called "bio-physiological" effects, the very existence of which is still very uncertain and the nature of which, if they exist at all, is in any case the subject of speculation and controversy.

The aim of this guide is therefore to provide the necessary data for assessing and possibly minimising the effect of installations on the environment, as far as the existence of an electric field is concerned. Similarly, but much more briefly, the question of the effect of magnetic fields will also be dealt with.

We shall therefore briefly review the way in which these various problems have developed in the course of the last fifteen to twenty years and how they appear today.

History

A fact already noticed at lower transmission voltages but especially since the arrival of 400 kV was that, when a person touched a metal object in certain circumstances, a small spark occurred at the moment of contact, accompanied by an-unpleasant prickling sensation at the point of contact such as the finger-tip. It had been observed that this phenomenon was much more pronounced if the metal object was insulated from earth while the person himself was connected to earth, for example through shoes with poor insulation. This was the case with vehicles parked under a line or in a substation, metal fencing on wooden posts etc.

However, for these kinds of object, as we shall show later, only the transient discharge was perceptible ; once a solid contact was established, the steady current remained below the threshold of human perception. On the other hand it was known that if the metal object in question had a large surface area, such as, for example, the roof of a shed located in close proximity to a line, earthing was essential, failing which there was a risk of severe, or even dangerous, electric shock; since the steady capacitive current could reach several millamperes.

Another hazard which has been cited is the ignition of hydrocarbon vapours as a result of these discharges, for example during re-fuelling of a vehicle in a filling station located close to a line. Up to the present time, this hazard has remained purely theoretical and no actual case has, fortunately, been reported. Fears have also been expressed about possible disturbance of the operation of sensitive equipment in laboratories or hospitals, for example, of cardiac pacemakers.

These various nuisances had, indeed, been investigated, somewhat summarily, but since they were extremely rare and of minor importance, they had not attracted substantial attention from engineers.

Nevertheless, the need for certain maintenance personnel to work in relatively intense fields (> 20 kV/m) had led, since 1963, to investigations into the capacitive discharge currents during the handling of tools and to the raising of the question of possible physiological effects of these fields.

Par ailleurs, l'expérience montre qu'à partir d'une certaine intensité de champ, comprise entre 20 et 30 kV/m selon la sensibilité des individus, la présence de celui-ci est directement perçue, sous forme de picotements qui se manifestent à la surface de la peau, à la racine des cheveux pour l'homme, au niveau des poils pour les animaux. Si l'on tient compte que cet effet s'ajoute à celui des microdécharges désagréables, on conçoit que l'homme ou l'animal ne restent pas spontanément dans les zones à champ intense où ce seuil de perception est atteint. Le développement des travaux sous tension, qui impliquent un séjour en champ intense, avait donc incité à entreprendre des recherches médicales, soit sous forme d'enquêtes sur la santé du personnel spécial de maintenance sous tension, soit en soumettant des animaux de laboratoire à des champs intenses de courte durée.

Les deux méthodes avaient alors conduit à des conclusions négatives en ce sens qu'aucun effet nocif du champ n'avait pu être mis en évidence. Néanmoins, par mesure de prudence, mais surtout pour éviter au personnel les effets déplaisants cités plus haut, des combinaisons conductrices ont été mises au point ; revêtu de telles combinaisons, le personnel est alors pratiquement soustrait à tout effet électrostatique.

Le problème actuel

D'une manière générale, les effets observés, liés au phénomène d'influence associé à la présence d'un champ électrique, augmentent avec la taille des objets considérés et croissent à peu près proportionnellement à l'intensité du champ électrique dans lequel ils sont plongés. Pour cette dernière raison, il devenait nécessaire d'examiner de très près les intensités de champs entraînées par l'apparition des nouveaux échelons de tension, et d'étudier en détail les divers effets possibles, en gardant constamment à l'esprit le risque de franchissement d'un seuil de danger. C'est cet aspect du problème qui conduit aussi à la recherche de solutions techniques permettant de limiter l'accroissement corrélatif des champs, malgré l'accroissement des tensions de service.

Chacun sait que le calcul algébrique des champs électriques n'est possible que dans certaines configurations relativement simples ; une nappe de conducteurs parallèles horizontaux, au-dessus d'un sol plan, représentant la zone centrale d'une portée de ligne, constitue à peu près la limite des structures d'ouvrages dont on sait calculer les champs par des méthodes analytiques. Aussi, pour les besoins de la représentation de structures complexes (pylônes, jeux de barres croisés superposés...), diverses méthodes de détermination des champs se sont développées ces dernières années, faisant appel à l'ordinateur. Parmi ces méthodes, nous citerons la méthode de simulation des charges, les méthodes des différences finies et des éléments finis (basées les deux sur la résolution de l'équation de Laplace), enfin la méthode dite de "Monte-Carlo".

Mais même ces méthodes atteignent rapidement leurs limites, soit en raison du nombre considérable de "mémoires" nécessaires pour stocker les informations, soit que les "matrices" à inverser présentent un rang trop élevé. On a alors recours à la modélisation à échelle réduite : en appliquant à une maquette de l'ouvrage considéré une tension à fréquence surélevée (pour augmenter la sensibilité de la mesure) et en déplaçant dans le volume intéressé une "sonde" spéciale, on peut tracer point par point la carte des champs électriques.

Mais la détermination a priori des champs engendrés par un ouvrage (que ce soit par calcul ou par modélisation) doit être vérifiée par une mesure directe en vraie grandeur. A cet effet, plusieurs appareils de mesure de champ ont été développés, suivant des principes légèrement différents. Ces appareils sont d'un maniement délicat et sont sensibles à de très nombreuses perturbations : effet de proximité, divergence du champ et inclinaison en sont les principales. Il était donc nécessaire de définir des spécifications rigoureuses et des modes d'utilisation détaillés.

Enfin, l'élaboration de nombreuses méthodes de calcul et de mesures a été nécessaire pour déterminer les effets physiques des champs électriques et pour obtenir les valeurs numériques des grandeurs associées à ces effets : courants induits permanent et transitoire, capacité des objets soumis au champ, potentiel des objets "flottants" (c'est-à-dire électriquement isolés dans l'espace où règne un champ).

Ces divers aspects strictement techniques constituent le corps principal du présent guide.

Le Groupe de Travail s'est par ailleurs demandé s'il convenait, dans le cadre de ce fascicule, d'aborder la question des champs magnétiques engendrés par les ouvrages à haute tension. En ce qui concerne les installations industrielles voisines, l'influence des champs magnétiques, qui se traduit par l'apparition d'une force électromotrice induite, est parfaitement connue depuis longtemps, et les précautions qui s'imposent ont été prises ; les règles du CCITT, qui fixent les relations entre lignes de transport d'énergie électrique et lignes de télécommunications, en témoignent. En dehors de ce cas particulier, et de celui des conduites enterrées, où le couplage entre circuits est très fort, et où un risque n'existe que pendant la fraction de seconde que dure un court-circuit, aucun phénomène gênant n'a jamais été porté à la connaissance des spécialistes.

Furthermore, experience shows that, above a certain intensity of field, which may be between 20 and 30 kV/m, depending on the sensitivity of the individual, the presence of the field is directly perceived, in the form of tingling at the skin surface, at the hair-roots in man and in the fur of animals. Having regard to the fact that this effect is additional to that of the irritating microdischarges, it can be imagined that neither man nor animal will willingly remain in areas of high field intensity where this perception threshold is reached. The development of live line working, which necessitates remaining in intense fields, thus gave rise to investigations of a medical nature, either in the form of analyses of the health records of personnel engaged in live line working or by submitting laboratory animals to high intensity fields of short duration. Both methods then led to negative results, in that it had not been possible to prove any harmful effect from the field. Nevertheless, as a precaution and to avoid subjecting people to the above-mentioned unpleasant sensations, conductive overalls were developed. When wearing such overalls, the wearer is practically shielded from all electrostatic effects.

The present-day problem

Generally speaking, the observed effects of electric fields increase with the dimensions of the objects under consideration and nearly proportionally to the intensity of the electric field in which those objects are immersed. For the latter reason, it became necessary to examine, very closely, the field intensities entailed by the appearance of new classes of transmission voltage, and to make a detailed investigation of the various possible effects, always bearing in mind the possibility of passing a danger threshold. This aspect of the problem also leads to a search for technical ways of limiting the increases in electric fields, despite the increase in operating voltages.

It is well known that the algebraic calculation of electrostatic fields is only possible in certain relatively simple configurations ; a layer of parallel horizontal conductors above an earth plane, corresponding to mid-span of a single-circuit line, is about the limit of practical structures for which the field can be calculated analytically. Also, for the requirements of representing complex structures such as towers, sets of bus-bars crossing over one another etc., various ways of estimating the field have been developed over the last few years, making use of computers. These methods include charge simulation, finite difference and finite element methods, both based on the solution of Laplace's equation, and finally the so-called Monte Carlo method.

But even these methods rapidly reach their limits, either because of the large store capacity needed to hold the data or because the matrices to be inverted are of too high an order. Recourse can be had to modelling ; by applying a high-frequency voltage (to increase the sensitivity of measurement) to a model of the installation in question, and by investigating the relevant volume of space with a special probe, it is possible to plot, point by point, a map of the electric field.

But the initial determination of the electric fields produced by an installation, whether by calculation or by modelling, must be verified by direct full-scale measurements. For this purpose, several measuring instruments have been developed, following principles which differ only slightly. These instruments require careful handling and are subject to very many disturbances ; proximity effects, non-uniformity of the field and its inclination are the most important. It was thus necessary to define strict specifications and detailed instructions for use. Finally, it has been necessary to work out various methods of calculation and measurement to determine the physical effects of electric fields and to obtain the numerical values of the quantities associated with these effects : induced currents, both discontinuous and transient, capacitances of objects immersed in fields, potentials of "floating" objects (that is, electrically insulated objects in the space where the field prevails).

These various, strictly technical, aspects form the principal matter of the present guide.

The Working Group considered whether it was appropriate, within the framework of this document, to deal with the question of magnetic fields arising from high voltage apparatus. Insofar as the influence of magnetic fields on neighbouring power apparatus, resulting in the appearance of an induced EMF, is concerned, the matter is well understood and the necessary precautions have long been taken ; the CCITT rules, which determine the relationships between electric power lines and telecommunication circuits, are examples of this. Apart from this particular case and that of underground cables, where the coupling between circuits is very close and there is no risk except during the fraction of a second which represents the duration of a short-circuit, no unwanted interference effect has ever been reported to the relevant specialists.

Cependant, pour être complet, le guide comporte également un chapitre présentant les principales formules de calcul des champs magnétiques engendrés par les ouvrages à HT, ainsi que les procédés et appareils permettant la mesure de ces champs et de certains de leurs effets.

La question des effets biologiques des champs électrique et magnétique.

Le problème posé par la maintenance sous tension des ouvrages ayant trouvé une solution satisfaisante avec l'emploi des combinaisons conductrices, la question de l'effet des champs électriques était considérée comme résolue. En dehors de ce cas particulier, aucun effet significatif direct ne fut discerné, apte à fixer l'attention des ingénieurs.

Ce fut donc avec une grande surprise que l'on prit connaissance, en 1972, des publications émanant d'URSS, faisant état d'effets physiologiques défavorables des champs électriques sur l'homme. Ces effets conduisaient les auteurs russes à proposer des règles de séjour en champ électrique, la valeur limite pour un séjour de durée indéterminée étant fixée à 5 kV/m. Ces limitations n'étaient en outre applicables qu'aux personnels travaillant dans des postes. Or il se trouve que des champs de cet ordre de grandeur se rencontrent couramment sous les lignes à 400 kV, dont des dizaines de milliers de kilomètres en fonctionnement de par le monde ont fourni une expérience particulièrement étendue et significative, attestant leur totale innocuité. Les publications soviétiques posaient clairement le problème du séjour au voisinage des futures lignes de tensions plus élevées, non seulement pour le personnel spécialisé, mais également pour le grand public.

En ce qui concerne ce dernier, l'URSS admet depuis 1975 les limites suivantes :

10 kV/m à la traversée des routes et dans les zones d'accès fréquent,

15 kV/m dans les régions non habitées, mais accessibles

20 kV/m dans les zones d'accès difficile.

Au Japon, la principale raison de limitation des champs est l'effet d'induction sur les parapluies déployés, qui risque d'entraîner des sensations déplaisantes (umbrella effect). Le champ dans les zones accessibles au public est alors limité à 3 kV/m, ce qui nécessite fréquemment l'installation de conducteurs écrans (voir chapitre 2).

Dans d'autres pays, une certaine contestation écologique, probablement inspirée par ces travaux, s'est emparée de la question accusant les lignes d'un effet néfaste sur la santé du public. Cette contestation a commencé par un article virulent, dû à Louise et Peyton Young, paru en 1974 dans "Bulletin of the Atomic Scientists", article auquel se réfère maintenant la grande presse, en y ajoutant des considérations de plus en plus fantaisistes.

Il apparut donc urgent de faire le point en se basant sur des faits expérimentaux objectifs.

Ces assertions ont induit un nouvel intérêt des milieux scientifiques, techniques et médicaux concernés, et de nombreuses études et observations ont depuis lors été entreprises, dont les résultats constituent maintenant une très appréciable, cependant qu'encore incomplète, somme de connaissances. L'état actuel de ces connaissances et les conclusions que l'on peut en tirer seront exposés au chapitre 6.

On y verra que la plupart des recherches actuelles, par exemple menées sur des animaux de laboratoire, utilisent des intensités de champ élevées (> 20 kV/m), avec l'intention de mettre plus nettement une action éventuelle en évidence. Même à ces valeurs élevées, les effets constatés sont extrêmement ténus, à tel point que les résultats obtenus par les différents chercheurs sont toujours sujets à controverse. En outre, pour les raisons que nous avons développées plus haut, et en ce qui concerne les ouvrages de transport, il importerait essentiellement, à notre avis, de déterminer si un séjour dans un champ inférieur au champ de perception direct peut avoir une quelconque répercussion physiologique sur les êtres vivants.

Avant de quitter cet exposé introductif sur l'effet des champs sur les organismes vivants, nous voudrions rappeler qu'il existe des champs électriques naturels, dont l'intensité atteint largement celle que l'on peut rencontrer sous les ouvrages à HT. On sait que, par beau temps, il existe un champ permanent de l'ordre de 100 à 150 volts par mètre. Mais à l'approche d'un orage, l'intensité de ce champ croît brusquement, pour atteindre, à l'aplomb d'un nuage orageux, des valeurs telles que 20 kV/m au sol.

Ce n'est donc pas l'amplitude qui distingue les champs naturels des champs produits par les ouvrages de transport, mais uniquement le caractère périodique, à fréquence industrielle, de ces derniers. Il convient de noter que nous sommes en permanence baignés dans un environnement électromagnétique, naturel et artificiel, dont le spectre de fréquences s'étend de la fraction de Hertz au Gigahertz (10^9 Hz). Mais le mode d'action de ces champs dépend étroitement de la fréquence considérée.

Ainsi, dans le cas des champs à haute fréquence, tels que les micro-ondes des radars, des fours, ce sont des mé-

However, for completeness, the guide does comprise a chapter giving the principal formulas for calculating magnetic fields arising from high voltage installations, as well as the procedures and apparatus which permit the measurement of these fields and of some of their effects.

The question of biological effects of electric and magnetic fields.

With conducting overalls providing a solution to the problem of live line working, the question of effects of electric fields was considered as closed. Apart from this special case, no significant effect calling for the attention of engineers was seen.

USSR publications, in 1972, reporting undesirable physiological effects of electric fields on human beings, were therefore received with considerable surprise. These effects had led the USSR authors to propose regulations for exposure to electric fields, the limiting value for a stay of indeterminate duration (e.g., in substations) being fixed at 5 kV/m. Now it happens that fields of about this intensity are commonly found under 400 kV lines. The tens of thousands of kilometres of these lines, operating throughout the world, provide experimental data, of a particularly extensive and significant kind, that such lines are completely harmless. The USSR publications clearly raised the problem of access to the vicinity of future lines at higher voltages, not only for specialised staff but also for the general public.

As far as the latter is concerned, the USSR has accepted the following limits since 1975.

10 kV/m at road crossings and in areas to which there is frequent access,

15 kV/m in uninhabited but accessible regions,

20 kV/m in areas where access is difficult.

In Japan, the main reason for limiting fields is the induction effect on open umbrellas (umbrella effect), which is liable to cause unpleasant sensations. The field in areas accessible to the public is thus limited to 3 kV/m, which often necessitates the installation of screening conductors (see Chapter 2).

In other countries, probably as a result of these publications, ecological arguments, based on this point, alleged that power-lines were having a harmful effect on public health. These accusations began with a virulent article, written by Louise and Peyton Young, which appeared in 1974 in the "Bulletin of Atomic Scientists". This article has since been referred to in the popular press, which has embroidered it with further stories of an increasingly fantastic nature.

It thus became a matter of urgency to deal with the matter on the basis of objective experimental facts.

These assertions have aroused interest in scientific, technical and medical circles and numerous studies and programmes of observation have since been undertaken. The results of these now constitute a very substantial, though incomplete, volume of knowledge. The current extent of these data and the conclusions which can be drawn from them are discussed in Chapter 6.

It is seen there that the bulk of the current research, for example using laboratory animals, is done at high intensities of electric field (greater than 20 kV/m) with the intention of clearly demonstrating any possible effect. Even at these elevated field intensities, the reported effects are tenuous, to such an extent that the results obtained by different investigators are still subject to controversy. Apart from this, for the reasons which have been stated above, and as far as transmission apparatus is concerned, the essential point, in our view, is to determine whether immersion, in a field of an intensity below the perceptible level, can have any physiological effects on living beings.

Before leaving this introductory section on the effect of fields on living organisms, it is worth recalling the existence of natural electric fields, the intensity of which is broadly the same as of those under high-voltage installations. It is known that, in fine weather, a permanent electric field, of the order of 100 to 150 V/m, exists, but on the approach of a thunderstorm, the intensity of this field increases rapidly, to reach values as high as 20 kV/m at ground level underneath a thundercloud.

Therefore, it is not the amplitude which distinguishes natural fields from the fields produced by transmission equipment, but solely the oscillatory nature, at power frequency, of the latter. It should be noted that we are permanently immersed in an electromagnetic environment, both natural and artificial, the frequency spectrum of which extends from a fraction of a Hertz to the Gigahertz (10^9 Hz) range. But the way in which these fields act depends closely on the frequency concerned.

Thus, in the case of high-frequency fields, such as microwaves from radar equipment and microwave ovens,

canismes énergétiques qui interviennent, notamment sous forme de pertes diélectriques dans les tissus aqueux. Nous voudrions très fortement insister sur le fait que ces mécanismes n'existent pas, ou n'existent qu'à une échelle infinitésimale aux très basses fréquences qui nous occupent ici. Le seul mode d'action des champs à fréquence industrielle est un très faible courant d'influence parcourant un corps conducteur plongé dans le champ, courant qui n'est autre chose qu'un courant de couplage capacitif.

Certains esprits se sont également inquiétés d'une éventuelle action physiologique des champs magnétiques. Pour apprécier une telle éventualité, il faut retenir que l'amplitude des champs produite par les ouvrages de transport est, à la surface du sol, de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-5} Tesla, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que le champ magnétique terrestre. Ici encore, c'est donc exclusivement le caractère périodique, à fréquence industrielle, qui le différencie du champ terrestre naturel.

Insistons, pour terminer, sur le fait que nous ne considérons ici que les champs, électriques ou magnétiques, produits par les ouvrages de transport d'énergie. Nous excluons tant les champs à haute fréquence que les champs très intenses produits par certaines installations spéciales.

Nous avons également exclu de ce guide toute référence aux champs engendrés par les ouvrages de transport à courant continu. Des travaux concernant de tels champs sont en cours, mais il ne semble pas que ceux-ci puissent avoir un quelconque effet. Ceci résulte du fait que des courants induits ne sauraient être produits que par des champs alternatifs, et que, ainsi que nous l'avons mentionné plus haut, les champs continus font partie de notre environnement naturel.

Outre le champ électrostatique il peut y avoir à proximité des installations à courant continu des flux d'ions, engendrés par l'effet de couronne, ces ions migrant vers le sol sous l'effet d'une force unidirectionnelle (champ $\times$ charge) qui n'existe pas en courant alternatif. C'est pourquoi tout effet observé pourrait être aussi bien imputé aux ions eux-mêmes plutôt qu'au champ.

La charge d'espace associée aux ions est à même de modifier considérablement les valeurs des champs électriques, telles qu'on les déduit des calculs habituels.

power mechanisms play a part, particularly in the form of dielectric losses in aqueous tissues. We would like to emphasise very strongly the fact that these mechanisms do not exist, or only exist on an infinitesimally small scale, at the very low frequencies with which we are concerned here. The only way in which power frequency fields can act is by a very small induced current flowing through a conductive body immersed in the field, a current which is nothing more than a capacitively coupled current.

There are those who are also disturbed by the possibility of physiological effects of magnetic fields. To assess this possibility, it must be remembered that the amplitude of the fields produced by transmission installations is of the order of 10^{-6} to 10^{-5} Tesla at ground level, i.e. of the same order of magnitude as the terrestrial magnetic field. Here again, it is thus only the alternating character of the field, at power frequency, which distinguishes it from the natural magnetic field.

Finally, let us emphasise that we are only considering here the electric or magnetic fields produced by power transmission installations. We exclude both high-frequency fields and the very intense fields produced by certain special installations.

We have excluded from this guide any reference to the fields produced by HVDC transmission installations. Some work is in progress on such fields but their existence is not seen as presenting any threat. This is because induced currents arise only from AC fields and because, as stated above, unidirectional electric fields are, in any event, a part of our natural environment.

Apart from the electrostatic field, near DC installations there will sometimes be fluxes of ions, generated by corona and drifting to earth under the unidirectional force (field $\times$ charge) which is absent from AC fields. Any observed effects may therefore well arise from the ions themselves rather than from the field.

The space-charge associated with the ions is likely to modify considerably the intensities of electric field derived by basic calculation.

2. CALCUL DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

2.1. Quelques rappels – Champs non perturbés et champs perturbés

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler brièvement la nature physique d'un champ électrique, ainsi que la nature des phénomènes physiques mis en jeu lorsqu'un objet conducteur quelconque, pièce métallique ou organisme vivant, est plongé dans un tel champ.

2.1.1. Définition d'un champ électrique quasi-statique

Les champs électriques à fréquence industrielle, dont il est question ici, sont des champs quasi-statiques, dont les effets peuvent s'analyser à partir des notions classiques de l'électrostatique. Ces champs sont toujours engendrés par des charges électriques ; dans le cas d'un ouvrage à haute tension, les charges apparaissent à la surface des conducteurs aériens, lorsqu'une tension leur est appliquée. Le champ électrique n'est autre chose que l'expression de l'action à distance de ces charges, action dont la nature est coulombienne. Le champ électrique en un point quelconque de l'espace, représente la force, en intensité et en direction, qui serait appliquée à une charge positive placée en ce point. Le champ électrique est donc représentable par un vecteur, et il s'exprime en gradient de potentiel. Cette définition est entièrement contenue dans l'expression vectorielle :

$$\vec{F}(M) = q \cdot \vec{E}(M)$$

où F est la force qui serait appliquée à une charge q placée en un point M où règne un champ E .

2.1.2. Phénomène d'influence – Champ perturbé

Il résulte de ce qui précède, que lorsqu'un objet conducteur, quel qu'il soit, est plongé dans un champ électrique, celui-ci provoque une migration de charges électriques, qui viennent se disposer à la surface de cet objet. Ce phénomène reconnu dès les débuts de l'électricité est désigné par "effet d'influence" ou "induction électrostatique".

Les charges portées par l'objet créent à leur tour un champ électrique, lequel vient se superposer au champ d'origine. C'est cette superposition qui est la cause d'une déformation du champ total au voisinage de l'objet, et l'on parle alors de champ perturbé. L'intensité du champ varie localement, en fonction du rayon de courbure du corps perturbant (Fig. 2.1.).

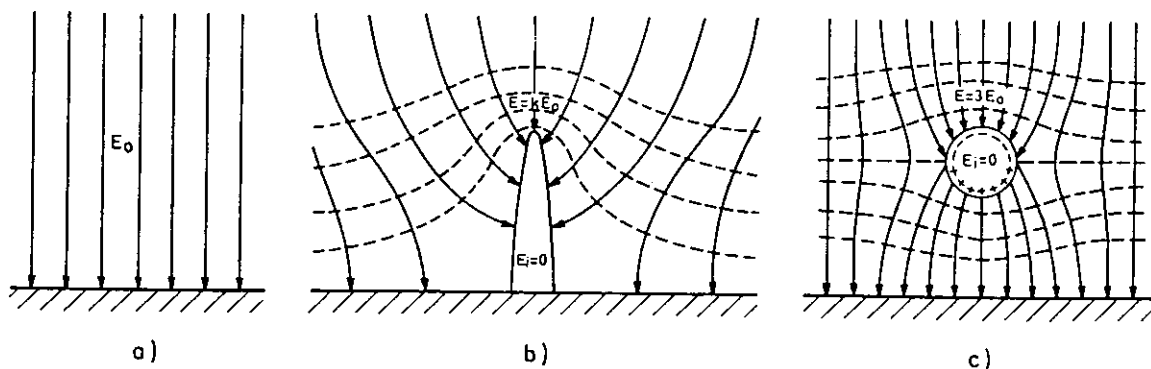


FIG. 2.1. – Perturbation du champ en présence d'objets conducteurs.

- a) champ non perturbé
- b) objet au sol
- c) objet à potentiel flottant

2. CALCULATION OF ELECTRIC FIELDS

2.1. Sundry reminders – Unperturbed and perturbed fields

It is perhaps worth while briefly reviewing the physical nature of an electric field and the nature of the physical phenomena which come into play when a conductive object of some kind, whether a metal part or a living organism, is immersed in such a field.

2.1.1. Definition of a quasi-static electric field

Power frequency electric fields, with which we are concerned here, are quasi-static fields, the effects of which can be analysed on the basis of the conventional notions of electrostatics. These fields are always produced by electric charges ; in the case of a high-voltage installation, charges appear at the surface of the overhead conductors when a voltage is applied to them. The electric field is nothing more than the expression of the effect of these charges at a distance, which follows Coulomb's law. The electric field at any point in space represents the force, in magnitude and direction, which would be applied to a unit positive charge located at that point. The electric field can thus be represented by a vector expressed as gradient of potential. This definition is entirely contained in the vectorial expression :

$$\vec{F}(M) = q \cdot \vec{E}(M)$$

where $\vec{F}$ is the force which would be applied to a charge q located at a point M where a field $\vec{E}$ prevails.

2.1.2. Phenomenon of induction – perturbed field

It follows from the above that, when a conductive object of any kind is immersed in an electric field, the latter causes a migration of electric charges, which arrange themselves on the surface of the object. This phenomenon, recognised since the first discoveries of electricity, is called the "influence effect" or "electrostatic induction".

In turn, the charges carried by the object create an electric field, which is superimposed on the original field. It is this superposition which changes the total field in the vicinity of the object, around which the field is described as "perturbed". The intensity varies locally, with the radius of curvature of the perturbing body (Fig. 2.1.).

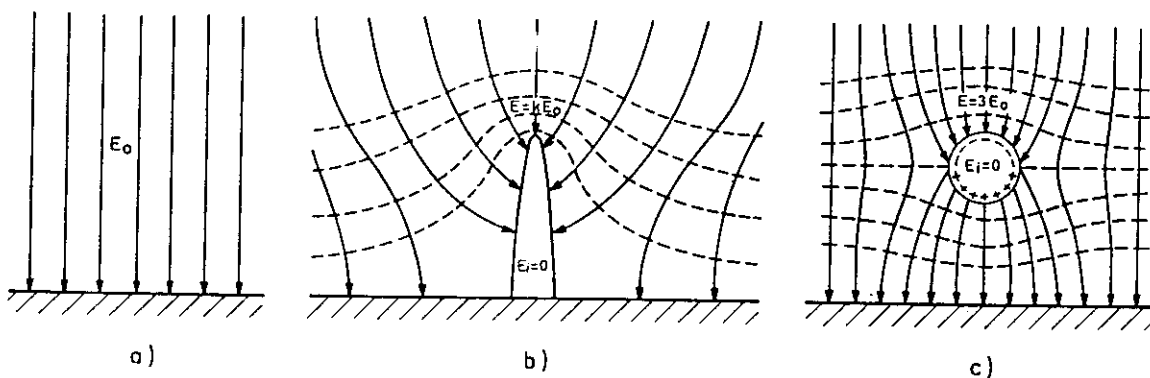


FIG. 2.1. – Perturbation of field by conductive objects.

- a) unperturbed field
- b) object on ground
- c) object at floating potential.

Ainsi, le fait de disposer un objet dans le milieu modifie la répartition initiale du champ électrique. Dans le cas particulier d'une sphère métallique le calcul montre que l'intensité maximale du champ électrique perturbé atteint 3 fois l'intensité du champ électrique uniforme non perturbé. Ce renforcement peut être encore bien supérieur dans le cas d'objets allongés. Des exemples en seront donnés au chapitre 3.

Il est donc essentiel de distinguer l'intensité du champ électrique non perturbé qui existait avant l'introduction de tout objet (véhicule, animal, végétal, structure, ...) par rapport aux différentes intensités du champ perturbé qui existe réellement en présence de l'objet.

2.1.3. Le courant d'influence

Pendant la durée de l'établissement d'un champ électrique continu ou pendant la durée de pénétration d'un objet dans la zone de champ, il apparaît un mouvement de charges dans cet objet. Ce mouvement se traduit par un courant électrique à travers l'objet considéré.

Mais à champ constant ou au repos, tout passage du courant cesse, et l'état d'équilibre est alors tel que le champ électrique à l'intérieur de l'objet est nul : c'est le principe fondamental de la cage de Faraday.

Lorsque le champ appliqué est alternatif, le changement périodique de son sens entraînera, dans cet objet, un va-et-vient des charges positives et négatives. Ce va-et-vient se traduit par un courant alternatif à l'intérieur de l'objet. Il est très important de noter que ce courant ne dépend que de la forme de l'objet considéré et de l'intensité du champ appliqué, mais est, dans de très larges limites, indépendant de la résistivité interne, c'est-à-dire de la nature du conducteur. Ainsi, à 50 Hz, cette indépendance se vérifie jusqu'à des résistivités aussi élevées que $10^5 \Omega \cdot m$. Dans ces conditions, aussi bien les sols surplombés par les ouvrages à haute tension que les organismes vivants peuvent être considérés comme conducteurs, propriété qui simplifie les calculs où ces éléments interviennent.

La seule cause possible d'existence d'un champ électrique interne sera la différence de potentiel provoquée par le passage du courant induit : ce champ se chiffre en microvolts par mètre pour les métaux, en millivolts par mètre pour les organismes vivants.

2.2. Méthodes de détermination de l'intensité du champ électrique

Outre les méthodes classiques exclusivement applicables aux dispositifs à géométries simples, la détermination des champs et des potentiels fait appel à un des moyens suivants :

- méthode analytique (charges équivalentes),
- méthodes numériques de résolution de l'équation de Laplace $\Delta V = 0$ (différences finies, éléments finis),
- méthode de Monte-Carlo
- modèle réduit.

Le choix de la méthode dépend du type de problème à résoudre. La méthode par différences finies s'adapte très bien aux espaces confinés, de même que la méthode par éléments finis.

Il est possible de tenir compte de l'espace infini moyennant certains artifices. Les méthodes de résolution par éléments finis et par différences finies, demandent la mise en place d'un maillage plus ou moins serré dans le milieu compris entre les électrodes.

Par contre, la méthode des charges équivalentes trouve son application naturelle lorsque le problème est de calculer le gradient de potentiel au voisinage du sol sous les lignes de transport et dans les postes.

A ce stade, on doit se rappeler que l'application d'une méthode de résolution quelle qu'elle soit suppose une définition précise du système ou encore sa modélisation.

On peut évidemment raffiner la modélisation du système, mais en général au prix d'un temps de calcul beaucoup plus considérable et pas toujours compatible avec le résultat recherché.

Inversement, si la modélisation est trop sommaire ou conduit à s'écarter trop sensiblement de la situation réelle, il est clair que les résultats du calcul seront peu significatifs.

Ce qui précède nous conduit à proposer la méthode des charges équivalentes dans l'étude des champs électriques sous les lignes et dans les postes (de structures simplifiées pour les besoins du calcul). Cette méthode a déjà été développée dans le guide des "Perturbations engendrées par l'effet de couronne des réseaux de transport", édité par la CIGRE, mais dans le cadre d'une application différente.

Thus, the fact of placing an object in the environment modifies the initial distribution of the electric field. In the particular case of a metal sphere, calculation shows that the maximum intensity of the perturbed electric field reaches 3 times the intensity of the uniform, unperturbed electric field. This enhancement can be even greater in the case of elongated objects. Examples are given in Chapter 3.

It is thus essential to distinguish between the intensity of the unperturbed electric field which existed before the introduction of any object (vehicle, animal, vegetable, structure. . .) and the different intensities in the perturbed field which actually exists in the presence of the object.

2.1.3. The induced current

During the time in which a DC electric field is being established or during the time in which an object moves into the field region, movement of charge occurs in the object. This movement constitutes an electric current flowing through the object in question.

But, with a constant field or the object at rest, all current flow ceases and the equilibrium condition is then such that the electric field inside the object is zero ; this is the basic principle of the Faraday cage.

When an alternating field is applied, the periodic change in its direction will cause a to-and-fro motion of positive and negative charges in the object. This to-and-fro motion shows itself by an alternating current flowing inside the object. It is very important to note that this current only depends on the shape of the object in question and on the intensity of the applied field, but within very wide limits it is independent of the internal resistivity, that is, of the nature of the conductor. Thus, at 50 Hz, this independence is maintained up to resistivities as high as $10^5 \Omega.m$. Under these conditions, not only the ground underneath high-voltage installations but also living organisms can be considered as conductors, a property which simplifies the calculations where these elements are involved.

The only possible cause for the existence of an internal electric field will be the potential difference caused by the passage of the induced current ; this field will have a numerical value in microvolts per metre for metals and in millivolts per metre for living organisms.

2.2. Methods of determination of the intensity of the electric field

Apart from the conventional methods which are exclusively applicable to devices with simple geometry, the determination of fields and potentials makes use of the following means :

- Analytical method (equivalent charges)
- Numerical methods of solution of the Laplace equation $\Delta V = 0$ (finite differences, finite elements),
- Monte Carlo method,
- Reduced-scale model.

The choice of method depends on the type of problem to be solved. The finite difference method is very well suited for enclosed spaces, as is the finite element method.

It is possible to take account of unbounded spaces by the use of certain expedients. The methods of solution by finite elements or finite differences require the establishment of a more or less closely spaced grid in the medium between the electrodes.

On the other hand, the equivalent charge method is naturally applicable when the problem is to calculate the potential gradient near the ground under transmission lines and in sub-stations.

At this stage, it must be remembered that the application of any solution-method presupposes exact definition or modelling of the system.

Obviously, the modelling of the system can be refined, but generally at the expense of much greater calculation time, which is not always compatible with the desired result.

Conversely, if the modelling is too cursory or leads to too great a deviation from the true situation, it is obvious that the calculated results will have little significance.

The above considerations lead us to propose the method of equivalent charges in the investigation of the electrical fields under lines and in substations (of simplified structure for calculation purposes). This method has already been developed in the guide to "Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems", published by CIGRE, but for a different application.

2.2.1. Charges équivalentes

Cette méthode est basée sur la théorie des images électrostatiques, selon laquelle les charges superficielles d'un contour conducteur fermé peuvent être remplacées par des charges intérieures. Convenablement placées, ces charges engendrent un système de lignes de force et d'équipotentiellles inchangé à l'extérieur du contour. Le principe permet donc de représenter une surface équipotentielle de forme prédéterminée par un système de charges intérieures.

Plus le nombre de charges équivalentes est élevé, meilleure est la définition du contour que l'on veut représenter. Suivant les géométries particulières à représenter, on emploie en pratique, non seulement des charges ponctuelles mais aussi des charges filiformes (représentation de tubes et conducteurs cylindriques) et annulaires (tores et sphères). La définition mathématique du problème nécessite autant d'équations linéaires reliant charges et potentiel du contour que de points de définition de celui-ci. Un tel système à n équations (où n peut dépasser 100) ne peut se résoudre que par ordinateur.

Q_i étant les charges équivalentes mises en place, le potentiel V et le champ E en un point quelconque P de l'espace s'expriment alors par :

$$V_{(P)} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}$$

$$\vec{E}_{(P)} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \vec{r}_i}{r_i^3}$$

où r_i est la distance entre la charge locale Q_i et le point P considéré et ϵ_0 la constante diélectrique de l'air.

2.2.2. Différences finies

La méthode est basée sur le développement de la fonction du potentiel V en série de Taylor.

Dans l'hypothèse d'un maillage carré de côté a (voir Fig. 2.2.), on écrira en se limitant aux trois premiers termes de la série :

$$V_1 = V_0 + a \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} \right)$$

$$V_2 = V_0 + a \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} \right)$$

$$V_3 = V_0 - a \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} \right)$$

$$V_4 = V_0 - a \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} \right)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 4 V_0 + a^2 \left(\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} \right)$$

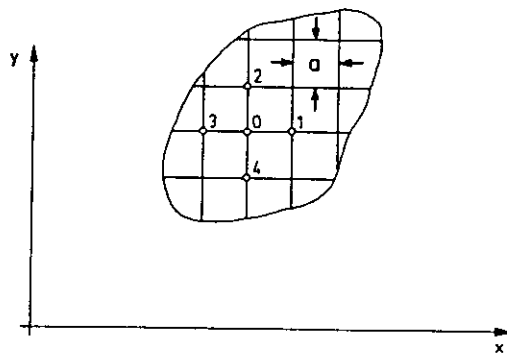


FIG. 2.2. - Méthode des différences finies : maillage d'une zone de champ.

2.2.1. Equivalent charges

This method is based on the theory of electrostatic images, according to which the surface charges of a closed conductive contour can be replaced by internal charges. Suitably located, these charges generate a system of lines of force and equipotential lines which is unchanged outside the contour. The principle thus allows an equipotential surface of predetermined shape to be represented by a system of internal charges.

The higher the number of equivalent charges, the higher the accuracy with which the contour can be represented. According to the particular geometries to be represented, not only point charges, but also linear charges are used in practice (for representation of tubes and cylindrical conductors) as well as annular charges (for toroids and spheres). The mathematical definition of the problem necessitates as many linear equations, connecting charges and potential of the contour, as there are points of definition of the latter. Such a family of n equations (where n can exceed 100) can only be solved by computer.

If Q_i denotes the equivalent charges inserted, the potential V and the field $\vec{E}$ at any point p in space are then expressed by :

$$V_{(p)} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}$$

$$\vec{E}_{(p)} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \vec{r}_i}{r_i^3}$$

where r is the distance between the local charge Q_i and the point p in question.

2.2.2. Finite differences

The method is based on the development of the potential function V in a Taylor series.

Assuming a square mesh of side a (see Fig. 2.2.), then restricting oneself to the first three terms of the series, one will write :

$$V_1 = V_0 + a \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} \right)$$

$$V_2 = V_0 + a \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} \right)$$

$$V_3 = V_0 - a \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta x^2} \right)$$

$$V_4 = V_0 - a \frac{\delta V}{\delta y} + \frac{1}{2} \left(a^2 \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} \right)$$

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 4 V_0 + a^2 \left(\frac{\delta^2 V}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 V}{\delta y^2} \right)$$

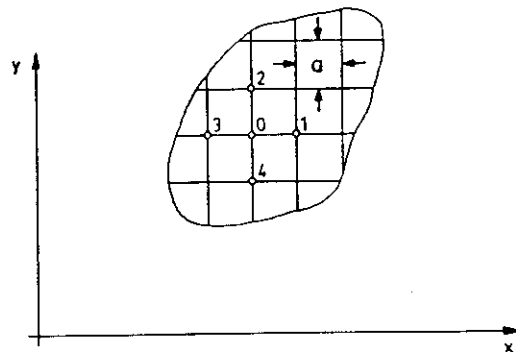


FIG. 2.2. – Finite difference method : mesh within section of field.

Si on néglige le second terme de second membre (maillage serré), par rapport au premier, il vient :

$$V_0 \approx \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 V_i$$

On construit de la sorte un système de n équations à n inconnues dont la solution fournira les potentiels cherchés. A partir des potentiels, il est aisé de déterminer l'intensité du champ électrique.

Il convient de noter que la précision est directement fonction du maillage.

2.2.3. *Éléments finis*

La méthode des éléments finis est basée sur le principe énoncé comme suit : la distribution d'équilibre des charges en présence dans un domaine clos est telle que l'énergie électrostatique associée au champ soit minimale.

Pour résoudre le problème, cette méthode divise le domaine considéré en un nombre fini d'éléments suffisamment petits, de forme géométrique simple et de matériau homogène ; ces éléments sont connectés les uns aux autres au moyen de noeuds, de telle sorte à constituer un réseau ne comportant ni lacunes ni recouvrements.

La solution numérique consiste à rechercher les potentiels des noeuds qui minimisent l'énergie électrostatique incluse dans chaque élément, ceci après avoir prédéterminé la loi polynomiale qui définit le potentiel à l'intérieur des éléments eux-mêmes.

Du point de vue de son application, la méthode des éléments finis exige un nombre considérable de données d'entrée, dont la préparation peut cependant être rendue automatique dans certains cas : ce sont notamment les cas de problèmes bi-dimensionnels dérivés de problèmes tri-dimensionnels à symétrie cylindrique ou axiale. Le cas tri-dimensionnel général est, quant à lui, le plus souvent peu maniable.

L'avantage de la méthode est qu'elle permet de considérer des configurations comportant des charges d'espace, des objets à potentiel flottant, ainsi que des matériaux de propriétés diélectriques différentes. Son emploi peut être utile pour étudier finement une partie (c'est-à-dire un domaine clos) d'une configuration complexe, en particulier comme auxiliaire d'une autre méthode de calcul qui permet, elle, de définir les conditions aux limites du domaine clos mentionné ci-dessus.

Finalement, la méthode des éléments finis autorise une bonne représentation graphique des résultats.

2.2.4. *Méthode de Monte-Carlo*

La méthode de Monte-Carlo peut être considérée comme une généralisation de la méthode des éléments finis, par l'introduction de concepts statistiques.

La détermination du potentiel en un point quelconque (P_0) est obtenue à partir de la construction d'un nombre n de trajets aléatoires, chacun d'eux étant issu de P_0 et rejoignant, après un certain nombre de pas, un point P^* de la limite, sur laquelle les conditions de Dirichlet sont données.

Une estimation statistique du potentiel en P_0 est par conséquent la suivante :

$$V(P_0) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V(P^*_j)$$

Plus le nombre de trajets effectués est élevé, meilleure sera la valeur obtenue du potentiel. En tout état de cause, l'estimation de l'écart-type permet d'évaluer le degré d'approximation du calcul.

Cette méthode peut être utilisée pour l'étude de problèmes de champs dans des domaines ouverts, avec des configurations d'électrodes relativement complexes, et ne nécessite qu'un nombre réduit de données d'entrée. Elle n'est, par contre, pas adaptée à l'étude de champs électriques en présence d'électrodes flottantes ou de matériaux de propriétés diélectriques différentes.

If the second term of the R.H.S. is neglected in relation to the first (closely spaced mesh), this comes to :

$$V_0 \approx \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 V_i$$

In this way, a system of n equations, with n unknowns, is constructed and its solution will provide the required potentials.

From the potentials, the intensity of the electric field can easily be determined.

It must be noted that the accuracy is directly related to the mesh-size.

2.2.3. The Finite Element Method

The finite element method is based on the principle that the equilibrium distribution of the charges present in a closed domain is such as to minimize the electrostatic energy associated with the field.

This method breaks down the problem by subdividing the whole domain into a finite number of sufficiently small elements of simple geometrical form and uniform material, which are connected to each other by means of nodes in such a way as to form a mesh that has neither holes nor overlaps.

The digital solution of the system therefore consists in looking for the nodal values of the potential that bring to a minimum the electrostatic energy enclosed in each element, after having predetermined the polynomial law that defines the potential inside the elements themselves.

From the applicational point of view, the f.e.m. calls for a considerable amount of input data, the preparation of which can, however, be automatic in case of bi-dimensional problems deriving from three-dimensional ones with cylindrical or axial symmetry. The general three-dimensional case, on the other hand, is very unwieldy.

The advantage of this method is to allow consideration of cases in which there are present, inside the domain, space charge, objects with a floating potential, and materials with different dielectric properties. It may be useful for the detailed study of a part (closed domain) of a complex configuration, especially as an auxiliary for other methods of calculation that may be used for defining the conditions at the boundary of the above mentioned closed domain.

Lastly, the method allows for a good graphic display of the results.

2.2.4. The Monte Carlo Method

The Monte Carlo method may be considered a generalization of the finite differences method, through the introduction of statistical concepts.

Determination of the potential at any point (P_0) is obtained from the construction of a number n of random walks, each of which, starting from P_0 , after a certain number of steps reaches a point P^* of the boundary on which Dirichlet conditions are given.

A statistical estimate of the potential at P_0 is therefore as follows :

$$V(P_0) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V(P_j^*)$$

The greater the number of walks performed, the more correct will be the above value. In any case, the estimate of the standard deviation enables an evaluation to be made of the degree of approximation of the calculation.

This method can be applied to the study of field problems in open regions, with electrode configurations that may even be quite complex, and it calls for only a small amount of input data. On the other hand, it is not suitable for studying electric fields in the presence of floating electrodes or of materials with different dielectric properties.

2.3. Champ sous une ligne

Ce calcul fait appel à la méthode des charges équivalentes ; il comporte essentiellement deux étapes :

- calcul des charges équivalentes par unité de longueur de conducteur,
- calcul du champ électrique produit par ces charges.

Les conducteurs sont supposés infiniment longs, parallèles au sol et celui-ci est considéré comme suffisamment "bon conducteur" ($10^5 \Omega \text{ m}$ ou moins).

La relation générale que l'on utilise pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle :

$$\{q\} = [C] \{V\}$$

où $\{q\}$ et $\{V\}$ sont les matrices unicolonnes des charges et des potentiels des conducteurs (le sol étant au potentiel nul), et $[C]$ est la matrice carrée des coefficients de capacité propres et mutuelles. Pour déterminer $[C]$, on commence d'abord par calculer les coefficients de potentiel de la ligne. Ceux-ci sont obtenus par application directe de la théorie des images : on remplace le sol, considéré comme un plan de potentiel nul, par l'image des conducteurs par rapport à ce plan. Désignons par $i, j, \dots$ les conducteurs parallèles en présence et par i', j' , leurs images (Fig. 2.3.).

Les coefficients de potentiel s'écriront :

avec $\epsilon_0 = 1/36 \pi 10^9 \text{ F/m}$ (constante diélectrique de l'air)

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \ln \frac{2 h_i}{r_i}$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

on sait de plus que $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$

Par inversion $[C] = [\lambda]^{-1}$

Et enfin $\{q\} = [C] \{V\}$

Dans le cas des conducteurs en faisceaux, on adoptera un conducteur de rayon équivalent r_{eq} défini par (Fig. 2.4.) :

$$r_{eq} = R \sqrt[n]{\frac{n r}{R}}$$

r : rayon d'un sous-conducteur

n : nombre de sous-conducteurs

R : rayon géométrique du faisceau.

Les charges par unité de longueur étant déterminées, on calcule l'intensité du champ électrique à l'aide du théorème de Gauss $E = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0 \rho}$ avec ρ distance du point où se calcule le champ par rapport au conducteur ou à son image et qui porte la charge q par unité de longueur.

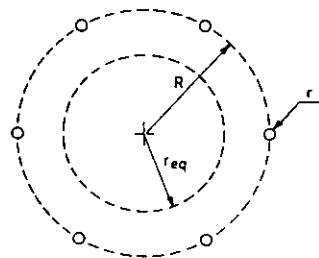
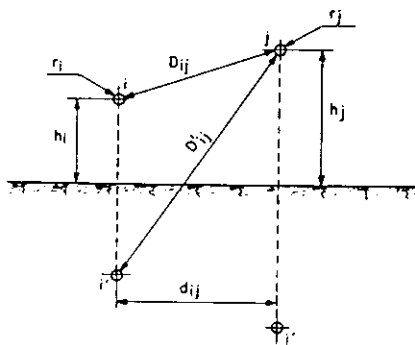


FIG. 2.3. – Schéma utilisé pour le calcul des coefficients de potentiel. FIG. 2.4. – Faisceau de conducteurs : rayon du conducteur équivalent.

2.3. Field under a line

This calculation makes use of the equivalent charges method ; it consists essentially of two stages :

- calculation of the equivalent charges per unit length of conductor,
- calculation of the electric field produced by these charges.

The conductors are assumed to be infinitely long and parallel to the ground, and the latter is considered to be a sufficiently "good conductor" ($10^5 \Omega.m$ or less).

The general relationship which is used to calculate the charges carried by the conductors of a multi-conductor line is the matrix equation :

$$\{q\} = [C] \{V\}$$

where $\{q\}$ and $\{V\}$ are the single-column matrices of the charges and potentials of the conductors (the ground being at zero potential) and $[C]$ is the square matrix of the characteristic and mutual capacitance coefficients. To determine $[C]$ first of all the potential coefficients of the line are calculated. These are obtained by direct application of the theory of images : the ground, considered as a plane at zero potential, is replaced by the image of the conductors in respect to this plane. Let us designate the actual parallel conductors by $i, j \dots$ and their images by $i', j' \dots$ (Fig. 2.3.)

The potential coefficients will be written :

with $\epsilon_0 = 1/36 \pi 10^9 \text{ F/m}$ (dielectric constant of air)

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \ln \frac{2 h_i}{r_i}$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2 \pi \epsilon_0} \ln \frac{D'_{ij}}{D_{ij}}$$

and it is also known that $\lambda_{ij} = \lambda_{ji}$

By inversion $[C] = [\lambda]^{-1}$

and finally $\{q\} = [C] \{V\}$

In the case of conductors in bundles, an equivalent conductor (see Fig. 2.4) can be adopted, having radius r_{eq} , where :

$$r_{eq} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{nr}{R}}$$

r : radius of a sub-conductor

n : number of sub-conductors

R : geometrical radius of the bundle.

When the charges per unit length are determined, the intensity of the electric field is calculated by means of Gauss's theorem $E = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0 \rho}$ where ρ is the distance from the point at which the field is calculated to the conductor or its image, carrying charge q per unit length.

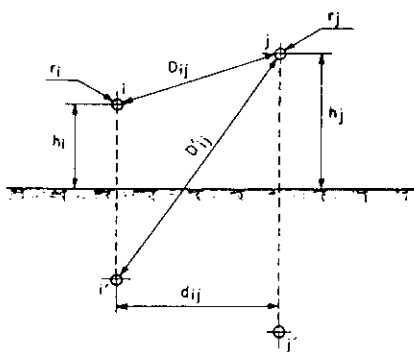


FIG. 2.3. – Diagram used for calculating potential coefficients.

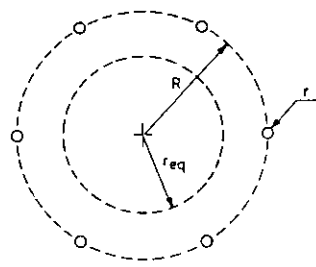


FIG. 2.4. – Bundled conductors : radius of equivalent conductor.

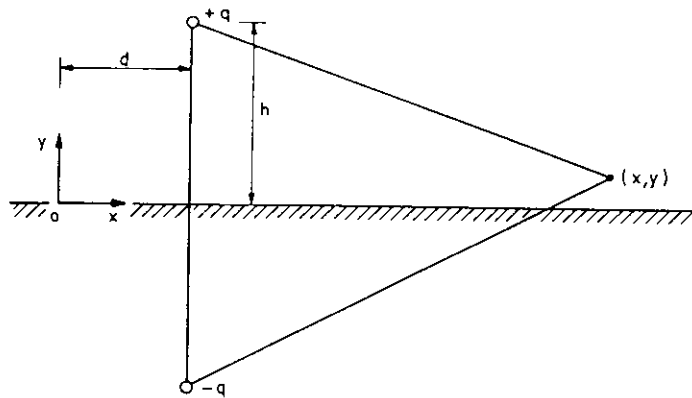


FIG. 2.5. - Schéma utilisé pour le calcul du champ électrique.

Développons les résultats dans le cas d'un conducteur (ou d'un faisceau) et de son image et considérons un plan perpendiculaire à la ligne (Fig. 2.5) :

Les coordonnées du conducteur sont (d, h).

Les coordonnées de son image sont (d, -h).

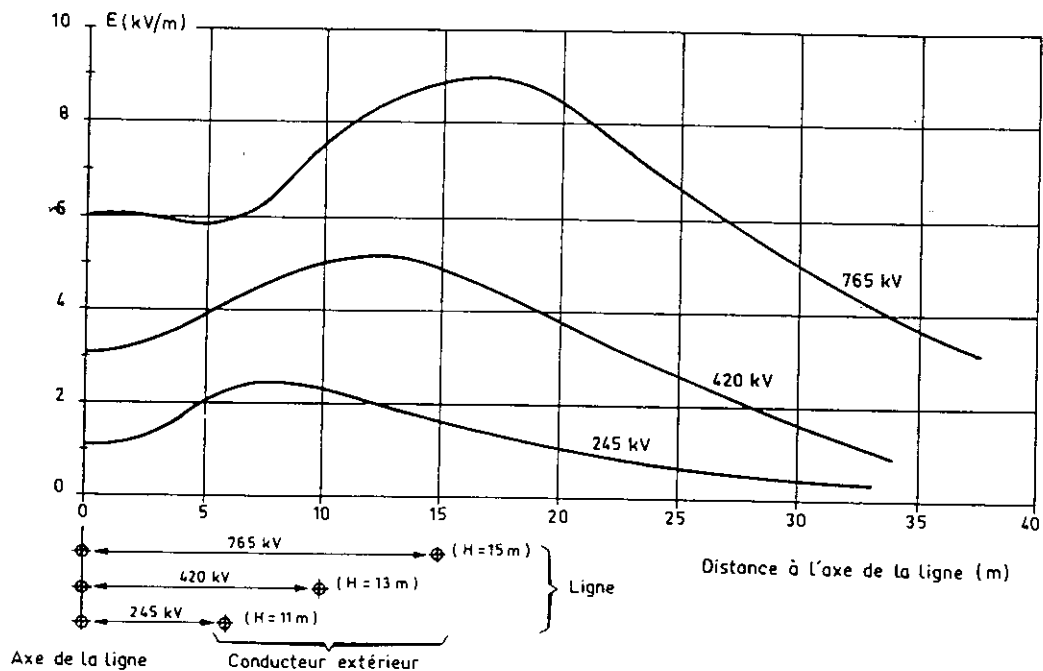
Les composantes E_x et E_y de l'intensité du champ électrique en (x, y) s'expriment par :

$$E_x = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0} \left\{ \frac{x - d}{(x - d)^2 + (y - h)^2} - \frac{x - d}{(x - d)^2 + (y + h)^2} \right\}$$

$$E_y = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0} \left\{ \frac{y - h}{(x - d)^2 + (y - h)^2} - \frac{y + h}{(x - d)^2 + (y + h)^2} \right\}$$

Dans l'hypothèse de calcul de l'intensité du champ électrique au niveau du sol ($y = 0$), $E_x = 0$, et on a :

$$E_y = \frac{q}{\pi \epsilon_0} \frac{h}{(x - d)^2 + h^2}$$



H = Hauteur du conducteur au-dessus du sol pour le calcul du champ

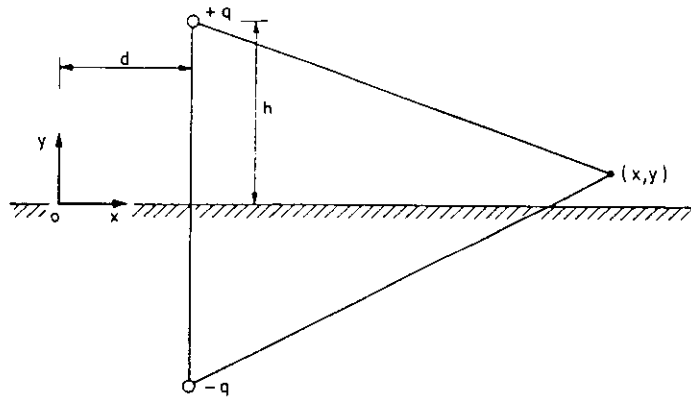


FIG. 2.5. - Diagram used for calculation of electric field.

Calculating the results for the case of a single conductor (or a bundle) and its image and considering a plane perpendicular to the line (Fig. 2.5.) :

The coordinates of the conductor are (d, h) .

The coordinates of its image are $(d, -h)$.

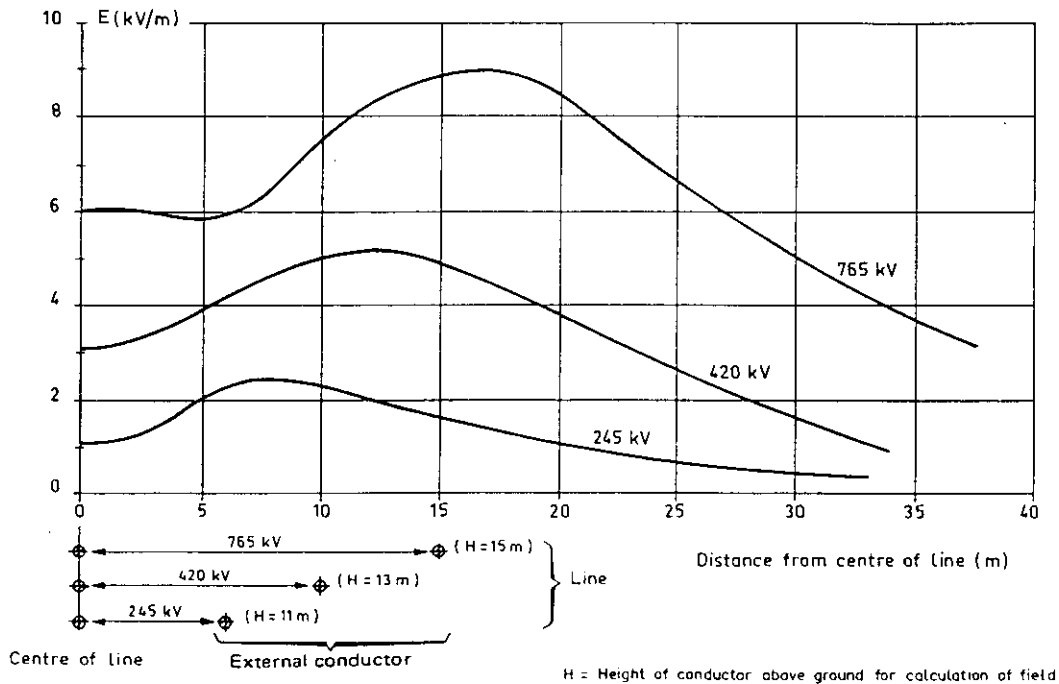
The components E_x and E_y of the intensity of the electrical field at (x, y) are expressed by :

$$E_x = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0} \left\{ \frac{x - d}{(x - d)^2 + (y - h)^2} - \frac{x - d}{(x - d)^2 + (y + h)^2} \right\}$$

$$E_y = \frac{q}{2 \pi \epsilon_0} \left\{ \frac{y - h}{(x - d)^2 + (y - h)^2} - \frac{y + h}{(x - d)^2 + (y + h)^2} \right\}$$

Assuming the intensity of the electric field is being calculated at ground level ($y = 0$), $E_x = 0$:

$$E_y = \frac{q}{\pi \epsilon_0} \frac{h}{(x - d)^2 + h^2}$$



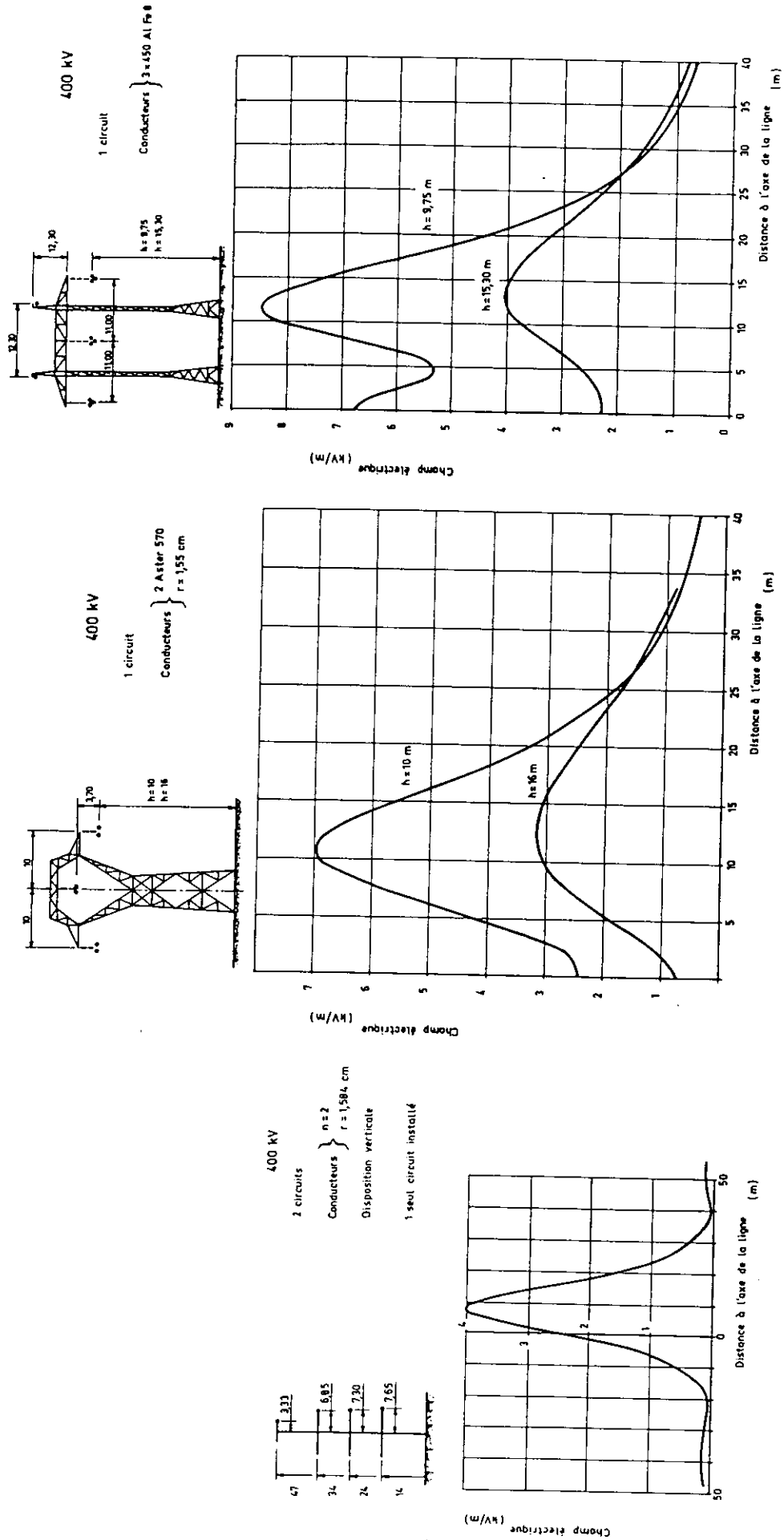


FIG. 2.6. (a-g). — Profil transversal du champ sous quelques lignes typiques, à 2 mètres au-dessus du sol.

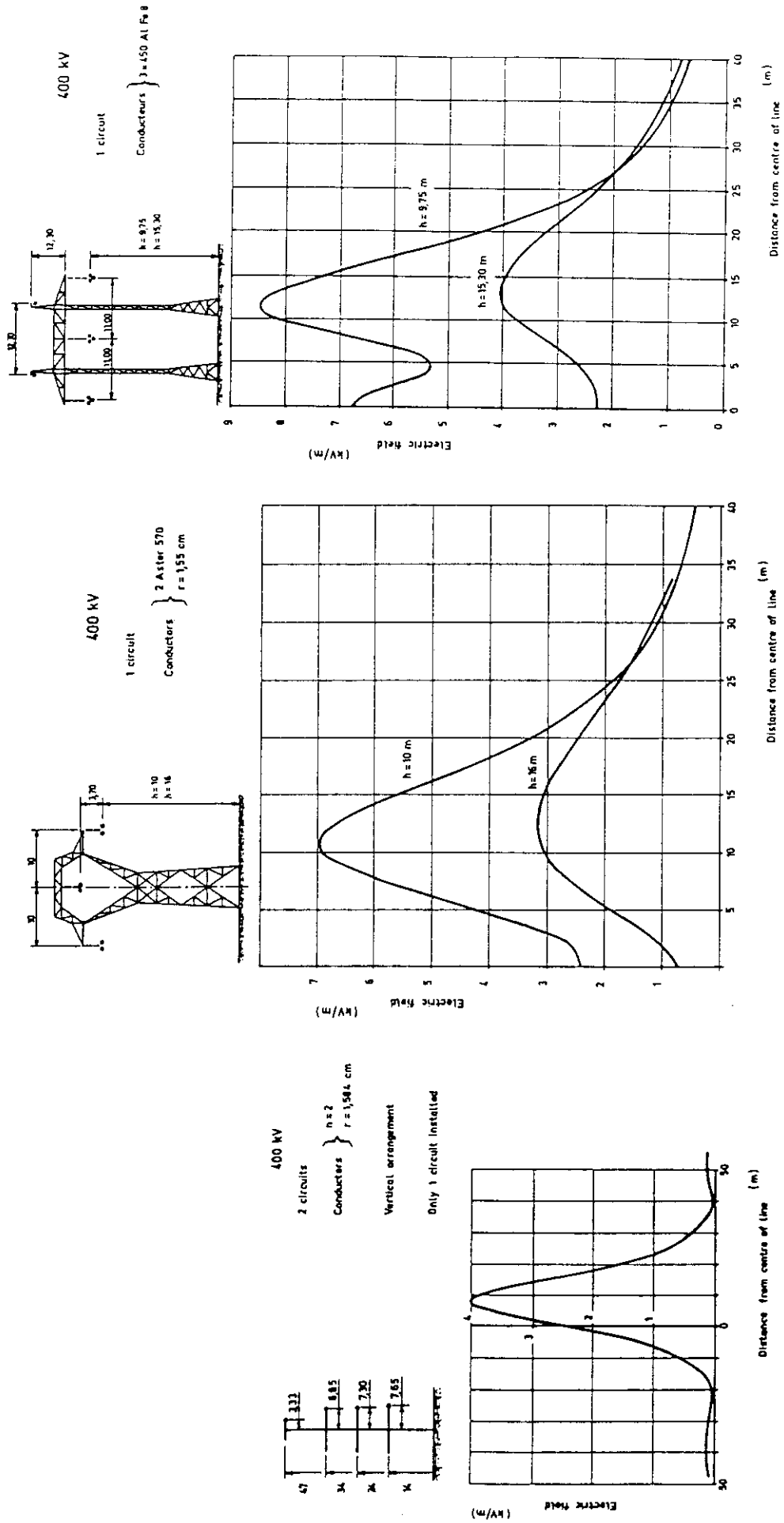


FIG. 2.6. (a-g). - Transverse profiles of field intensity under typical lines, at 2 metres above ground.

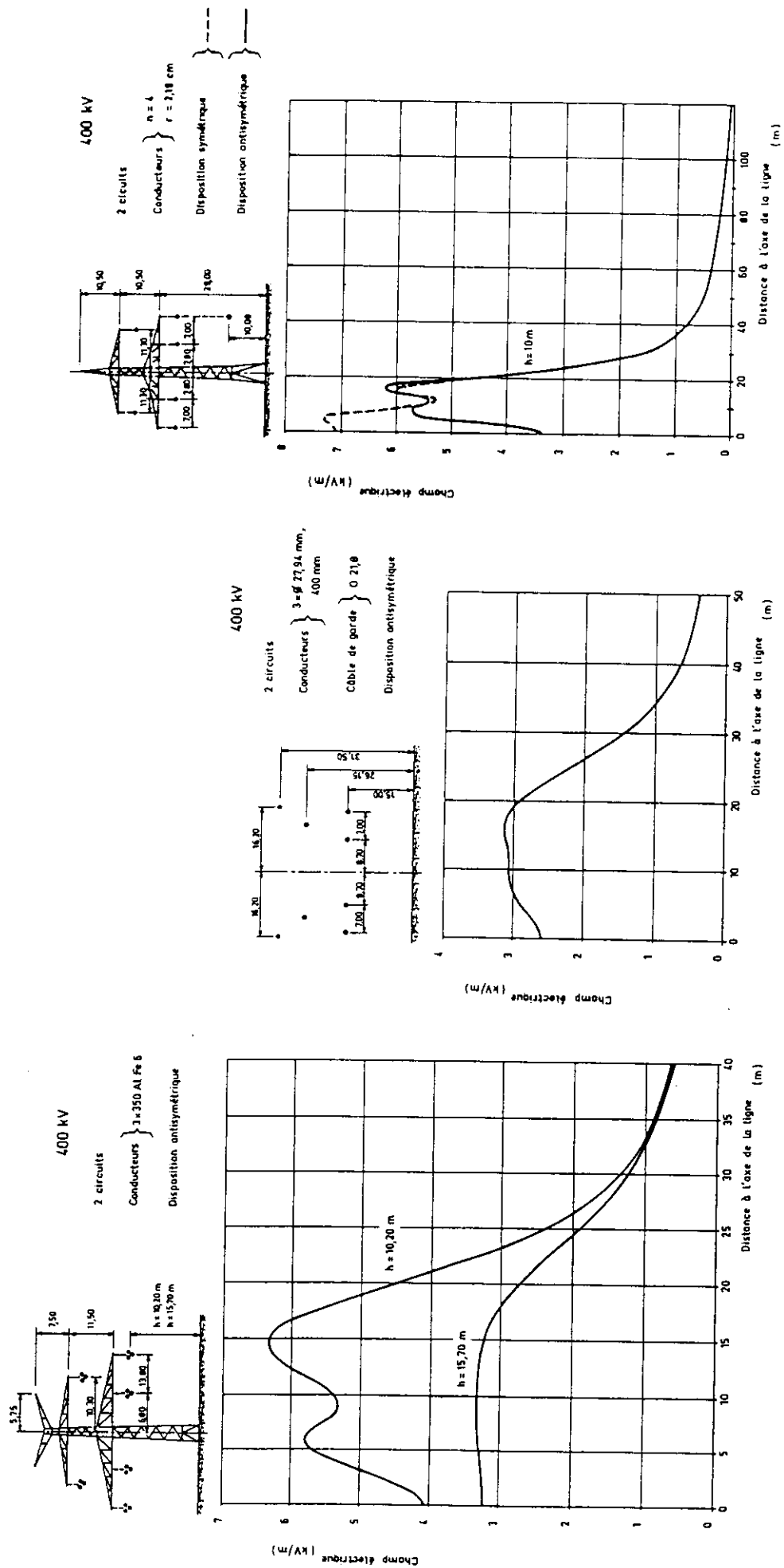


FIG. 2.6. (a-g). — Profil transversal du champ sous quelques lignes typiques, à 2 mètres au-dessus du sol.

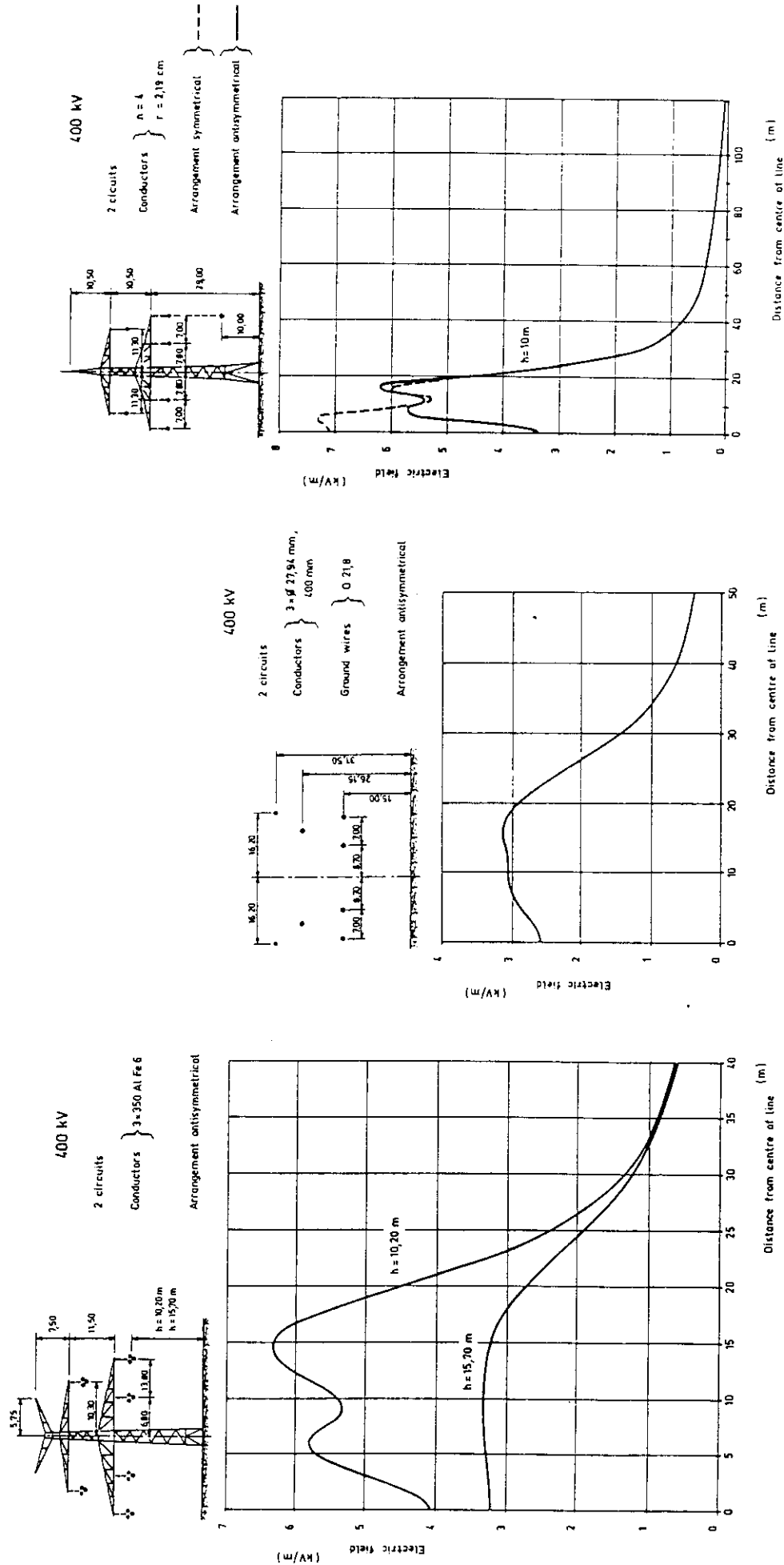


FIG. 2.6. (a-g). -- Transverse profiles of field intensity under typical lines, at 2 metres above ground.

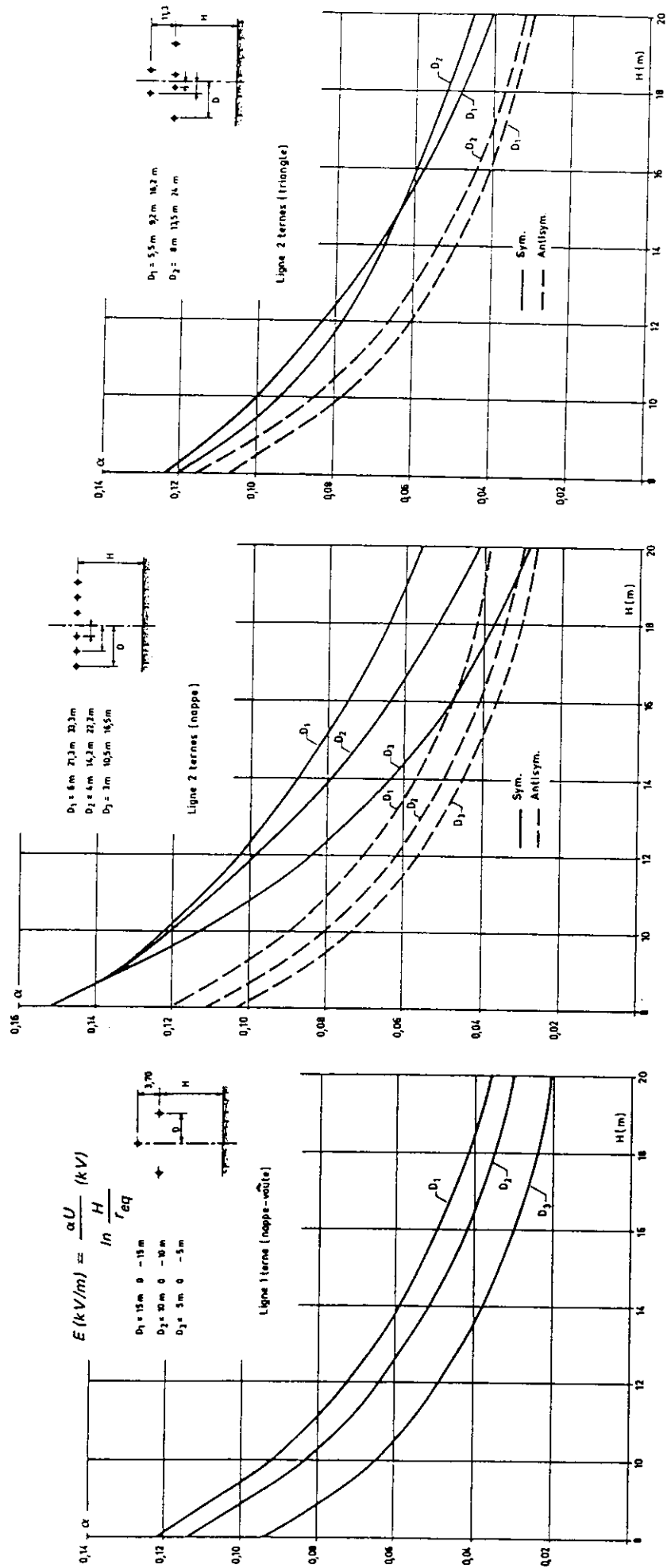


FIG. 2.7. (a-c). — Abaques permettant la détermination du champ maximal au sol, pour plusieurs configurations de lignes.
 U est la tension composée.

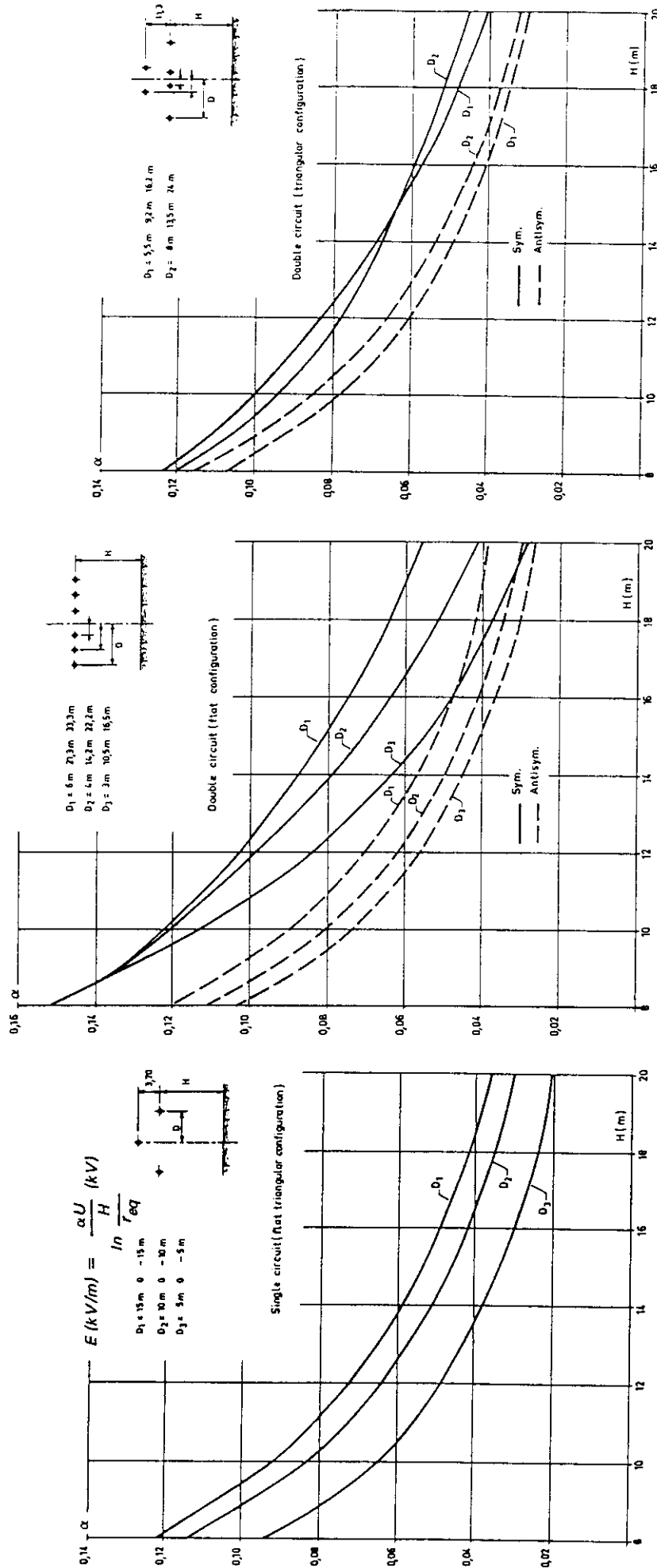


FIG. 2.7. (a-c). - Charts allowing maximum ground level intensities to be read off, for various line configurations.
 U is the phase-to-phase voltage.

Dans le cas d'un réseau polyphasé, le champ résultant en chacun des points de l'espace est un champ tournant elliptique. Au niveau du sol cependant, l'ellipse dégénère, le champ est perpendiculaire au sol. De plus et dans une zone comprise entre 0 et ≈ 2 m au-dessus du sol, la composante verticale du champ électrique présente un grand degré d'uniformité et par ailleurs la composante horizontale est négligeable. Cette constatation conduit à retenir et ce, avec une bonne approximation, un espace où le champ électrique serait initialement uniforme pour y évaluer la perturbation apportée par la présence d'un objet, autrement dit l'intensité du champ électrique perturbé (2.1.2.).

Vu que les charges portées par les différents conducteurs sont représentées par des nombres complexes (réseau polyphasé), les composantes de l'intensité du champ électrique le sont également. Les ordinateurs modernes permettent de traiter ce type de problème automatiquement, sans difficulté majeure.

Les figures 2.6. (a-g) donnent quelques exemples de profils transversaux de l'intensité du champ, relatifs à quelques lignes typiques. Ces profils sont calculés au voisinage du sol, et au point bas d'une portée en terrain plat horizontal.

Les figures 2.7. (a-c) sont des abaques qui permettent d'obtenir le champ maximal au niveau du sol, en fonction des paramètres de la ligne.

2.4. Champ sous un jeu de barres

Pour calculer le champ créé par un jeu de barres horizontales dans un poste, on procède rigoureusement de la même manière.

La figure 2.8. donne deux exemples, un pour un double jeu de barres à 400 kV, et l'autre pour un jeu de barres simple à 750 kV.

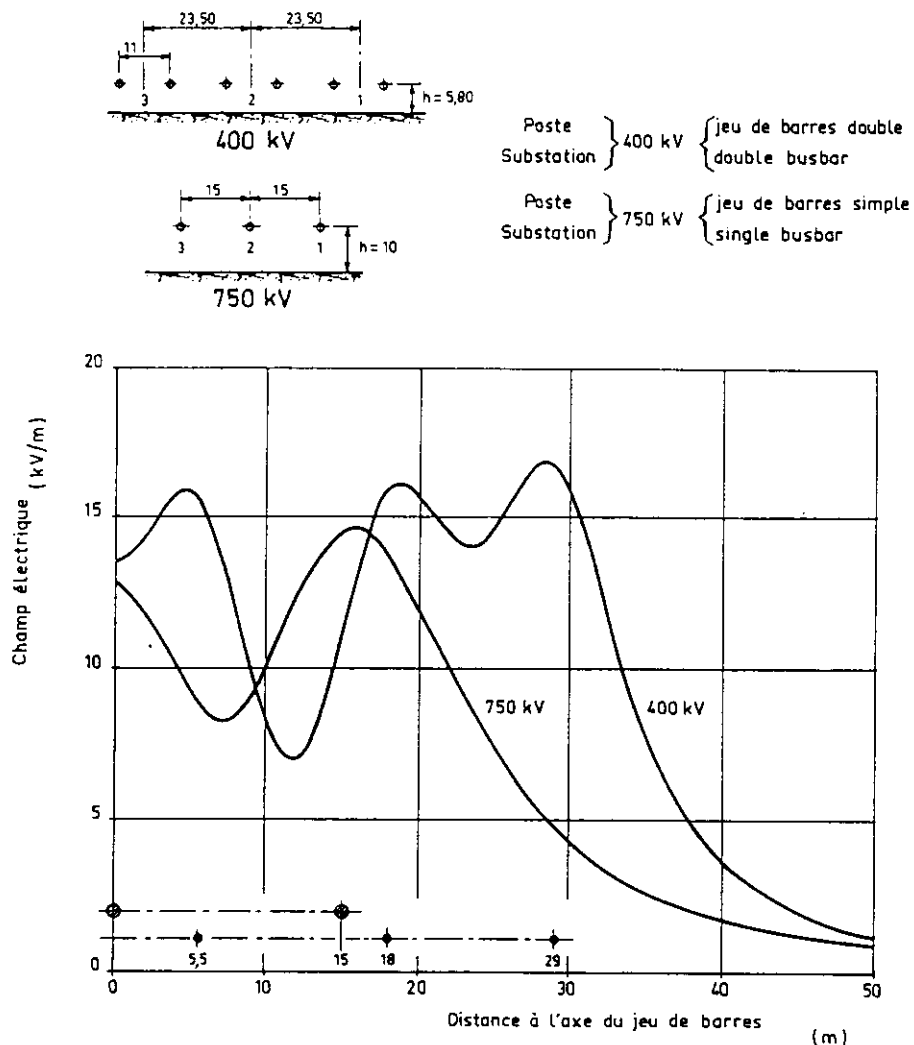


FIG. 2.8. – Champ électrique au sol sous des jeux de barres (distances en mètres).

In the case of a polyphase system, the resultant field at each point in space is a rotating elliptical field. However, at ground level the ellipse degenerates and the field is perpendicular to the ground. Furthermore, in a zone between 0 and 2 m above the ground, the vertical component of the electric field is very uniform and the horizontal component is negligible. This finding leads to the adoption, to a good degree of approximation, of a space where the electric field would initially be uniform, in order to evaluate the perturbation caused there by the presence of an object, or in other words the intensity of the perturbed electric field (2.1.2.).

Since the charges carried by the different conductors are represented by complex numbers (polyphase system), so too are the components of the intensity of the electric field. Modern computers allow this type of problem to be dealt with automatically, without major difficulties.

Figures 2.6 (a-g) give a few examples of transverse profiles of the field intensity, relating to a number of typical lines. These profiles are calculated near the ground and at the lowest point of a span on flat, level ground.

Figure 2.7 (a-c) are charts allowing the maximum ground level intensities to be read off, in terms of the line parameters.

2.4. Field under busbars

To calculate the field produced by a set of busbars in a sub-station, exactly the same procedure is followed. Figure 2.8 gives two examples, one for a double set of busbars at 400 kV, and the other for a single set at 750 kV.

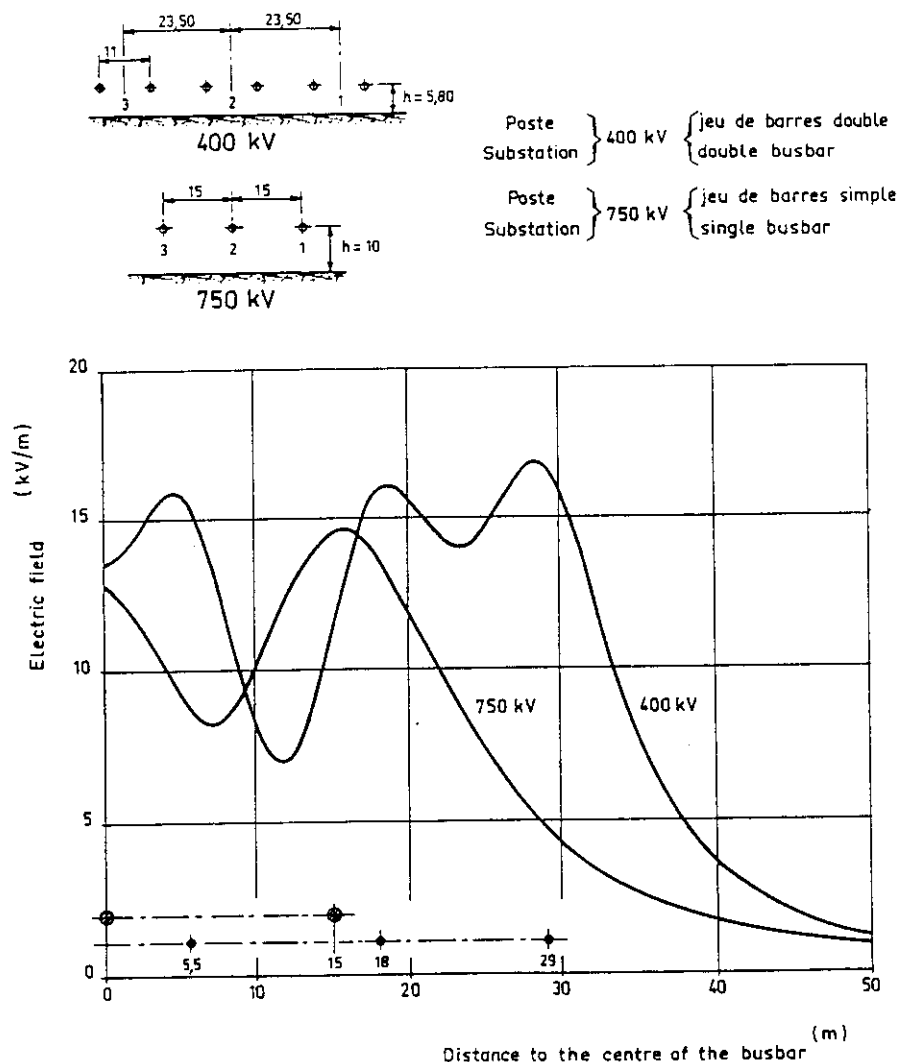
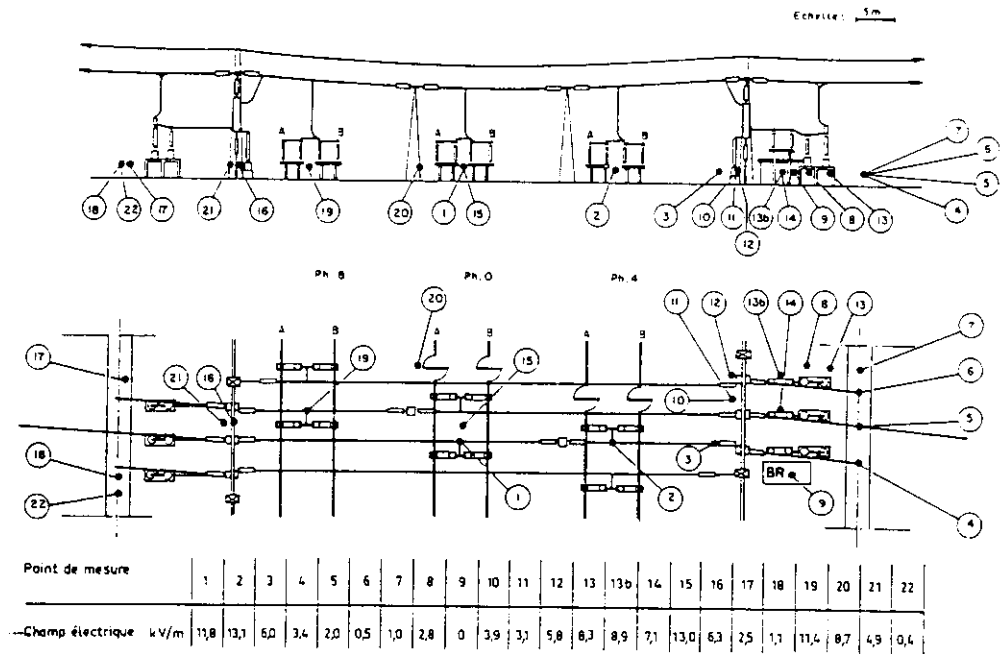
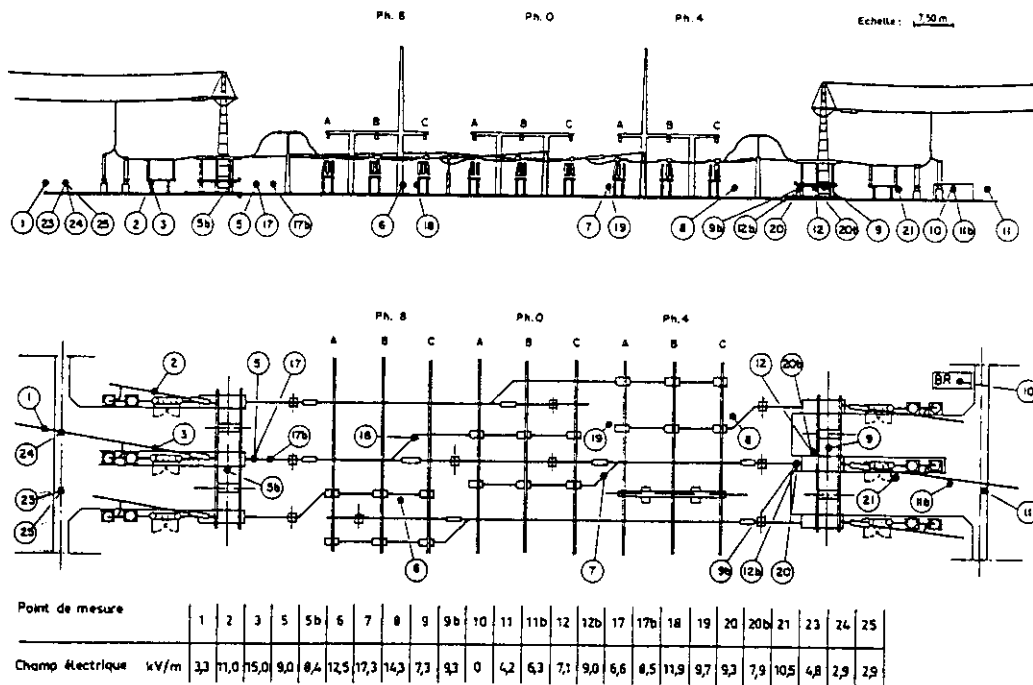


FIG. 2.8. — Electric field at ground level under sets of busbars (distances in metres).

POSTE 225 kV



POSTE 400 kV



POSTE 735 kV

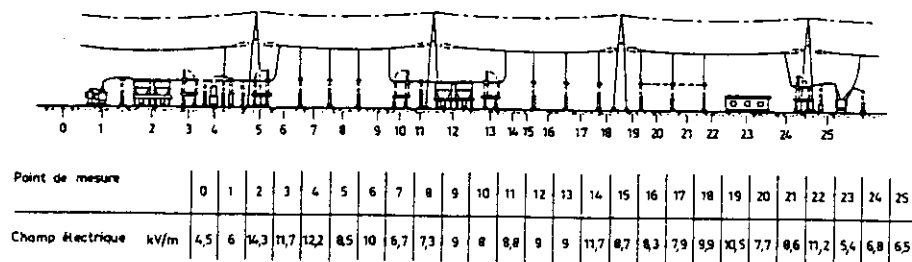
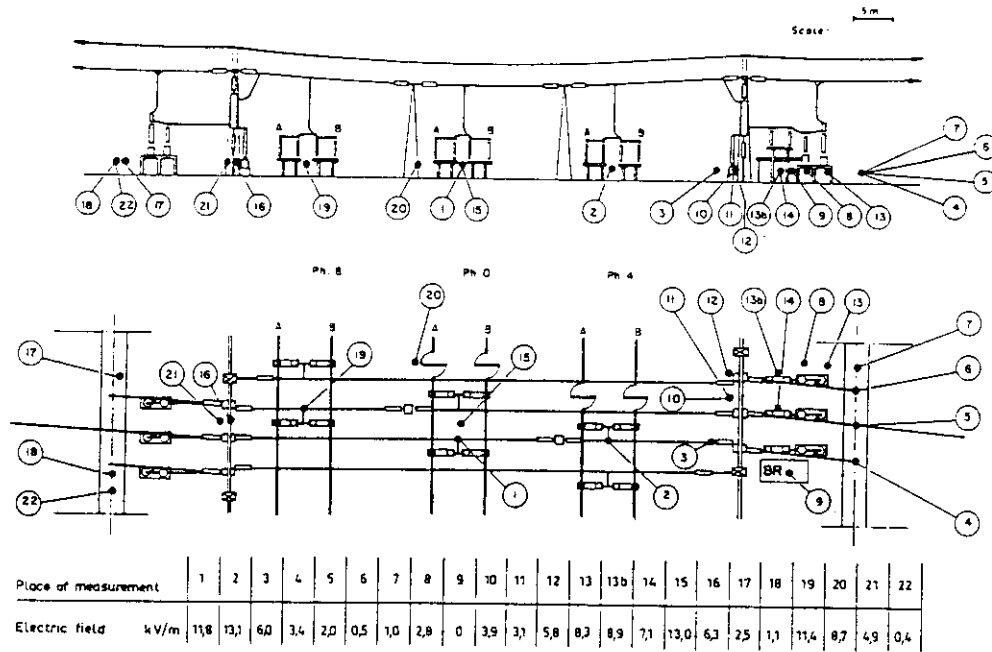
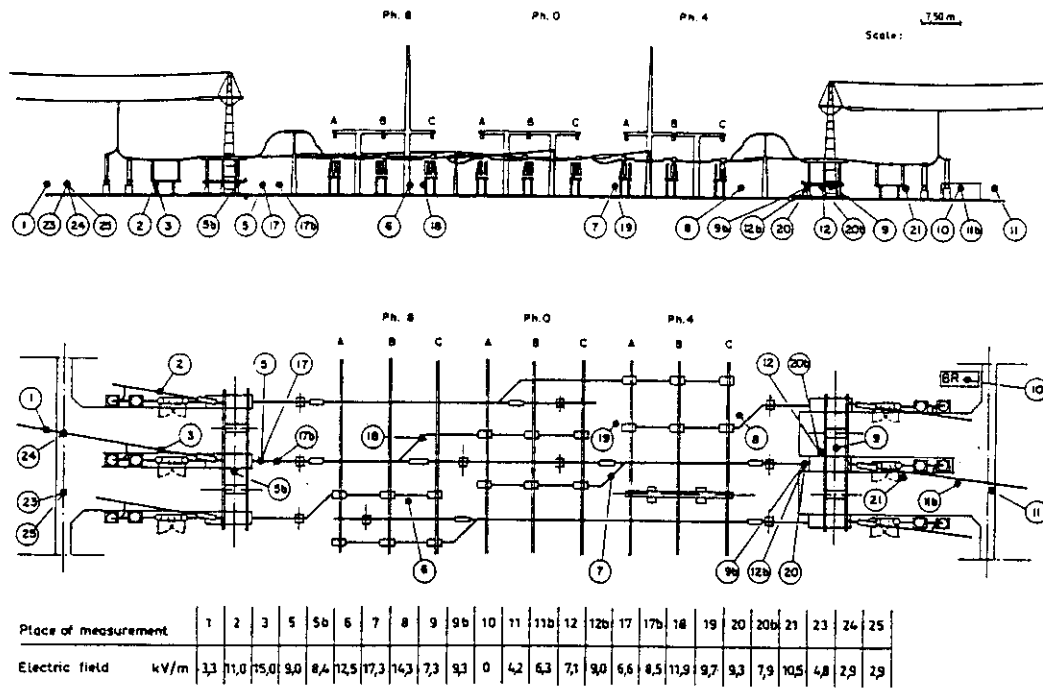


FIG. 2.9. — Exemples de mesures de champs électriques dans les postes de diverses configurations.

225 kV SUBSTATION



400 kV SUBSTATION



735 kV SUBSTATION

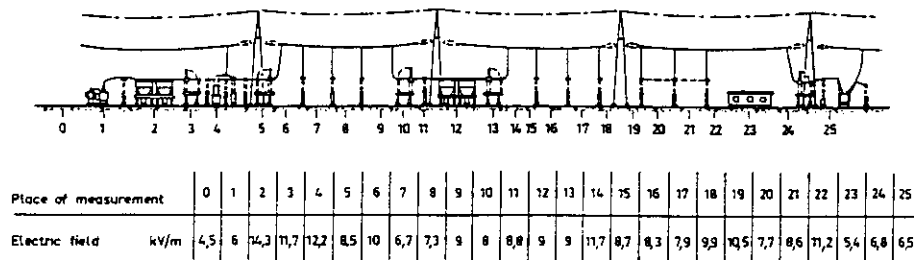


FIG. 2.9. - Values of electric field intensity measured in substations of various configurations.

Lorsque des barres ou des conducteurs horizontaux de postes sont installés en deux niveaux superposés, le niveau supérieur étant perpendiculaire au niveau inférieur, un calcul simple ne peut être effectué. En pratique, on obtiendra une bonne approximation du champ combiné, au sol, par la méthode suivante :

- on calcule le champ dû aux jeux de barres inférieures en ignorant les barres supérieures,
- on majore le champ de 20 % au droit d'un croisement lorsque la barre supérieure est de même phase que la barre inférieure, et on le minore de 20 % lorsque les barres sont de phase différente.

A titre d'information, l'illustration suivante (Fig. 2.9 (a-c)) donne quelques valeurs mesurées dans des postes à 225 kV, 400 kV et 735 kV.

2.5. Effet d'écran – Cas des lignes

Il existe en général deux moyens pour réduire l'intensité du champ sous les lignes : le premier est un choix convenable de la hauteur des pylônes, déterminant la hauteur des conducteurs de phase au-dessus du sol, associé à la disposition la plus favorable des indices horaires des tensions ; le second est l'utilisation de conducteurs jouant le rôle d'écrans, placés entre les conducteurs de phase et le sol.

Pour calculer la réduction de champ obtenue par la mise en place de conducteurs-écrans, on utilise la méthode exposée en 2.3. On incorpore les caractéristiques et les paramètres de position des conducteurs dans la matrice des coefficients de potentiel $[\lambda]$. On calcule les charges $\{q\}$ portées par tous les conducteurs, en prenant soin d'affecter aux conducteurs-écrans le potentiel $V = 0$, puis on calcule le profil du champ résultant. On peut aussi utiliser comme écrans les conducteurs d'une ligne de plus faible tension placés sous la ligne à Très Haute Tension. Il faut évidemment leur affecter leur potentiel réel.

A titre d'exemple, des calculs d'intensité du champ électrique sous une ligne à 750 kV ont été effectués afin d'étudier l'influence du nombre de conducteurs sur l'efficacité de l'effet d'écran.

Le pylône de cette ligne était du type "portique". La distance entre faisceaux suspendus par des chaînes en V, était de 13,5 m. Chaque faisceau était constitué de 4 conducteurs 670 Alfe 8 (36 brins d'aluminium de diamètre 4,5 mm, sur 12 brins d'acier de diamètre 3 mm). Les câbles de garde et les conducteurs-écrans étaient du type 185 Alfe 8 (36 brins d'aluminium de diamètre 2,5 mm sur 12 brins d'acier de diamètre 2,5 mm).

La distance minimale entre conducteurs-écrans et faisceaux de phases était de 6,7 m, les conducteurs-écrans étant à 5,3 m au-dessus du sol.

L'efficacité de l'écran, exprimée par le rapport entre le champ maximal d'origine à 1,8 m au-dessus du sol et le champ en présence d'écrans, est indiquée au tableau I.

TABLEAU I

Nombre de conducteurs-écrans	0	3	7	16	31
Efficacité de l'écran	1	1,42	1,55	1,79	1,86

On peut voir que l'augmentation du nombre de conducteurs-écrans ne conduit pas à une réduction proportionnelle de l'intensité du champ.

Il convient par ailleurs de noter que la présence des conducteurs-écrans a pour effet secondaire un accroissement du champ superficiel des conducteurs de phases, conformément au tableau II.

TABLEAU II

Nombre de conducteurs-écrans	0	3	7	16	31
Champ superficiel maximal (kV/cm)	17,78	18,03	18,22	18,46	18,57
Accroissement du champ superficiel (%)	0	1,40	2,47	3,82	4,44

En conséquence, les conducteurs-écrans ont une influence sensible sur les pertes par effet de couronne (tableau III).

When busbars or other horizontal conductors in sub-stations are installed at two levels, one above another, the higher level being perpendicular to the lower, a simple calculation cannot be carried out. In practice, a good approximation to the combined field, at ground level, will be obtained by the following method :

- The field due to the lower busbar array is calculated, ignoring the upper set.
- The field is increased by 20 % under an intersection where the upper busbar is of the same phase as the lower busbar, and it is reduced by 20 % where the bars are of different phases.

For information, the following illustrations (Fig. 2.9 (a-c)) give a few values measured in 225 kV, 400 kV and 735 kV substations.

2.5. Shielding effect : Transmission lines

Generally, there are two possible ways of reducing the electric field intensity under transmission lines at ground level, either a suitable choice of tower height, governing the clearance to ground of the phase conductors with best rotation of phase voltages, or the use of shielding wires, located between the phase conductors and earth.

To calculate the reduction in field obtained by the installation of shielding conductors, the method shown in 2.3 is used. The characteristics and positional parameters of the conductors are incorporated in the matrix of potential coefficients $[\lambda]$. The charges $\{q\}$ carried by all the conductors are calculated, taking care to assign the potential $V = 0$ to the screening conductors, and then the resultant field profile is calculated.

As an example, calculations of the electric field intensities under a 750 kV transmission line were made to verify the influence of shielding wires as a function of their number.

The tower of the transmission line was of portal type. The distance between phase conductor bundles, which were suspended on V-type insulator strings, was 13.5 m. Each bundle comprised four conductors of type 670 Alfe 8 [36 Al strands (4.5 mm dia.) on 12 Fe strands (3 mm dia.)]. For earth conductors and shielding wires the conductor type was 185 Alfe 3 [36 Al strands (2.5 mm dia.) on 12 Fe strands (2.5 mm dia.)].

The minimum distance between shielding wires and phase conductors was 6.7 m ; the shielding wires were 5.3 m above ground.

The "efficiency" of the shielding wires, expressed as the ratio of the maximum electric field intensity at 1.8 m above ground withouth shielding wires to that with shielding wires, is given in Table 1.

TABLE I

Number of shielding wires	0	3	7	16	31
Efficiency of shielding	1	1.42	1.55	1.79	1.86

It can be seen that increasing the number of shielding wires does not lead to a proportional reduction of intensity.

Moreover, it should be remembered that the presence of the shielding wires, in the space between phase conductors and ground, has the secondary effect of increasing the surface electric gradient at the conductors, as shown in Table II.

TABLE II

Number of shielding wires	0	3	7	16	31
Maximum surface gradient kV/cm	17.78	18.03	18.22	18.48	18.57
Increase in surface gradient %	0	1.4	2.47	3.02	4.44

Shielding wires have, in consequence, a measurable effect on the level of corona losses : see Table III.

TABLEAU III

Nombre de conducteurs-écrans	0	3	7	16	31
Accroissement des pertes couronne (%)	0	13,0	23,4	37,8	45,5

2.6. Effet d'écran — Cas des jeux de barres

Une méthode de calcul analogue a été utilisée pour examiner l'effet d'écran de conducteurs placés au-dessous d'un double jeu de barres dans un poste à 750 kV. La distance entre barres et sol était de 9,5 m. La distance entre les barres d'un jeu était de 12 m, et la distance entre les 2 jeux voisins de 18 m. Le diamètre des barres était de 200 mm, celui des conducteurs-écrans de 6 mm.

Les calculs ont été effectués pour des hauteurs des écrans, au-dessus du sol, de 2 — 2,5 — 3 et 3,5 mètres, l'intensité du champ a été calculée à 1,8 m au-dessus du sol. L'écartement entre les conducteurs-écrans était de 2 m, le corridor protégé se prolongeant de 2 m de part et d'autre des deux jeux de barres.

Le résultat des calculs d'efficacité du dispositif d'écran est donné au tableau suivant :

TABLEAU IV

Hauteur des conducteurs-écrans au-dessus du sol (m)	3,5	3	2,5	2	sans écran
Champ maximal (kV/m)	9,45	10,0	10,75	12,0	15,35
Efficacité des écrans	1,62	1,53	1,43	1,28	1,0

On constate que l'efficacité de l'écran croît avec la hauteur des conducteurs au-dessus du sol. Il convient néanmoins de considérer deux exigences contradictoires : la diminution du champ doit être confrontée à la nécessité de maintenir le niveau perturbateur des barres et de l'appareillage à un niveau acceptable.

Le principal inconvénient de ces dispositifs de réduction de champ est de restreindre l'accès au poste de l'appareillage d'entretien.

Des grillages faisant office d'écran peuvent cependant être utiles, disposés au voisinage immédiat des coffrets de commande d'appareillage, de relayage, etc. . .

En ce qui concerne la protection individuelle du personnel d'entretien ayant à se déplacer dans des zones de forte intensité de champ, des combinaisons conductrices peuvent être plus commodes que des écrans, à condition que leur conception assure suffisamment de confort et de sécurité. Plusieurs pays disposent d'une bonne expérience d'emploi de telles combinaisons.

2.7. Effet d'écran des habitations situées près des lignes.

Les habitations constituent vis-à-vis de leurs occupants un écran, dû à leur présence même, dont l'efficacité est considérable. En Angleterre, où de nombreuses maisons sont situées directement sous des lignes de transport, de nombreuses mesures ont été effectuées (Stringfellow 1978), montrant que le facteur de réduction du champ à l'intérieur des habitations était compris entre 10 et 20. Toutes les maisons étaient en briques, au toit recouvert de tuiles, et contenaient des conduites métalliques de gaz et d'eau ainsi que les canalisations de l'installation électrique. Les facteurs élevés de réduction qui ont été mesurés ne sont pour cette raison pas nécessairement applicables à des habitations de construction différente (par exemple en bois).

2.7.1. Résultats des mesures

Les résultats suivants proviennent de mesures effectuées dans trois habitations situées sous une ligne à 400 kV ($4 \times 400 \text{ mm}^2$) à deux ternes, les deux étant sous tension. Les intensités du champ non perturbé, sous de telles lignes où les distances conducteurs-sol sont élevées, sont comprises entre 1 et 3 kV/m.

Les intensités à l'intérieur des maisons étaient si faibles que des erreurs de 20 V/m étaient significatives : l'influence du réseau à 240 V sur l'intensité mesurée était probablement notable au voisinage de l'appareillage ménager.

TABLE III

Number of shielding wires	0	3	7	16	31
Increase in corona losses, %	0	13.0	23.4	37.8	45.5

2.6. Shielding effect : busbar array

An analogous method of calculation was used to review the shielding effect of wires under two systems of busbars in a 750 kV substation. The distance between busbars and ground was 9.5 m. The distance between busbars in each system was 12 m and between two neighbouring systems of busbars 18 m. The diameter of the busbars was 200 mm and of the shielding wires 6 mm.

The calculations were made for heights of shielding wires of 2, 2.5, 3 and 3.5 m above ground. The field intensity at 1.8 m height was calculated. The shielding wires were spaced parallel at 2 m spacing, the screening corridor of wires extended sideways 2 m from both busbar systems.

The calculated efficiency of the shielding system is given in the following table.

TABLE IV

Height of shielding wires above earth (m)	3.5	3	2.5	2	Without shielding wires
Maximum field intensity (kV/m)	9.45	10.0	10.75	12.0	15.35
Efficiency of shielding	1.62	1.53	1.43	1.28	1.0

It can be seen that the efficiency of shielding increases with the height of the wire system above earth. However, there are two opposing requirements : decrease in field intensity has to be set against maintenance of acceptable radio interference levels from busbars and apparatus.

The main disadvantage of all such screening systems is the restriction of access for maintenance machines within the substation.

Screening grids may, however, be useful in the immediate surroundings of control boxes for apparatus, protective relays etc.

For individual protection of maintenance staff moving within areas of high field intensities, conductive suits can be more convenient than shielding if their design allows comfort and safety. Experience of screening suits is available from several countries.

2.7. Shielding by houses located near lines

The degree to which the occupants of houses are shielded by the structures themselves is very substantial. In England, where many houses are located directly under transmission lines, a series of measurements has been made (Stringfellow, 1978) which shows reductions within houses by factors between 10 and 20. All these houses were brick-built, with tiled, pitched roofs and all contained metallic gas- and water-pipes as well as domestic wiring. The large measured shielding-factors are therefore not necessarily applicable to houses of other, e.g. wooden, constructions.

2.7.1. Shielding-results

Some results are quoted from measurements made in three dwellings located on the route of a 400 kV ($4 \times 400 \text{ mm}^2$) double-circuit line, when both circuits were energised. The unperturbed intensities under such lines, with the relevant large earth-clearances, are in the range 1-3 kV/m.

The values within the house were so small that errors up to 20 V/m were significant : the contribution to the intensities near electric fittings from the 240 V circuit were probably significant.

Site A

Habitation	: Maisons jumelées à deux étages, en briques, à toit recouvert de tuiles.
Localisation	: dans l'axe de la ligne
Hauteur des conducteurs au-dessus du sol	: 20 m
Champ mesuré	: (en kV/m)
Dans le jardin	: 1,0
Au rez-de-chaussée à hauteur de tête	: 0,0
1er étage chambre à coucher	: 0,05
Près d'un dispositif d'éclairage	: 0,1

Site B

Habitation	: Bungalow en brique, de plain-pied, avec toit recouvert de tuiles
Localisation	: dans l'axe de la ligne
Hauteur des conducteurs au-dessus du sol	: 15 m
Champ mesuré	: (en kV/m)
Dans le jardin	: 1,5
Salle de séjour à hauteur de tête	: 0,1
Près d'un dispositif d'éclairage	: 0,1

Site C

Habitation	: Comme en B
Localisation	: sous une phase
Hauteur des conducteurs au-dessus du sol	: 15 m
Champ mesuré	: (en kV/m)
Dans le jardin	: 3,0
Salle de séjour à hauteur de tête	: 0,2
Près d'un dispositif d'éclairage	: 0,15

ANNEXE AU CHAPITRE 2

Le champ elliptique

Soient E_y et E_x les composantes verticale et horizontale du champ électrique engendré en milieu de portée d'une ligne, exprimée sous leur forme complexe, telle que calculée selon 2.3 :

$$\left. \begin{aligned} E_y &= a + j b \\ E_x &= c + j d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Exprimées en fonction du temps ces composantes s'écrivent :

$$\left. \begin{aligned} E_y &= a \cos \omega t + b \sin \omega t \\ E_x &= c \cos \omega t + d \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

On peut voir immédiatement que, si la condition

$$ad - bc = 0$$

est satisfaite, alors le vecteur-champ a une et une seule direction, Sinon, le champ est elliptique. Dans ce qui suit, nous nous proposons de calculer les paramètres de l'ellipse, c'est-à-dire le module et l'inclinaison du grand axe et du petit axe (Fig. 2.10).

Site A

Dwelling	: Two-storey brick-built semi-detached house with tiled pitched roof.
Location	: Under centre-line of line.
Ground clearance to conductors	: 20 m
Measured field	: (kV/m)
In the garden	: 1.0
Ground floor at head height	: 0.0
1st floor bedroom	: 0.05
Close to light fittings	: 0.1

Site B

Dwelling	: Single-storey brick-built bungalow with tiled pitched roof.
Location	: Under centre-line of line.
Ground clearance to conductors	: 15 m
Measured field	: (kV/m)
In the garden	: 1.5
Living room at head height	: 0.1
Close to light fittings	: 0.1

Site C

Dwelling	: As B.
Location	: Under phase conductors.
Ground clearance to conductors	: 15 m
Measured field	: (kV/m)
In the garden	: 3.0
Living room at head height	: 0.2
Close to light fittings	: 0.15

APPENDIX TO CHAPTER 2

The elliptic field

Let us consider the two components E_y and E_x (vertical and horizontal) of the electric field generated, for example, at mid-span of a line, expressed in their complex form, as computed according to 2.3.

$$\left. \begin{aligned} E_y &= a + j b \\ E_x &= c + j d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Expressed as functions of time, they may be written :

$$\left. \begin{aligned} E_y &= a \cos \omega t + b \sin \omega t \\ E_x &= c \cos \omega t + d \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

It can be seen immediately, that if the condition

$$ad - bc = 0$$

is satisfied, then the field vector has a single, well-defined direction. If not, the field is elliptic. In the following, the parameters of the ellipse will be calculated, i.e. its modulus and the inclination of the major and minor axes (see fig. 2.10).

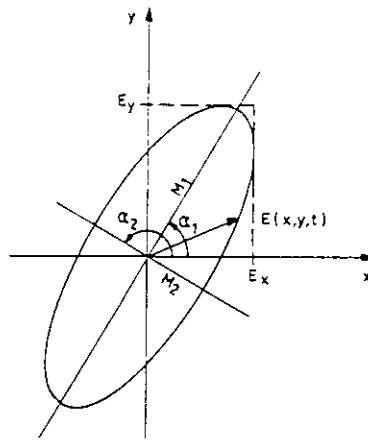


FIG. 2.10. – Représentation vectorielle d'un champ elliptique.

Le module du vecteur-champ s'exprime en fonction du temps, à partir de (2) par :

$$M^2 = E_y^2 + E_x^2 = (a^2 + c^2) \cos^2 \omega t + (b^2 + d^2) \sin^2 \omega t + 2(ab + cd) \cos \omega t \sin \omega t$$

Les extremums de M^2 seront obtenus en calculant

$$\frac{dM^2}{d(\omega t)} = 0,$$

$$\text{soit} \quad 2[(b^2 + d^2) - (a^2 + c^2)] \sin \omega t \cos \omega t + 2(ab + cd)(\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t) = 0$$

Divisant cette expression par $\cos^2 \omega t$ et posant $\tan \omega t = \rho$ on obtient :

$$\rho = \frac{k \pm \sqrt{k^2 + 4}}{2}, \quad \text{avec } k = \frac{(b^2 + d^2) - (a^2 + c^2)}{(ab + cd)}$$

d'autre part :

$$\cos \omega t = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho^2}} \quad \sin \omega t = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \rho^2}}$$

Les deux solutions de ρ fournissent les deux inclinaisons α_1 et α_2 des deux axes, soit

$$\tan \alpha_1, \tan \alpha_2 = \frac{a + b\rho}{c + d\rho}, \quad \text{avec } \tan \alpha_1 \cdot \tan \alpha_2 = -1$$

ainsi que leurs modules :

$$M_1, M_2 = \left\{ \frac{1}{1 + \rho^2} \left[(a^2 + c^2) \rho^2 + (b^2 + d^2) + 2(ab + cd) \rho \right] \right\}^{1/2}$$

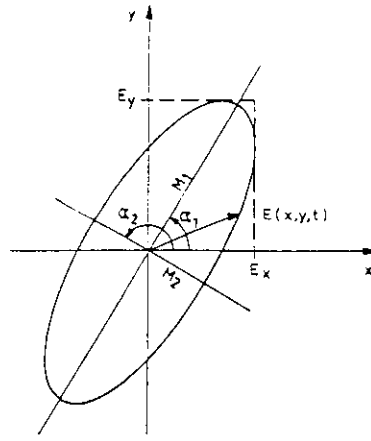


FIG. 2.10. — Vectorial representation of an elliptic field.

From (2), let us express the modulus of the field vector as a function of time :

$$M^2 = E_x^2 + E_y^2 = (a^2 + c^2) \cos^2 \omega t + (b^2 + d^2) \sin^2 \omega t + 2(ab + cd) \cos \omega t \sin \omega t$$

The extrema of M^2 will be obtained by setting

$$\frac{dM^2}{d(\omega t)} = 0,$$

that is :

$$(2(b^2 + d^2) - (a^2 + c^2)) \sin \omega t \cos \omega t + 2(ab + cd)(\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t) = 0$$

Dividing by $\cos^2 \omega t$ and writing $\tan \omega t = \rho$, we obtain :

$$\rho = \frac{k \pm \sqrt{k^2 + 4}}{2}, \quad k = \frac{(b^2 + d^2) - (a^2 + c^2)}{(ab + cd)}$$

and further :

$$\cos \omega t = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho^2}} \quad \sin \omega t = \frac{\rho}{\sqrt{1 + \rho^2}}$$

The two solutions of ρ lead to the inclinations α_1 and α_2 of the two axes :

$$\operatorname{tg} \alpha_1, \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{a + b \rho}{c + d \rho}, \quad \text{with } \operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 = -1$$

and to their two moduli :

$$M_1, M_2 = \left\{ \frac{1}{1 + \rho^2} \left[(a^2 + c^2) \rho^2 + (b^2 + d^2) + 2(ab + cd) \rho \right] \right\}^{1/2}$$

3. TENSIONS ET COURANTS INDUITS DANS LES OBJETS PLACÉS AU VOISINAGE DE CONDUCTEURS SOUS TENSION

3.1. Equations générales des phénomènes.

Considérons un corps M, conducteur, placé au voisinage d'une ligne représentée dans les figures ci-dessous par ses trois phases P_1 P_2 P_3 . Les phases sont portées respectivement au potentiel V_1 , V_2 , V_3 .

Deux cas extrêmes peuvent alors être considérés : le corps M est entièrement isolé du sol (Fig. 3.1a), le corps est relié au sol par un fil conducteur (Fig. 3.1b).

L'équation générale de l'électrostatique reliant potentiel V_0 et charge Q relatifs au corps M s'écrit :

$$Q = V_0 C_0 + V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30}$$

Dans le cas de la figure (3.1a), le corps est isolé, et par conséquent $Q = 0$. On en déduit le "potentiel flottant" V_0 :

$$V_0 = - \frac{V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30}}{C_0} \quad (1)$$

Note : Les coefficients d'influence mutuelle C_{i0} étant *negatifs*, le potentiel V_0 est du même signe que V_1 , V_2 , V_3 .

Entre les coefficients de capacité C utilisés dans les formules et les capacitances K représentées dans les figures 3.1.a et 3.1.b, il existe les relations suivantes :

$$K_{i0} = - C_{i0}$$

$$K_0 = C_0 - \sum C_{i0}$$

En pratique cependant, $\sum C_{i0} \ll C_0$, de telle sorte que K_0 et C_0 ne sont pas discernables.

Dans le cas de la figure (3.1.b), le corps est au potentiel zéro ; nous en déduisons la charge Q portée par "influence" :

$$Q = V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30} \quad (2)$$

En régime sinusoïdal, la charge Q et le courant de charge i_0 sont reliés en tenant compte des conventions de signe de la figure par :

$$i_0 = - j \omega Q$$

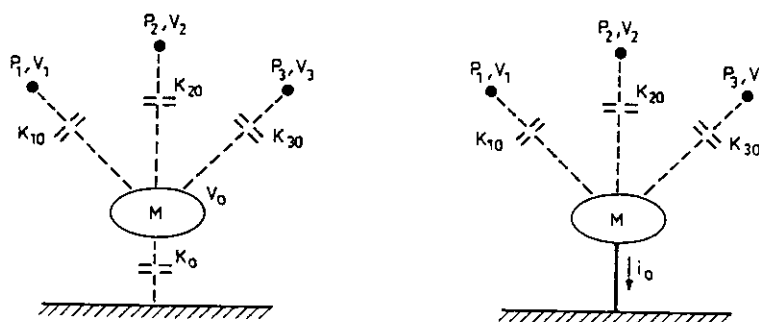


FIG. 3.1. (a et b). – Schéma électrique d'un objet placé sous une ligne.

3. INDUCED VOLTAGES AND CURRENTS IN OBJECTS LOCATED NEAR LIVE CONDUCTORS

3.1. General equations for the phenomena

Let us consider a conductive body M , located near a line which is represented in the figures below by its three phases P_1, P_2, P_3 . The phases are brought to the potentials V_1, V_2 , and V_3 respectively.

Two extreme cases can then be considered ; the body M is completely insulated from earth (Fig. 3.1 a) or the body is connected to earth by a conductive wire (Fig. 3.1 b).

The general electrostatic equation connecting potential V_0 and charge Q , relating to the body M is written :

$$Q = V_0 C_0 + V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30}$$

In the case of figure 3.1 a, the body is insulated and consequently $Q = 0$. The "floating" potential V_0 is deduced :

$$V_0 = - \frac{V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30}}{C_0} \quad (1)$$

Note : Since the mutual coefficients of electrostatic induction C_{i0} are negative, the potential V_0 is of the same sign as V_1, V_2, V_3 .

Between the capacity coefficients C of the formulae and the capacitances K , shown on figures 3.1 a and 3.1 b, the following relations exist :

$$K_{i0} = - C_{i0}$$

$$K_0 = C_0 - \sum C_{i0}$$

In practice however, $\sum C_{i0} \ll C_0$, so that K_0 and C_0 are indistinguishable.

In the case of Figure 3.1.b, the body is at zero potential ; we deduce the induced charge Q :

$$Q = V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30} \quad (2)$$

Under sinusoidal conditions, the charge Q and the charging current i_0 are connected, taking account of the sign conventions of the figure, by :

$$i_0 = - j \omega Q$$

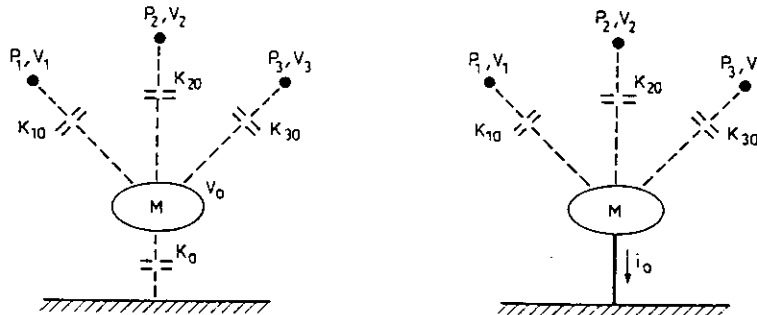


FIG. 3.1. (a et b). - Electrical equivalents of objects under lines.

Cette relation nous permet d'écrire, à partir de (1) et (2), le système d'équations suivant :

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= -j \omega (V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30}) \\ V_0 &= \frac{i_0}{j \omega C_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

On peut alors considérer le corps M et le sol comme les deux bornes d'un générateur qui présente une force électromotrice à vide V_0 et un courant de court-circuit i_0 , et qui possède une impédance interne (fig. 3.2.a) :

$$Z_i = \frac{1}{j \omega C_0}$$

Si l'on raccorde à ce générateur une impédance Z quelconque, on en déduit immédiatement le courant i s'écoulant par celle-ci et la tension V_m à ses bornes (Fig. 3.2.b) :

$$i = \frac{V_0}{Z + \frac{1}{j \omega C_0}} = \frac{i_0}{1 + j \omega C_0 Z} \quad (4)$$

$$V_m = V_0 \frac{Z}{Z + \frac{1}{j \omega C_0}} = i_0 \frac{Z}{1 + j \omega C_0 Z} \quad (4')$$

Remarques importantes

- 1) Les trois grandeurs qui définissent le générateur équivalent, soit V_0 , C_0 , i_0 , sont reliées entre elles par la 2^e équation (3). Il suffit donc d'en connaître deux pour résoudre le problème général. Dans certains cas, il est plus aisé de calculer i_0 et C_0 , dans d'autres cas, V_0 et C_0 . Par ailleurs, chacun de ces paramètres est facilement accessible par une mesure simple.
- 2) Les équations (4) et (4') montrent que, tant que la condition $\omega C_0 Z < 1$ est satisfaite, le courant s'écoulant par Z est pratiquement égal à i_0 .
- 3) On est très souvent conduit à considérer que l'impédance Z est formée de deux branches en parallèle Z_1 et Z_2 , l'une des branches Z_1 faisant partie du circuit permanent, et l'autre Z_2 étant ajoutée occasionnellement. Le problème consiste alors à déterminer le courant s'écoulant dans cette deuxième branche. La tension permanente en "circuit ouvert" n'est évidemment plus égale à V_0 , mais vaut $V_s < V_0$ (Fig. 3.2.c). Lorsque la branche permanente est une résistance R (résistance de fuite par exemple), on a :

$$V_s = V_0 \frac{j R C_0 \omega}{1 + j R C_0 \omega}$$

et l'impédance interne du générateur équivalent vaut :

$$Z_i = \frac{R}{1 + j R C_0 \omega}$$

On peut voir cependant que le courant de court-circuit que l'on mesurerait dans un tel cas, soit

reste égal à i_0 $i_q = \frac{V_s}{Z'_i}$

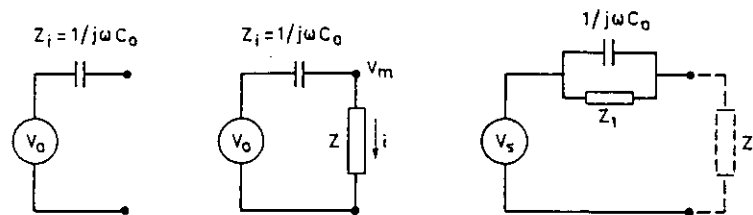


FIG. 3.2. (a-b-c). — Circuit équivalent : différentes conditions de mise à la terre.

This relationship allows us to write, from (1) and (2), the following family of equations :

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= -j \omega (V_1 C_{10} + V_2 C_{20} + V_3 C_{30}) \\ V_0 &= \frac{i_0}{j \omega C_0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

The body M and the ground can thus be considered as the two terminals of a generator with an open circuit voltage V_0 and a short-circuit current i_0 , with an internal impedance (Fig. 3.2 a) of :

$$Z_i = \frac{1}{j \omega C_0}$$

If an impedance Z is connected to this generator, the current i flowing through the impedance and the voltage V_m at its terminals can be deduced immediately (Fig. 3.2 b) :

$$i = \frac{V_0}{Z + \frac{1}{j \omega C_0}} = \frac{i_0}{1 + j \omega C_0 Z} \quad (4)$$

$$V_m = V_0 \frac{Z}{Z + \frac{1}{j \omega C_0}} = i_0 \frac{Z}{1 + j \omega C_0 Z} \quad (4')$$

Important notes :

- 1) The three variables which define the equivalent generator, namely V_0 , C_0 , i_0 , are related by the second equation (3). Thus it is only necessary to know two of these to solve the general problem. In certain cases, it is easier to calculate i_0 and C_0 , in others V_0 and C_0 . Furthermore, each of these parameters is easily accessible by a simple measurement.
- 2) The equations (4) and (4') show that, provided the condition $\omega C_0 Z < 1$ is satisfied, the current flowing through Z is practically equal to i_0 .
- 3) One very often has occasion to consider that the impedance Z is formed from two branches in parallel, Z_1 and Z_2 , one branch Z_1 forming part of the permanent circuit, the other Z_2 being added occasionally. The problem then consists of determining the current flowing in this second branch. Obviously, the permanent "open circuit" voltage is no longer equal to V_0 , but has a value $V_s < V_0$ (Fig. 3.2 c). When the permanent branch is a resistance R (leakage resistance for example) then :

$$V_s = V_0 \frac{j R C_0 \omega}{1 + j R C_0 \omega}$$

and the internal impedance of the equivalent generator has a value of :

$$Z'_i = \frac{R}{1 + j R C_0 \omega}$$

Nevertheless, it can be seen that the short-circuit current which would be measured in such a case, say i'_0 , remains equal to i_0 .

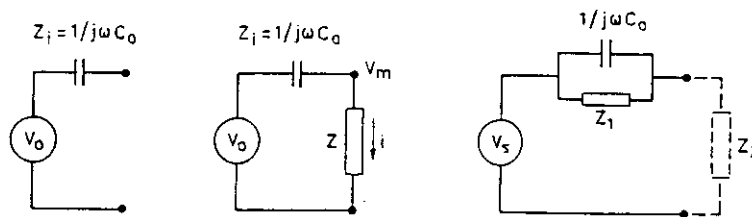


FIG. 3.2. (a-b-c). -- Equivalent circuits : different discharge conditions.

3.2. Calcul de V_0 , C_0 , i_0 .

Le champ électrique engendré par une ligne présente une composante verticale prédominante de valeur à peu près constante, depuis le niveau du sol jusqu'à une hauteur de 2 à 3 mètres. Sa variation transversale (composante horizontale) le long d'un profil est d'autre part relativement faible, sauf sous les conducteurs, où la variation de phase (et non d'amplitude) est très rapide. On peut en outre admettre que des objets de dimensions modérées, placés au voisinage du sol, n'ont pas d'influence sur les charges portées par les conducteurs de la ligne. Dans ces conditions, il est légitime de faire totalement abstraction de ces derniers et d'admettre que l'objet considéré est plongé dans un champ homogène et uniforme. Cette simplification reste à peu près valable jusqu'aux dimensions d'une grosse voiture, voire d'un autocar lorsque les conducteurs de la ligne sont à plus de 15 mètres au-dessus du sol.

3.2.1. Calcul de V_0 .

Le potentiel à vide ne peut se déterminer aisément que si l'objet est tout entier contenu dans une surface équipotentielle. C'est le cas d'un fil conducteur horizontal, tendu parallèlement à la ligne, ou approximativement le cas d'une tôle plane plus ou moins horizontale, telle par exemple le toit d'un hangar. La dimension *parallèle* à la ligne de tels objets peut être assez importante, disons 100 mètres de part et d'autre du point bas d'une portée, en terrain plat, sans beaucoup fausser le résultat du calcul.

Fil conducteur horizontal

Lorsque le fil est parallèle à l'axe de la ligne, son potentiel vaudra simplement :

$$V_0 = Eh$$

où E est le champ quasi-constant sur toute sa longueur, et h sa hauteur au-dessus du sol.

Lorsque le fil, tout en étant horizontal, n'est plus parallèle à la ligne, son potentiel flottant peut encore se calculer, en utilisant l'expression :

$$V_0 = \frac{h}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} E \cdot e^{j\varphi} dx$$

où x est compté le long du fil de longueur $x_2 - x_1$, et $E \cdot e^{j\varphi}$ est le champ au point x en tenant compte de la rotation de phase φ .

Toit métallique peu incliné (pente 1/5)

Dans la mesure où le champ non perturbé ne varie que de façon modérée d'un point à l'autre de la surface occupée par le toit, le potentiel de celui-ci peut être estimé par :

$$V_0 = \bar{E} \cdot \bar{h}$$

où $\bar{E}$ et $\bar{h}$ sont respectivement le champ moyen et la hauteur moyenne du toit.

Objet volumineux.

Lorsque l'objet est volumineux, il n'est plus possible de calculer son potentiel de façon simple. Les figures (3.3a et 3.3b) permettent d'estimer V_0 pour deux formes typiques, l'une étant un parallélépipède rectangle couché, l'autre un cylindre debout. Δ étant la hauteur de la base au-dessus du sol, on détermine un coefficient correcteur K_1 en fonction des paramètres réduits Δ/a et c/a . On a :

$$V_0 = K_1 Eh$$

où h est la hauteur moyenne de l'objet au-dessus du sol, soit $h = c/2 + \Delta$.

3.2.2. Calcul de C_0 .

Peu de géométries se prêtent à un calcul rigoureux de C_0 , notamment lorsque l'objet considéré est très près du sol ; le cylindre horizontal est l'une d'elles et peut être utilisé pour représenter divers objets, tels par exemple un véhicule allongé : camion ou autobus.

3.2. Calculation of V_0 , C_0 , i_0

The electric field produced by a line has a predominant vertical component of more or less constant value from ground level up to a height of 2 to 3 metres. Its transverse variation (horizontal component) along a profile is, on the other hand, relatively slight, except under the conductors, where the variation in phase (but not in amplitude) is very rapid. It can also be considered that objects of moderate size, placed near the ground, have no effect on the charges carried by the conductors of the line. Under these conditions, it is legitimate to disregard the conductors and to consider that the object in question is immersed in a formerly homogeneous and uniform field. This simplification remains more or less valid up to the dimensions of a large car, or even a bus when the conductors of the line are at more than 15 metres above the ground.

3.2.1. Calculation of V_0

The open-circuit voltage can only be determined easily if the whole object is contained within an equipotential surface. This is the case with a horizontal conductive wire, stretched parallel to the line, or approximately the case with a more or less horizontal flat metal sheet, such as the roof of a shed. The dimension of such objects parallel to the line can be fairly large, say 100 metres on either side of the low point of a span, on flat ground, without introducing much error into the calculation.

Horizontal conductive wire

When the wire is parallel to the axis of the line, its potential will simply have the value :

$$V_0 = Eh$$

where E is the quasi-constant field over its whole length and h is its height above the ground.

If the wire, while still horizontal, is no longer parallel to the line, its floating potential can still be calculated, by using the expression :

$$V_0 = \frac{h}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} E \cdot e^{j\varphi} dx$$

where x is counted along the wire of length $x_2 - x_1$ and $E \cdot e^{j\varphi}$ is the field at the point x , taking account of the phase angle φ .

Slightly sloping metal roof (e.g. 1/5 slope)

Provided that the unperturbed field varies only moderately from one point to another of the area occupied by the roof, the potential can be estimated by :

$$V_0 = \bar{E} \cdot \bar{h}$$

where $\bar{E}$ and $\bar{h}$ are, respectively, the mean field and the mean height of the roof.

Bulky object

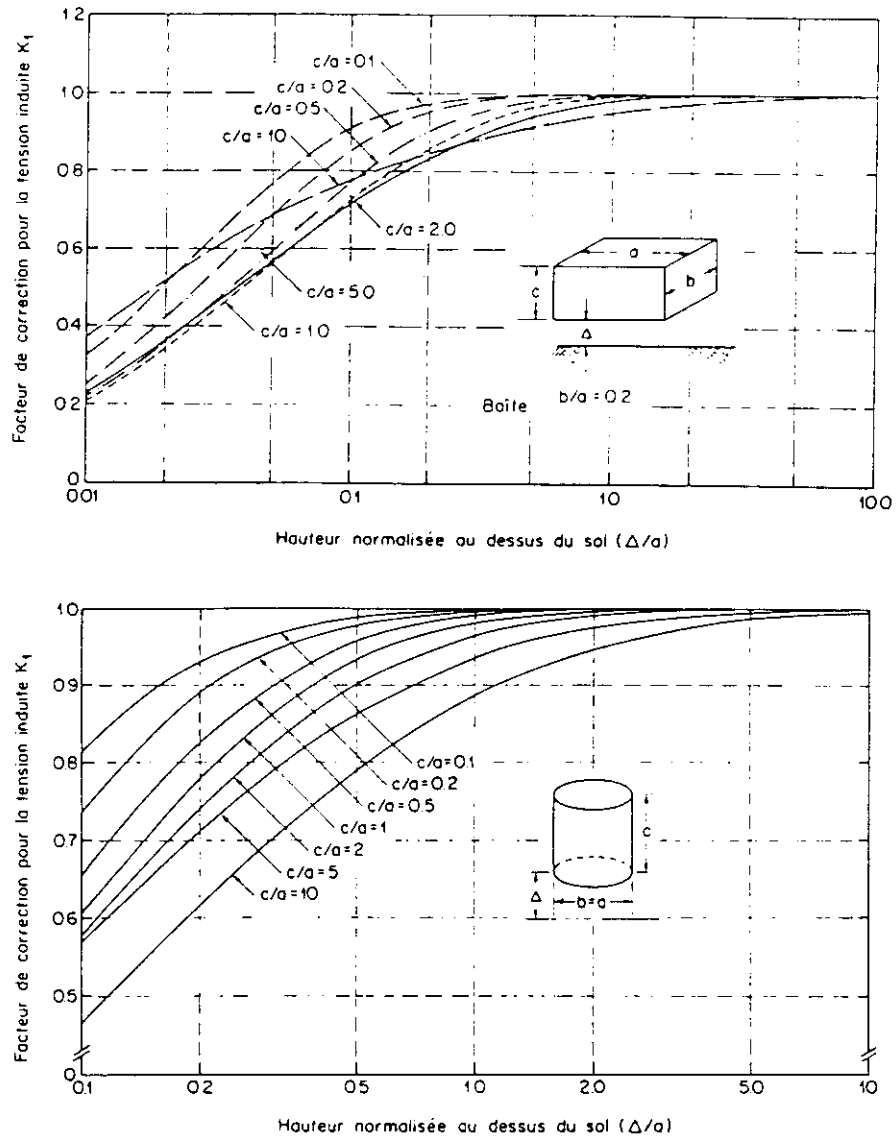
When the object is bulky, it is no longer possible to calculate its potential in a simple manner. Figures 3.3 a and 3.3 b allow V_0 to be estimated for two typical shapes, one being a rectangular box lying on its side, the other an upright cylinder. If Δ is the height of the base above the ground, the correction factor K_1 is determined as a function of the reduced parameters Δ/a and c/a . Then :

$$V_0 = K_1 Eh$$

where h is the mean height of the object above the ground, that is $h = c/2 + \Delta$.

3.2.2. Calculation of C_0

Few shapes lend themselves to a strict calculation of C_0 , especially when the object is very close to the ground ; the horizontal cylinder is one of these and can be used to represent various objects, such as, for example, a long vehicle (lorry or bus).



Cylindre horizontal.

La capacité par unité de longueur d'un cylindre horizontal a pour expression :

$$C_0 = \frac{4 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{h - \sqrt{h^2 - r^2}}}$$

ou h est la hauteur de l'axe du cylindre au-dessus du sol, soit $h = \Delta + r$

r est le rayon du cylindre.

$\epsilon_0 = 1/36 \cdot \pi \cdot 10^9$ F/m

Lorsque $r \ll h$, l'expression ci-dessus dégénère et prend la forme classique :

$$C_0 = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}$$

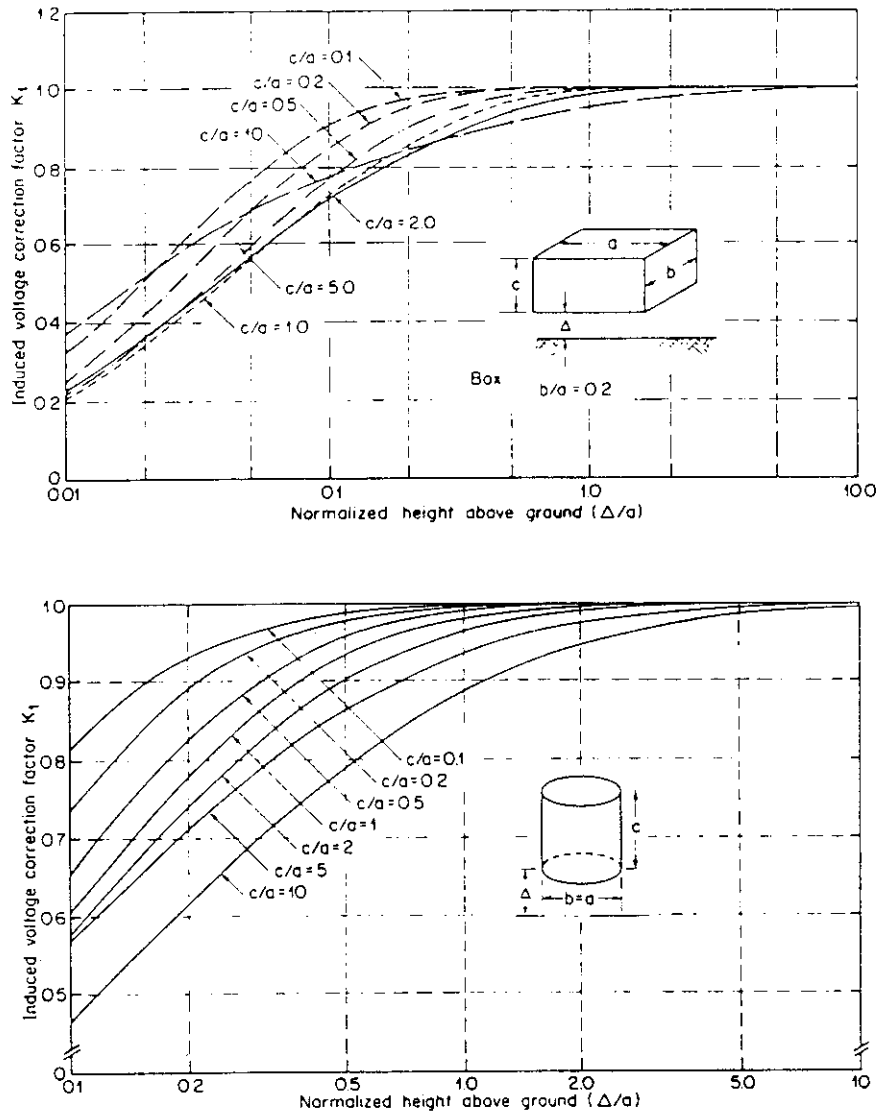


FIG. 3.3. (a and b). — Variation of K_1 , induced voltage correction factor, as function of height Δ above ground.
a) Rectangular box
b) vertical cylinder
from Maruvada et al CIGRE 36-04-1976

Horizontal cylinder

The expression for the capacitance per unit length of a horizontal cylinder is :

$$C_0 = \frac{4 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{h - \sqrt{h^2 - r^2}}}$$

where h is the height of the axis of the cylinder above the ground, i.e., $h = \Delta + r$.

r is the radius of the cylinder.

$$\epsilon_0 = 1/36 \cdot \pi \cdot 10^9 \text{ F/m}$$

When $r \leq h$, the expression above degenerates and takes the conventional form :

$$C_0 = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}$$

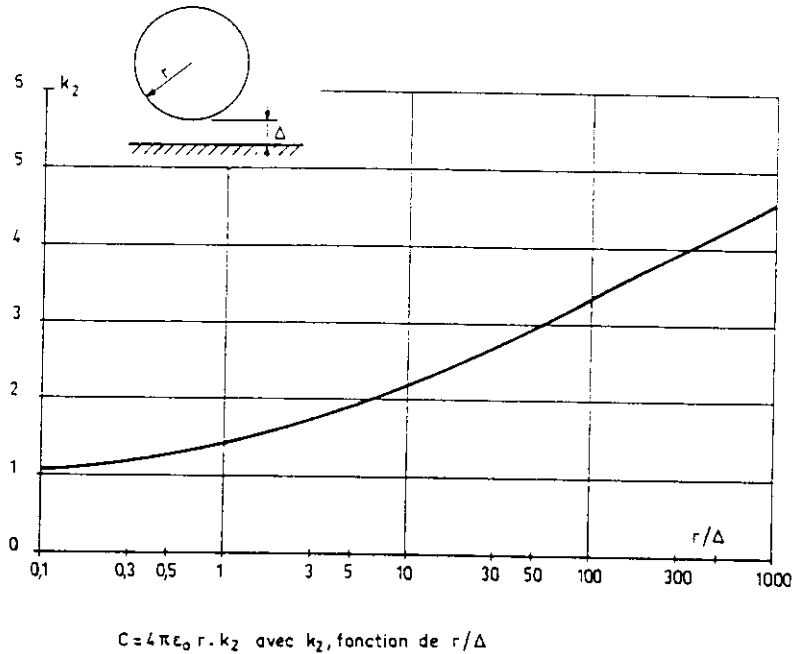


FIG. 3.4. — Sphère au-dessus du sol : variation de capacité en fonction de la hauteur. K_2 dépend du rapport r/Δ

Sphère.

On sait que la capacité d'une sphère isolée dans l'espace est donnée par $C = 4 \pi \epsilon_0 r$, r étant son rayon exprimé en mètre. Lorsque cette sphère se rapproche du sol, la capacité s'accroît par un facteur multiplicatif K_2 donné par la courbe de la figure 3.4 en fonction du paramètre réduit r/Δ , de telle sorte que :

$$C_0 = 4 \pi \epsilon_0 r \cdot K_2$$

Cylindre horizontal terminé par deux hémisphères.

A partir des deux configurations précédentes, il est possible d'estimer la capacité d'un objet constitué d'un cylindre de longueur L , terminé à ses deux extrémités par un hémisphère, en posant :

$$C_0 = C_0 (\text{sphère}) + L C_0 (\text{cylindre})$$

Naturellement, r et Δ seront communs aux deux éléments partiels.

Autres objets volumineux.

Les figures (3.5a) et (3.5b) permettent d'estimer la capacité C_0 des volumes-types déjà représentés aux figures (3.3a) et (3.3b). A cet effet, on détermine d'abord la capacité de l'objet isolé dans l'espace, par l'expression :

$$C = 4 \pi \epsilon_0 \frac{a + b + c}{3}$$

puis on multiplie cette capacité par le facteur de correction de proximité au sol K_3 , que l'on lit sur les abaques :

$$C_0 = K_3 C$$

3.2.3. Calcul de i_0 .

Calcul indirect.

La première méthode suppose que l'on ait pu calculer V_0 et C_0 de façon indépendante. On obtient immédiatement :

$$i_0 = V_0 \cdot j \omega C_0$$

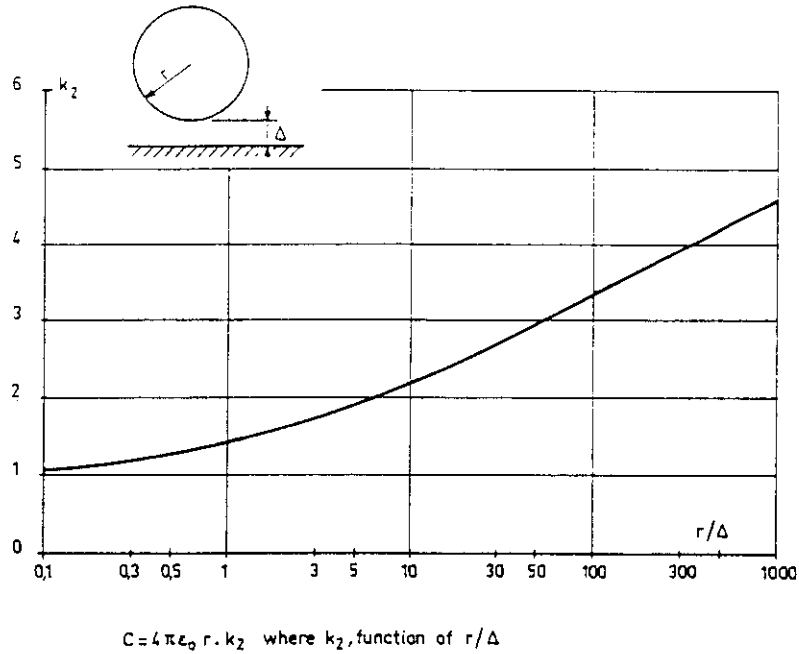


FIG. 3.4. — Sphere above ground : capacitance variation with height.

Sphere

The capacitance of an insulated sphere in free space is given by $C = 4 \pi \epsilon_0 r$, r being its radius. When this sphere approaches the ground, the capacitance increases by a multiplication factor K_2 , given by the curve in figure 3.4, as a function of the reduced parameter r/Δ , so that :

$$C_0 = 4 \pi \epsilon_0 r \cdot K_2$$

Horizontal cylinder terminated by two hemispheres

From the two previous configurations, it is possible to estimate the capacitance of an object consisting of a cylinder of length L , terminated at each end by a hemisphere, by putting :

$$C_0 = C_0 (\text{sphere}) + L C_0 (\text{cylinder})$$

Naturally, r and Δ will be common to the two partial elements.

Other bulky objects

Figures 3.5 a and 3.5 b permit the estimation of the capacitance C_0 of the typical volumes already represented in figures 3.3 a and 3.3 b. For this purpose, first the capacitance of the object insulated in space is determined by the expression :

$$C = 4 \pi \epsilon_0 \frac{a + b + c}{3}$$

and then this capacitance is multiplied by the correction factor for proximity to the ground, K_3 , which is read from the graphs :

$$C_0 = K_3 C$$

3.2.3. Calculation of i_0

Indirect calculation

The first method supposes that it has been possible to calculate V_0 and C_0 independently. Then i_0 is obtained immediately :

$$i_0 = V_0 \cdot j \omega C_0$$

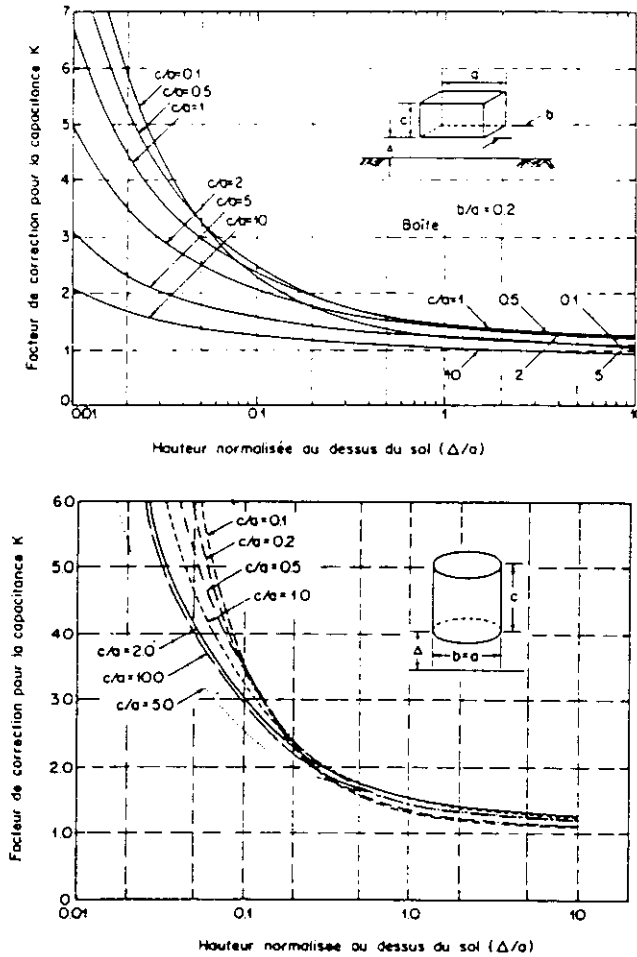


FIG. 3.5. (a et b). -- Variation de K_3 , facteur de correction de la capacité, en fonction de la hauteur Δ au-dessus du sol.

a) boîte parallélépipédique

b) cylindre vertical

d'après Maruvada et al. CIGRE 36-04-1976.

Cette méthode se prête bien au cas des conducteurs filiformes horizontaux et au cas des volumes-types des figures 3.3 et 3.5.

Méthode générale.

Mais la méthode la plus générale consiste à procéder comme suit :

(a) On porte d'abord l'objet au potentiel imposé par le problème considéré, le plus souvent le potentiel nul du sol.

(b) Dans cette condition de potentiel, on détermine la configuration du champ électrique perturbé, c'est-à-dire la configuration du champ (à l'origine homogène), en présence de l'objet.

On en tire le champ superficiel, en tout point de la surface S de l'objet, soit $E(S)$.

Selon les lois de l'électrostatique, la relation entre le champ superficiel d'un objet conducteur et la densité de charge superficielle σ est donnée par :

$$\sigma = \epsilon_0 E$$

En champ alternatif, cette densité de charge varie également, et il va en résulter un courant intérieur à l'objet, dont la densité locale s'écrira :

$$J = j \omega \sigma = j \omega \epsilon_0 E$$

On en déduit ensuite, par intégration, le courant de charge total :

$$i_0 = j \omega \epsilon_0 \int_S E(S) dS$$

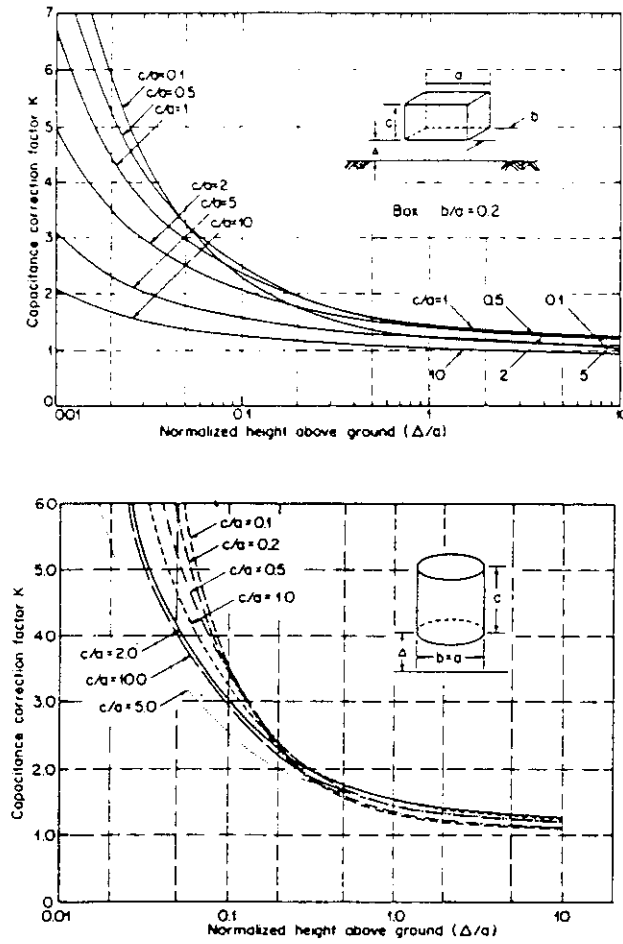


FIG. 3.5. (a et b). – Variation of K_3 , capacitance correction factor, as function of height Δ above ground.

a) Rectangular box

b) vertical cylinder

from Maruvada et al. CIGRE 36-04-1976.

This method lends itself well to the cases of horizontal wire-like conductors and to the typical volumes of figures 3.3 and 3.5.

General method

The general method is as follows :

- (a) The potential of the object is set at the value determined by the boundary conditions, commonly zero or earth-potential.
- (b) In this condition, the configuration of the perturbed electric field is determined, i.e. the configuration in the presence of the object.

Hence the field-intensity, $E(S)$, at any point of the surface S of the object is obtained.

This intensity and the charge-density σ are related by classical electrostatics :

$$\sigma = \epsilon_0 E$$

In alternating fields, the alternating charge-densities correspond to current-densities, within the object, given by

$$J = j \omega \sigma = j \omega \epsilon_0 E$$

Then, by integration, the total charging current is deduced :

$$i_0 = j \omega \epsilon_0 \int_S E(S) dS$$

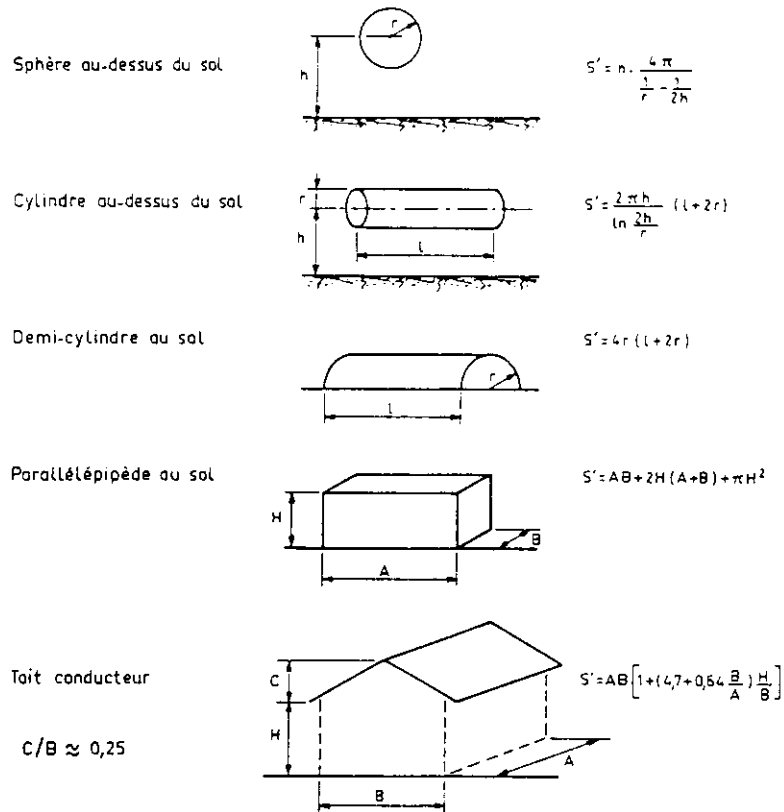


FIG. 3.6. — Surfaces équivalentes de divers objets usuels (simplifiés) (d'après IEEE Tutorial Course — 1979).

Quelques exemples.

Hémisphère posé sur un plan : $i_0 = 3 \pi r^2 \omega \epsilon_0 E_0$

Sphère posée sur un plan : $i_0 = 8 \pi r^2 \omega \epsilon_0 E_0$

Dans ces exemples, r est le rayon (en mètres) et E_0 est le champ préexistant non perturbé. On voit qu'on peut affecter à chaque structure géométrique une surface équivalente S' , qui serait celle d'un plan horizontal au sol irradié par le champ E_0 . Ainsi, pour l'hémisphère, $S' = 3 \pi r^2$, et pour la sphère, $S' = 8 \pi r^2$. La figure 3.6. donne les surfaces équivalentes relatives à quelques autres géométries.

3.3. Influence de la résistivité de l'objet.

On peut se demander dans quelle mesure les paramètres électriques internes des éléments conducteurs, s'ils ne sont pas parfaitement conducteurs, peuvent influencer la distribution globale des charges et des champs. Par exemple, le champ d'une ligne au-dessus du sol est-il affecté par la résistivité du sol ? La distribution des charges, et par conséquent le courant induit dans un objet est-il affecté par la conductivité de ce dernier ?

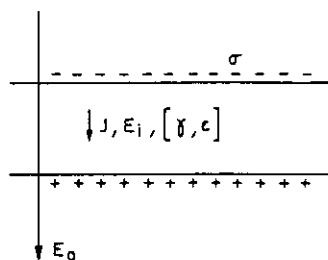


FIG. 3.7. — Corps à faces parallèles plongé dans un champ électrique.

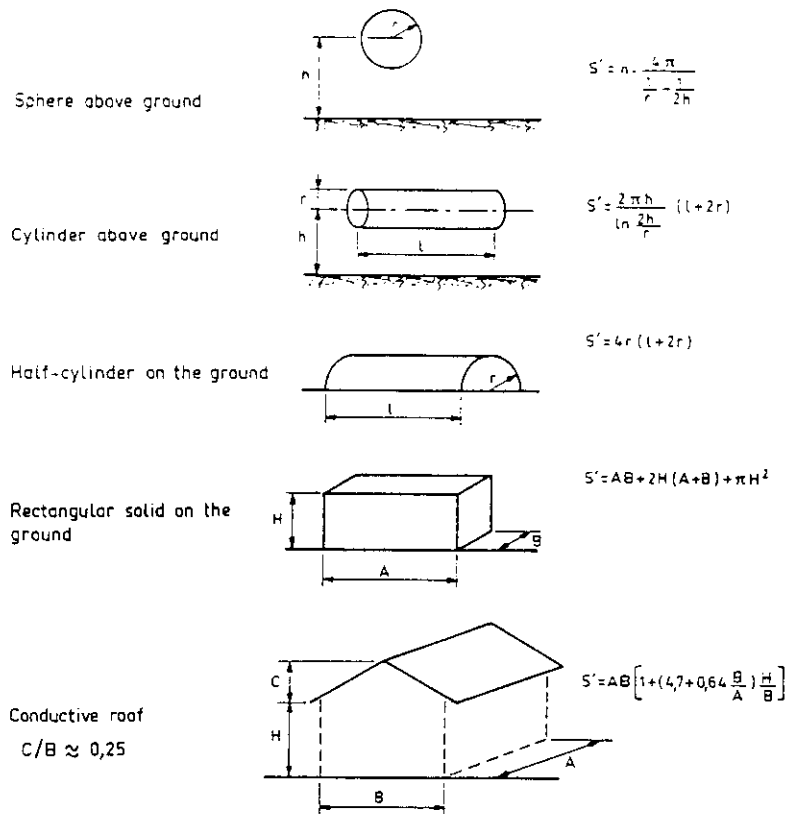


FIG. 3.6. — Equivalent surfaces of common objects (simplified) (from IEEE Tutorial Course — 1979).

A few examples : —

Hemisphere placed on a plane : $i_0 = 3 \pi r^2 \omega \epsilon_0 E_0$

Sphere placed on a plane : $i_0 = 8 \pi r^2 \omega \epsilon_0 E_0$

In these examples, r is the radius and E_0 is the previous unperturbed field intensity. It can be seen that each geometrical structure can have assigned to it an equivalent surface area S' , which would be that of a horizontal plane on the ground, irradiated by the field E_0 . Thus, for the hemisphere, $S' = 3 \pi r^2$, and for the sphere $S' = 8 \pi r^2$. Figure 3.6 gives the equivalent areas relating to a number of other geometries.

3.3. Influence of the resistivity of the object

It is interesting to consider the extent to which the internal electrical parameters of the conducting parts, if they are not perfect conductors, can influence the overall distributions of the charges and fields. For example, is the field of an overhead line affected by the resistivity of the soil? Is the distribution of charges and consequently the induced current in an object, affected by the conductivity of the latter?

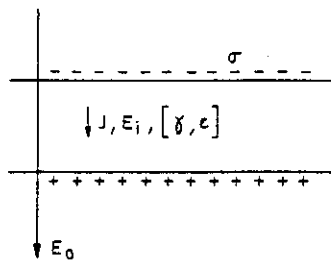


FIG. 3.7. — Slice of material immersed in electric field.

Pour se rendre compte de cette influence, plongeons un corps, caractérisé par une conductivité γ et par une constante diélectrique relative ϵ' , dans un champ homogène E ; nous considérerons, pour simplifier, une tranche de matériau comprise entre deux faces parallèles, et nous supposerons que le champ pénètre perpendiculairement aux surfaces planes (Fig. 3.7).

Le calcul montre alors que :

– la charge superficielle devient :
$$\sigma = \epsilon_0 E \frac{1}{1 + j \epsilon_0 \epsilon' \omega / \gamma}$$

– le champ interne devient :
$$E_i = \frac{E}{\epsilon'} \cdot \frac{1}{1 + \gamma / j \omega \epsilon_0 \epsilon'}$$

– la densité du courant de conduction J est affectée de la même manière que σ , puisque $J = j \omega \sigma$

Examinons la signification physique des expressions ci-dessus. Selon les valeurs numériques de γ et ϵ' , il existe deux régimes extrêmes :

– si $\frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} \ll 1$, alors $E_i = \frac{E}{\epsilon'}$, ce qui correspond à un corps essentiellement isolant.

– si $\frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} \gg 1$, alors $E_i = \frac{j \omega \epsilon_0 E}{\gamma} = \frac{J}{\gamma}$, ce qui correspond à un corps conducteur, de conductivité γ .

On constate, dans ce deuxième cas, que le champ électrique interne est simplement un champ de chute de potentiel ohmique, et que la densité de courant J , et par conséquent σ , ne dépendent plus ni de γ , ni de ϵ' .

Le passage de la prédominance conductrice à la prédominance diélectrique a lieu pour :

$$\frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} = 1$$

Dans la pratique, on peut constater qu'à la fréquence industrielle de 50 ou 60 Hz, un corps de conductivité aussi faible que 10^{-5} Siemens/m reste encore un corps conducteur, même en admettant $\epsilon' = 80$ (constante diélectrique de l'eau). A plus forte raison, le sol et la plupart des revêtements de sol, les organismes vivants, les objets métalliques usuels peuvent être considérés comme conducteur. Un terrain mauvais conducteur ne modifie donc pas la distribution du champ d'une ligne ou d'un jeu de barres(*).

Remarque : Il convient cependant de noter que ces considérations sont valables pour des densités de courant diffuses qui fournissent les charges superficielles σ . Dans les zones de contact plus ou moins ponctuel (pieds d'un homme debout-sol, roues d'un véhicule-sol), apparaît une résistance de contact qui devra être incluse dans le calcul ou l'estimation de Z_1 et Z_2 définis en 3.1.

3.4. Application à quelques cas fréquents.

3.4.1. Véhicules.

De nombreuses mesures ont été effectuées, par de nombreux chercheurs, sur divers types de véhicules. Le tableau ci-dessous donne quelques exemples de résultats :

*Les géologues indiquent que même les granits et les roches siliceuses ont rarement des conductivités inférieures à $5 \cdot 10^{-5}$ Siemens/m.

To obtain a clear idea of this effect, let us consider immersing a body, of conductivity γ and relative dielectric constant ϵ' , in a previously homogeneous field E : for simplicity a slice of material between two parallel faces is assumed with the field penetrating perpendicularly to the plane surfaces (Figure 3.7).

Calculation then shows :

- the surface charge becomes : $\sigma = \epsilon_0 E \frac{1}{1 + j \epsilon_0 \epsilon' \omega / \gamma}$

- the internal field becomes : $E_i = \frac{E}{\epsilon'} \cdot \frac{1}{1 + \gamma / j \omega \epsilon_0 \epsilon'}$

- the density of the conduction current J follows that of the charge density σ , since $J = j \omega \sigma$

According to the numerical values of γ and ϵ' , there are two extreme conditions of internal field-intensity :

- if $\frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} \ll 1$, then $E_i = \frac{E}{\epsilon'}$, which corresponds to an essentially insulating body.

- if $\frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} \gg 1$, then $E_i = \frac{j \omega \epsilon_0 E}{\gamma} = \frac{J}{\gamma}$, which corresponds to a conductive body, with conductivity γ .

It is found, in this second case, that the internal electric field is simply a resistive potential-drop field, and that the current density J , and consequently σ , no longer depends either on γ or ϵ' .

The transition from predominance of conductive to predominance of dielectric properties takes place at :

$$\frac{\gamma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} = 1$$

In practice, at the power frequency of 50 or 60 Hz, a body with a conductivity as low as 10^{-5} Siemens/m still behaves as a conductive body, even assuming $\epsilon' = 80$ (dielectric constant of water). Clearly ordinary soil and common surfacings, living organisms and common metal objects also act as conductors. Soil which is, in normal terms, a bad conductor thus does not modify the distribution of the field from a line or a busbar array(*),

Note : It should nevertheless be noted that these considerations are valid for low current densities which provide the surface charges σ . In more-or-less point-contact areas (feet of a standing man to ground, wheels of a vehicle to ground), a contact resistance appears and must be included in the calculation or estimation of Z_1 and Z_2 as defined in 3.1.

3.4. Application to some common cases

3.4.1. Vehicles

Many measurements have been carried out by numerous investigators, on various types of vehicle. The Table below gives some examples of the results :

(*) Geologists state that even granites and siliceous rocks seldom have conductivities less than $5 \cdot 10^{-5}$ Siemens/m.

Conditions de mesure	Grandeur mesurée	Voiture particulière	Camionnette 1000 kg	Camion 2000 kg
Hors champ	C_0 (pF) R (M Ω)	600 2	800 1.7	2000 0.15
Ligne 400 kV $h = 15$ m $E = 4,5$ kV/m	i_0 (mA) V_0 (volts) V_s (volts)	0,250 1000 450	0,460 1700 780	1,10 2000 200
Ligne 750 kV $h = 16$ m $E = 9$ kV/m	i_0 (mA) V_0 (volts) V_s (volts)	0,45 1800 750	1,10 3300 1900	2,20 4300 440

Ce tableau appelle les remarques suivantes :

- 1) Les mesures montrent que la résistance de fuite des pneus est extrêmement variable d'un type de pneu à l'autre, et même avec la portion reposant sur le sol. C'est pourquoi deux mesures ont été effectuées dans chaque cas : la première en plaçant les roues du véhicule sur une feuille mince isolante, ce qui permet de mesurer C_0 et V_0 ; la deuxième en plaçant le véhicule sur une tôle de laiton, elle-même placée sur un pré humide, ce qui permet de mesurer R en tension alternative (R tient également compte de l'angle de pertes) et V_s .
- 2) Les valeurs de courant et de tension qui figurent ci-dessus sont les plus élevées que l'on note, lorsque l'on déplace le véhicule lentement, perpendiculairement à la ligne. Les maxima ont lieu assez exactement lorsque le centre du véhicule coïncide avec un maximum du champ.
- 3) On constate que les courants de court-circuit i_0 (indépendants de R) sont, pour chaque type de véhicule, assez bien proportionnels au champ ambiant E_0 , ce qui justifie les hypothèses faites précédemment, notamment en 3.2.

En conclusion, nous dirons :

— que les valeurs-types de courants induits i_0 dans les véhicules sont, pour une fréquence du champ de 50 Hz (à 60 Hz, ces valeurs sont à multiplier par 1,2) :

- petite voiture particulière : 0,05 mA/kV/m
- grosse voiture particulière : 0,1 mA/kV/m
- camion 2000 kg : 0,2 mA/kV/m
- car, gros véhicule : 0,25 mA/kV/m

Ainsi, un car se trouvant directement sous une ligne à 750 kV, pourrait théoriquement délivrer un courant de contact permanent de 2 à 2,5 mA dans les conditions les plus défavorables.

— que les potentiels flottants V_s (cf. Fig. 3.2c) sont beaucoup plus difficiles à déterminer. Ils dépendent grandement de la qualité de l'isolement (pneumatiques, asphalte, herbe, conditions d'humidité ambiante) et sont généralement nettement plus faibles que V_0 . Leur connaissance est cependant importante pour pouvoir estimer les courants de décharge transitoire.

Les figures (3.8a) et (3.8b) donnent quelques distributions statistiques des résistances de fuite mesurées sur des véhicules de tourisme et sur des personnes debout au sol, dans diverses conditions.

3.4.2. Fils de vignes et clôtures.

De nombreuses plantations, en particulier les vignes, nécessitent des supports sous forme de fils de fer tendus horizontalement. Le calcul du courant de court-circuit, relatif à un fil de longueur L , s'effectue immédiatement par l'expression :

$$i_0 = j \omega V_0 C_0 L$$

en notant que, conformément à 3.2.1. et 3.2.2.,

$$V_0 = Eh \quad \text{et} \quad C_0 = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}$$

Measurement conditions	Value measured	Private car	Light van 1 000 kg	Lorry 2 000 kg
Out of field	C_0 (pF) R (MΩ)	600 2	800 1.7	2 000 0.15
400 kV line $h = 15$ m $E = 4.5$ kV/m	i_0 (mA) V_0 (volts) V_s (volts)	0.250 1 000 450	0.460 1 700 780	1.10 2 000 200
750 kV line $h = 16$ m $E = 9$ kV/m	i_0 (mA) V_0 (volts) V_s (volts)	0.45 1 800 750	1.10 3 300 1 900	2.20 4 300 440

This Table calls for the following notes :

- 1) Measurements show that the leakage resistance of tyres is extremely variable from one type of tyre to another and even with the area resting on the ground. This is why two measurements were carried out in each case : the first with the wheels of the vehicle placed on a thin insulating sheet, permitting the measurement of C_0 and V_0 ; the second with the vehicle standing on a brass plate, itself placed on damp ground, permitting the measurement of R with AC voltage (R also takes account of the loss angle) and V_s .
- 2) The value of current and voltage which appear above are the highest which are noted when the vehicle is moved slowly and perpendicularly to the line. The maxima occur almost exactly when the centre of the vehicle coincides with a field maximum.
- 3) It is found that the short-circuit-currents i_0 (independent of R), for each type of vehicle, are fairly well proportional to the ambient field E_0 , which justifies the hypotheses previously made, particularly in 3.2.

In conclusion, we will say :

- that the typical values of induced currents i_0 in vehicles, for a field frequency of 50 Hz, are (at 60 Hz, these values are to be multiplied by 1.2) :
 - Small private car : 0.05 mA/kV/m
 - Large private car : 0.1 mA/kV/m
 - 2 000 kg lorry : 0.2 mA/kV/m
 - Bus, large vehicle : 0.25 mA/kV/m

Thus, a bus standing directly under a 750 kV line could, theoretically, deliver a continuous contact-current of 2 to 2.5 mA, in worst-case conditions.

- that the floating potentials V_s (see figure 3.2 c) are much more difficult to determine. They depend largely on the quality of insulation (tyres, asphalt, grass, ambient humidity conditions) and are generally distinctly less than V_0 . Nevertheless, it is important to know them, in order to be able to estimate the transient discharge currents.

Figures 3.8a and 3.8b give a few statistical distributions of the leakage resistances measured on passenger vehicles and on persons standing on the ground, under various conditions.

3.4.2. Vineyard wires and fences

Many plantations, particularly vineyards, use supports in the form of iron wires stretched horizontally. The short-circuit current relating to a wire of length L follows immediately from the expression :

$$i_0 = j \omega V_0 C_0 L$$

noting that, in accordance with 3.2.1 and 3.2.2.,

$$V_0 = Eh \text{ and } C_0 = \frac{2 \pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}}$$

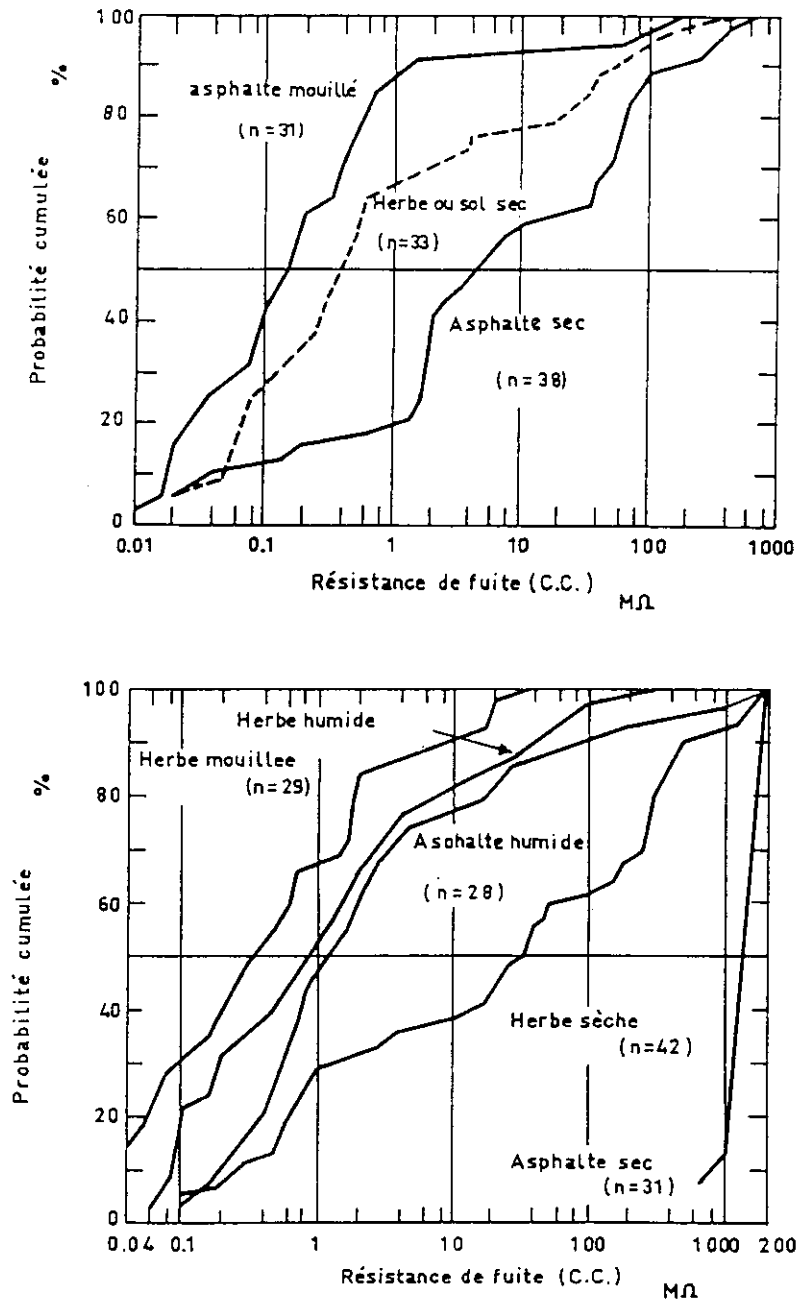


FIG. 3.8 (a et b). - Distribution statistique de la résistance de fuite mesurée sur des véhicules (a) et sur des personnes (b) à travers leurs chaussures. (d'après J.P. Reilly, 3me ISHV, Milan 1979).

Ainsi, avec $L = 200 \text{ m}$, $h = 2 \text{ m}$, $r = 0,002 \text{ m}$, $E = 10 \text{ kV/m}$, nous obtenons un courant théorique de $i_0 = 9,2 \text{ mA}$.

Lorsque plusieurs fils sont tendus les uns au-dessus des autres à des hauteurs différentes, et reliés électriquement entre eux, on peut exprimer les caractéristiques du générateur équivalent de façon simple ; en négligeant en première approximation le couplage mutuel entre les fils, on écrit en effet :

$$V_0 = \frac{\sum_n V_{0i} C_{0i}}{\sum_n C_{0i}}$$

$$i_0 = j \omega L \sum_n V_{0i} C_{0i}$$

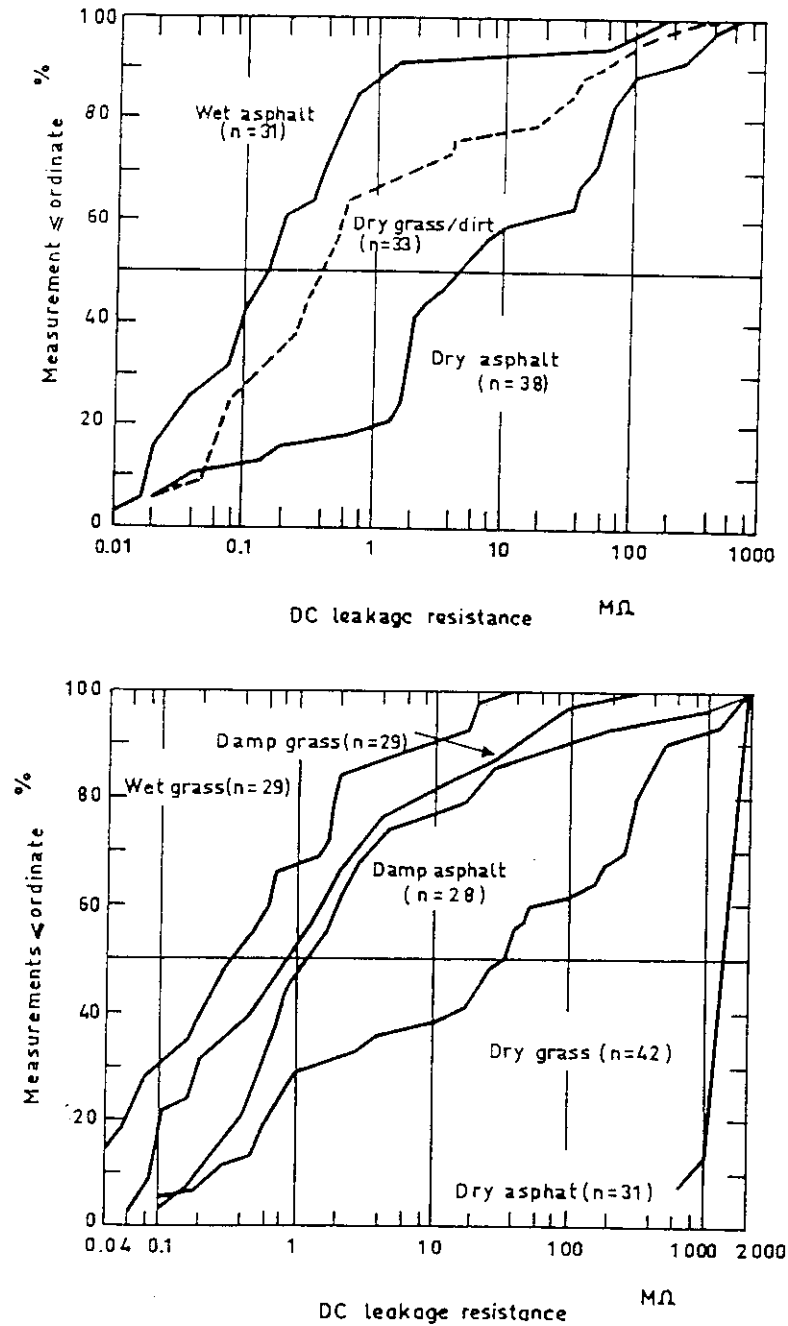


FIG. 3.8. (a & b). — Statistical distribution of DC leakage resistance of (a) vehicles and (b) people through their shoes. (from J.P. Reilly, 3rd ISHV, Milan 1979).

Thus, with $L = 200 \text{ m}$, $h = 2 \text{ m}$, $r = 0.002 \text{ m}$, $E_0 = 10 \text{ kV/m}$, we obtain a theoretical current of $i_0 = 9.2 \text{ mA}$.

When several wires are stretched one above another at different heights and are connected together electrically, the characteristics of the equivalent generator can be expressed in a simple manner. Neglecting, as a first approximation, the mutual coupling between the wires :

$$V_0 = \frac{\sum_n V_{0i} C_{0i}}{\sum_n C_{0i}}$$

$$i_0 = j \omega L \sum_n V_{0i} C_{0i}$$

Quatre fils tendus parallèlement, dont le plus haut à 2 m, avec des intervalles de 50 cm entre eux, seraient dans les conditions de l'exemple précédent capables de débiter un courant théorique de 20 mA, intensité considérée comme dangereuse.

En pratique, il existe généralement des résistances de fuite naturelle qui assurent une protection suffisante ; à défaut, des mises à la terre pourront aisément être installées (Fig. 3.2.c).

Pour éviter tout désagrément, il reste judicieux de disposer les rangs de plantation de préférence perpendiculairement à la ligne.

En ce qui concerne les *clôtures*, dont la capacité C_0 peut être notablement supérieure à celle de fils tendus, il convient de les mettre systématiquement à la terre. Pour éviter le risque de coupure accidentelle d'une prise de terre, on prévoira une mise à la terre tous les 20 mètres environ.

Il serait naturellement souhaitable de procéder, chaque fois que possible, à une mesure directe de i_0 sur place, afin de s'assurer qu'une mise à la terre est réellement nécessaire.

3.4.3. Homme debout dans un champ.

Méthode simplifiée.

C'est une méthode de simulation de charges, dans laquelle on se contente de placer deux charges ponctuelles q_1 et q_2 sur un axe vertical, à des hauteurs respectivement de h_1 et $2h_1$ au-dessus du sol. On peut calculer qu'en posant :

$$q_1 = 2 \pi \epsilon_0 \frac{8}{9} E_0 h_1^2$$

$$q_2 = 2 \pi \epsilon_0 \frac{4}{9} E_0 h_1^2$$

l'équipotentielle de valeur $V = 0$ prend la forme illustrée par la figure 3.9. Cette équipotentielle, qui est de révolution, représente assez bien un corps humain, la boucle supérieure constituant la tête et la boucle inférieure le tronc. Ainsi, en posant $h_1 = 0,80$ mètre, on obtient approximativement la silhouette d'un homme d'une taille de 1,70 m.

Comme q_1 et q_2 représentent les charges portées respectivement par la surface du tronc et de la tête, on en déduit les courants induits :

- courant dans le tronc : $i_1 = \omega q_1$
- courant de tête (passant par le cou) : $i_2 = \omega q_2$
- courant total pénétrant par les pieds : $i_t = \omega (q_1 + q_2)$

Une application numérique de cette méthode nous fournit :

$$i_1 = 10 \mu\text{A/kV/m} \quad i_2 = 5 \mu\text{A/kV/m} \quad i_t = 15 \mu\text{A/kV/m.}$$

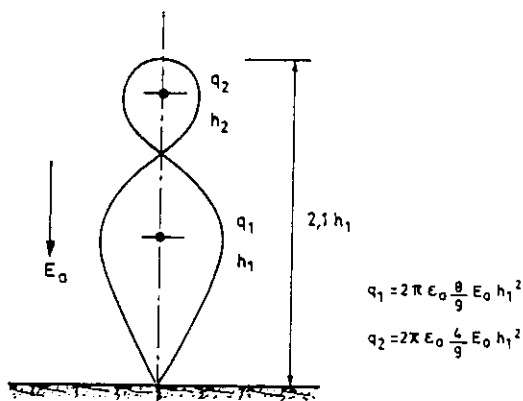


FIG. 3.9. – Charges et courants induits dans un homme soumis à un champ ambiant E_0 – Méthode simplifiée.

Four parallel stretched wires, with the highest at 2 m, spaced at 50 cm, would theoretically be capable, under the conditions of the previous example, of delivering a current as high as 20 mA, a possibly hazardous value.

Generally, in practice, natural leakage provides a sufficient safeguard, in default of which earth-connections are readily applied (Fig. 3.2 c).

In the interests of comfort, it is advisable where possible to run the rows, in plantations, perpendicularly to the line.

As far as fences are concerned, the capacitance C_0 of which may be considerably greater than that of stretched wires, systematic earthing is often advisable. To avoid the risk of accidental cutting of a single earth-connection, multiple earth connections are provided, about every 20 metres.

Naturally, it would be desirable to carry out a direct measurement of i_0 on site whenever possible, in order to make sure that earthing is really necessary.

3.4.3. Man standing in a field

Simplified method

This is a charge simulation method, in which one simply places two point charges q_1 and q_2 on a vertical axis, at heights of h_1 and $2h_1$ respectively above the ground. It can be calculated that by setting :

$$q_1 = 2 \pi \epsilon_0 \frac{8}{9} E_0 h_1^2$$

$$q_2 = 2 \pi \epsilon_0 \frac{4}{9} E_0 h_1^2$$

the equipotential of value $V = 0$ takes the form illustrated in figure 3.9. This equipotential, which is a surface of revolution, is a fairly good representation of a human body, the upper loop forming the head and the lower loop the trunk. Thus, by setting $h_1 = 0.80$ metre, the approximate silhouette of a man 1.70 m tall is obtained.

As q_1 and q_2 represent the charges carried respectively by the surface of the trunk and the head, the induced currents are deduced from them :

- Current in the trunk : $i_1 = \omega q_1$
- Head current (passing through the neck) : $i_2 = \omega q_2$
- Total current passing through the feet : $i_t = \omega (q_1 + q_2)$

A numerical application of this method gives :

$$i_1 = 10 \mu\text{A/kV/m} \quad i_2 = 5 \mu\text{A/kV/m} \quad i_t = 15 \mu\text{A/kV/m}.$$

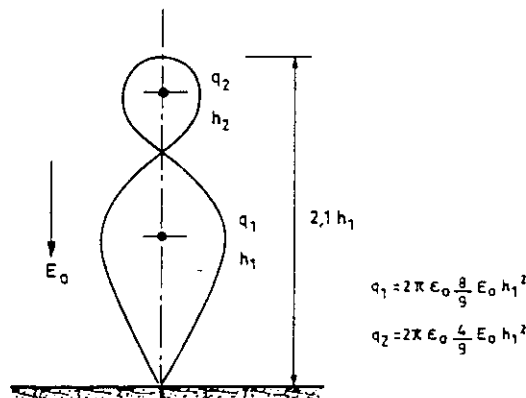


FIG. 3.9. – Charges and currents induced in a man immersed in a previously unperturbed field E_0 – Simplified method.

Le même modèle permet de déterminer le champ superficiel maximal, tel qu'on le mesurerait au sommet du crâne, on trouve :

$$E_{\max} = 16 E_0$$

d'où résulte une densité de courant superficielle, à 50 Hz, de :

$$J = 0,44 \text{ mA/m}^2 \text{ et par kV/m.}$$

Méthode complète.

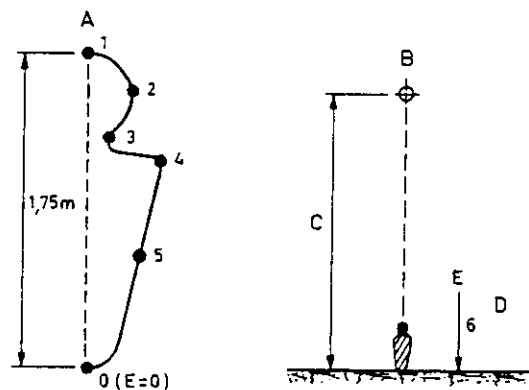
C'est encore une méthode de simulation de charges, mais effectuée à l'ordinateur, de façon à mieux prendre en compte la forme exacte du corps humain.

Le calcul a été effectué pour deux cas souvent rencontrés :

- Homme debout au sol (Fig. 3.10).
- Homme au potentiel, à proximité d'un conducteur de ligne (Fig. 3.11.).

Dans les deux figures, on a représenté à gauche le demi-profil utilisé, sur lequel sont portés les points de calcul du champ superficiel, et à droite, la disposition d'ensemble retenue pour le corps A par rapport au générateur de champ B.

En ce qui concerne l'homme au sol, on peut voir sur le tableau que les courants induits pénétrant par les pieds (courant total) et par le cou (courant de tête) ont des valeurs pratiquement identiques à celles obtenues par le modèle simplifié.



A = Profil adopté pour le calcul

B = Conducteur de rayon r

C = 12 à 18 m suivant tension ligne

D = E ambiant

Tension (kV)	Rayon (cm)	Champ (kV/m)	Courant - (μA)		
			Tête	Corps	Total (par les pieds)
225	1,5	2,5	11,3	23,6	34,9
400	7,0	5,5	25,6	54,4	80,0
750	20,0	10,0	46,5	98,9	145,0
1000	26,0	12,5	58,2	124,0	182,0

Coefficient multiplicateur du champ : $\frac{\text{Champ à la tête}}{\text{Champ ambiant}} = 13,5$

FIG. 3.10. — Conditions électriques d'un homme debout au sol sous une ligne.

The same model permits the determination of the maximum surface field, such as would be measured on the top of the head ; it is found that :

$$E_{max} = 16 E_0$$

which results in a surface current density, at 50 Hz, of :

$$J = 0,44 \text{ mA/m}^2 \text{ per kV/m.}$$

Complete method

This is again a charge simulation method, but carried out on the computer, in order to take better account of the exact shape of the human body.

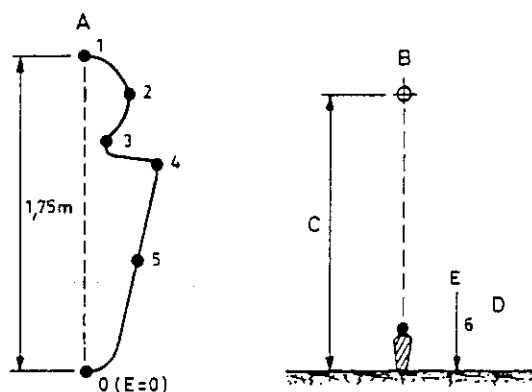
The calculation has been carried out for two common cases :

a) Man standing on the ground (Fig. 3.10)

b) Man at line potential and near a line conductor (Fig. 3.11).

In the two figures, the half-profile used, carrying the points of calculation of the surface field, is shown on the left and the overall arrangement adopted for the body A in relation to the field generator B is shown on the right.

As far as the man on the ground is concerned, it can be seen from the Table that the induced currents passing through the feet (total current) and through the neck (head current) have values which are practically identical with those obtained by the simplified model.



A = Profile adopted for the calculation

B = Conductor radius r

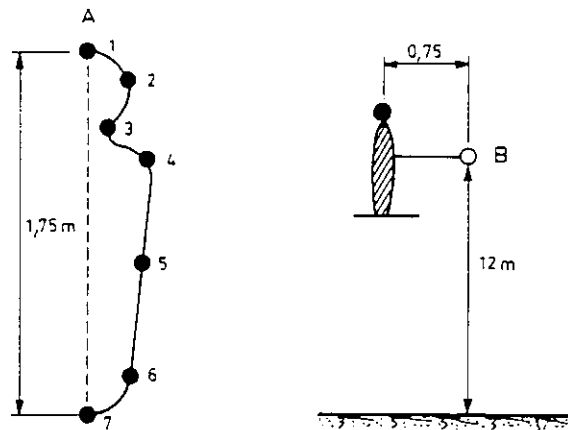
C = 12 to 18 m according to the line voltage

D = Ambient E

Voltage (kV)	Radius (cm)	Field (kV/m)	Current (μA)		
			Head	Body	Total (at the feet)
225	1,5	2,5	11,3	23,6	34,9
400	7,0	5,5	25,6	54,4	80,0
750	20,0	10,0	46,5	98,9	145,0
1000	26,0	12,5	58,2	124,0	182,0

Multiplying coefficient of the field : $\frac{\text{Field at the head}}{\text{Ambient field}} = 13,5$

FIG. 3.10. - Electrical conditions for a man standing on the ground under a line.



A = Profil adopté pour le calcul

B = Conducteur de rayon r

Tension (kV)	Rayon (cm)	Courant - (μ A)		
		Tête	Corps	Total (par le bras)
225	1,5	175	980	1155 (1,15 mA)
400	7	320	1500	1820 (1,8 mA)
750	20	500	2200	2700 (2,7 mA)
1000	26	700	3200	3900 (3,9 mA)

FIG. 3.11. - Conditions électriques d'un monteur travaillant au potentiel, sans écran protecteur.

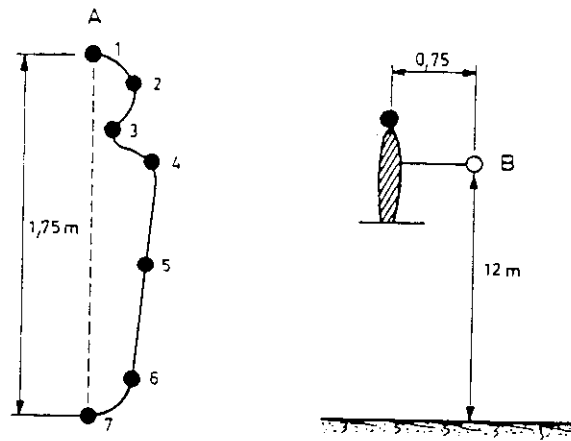
En ce qui concerne l'homme porté au potentiel du conducteur, il a été représenté touchant le conducteur avec la main. Dans ces conditions, le courant qui parcourt le bras atteint le seuil de perception dès 220 kV, et le seuil de désagrément à partir de 750 kV.

Si l'homme avait été placé dans une nacelle conductrice reliée électriquement à la phase de la ligne, le courant dans le corps s'en serait trouvé réduit par effet d'écran, mais le courant pénétrant dans la tête serait resté à peu près le même. C'est pourquoi les travaux sous tension réalisés dans ces conditions nécessitent l'emploi d'un écran électrostatique, tel que par exemple un survêtement en tissu conducteur ; ce survêtement doit en outre comporter une cagoule pour protéger la tête.

3.4.4. Comparaison avec des mesures.

Nous nous placerons exclusivement dans la situation de l'homme debout au sol, sous une ligne : c'est la disposition la plus souvent étudiée. Comparons alors les courants d'induction électrostatique, pénétrant par les pieds, calculés par les deux méthodes (que nous appellerons simplifiée et complète) avec les mesures effectuées par Fillipov directement in situ :

Champ au sol (kV/m)	Courant d'induction (μ A)		
	Méthode simplifiée	Méthode complète	Mesure directe
12	180	175	160
17	260	247	220



A = Profile adopted for the calculation

B = Conductor radius r

Voltage (kV)	Radius (cm)	Current (μ A)		
		Head	Body	Total (in the arm)
225	1,5	175	980	1155 (1,15 mA)
400	7	320	1500	1820 (1,8 mA)
750	20	500	2200	2700 (2,7 mA)
1000	26	700	3200	3900 (3,9 mA)

FIG. 3.11. — Electrical conditions of a fitter working at line potential, without protective screen.

The man at conductor potential has been represented as touching the conductor with his hand. Under these conditions, the current passing through the arm reaches the threshold of perception from 220 kV and the threshold of discomfort from 750 kV upwards.

If the man had been placed in a conductive gondola electrically connected to the live conductor, the current in his body would have been reduced by the screening effect, but the current passing in his head would have remained about the same. This is why live line working carried out under these conditions necessitates the use of an electrostatic screen, for example a suit of overalls in conductive fabric ; this suit must also include a hood to protect the head.

3.4.4. Comparison with measurements

We will place ourselves in the situation of the man standing on the ground under a line ; this is the case most often investigated. Let us then compare the electrostatic induction currents, passing through the feet, calculated by the two methods (which we will call simplified and complete), with the measurements carried out by Fillipov directly in situ :

Field at ground level (kV/m)	Induction currents (μ A)		
	Simplified method	Complete method	Direct measurement
12	180	175	160
17	260	247	220

Comparons par ailleurs les calculs aux résultats de mesures publiés par Schneider, Weck et al. Ces auteurs ont montré, à l'aide de leur Fieldman, que le courant d'induction total pénétrant dans le corps était de $14 \mu\text{A}$ par kV/m , et que la fraction de ce courant pénétrant dans la tête était du tiers environ, soit $5 \mu\text{A}$ par kV/m .

La méthode simplifiée donne $15 \mu\text{A}$ et $5 \mu\text{A}$, alors que la méthode complète nous donne respectivement $14,5 \mu\text{A}$ et $4,65 \mu\text{A}$.

Les auteurs cités plus haut indiquent aussi une densité maximale du courant au sommet du crâne de $0,48 \text{ mA/m}^2$ par kV/m .

La méthode simplifiée donne ici $0,44 \text{ mA/m}^2$ par kV/m alors que la méthode complète conduit à $0,37 \text{ mA/m}^2$ par kV/m .

Il n'est pas étonnant qu'une légère dispersion apparaisse dans l'estimation de cette densité de courant, car cette valeur dépend beaucoup de la manière de définir la courbure au sommet du crâne.

On trouve ainsi, dans l'ensemble, une excellente coïncidence entre les diverses mesures directes et les résultats des calculs. Le modèle simple des images électriques proposé ici suffit alors pour représenter correctement les régimes électriques auxquels est soumis un corps humain plongé dans un champ électrique, à condition d'assimiler celui-ci à un champ homogène ; cette condition est satisfaite sous les lignes jusqu'à une hauteur de l'ordre de 3 m et sous les jeux de barres horizontaux jusqu'à une hauteur de 2 m environ au-dessus du sol.

Quant à la méthode complète, elle peut s'employer pratiquement sans restriction, quelle que soit la forme du volume soumis à un effet d'induction électrostatique, et quelle que soit la topographie du champ électrique environnant.

3.5. Régime de charges et de décharges transitoires.

La situation est toute différente des situations précédemment analysées, si le contact entre deux objets est imparfait. Généralement, l'un d'eux est isolé et se trouve porté à un potentiel "flottant", le second est mis à la terre ou connecté électriquement à une structure sous tension. Lorsque les deux objets se rapprochent l'un de l'autre, il arrive un moment, juste avant le contact franc, où la différence de potentiel existant entre les deux est suffisante pour provoquer une petite étincelle. L'objet isolé se décharge (ou se charge) alors brusquement à travers l'objet qui est à potentiel fixe, et il en résulte un régime transitoire pendant lequel le courant atteint des intensités considérablement plus élevées qu'en régime permanent.

Ce type de phénomène est à craindre dans les circonstances suivantes :

- une personne isolée du sol, par des bottes en caoutchouc par exemple, touche une structure mise à la terre,
- une personne mise à la terre touche une structure isolée,
- un opérateur travaillant au potentiel agrippe un objet à un potentiel flottant, tel qu'outil ou pièce métallique transportés par un support isolant.

Dans ces différents cas, la décharge transitoire est ressentie de façon très déplaisante, d'autant plus que la densité de courant au point d'impact de l'étincelle est considérable ($> 10 \text{ A/mm}^2$).

– d'autre part, plusieurs auteurs ont signalé le risque d'inflammation de vapeurs d'essence dans des stations-service, lors du remplissage d'un réservoir, si celles-ci sont situées à proximité immédiate d'une ligne. Lorsque le contact entre l'embout du tuyau de remplissage et l'orifice du réservoir de carburant est intermittent, l'étincelle produite peut avoir une énergie suffisante pour enflammer le mélange air-vapeur hydrocarbonée.

3.5.1. Analyse du phénomène.

Le potentiel d'un objet isolé du sol, plongé dans un champ, s'exprime par

$$v = \sqrt{2} V_0 \cos \omega t \text{ ou } v = \sqrt{2} V_m \cos \omega t,$$

selon que l'isolement est parfait ou qu'il existe une impédance de fuite Z_1 (cf. Fig. 2.2.a et 2.2.c). Désignons la valeur de crête par $V_{\max}$, dans les deux cas.

Supposons alors que, pour une raison quelconque, un amorçage au sol se produise au maximum de tension. La capacité C_0 de l'objet se décharge, et le potentiel tombe à zéro. Si la rigidité diélectrique de l'intervalle d'air se reconstitue immédiatement après la décharge, le potentiel peut, à la demi-période suivante, atteindre $2 V_{\max}$ comme le

Let us also compare the calculations with the results of the measurements published by Schneider, Weck et al. These authors have shown, with the aid of their "Fieldman", that the total induction current entering the body was $14 \mu\text{A}$ per kV/m and that the fraction of this current entering the head was about a third, say $5 \mu\text{A}$ per kV/m .

The simplified method gives $15 \mu\text{A}$ and $5 \mu\text{A}$, while the complete method gives $14.5 \mu\text{A}$ and $4.65 \mu\text{A}$ respectively.

The authors cited above also show a maximum current density at the top of the cranium of 0.48 mA/m^2 per kV/m .

Here, the simplified method gives 0.44 mA/m^2 per kV/m while the complete method gives 0.37 mA/m^2 per kV/m .

It is not surprising that a slight scatter should appear in the estimation of this current density, since this value depends greatly on the manner in which the curvature of the top of the cranium is defined.

Thus, all in all, an excellent agreement is found between the various direct measurements and the results of the calculations. The simple model of the electrical images proposed here is thus sufficient for a correct representation of the electrical conditions to which a human body, immersed in an electric field, is subjected, provided that the latter is considered as a homogeneous field. This condition is satisfied under lines up to a height of the order of 3 m and under horizontal busbar arrays up to a height of approximately 2 m above the ground.

As for the complete method, it can be used practically without restriction, whatever the shape of the volume subjected to an electrostatic induction effect and whatever the topography of the surrounding electric field.

3.5. Transient charge and discharge conditions

The situation is quite different from the situations previously analysed, if the contact between two objects is imperfect. Generally, one of these is insulated and is brought to a "floating" potential, the other is earthed or connected electrically to a live structure. When the two objects approach each other, a moment occurs, just before firm contact, when the potential difference between the two is sufficient to cause a small spark. The insulated object thus discharges (or charges up) suddenly through the object which is at a fixed potential and transient conditions occur, during which the current reaches considerably higher values than in steady-state conditions.

This type of phenomenon is liable to occur under the following conditions :

- a person insulated from the ground, by rubber boots for example, touches an earthed structure,
- an earthed person touches an insulated structure,
- an operator working at line potential grasps an object at a floating potential, such as a tool or metal part carried by an insulating support.

In these various cases, the transient discharge is felt in a very unpleasant manner, the more so since the current density at the point where the spark strikes is considerable ($> 10 \text{ A.mm}^{-2}$).

– Furthermore, several authors have pointed out the risk of ignition of petroleum vapour in service stations, during the filling of a tank, if these stations are situated in the immediate vicinity of a line. When the contact between the nozzle of the filling hose and the fuel tank orifice is intermittent, the spark produced can have sufficient energy to ignite the air/hydrocarbon-vapour mixture.

3.5.1. Analysis of the phenomenon

The potential of an object insulated from earth, and immersed in a field, is expressed by $v = \sqrt{2} V_0 \cos \omega t$ or $v = \sqrt{2} V_m \cos \omega t$, depending on whether the insulation is perfect or whether there is a leakage resistance Z_1 (see figures 2.2 a and 2.2 c). Let us designate the peak value by V_{max} in both cases.

Let us then suppose that, for some reason, a flashover to earth occurs at the maximum voltage. The capacitance C_0 of the object discharges and the potential falls to zero. If the dielectric strength of the air gap recovers immediately after the discharge, the potential can reach $2 V_{\text{max}}$ on the next half-cycle, as is shown in figure 3.12 a . This is what

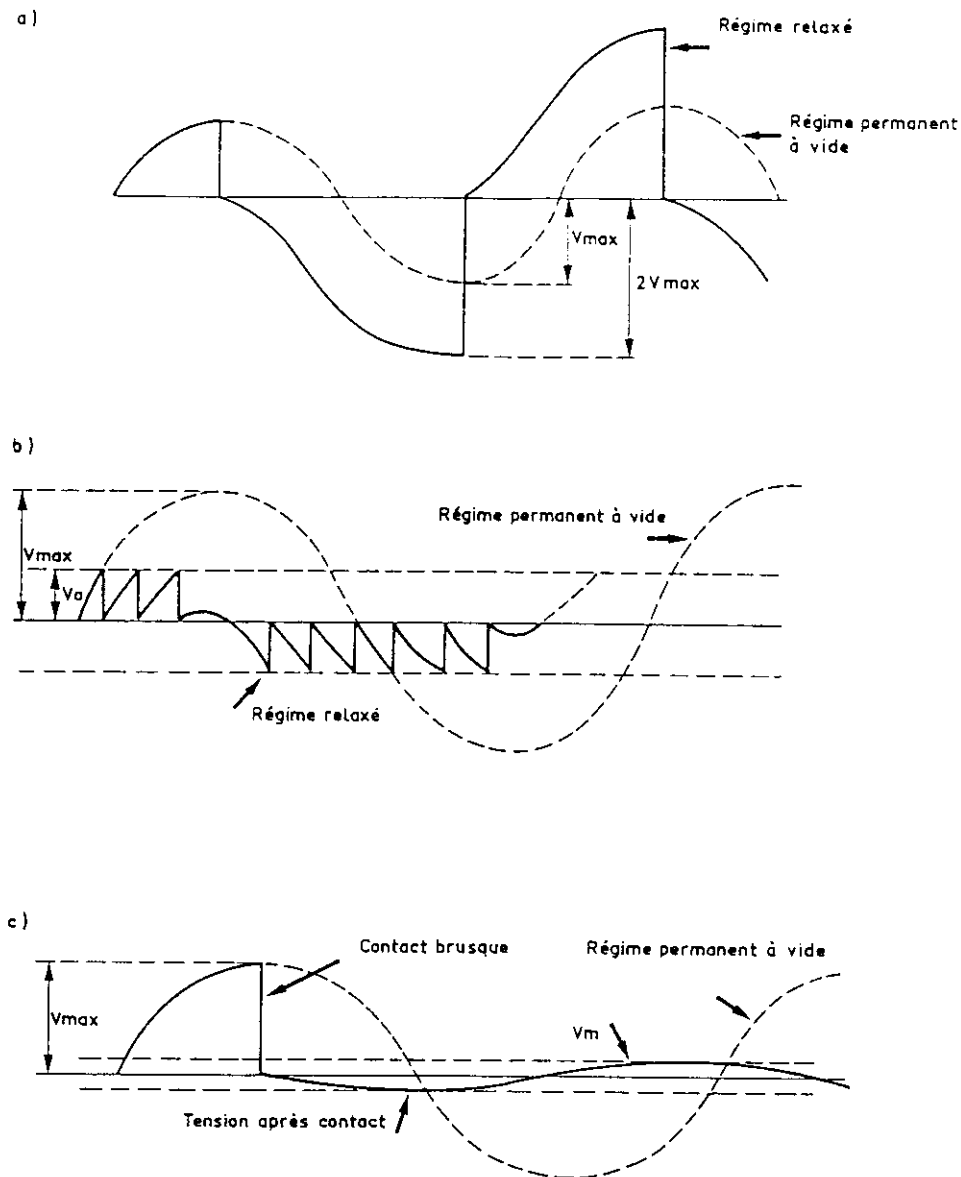


FIG. 3.12. (a-b-c). – Régimes transitoires de charge et de décharge dans des conditions de contact intermittent ou brusque.

montre la figure (3.12a). C'est ce qui se produit lorsque l'intervalle est à la limite du claquage : on se trouve alors en présence d'un régime de relaxation permanente, où la capacité C_0 se charge à $\pm 2 V_{\max}$ et se décharge toutes les demi-périodes (régime A).

Si au contraire l'intervalle d'air est tel que la tension disruptive soit plus petite que $V_{\max}$, il peut exister un régime de relaxations rapides, tel que représenté à la figure (3.12b) où plusieurs décharges se succèdent à chaque période. Si v_0 est la tension disruptive dans ce deuxième cas, le nombre approximatif de réamorçages par période est donné, par excès, par :

$$n = \frac{4 V_{\max}}{v_0} \quad (\text{Régime B})$$

Enfin, si le potentiel préexistant de l'objet isolé est trop faible pour donner lieu à une étincelle disruptive, on observera une seule décharge transitoire, dont l'intensité dépendra de la valeur instantanée du potentiel au moment même où le contact franc s'établit (Régime C, Fig. 3.12c).

Ces considérations permettent de déterminer l'énergie dissipée soit dans une seule décharge, soit par période si

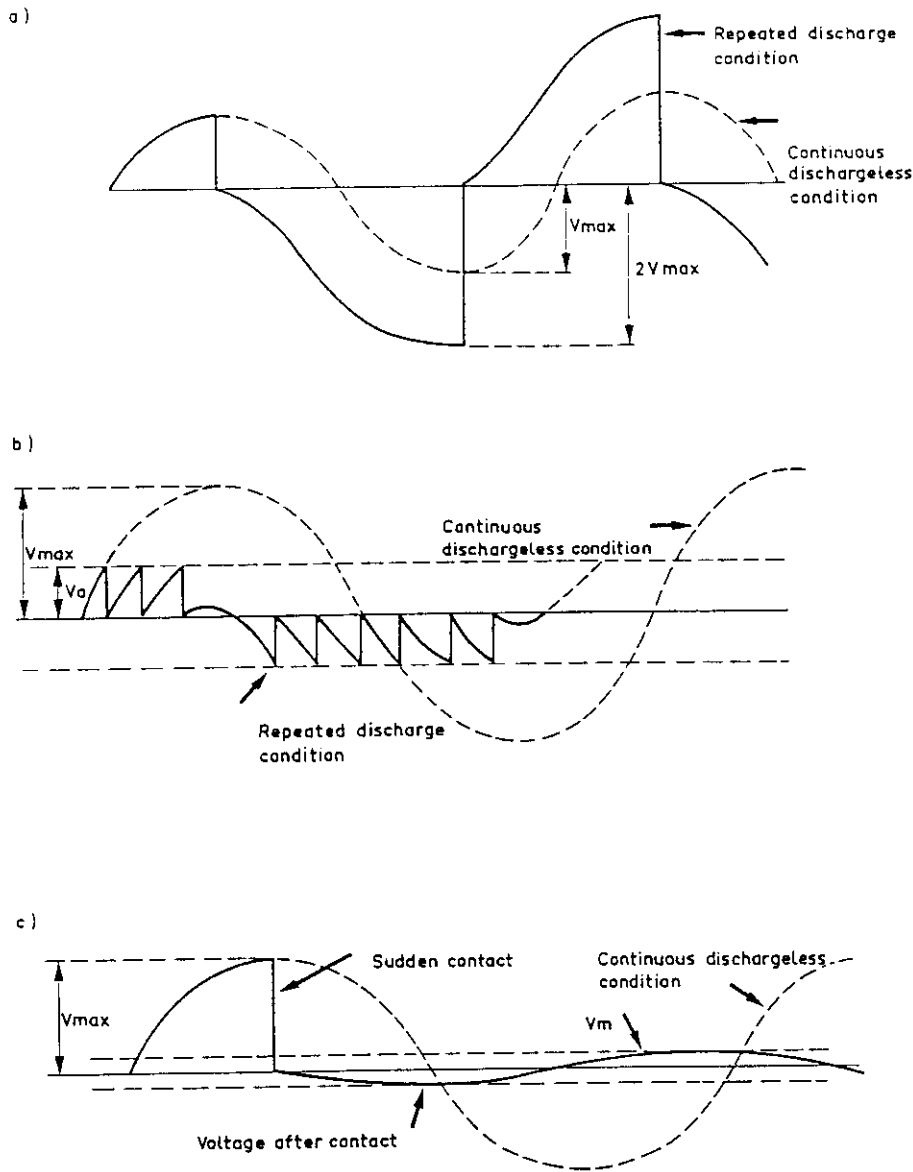


FIG. 3.12. (a-b-c). - Transient charging and discharging sequences when contacts are either intermittent or sudden.

occurs when the gap is at the breakdown limit : one then has a continuous relaxation condition, in which the capacitance C_0 charges to $\pm 2 V_{max}$ and discharges every half-cycle (Condition A).

If, on the other hand, the air gap is such that the breakdown voltage is less than V_{max} , a rapid relaxation condition can exist, as shown in figure 3.12 b , where several discharges follow each other during each cycle. If v_0 is the breakdown voltage in this second case, the approximate number of restrikes per cycle is given, moreover, by :

$$n = \frac{4 V_{max}}{v_0} \quad (\text{Condition B})$$

Finally, if the previous potential of the insulated object is too low to cause a spark breakdown, a single transient discharge will be observed, the intensity of this depending of the instantaneous value of the potential at the actual moment when firm contact is established (Condition C, Fig. 12c)).

These considerations make it possible to determine the energy dissipated either in a single discharge or per cycle

la décharge est relaxée, conformément au tableau suivant :

Type de relaxation	Energie par	
	Décharge unique	Période
régime A	$2 C_0 V_{\max}^2$	$4 C_0 V_{\max}^2$
régime B	$1/2 C_0 v_0^2$	$2 C_0 v_0 V_{\max}$
régime C	$1/2 C_0 V_{\max}^2$	—

Ce tableau montre que, pendant un intervalle de temps donné, le régime à fortes décharges de faible fréquence de répétition dissipe toujours plus d'énergie que le régime de faibles décharges se répétant plus fréquemment.

Quant au *courant transitoire* de décharge, de nombreuses mesures ont montré que celui-ci était toujours apériodique, et que son allure était assez bien représentée par une impulsion bi-exponentielle à front très raide. Pratiquement, la représentation exponentielle est suffisante, soit :

$$i = I_0 e^{-t/T}$$

la constante de temps de décharge vaut $T = C_0 \frac{R_i R_{\text{ext}}}{R_i + R_{\text{ext}}}$

où R_i est la résistance de fuite permanente de l'objet isolé, et R_{ext} la résistance à la terre de l'objet connecté transitoirement.

L'intensité de crête est donnée, selon le type de régime, par :

$$I_0 = \frac{2 V_{\max} \text{ ou } V_{\max} \text{ ou } v_0}{R_{\text{ext}}}$$

3.5.2. Valeurs numériques.

Régime transitoire entre véhicule et sol.

Le tableau suivant donne quelques résultats expérimentaux, relevés dans un champ ambiant de 4,8 kV/m.

Objet	Courant transitoire (en Amp)		$V_{\max}$ (V)	T_{70} (μs)	T_{550}	C_0 (estimé) (pF)
	$R_{\text{ext}} = 70 \Omega$	$R_{\text{ext}} = 550 \Omega$				
Voiture	0,95	0,12	70	0,05	0,33	600
Camion	3,5	0,50	280	0,15	1,1	2000
Autocar	5,0	0,73	400	0,18	1,4	2500

Inflammation de mélanges air-vapeurs hydrocarbonnés.

Sans précautions particulières, l'énergie dissipée dans une étincelle de décharge d'un véhicule peut notablement excéder la valeur minimale nécessaire pour enflammer un tel mélange (environ 0,25 mJ). Cependant de nombreuses investigations, effectuées principalement en Grande-Bretagne, ont montré que la limite de sécurité de la tension induite était de 800 Volts pour un véhicule de grandes dimensions. En dessous de cette valeur (qui correspond approximativement à 0,7 mJ par impulsion de décharge), il semblerait que l'énergie dissipée entraîne une probabilité d'inflammation tout à fait négligeable.

Comme ces 800 volts peuvent assez couramment être dépassés, même sous des champs de 4 kV/m, il importe de ne jamais installer de station-service sous, ou à proximité immédiate, de lignes à Très Haute Tension, sans prévoir des écrans électrostatiques. Souvent, un auvent de protection contre la pluie, s'il est métallique ou en béton armé, constituera un écran suffisant.

in the case of a relaxation discharge, in accordance with the following Table :

Type of relaxation	Energy per	
	Single discharge	Cycle
Condition A	$2 C_0 V_{max}^2$	$4 C_0 V_{max}^2$
Condition B	$1/2 C_0 V_0^2$	$2 C_0 V_0 V_{max}$
Condition C	$1/2 C_0 V_{max}^2$	–

This Table shows that, during a given time-interval, the condition with heavy discharges at low repetition frequency always dissipates more energy than the condition with weak discharges recurring more frequently,

As for the transient discharge current, numerous measurements have shown that this is always aperiodic and that its variation is fairly well represented by a bi-exponential pulse with a very steep front. In practice, an exponential representation is sufficient, namely :

$$i = I_0 e^{-t/T}$$

and the discharge time constant has a value of $T = C_0 \frac{R_i R_{ext}}{R_i + R_{ext}}$

where R_i is the permanent leakage resistance of the insulated object and R_{ext} is the resistance to earth of the object temporarily connected.

Depending on the conditions, the peak current is given by :

$$I_0 = \frac{2 V_{max} \text{ or } V_{max} \text{ or } v_0}{R_{ext}}$$

3.5.2. Numerical values

Transient conditions between vehicle and ground

The following Table gives a few experimental results, recorded in an ambient field of 4.8 kV/m.

	Transient current (in A)		V_{max} (V)	T_{70} (μs)	T_{550} (μs)	C_0 (estimated) (pF)
	$R_{ext} = 70 \Omega$	$R_{ext} = 550 \Omega$				
Car	0.95	0.12	70	0.05	0.33	600
Lorry	3.5	0.50	280	0.15	1.1	2000
Bus	5.0	0.73	400	0.18	1.4	2500

Ignition of air/hydrocarbon-vapour mixtures

Without special precautions, the energy dissipated in a discharge spark from a vehicle can considerably exceed the minimum value necessary to ignite such a mixture (approximately 0.25 mJ). Nevertheless, numerous investigations, carried out principally in Great Britain, have shown that the safety limit of the induced voltage is 800 volts for a large vehicle. Below this value (which corresponds approximately to 0.7 mJ per discharge pulse), it would appear that the energy dissipated entails a completely negligible probability of ignition.

As these 800 volts can quite commonly be exceeded, even in fields as low as 4 kV/m, it is important that service stations should never be installed under or in the immediate vicinity of EHV lines without providing electrostatic screens. Often, a canopy roof for weather protection, if made of metal or reinforced concrete, will constitute an adequate screen.

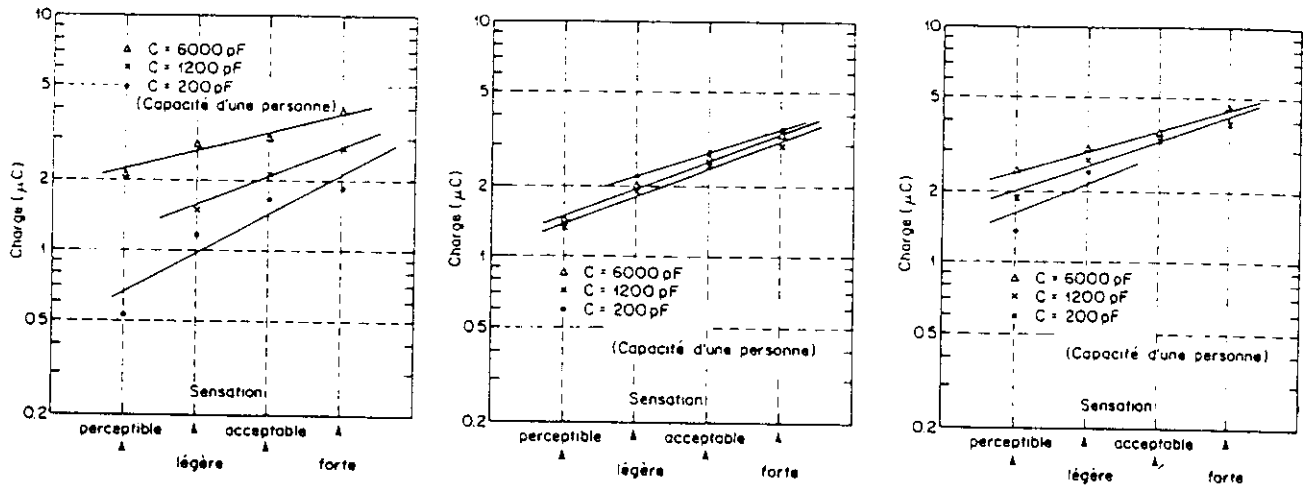


FIG. 3.13. — Moyenne logarithmique de la charge en fonction de la sensation à la décharge d'un condensateur.

- a) décharge ponctuelle sur le bout du doigt
- b) décharge sur une barrette en cuivre tenue entre deux doigts
- c) décharge sur une barrette en cuivre tenue dans la main

Effet des décharges transitoires sur les personnes.

S'il existe maintenant des données assez précises sur les effets de courants passant à travers un organisme vivant pendant des durées supérieures à quelques millisecondes, il n'existe par contre que très peu d'informations sur l'effet du passage d'impulsions de brève durée, telles que les impulsions de décharge de petites capacités. Des recherches en ce sens ont été effectuées au Canada en 1976, dans les conditions suivantes :

Un certain nombre de volontaires ont été soumis à des décharges de condensateurs de 200 pF, 1200 pF et 6000 pF, soit par la pointe d'une aiguille en contact avec l'extrémité d'un doigt, soit par contact avec une barrette de cuivre, tenue entre les doigts ou à pleine main. Ils devaient ensuite classer les sensations reçues en "perceptibles-légères-acceptables-fortes". Les résultats sont reportés sur la figure 3.13. On constate que le niveau moyen, classé sous "acceptable", est d'environ 3 μC , un peu plus faible dans le cas du contact avec une aiguille, un peu plus élevé dans le cas d'une barrette serrée dans la main.

Il semblerait donc que, pour des décharges de très faible durée, le paramètre caractéristique de l'effet soit la charge Q écoulée par l'organisme. Si les résultats avaient été présentés en fonction de l'énergie $\frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$, on aurait au contraire relevé des variations supérieures à 30 pour la série de capacités utilisées. Comme les tensions nécessaires pour stocker 3 μC sont de 15000 V pour 200 pF, 2500 volts pour 1200 pF, 500 volts pour 6000 pF, les expériences décrites ci-dessus reflètent assez bien les conditions de décharge, respectivement d'une personne ayant marché sur une moquette, d'une personne subissant la décharge d'une voiture bien isolée ou d'une personne subissant la décharge d'un très gros objet peu isolé.

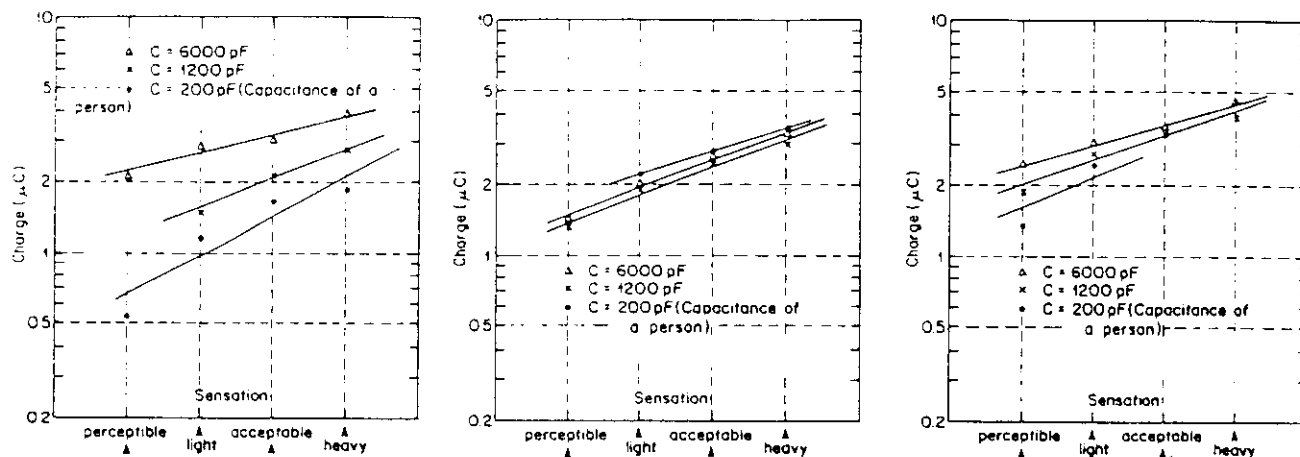


FIG. 3.13. — Sensations caused by discharge : logarithmic mean of perceptible charges.

- a) point discharge to finger tip
- b) discharge to copper bar held between two fingers
- c) discharge to copper bar held in hand

Effect of transient discharge on persons

Although there are now fairly precise data on the effects of currents passing through living organisms for durations greater than a few milliseconds, there is, on the other hand, very little information on the effect of the passage of pulses of short duration, such as the discharge from small capacitances. Research in this direction was carried out in Canada in 1976, under the following conditions :

A number of volunteers were subjected to discharges from capacitors of 200 pF, 1200 pF and 6000 pF, either through the point of a needle in contact with a finger tip, or by contact with a copper bar, held between the fingers or grasped fully in the hand. They then had to classify the sensations received into "perceptible — light — acceptable — heavy". The results are plotted in Figure 3.13. It is found that the mean level, classified as "acceptable" is about $3 \mu\text{C}$, a little less in the case of contact with a needle, a little higher in the case of a bar grasped in the hand.

It would thus seem that, for discharges of very short duration, the parameter which characterises the effect is the charge Q which has flown through the organism. If the results had been shown as a function of the energy $1/2 Q^2/C$, variations greater than 30 would, on the other hand, have been recorded for the series of capacitances used. Since the voltages necessary to store $3 \mu\text{C}$ are 15000 V for 200 pF, 2500 V for 1200 pF and 500 V for 6000 pF, the experiments described above are fairly representative of the discharge conditions, respectively of a person who has walked on a pile carpet, a person suffering the discharge of a well insulated car or a person suffering the discharge of a very large object with poor insulation.

4. LE CHAMP MAGNÉTIQUE D'UNE LIGNE

4.1. Calcul du champ magnétique

4.1.1. Magnétostatique

A la physique fondamentale des champs électriques quasi-statiques correspond celle des champs magnétiques quasi-statiques. C'est en effet la propriété quasi-statique qui permet l'analyse indépendante, sans interaction, des champs magnétiques et électriques. Au champ électrique E et à la densité de flux électrique D correspondent le champ magnétique H et le champ d'induction (ou la densité de flux magnétique) $B = \mu H$, où $\mu = \mu_0 \mu_r$. La perméabilité du vide μ_0 est également une constante universelle et vaut $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Henry/mètre. Tous les matériaux possèdent une perméabilité relative μ_r , mais seuls les matériaux ferromagnétiques tels que le fer, le nickel, le cobalt et certaines céramiques ferromagnétiques, ont une perméabilité relative s'écartant suffisamment de l'unité pour que cet effet soit sensible.

L'une des lois fondamentales de la magnétostatique est la loi d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i$$

Cette loi peut être illustrée par un exemple qui a des implications pratiques, c'est le cas du fil long et rectiligne parcouru par un courant donné. Considérons un cercle, dans un plan perpendiculaire à l'axe du conducteur, centré sur celui-ci. Pour des raisons de symétrie, le champ magnétique H est constant tout au long du cercle. Si le rayon de celui-ci est r , le champ magnétique sera donné par :

$$H = \frac{i}{2 \pi r} \quad (\text{A/m})$$

et la densité de flux magnétique (ou champ d'induction magnétique) par :

$$B = \frac{\mu i}{2 \pi r} \quad (\text{T})$$

B est orienté tangentiellement aux cercles centrés sur le conducteur et est contenu dans des plans perpendiculaires à celui-ci.

Le flux magnétique traversant une surface donnée A est déterminé par :

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{W})$$

L'intégration du flux magnétique à travers une surface fermée est nulle. Cette propriété conduit au résultat bien connu que les lignes de flux magnétique sont continues et qu'il n'existe pas de pôle magnétique isolé.

La force à laquelle est soumise l'unité de longueur d'un conducteur est donnée par la relation :

$$\vec{F}/l = \vec{i} \wedge \vec{B}$$

où $\vec{i}$ est le courant parcourant le conducteur, et $\vec{B}$ le champ d'induction magnétique, au point considéré du conducteur, engendré par tous les autres courants existant dans l'espace.

4.1.2. Champ magnétique dû aux lignes de transport

En raison de la nature quasi-statique du comportement électromagnétique aux fréquences industrielles, le champ magnétique d'une ligne est engendré uniquement par le courant. L'intensité du champ magnétique autour des conducteurs s'obtient donc par application de la loi d'Ampère, puis par superposition des résultats partiels.

4. THE MAGNETIC FIELD OF A LINE

4.1. Calculation of the magnetic field

4.1.1. Magnetostatics

The basic physics of quasi-static magnetic fields corresponds to the electric-field case. It is this quasi-static property which allows separate discussion of electric and magnetic fields which do not interact. Corresponding to the electric flux density D and the electric field E are the magnetic flux density B and the magnetic field H . These are related by the permeability $\mu = \mu_0 \mu_r$ as $B = \mu H$. The permeability of free space is also an universal constant and is given by $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ Henry/meter. All materials have relative permeabilities, μ_r , but only ferromagnetic materials like iron, nickel, cobalt, and some ceramics have relative permeabilities sufficiently different from unity to be of concern.

A fundamental law of magnetostatics is Ampere's law :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i$$

This can be illustrated, in practice, by the case of a long, straight wire carrying a given current. Assume a circle in a plane perpendicular to the conductor whose centre is on the conductor. By the symmetry of the problem, the magnetic field H is constant along the circle. If the circle's radius is r , the magnetic field is given by :

$$H = \frac{i}{2 \pi r} \quad (A/m)$$

and the magnetic flux density by

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \pi r} \quad (T)$$

B is directed tangentially to circles centred on the conductor and is contained in planes perpendicular to the conductor.

Magnetic flux through a given area is determined by

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (W)$$

Over a closed surface the magnetic flux integrates to zero. This gives the well-known result that magnetic flux lines are continuous and that there are no isolated magnetic poles.

The force per unit length on a conductor is given by the relation :

$$\vec{F}/\ell = \vec{i} \times \vec{B}$$

where $\vec{i}$ is the current in the conductor, and $\vec{B}$ is the magnetic flux density at the conductor location due to all the other currents in space.

4.1.2. Magnetic fields of power lines.

Because of the quasi-static nature of the electro-magnetic behaviour at power frequencies, the magnetic field of a line is produced by the current only. Application of Ampere's law to the current carrying conductors and superimposition of the results gives the intensity of magnetic field around the conductors.

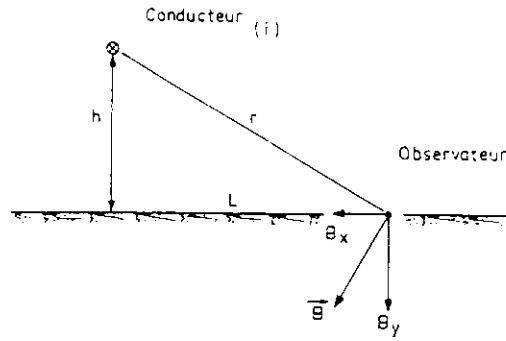


FIG. 4.1. - Densité de flux magnétique B à la surface du sol, engendré par un courant I circulant dans un conducteur unique (sans image).

La question de l'image des conducteurs doit être considérée ici différemment que lors du calcul du champ électrique. Les images sont situées à une profondeur, dans le sol, bien plus grande que la hauteur des conducteurs de phase. En première approximation, la profondeur d vaut :

$$d = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (\text{mètres})$$

où ρ est la résistivité du sol en ohm-mètre et f la fréquence en hertz.

Le calcul précis du champ magnétique nécessite l'emploi des termes de Carson pour évaluer les effets d'un sol imparfaitement conducteur.

Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les conducteurs de phase en espace libre, sans tenir compte des images. Pour le conducteur de la figure 4.1., sans son image, on a :

$$\vec{B} = \frac{\mu i}{2 \pi r} = \frac{\mu i}{2 \pi \sqrt{h^2 + L^2}}$$

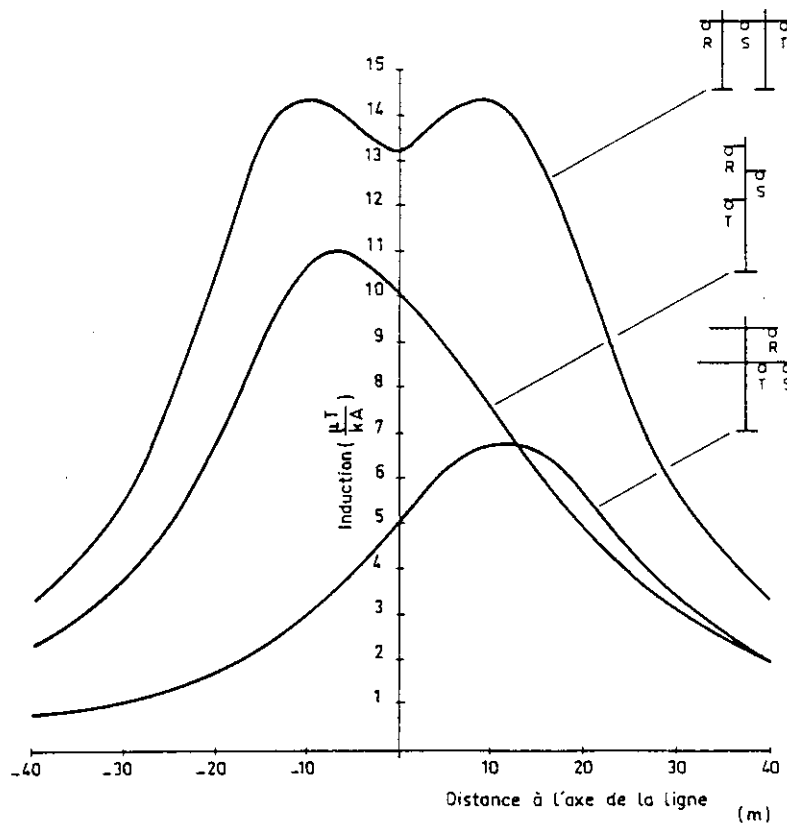


FIG. 4.2. - Influence de la disposition des conducteurs sur la densité de flux magnétique dû aux lignes de transport.

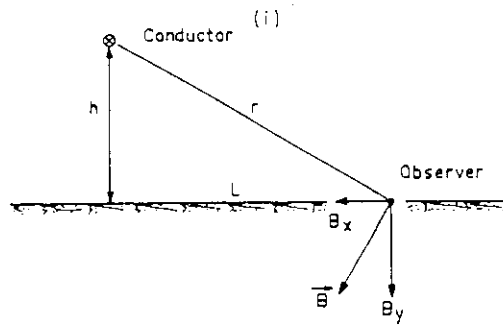


FIG. 4.1. - Magnetic flux density B at ground level, produced by a current I which flows in a single conductor (without images).

A consideration which is different from the electric field calculation concerns the image conductors. These have to be located at a greater depth d in the earth than the height of the live conductor. In a first approximation

$$d = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ metres}$$

where ρ is the earth resistivity in ohm-meters and f the frequency, in Hertz.

Accurate magnetic field calculation may call for the use of Carson's terms to evaluate the effects of imperfectly conducting earth.

For many purposes it is adequate to consider conductors in free space without any images. For the conductor of Figure 4.1 without its image :

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \pi r} = \frac{\mu \cdot i}{2 \pi \sqrt{h^2 + L^2}}$$

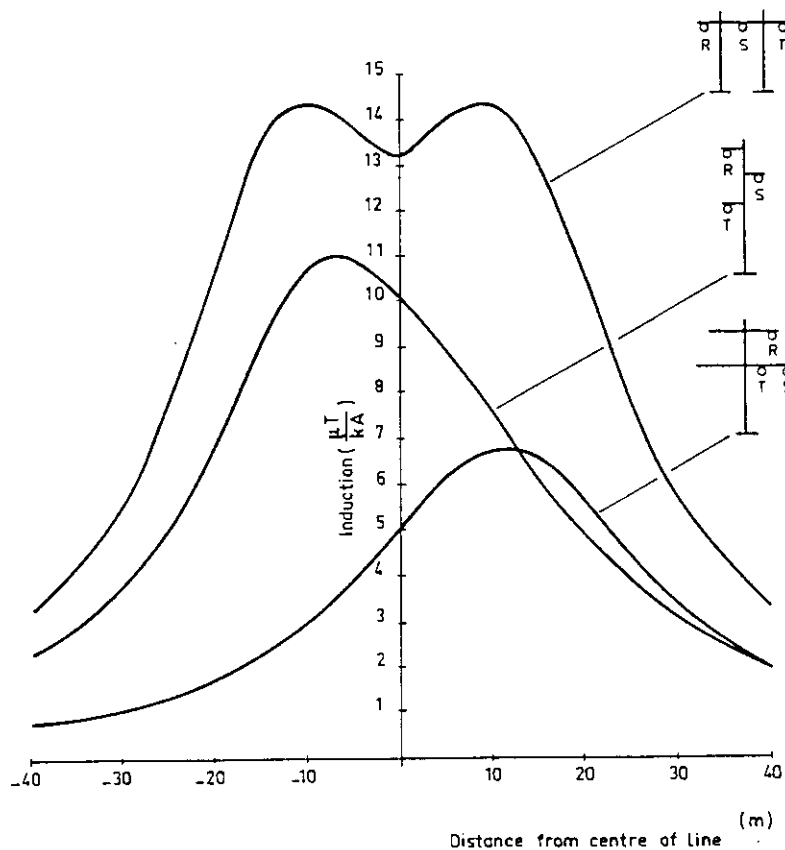


FIG. 4.2. - Influence of conductor arrangement on the magnetic flux density of power lines.

Dans le cas d'une ligne triphasée, les composantes horizontales et verticales du champ $\vec{B}$ des trois phases doivent être traitées comme vecteurs de phase et combinées séparément, en prenant en compte le déphasage entre les courants. En général, le vecteur champ résultant décrit une ellipse (voir 2.3. et son annexe).

La figure 4.2. présente quelques profils typiques du champ magnétique (grand axe de l'ellipse) relatifs à différentes configurations de lignes ; ils sont valables pour des courants de charge normale. Dans le cas de courts-circuits, la procédure de calcul sera la même, en prenant en compte les courants homopolaires.

4.2. Mesure du champ magnétique

4.2.1. Caractéristiques générales des mesureurs de champ magnétique

Pour mesurer les champs magnétiques à fréquence industrielle engendrés par les lignes de transport à haute tension, on utilise généralement des sondes de champ constituées par une bobine sous écran, connectée à un voltmètre portatif. D'autres types de sondes utilisent des résistances spéciales dont la valeur est une fonction de $\vec{B}$, ou l'effet Hall.

Dans son principe, le fonctionnement d'une sonde de champ à bobine utilise la loi de Faraday dont la forme différentielle est :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$$

Par application du théorème de Stokes, celle-ci s'écrit :

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

L'intégrale de gauche est une somme curviligne, le long d'une courbe entourant une surface A. Si le trajet curviligne est pris le long d'une boucle fermée conductrice, et si B est le champ uniforme quasi-statique comme indiqué sur la figure 4.3., l'intégrale curviligne peut être considérée comme une force électro-motrice (FEM) développée dans la boucle et un courant I y circulera, en conséquence d'un changement du flux magnétique B.A. On aura :

$$\text{FEM} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} (B.A.)$$

et d'après la figure 4.3. :

$$\text{FEM} = -\omega_0 B_0 A \cos \omega t$$

Dans le cas d'une boucle à plusieurs spires, la FEM apparaîtra dans chacune d'elles et la tension V s'accroîtra proportionnellement au nombre de spires. Le courant induit est supposé suffisamment faible pour que le champ opposé B qu'il engendre puisse être négligé. Il convient de noter que la relation entre la FEM et B_0 suppose que la direction de B_0 soit perpendiculaire au plan des spires de la bobine. Comme seule la composante spatiale de B perpendiculaire au plan des spires engendre une FEM, c'est aussi l'orientation de la bobine qui mesure la valeur maximale du champ B.

Par ailleurs, la FEM étant proportionnelle à la fréquence, il faut considérer avec attention le contenu harmonique du champ, c'est-à-dire du courant qui engendre ce champ.

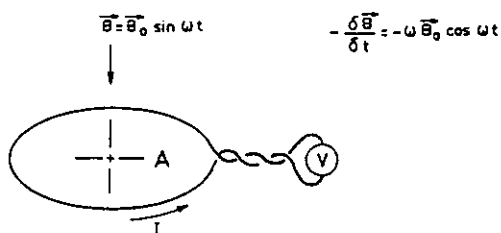


FIG. 4.3. - Principe de la sonde de champ B à bobine.

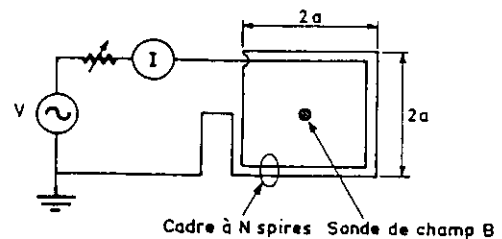


FIG. 4.4. - Dispositif utilisé pour l'étalonnage d'un mesureur de champ magnétique.

For a three-phase line, the horizontal and vertical components of $\vec{B}$ from the three conductors must be combined individually as phasors, taking account of the phase-angles between currents. In general the resultant traces an ellipse in time (see 2.3 and appendix).

Figure 4.2 presents typical forms of magnetic field profiles (major axis of ellipse) of different line configurations, valid for normal load currents. For the case of short circuits the calculation procedure is the same, taking account of homopolar currents.

4.2. Measurement of the magnetic field

4.2.1. General characteristic of magnetic field meters.

Magnetic field probes consisting of electrically shielded coils of wire are used in conjunction with portable voltmeters to measure power frequency B-fields under high voltage transmission lines. Other probes rely on resistors which change in value depending on B or on the Hall Effect.

The principle of operation of a coil type B-field probe takes advantage of Faraday's Law (in differential form).

$$\text{curl } \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

Using Stokes' theorem, this can be rewritten in the form

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

The left-hand term is a line integral along a curve enclosing a surface area A . If the path of the left hand integral is taken along a closed loop of conductor and B is a quasi-static uniform field as shown in Fig. 4.3, the line integral can be regarded as the electromotive force (EMF) developed in the loop and a current I will flow in response to a change in the magnetic flux $B.A$. That is,

$$EMF = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} (B.A)$$

and from Fig. 4.3

$$EMF = -\omega B_0 A \cos \omega t$$

For a loop of many turns, the EMF will appear in each turn and the voltage V will increase in proportion with the number of turns. The induced current has been assumed to be sufficiently small that the opposing B-field generated by it can be neglected. It should be noted that the relationship between the EMF and B_0 assumes that the direction of B_0 is perpendicular to the plane of the coil. Because only the component of B_0 perpendicular to the area of the loop generates an EMF, this is also the orientation for measuring the maximum B-field value.

Since the EMF is proportional to the frequency, special consideration of the harmonic content of the field is necessary, i.e. of the current which produces the field.

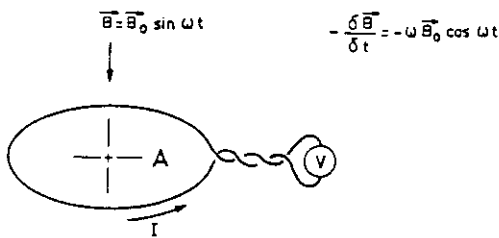


FIG. 4.3. – Principle of a coil-type B field probe.

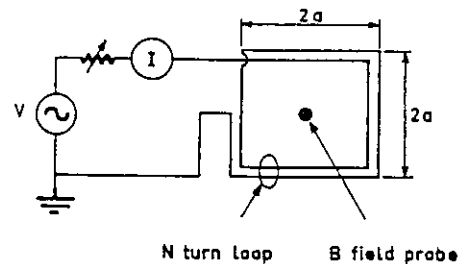


FIG. 4.4. – Arrangement for calibration of magnetic field meter.

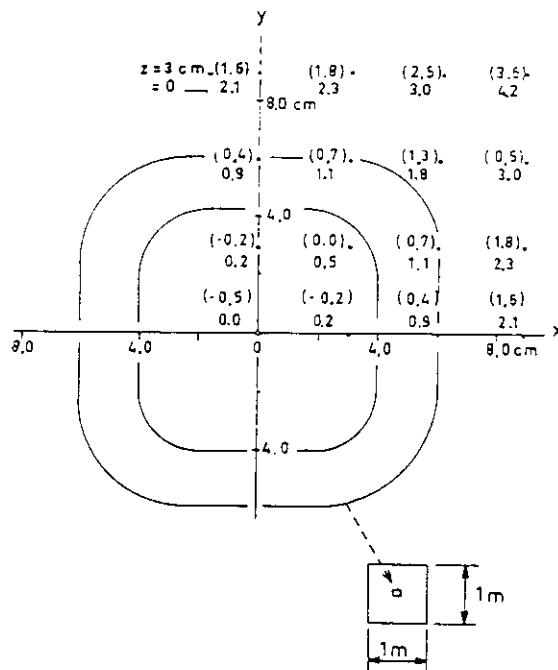


FIG. 4.5 — Ecart (en pourcentage) de B_z par rapport à $B_z(0, 0, 0)$ pour diverses positions dans le plan d'une boucle carrée de 1 m x 1 m, ainsi que 3 cm au-dessus et au-dessous du plan (chiffres entre parenthèses).

4.2.2. Etalonnage des mesureurs de champ magnétique.

La méthode-type d'étalonnage d'une sonde de champ consiste à introduire celle-ci dans un champ magnétique uniforme, d'amplitude et d'orientation connues. Des bobines de Helmholtz ont souvent été utilisées pour générer de tels champs, mais le cadre (à plusieurs spires), de construction plus simple, de forme géométrique rectangulaire, a également été employé. La simplicité de construction est au prix d'une moins bonne uniformité du champ, mais une précision suffisante est aisément obtenue.

La figure 4.4. propose une disposition de cadre d'étalonnage. Le champ d'induction magnétique au centre d'une boucle carrée, de côtés $2a \times 2a$, ayant n spires est donné par :

$$B_z(0, 0, 0) = \mu_0 \cdot i \cdot n \frac{\sqrt{2}}{\pi a}$$

Le calcul exact du champ au voisinage du centre indique un écart par rapport au champ central. La figure 4.5. donne les écarts, en pourcentage, près du centre d'une boucle carrée de 1 m x 1 m. En utilisant une sonde d'environ 6 cm x 6 cm, la précision de l'étalonnage est meilleure que 2 % de la valeur du champ B au centre.

4.2.3. Paramètres affectant la précision des mesures de champ magnétique

La position de la sonde, la proximité de l'observateur ou d'objets semblables, une éventuelle fuite électrique le long du manche, ou une probable non-uniformité du champ n'ont que des effets négligeables. Cependant, un blindage électrostatique de la sonde peut être nécessaire pour éviter les courants d'influence dus au champ électrique ambiant.

Des effets de température sur le détecteur ou un léger mouvement autour du point d'équilibre restent une source d'erreurs possibles, mais faibles.

4.2.4. Procédure de mesure du champ magnétique au voisinage des lignes de transport.

Le champ magnétique sous une ligne de transport est généralement mesuré à une hauteur de 1 m au-dessus du sol : lorsque ces mesures sont effectuées à d'autres hauteurs, celles-ci devront être explicitement indiquées. La sonde sera orientée de manière à obtenir la déviation maximale de l'appareil de lecture.

L'opérateur peut rester près de la sonde. Les objets déplaçables comportant des matériaux magnétiques ou conducteurs non magnétiques seront éloignés du point de mesure d'une distance égale à au moins trois fois leur plus grande dimension, afin d'éviter la distorsion du champ.

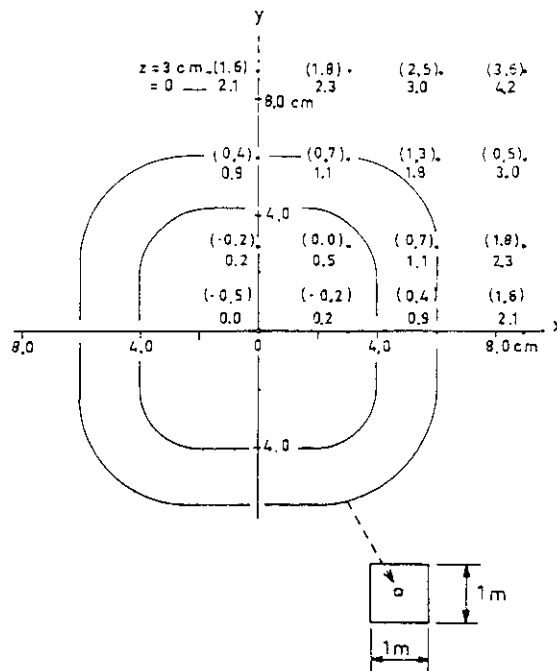


FIG. 4.5. - Percentage departure of B_z from $B_z(0, 0, 0)$ for positions in the plane of a square current loop 1 m x 1 m and 3 cm above or below the plane (figures in brackets).

4.2.2. Calibration of magnetic field meters

Calibration of magnetic field probes is typically done by introducing the probe into a nearly uniform magnetic field of known magnitude and direction. Helmholtz coils have frequently been employed to generate such fields but the more simply constructed single loop (of many turns) with rectangular geometry has also been used. The simplicity in construction is at the expense of reduced field uniformity, but sufficient accuracy is readily obtained.

Figure 4.4. gives a proposed arrangement of calibration loop. The magnetic field in the centre of a square loop (side-dimensions $2a \times 2a$, n = number of turns) is :

$$B_z(0, 0, 0) = \mu_0 \cdot i \cdot n \frac{\sqrt{2}}{\pi a}$$

An accurate calculation of field values near the centre of a square loop of dimensions 1 m x 1 m yields departures from the central magnetic fields given in Figure 4.5 as percentages. For a probe of approximately 6 cm x 6 cm the accuracy of this calibration is within 2 % of the B-field value at the centre.

4.2.3. Parameters affecting accuracy of magnetic field measurements

The position of the probe, the proximity of the observer or similar objects, any electrical leakage along the probe handle or likely non-uniformity of the field have negligible effects. However, electrostatic shielding of the probe may be needed to avoid induced currents from the ambient electric field.

Temperature effects on the detector and mechanical balance of the meter movement remain potential sources of small error.

4.2.4. Procedure for measuring the magnetic field near transmission lines

The magnetic field under transmission lines is usually measured at a height of 1 m above the ground level : measurements at other heights of interest should be explicitly indicated. The probe should be oriented for the maximum reading.

The operator may stay close to the probe. Movable objects containing magnetic materials or non-magnetic conductors should be at least three times the largest dimension of the object away from the point of measurement, to avoid perturbation of the field.

Les objets en métal non magnétique sont le siège de courants de Foucault à cause de la variation en fonction du temps du flux magnétique. Les champs magnétiques engendrés par ces courants de Foucault décroissent comme le cube de la distance lorsque celle-ci est grande par rapport aux dimensions de l'objet conducteur.

Une description plus détaillée du champ B au point de mesure sera obtenue en mesurant les amplitudes du maximum et minimum du champ, ainsi que leur orientation dans le plan de l'ellipse.

4.3. Les effets et le blindage du champ magnétique

Les champs magnétiques alternatifs risquent d'induire des courants dans le câblage de certains appareils de mesure sensibles, dans des systèmes électroniques divers, des installations de télécommunication, des lignes ou des conduites.

Les courants perturbateurs ne sont facilement calculables que lorsqu'il s'agit de simples boucles. Il est bien plus difficile de les déterminer lorsque les champs magnétiques pénètrent dans des volumes conducteurs ou semi-conducteurs, tels que des structures métalliques massives ou des organismes vivants. Le calcul des courants de Foucault engendrés ainsi n'est possible que dans des configurations simples particulières.

Afin de minimiser les effets nocifs, le champ perturbateur – ici, le champ magnétique d'une ligne de transport – peut être réduit par un choix convenable de la configuration des phases (Fig. 4.6.) ou par la création d'un champ de compensation.

La figure 4.7. montre l'effet d'un courant de compensation sur le champ magnétique régnant sous une ligne de transport. Le courant de compensation doit être engendré séparément, son amplitude et sa phase doivent être optimisés. Dans le cas de la figure 4.7., les câbles de garde, isolés, sont utilisés pour former le circuit de compensation ("B" sur la figure).

En ce qui concerne les champs magnétiques à fréquences industrielles, le blindage au moyen d'enveloppes présente des difficultés pratiques bien supérieures à celles que l'on rencontre dans le cas des champs électriques.

On utilise des écrans magnétiques réalisés avec des matériaux dont la susceptance est bien plus grande que celle de l'air. Non seulement la perméabilité mais aussi l'épaisseur et les dimensions de tels écrans sont importants, et la direction du champ doit également être considérée.

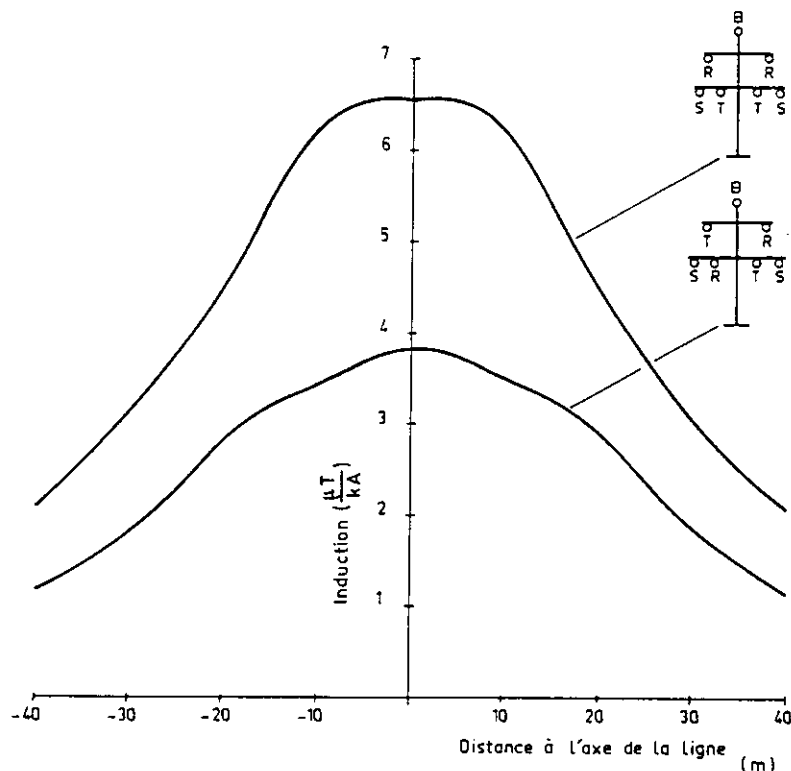


FIG. 4.6. – Influence de l'indice horaire des phases sur la densité de flux magnétique des lignes de transport.

Non-magnetic metal objects will develop eddy currents because of the time variation of magnetic flux. The magnetic fields generated by these eddy currents generally will decrease as the cube of the distance for distances large compared to the dimensions of the conductor.

To provide a more detailed description of the B-field at a point of interest, measurement of the maximum and minimum fields with their orientations in the plane of the field ellipse can be made.

4.3. Magnetic field effects and screening

Alternating magnetic fields may also induce currents within the circuitry of sensitive measuring apparatus or other electronic systems, communication installations, lines or pipes.

These interfering currents are easily calculable, as far as a simple loop is concerned. Many difficulties arise, where such fields penetrate conducting or semi-conducting volumes, like massive metallic structures, animals or humans. The calculation of eddy currents produced in these cases is possible only in special, simplified cases.

To minimize adverse effects the interfering field – i.e. the magnetic field of a transmission line – can be reduced by choosing a favourable phase configuration (Fig. 4.6) or by a compensating field.

Figure 4.7 shows the effect of a compensating current – which has to be generated separately and optimized in amplitude and phase angle – on the magnetic field under a transmission line. For this case, the isolated earth wires (marked "B" in Fig. 4.7) are used as the compensating loop.

Screening against power-frequency magnetic fields by means of enclosures presents practical difficulties far greater than in the comparable case of electric fields.

Magnetostatic enclosures, made of materials having much higher susceptances than air, are used. Not only the permeability but also the wall-thickness and dimensions of such enclosures need consideration as well as the field-direction.

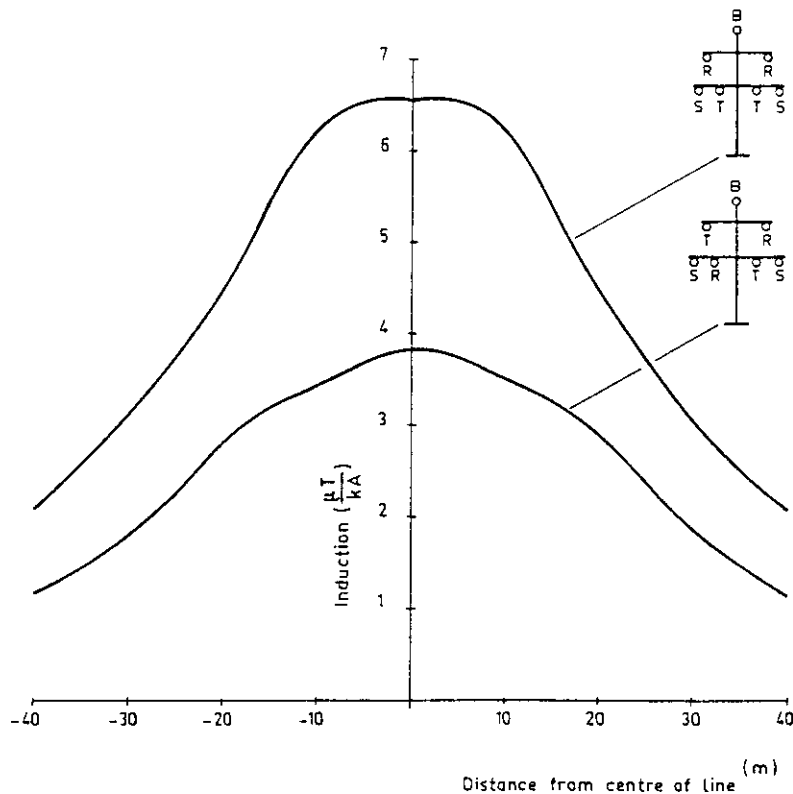


FIG. 4.6. – Influence of phase position on magnetic flux density of power lines.

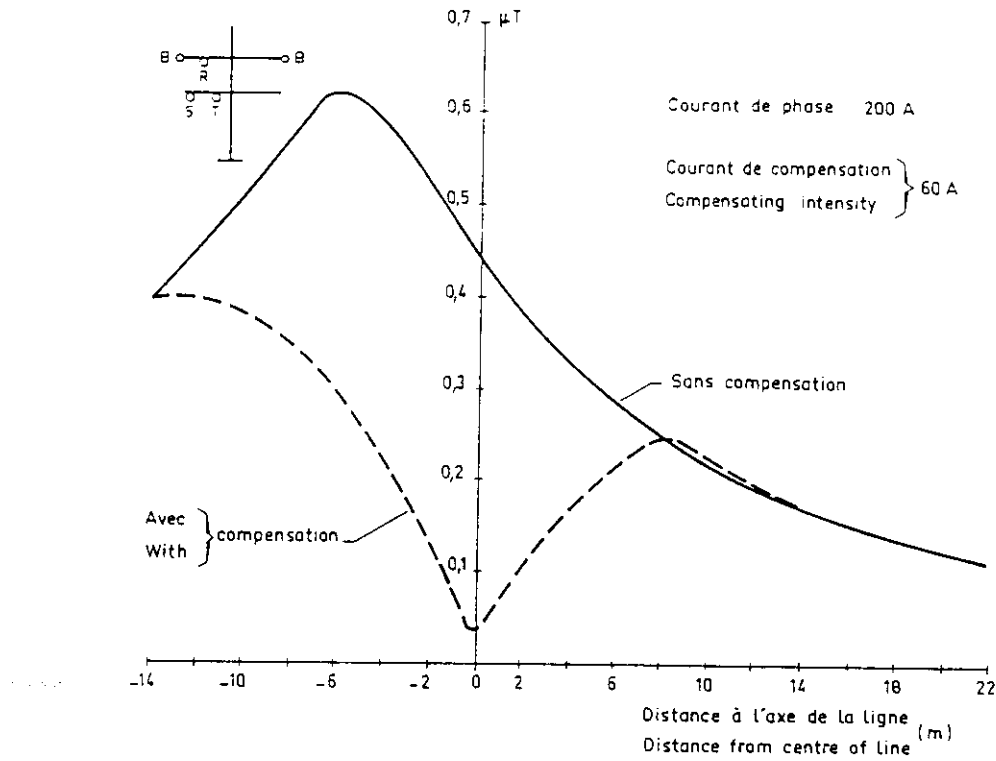


FIG. 4.7. - Compensation du champ magnétique d'une ligne à 110 kV.

Courant de charge : 200 A

Courant de compensation : 60 A

B-B = câbles de garde isolés.

La saturation et les courants de Foucault se conjuguent pour réduire l'efficacité de l'écran ; on utilise quelquefois, dans des installations de blindage pratiques, des enveloppes extérieures épaisses, par exemple en fonte, afin de réduire le champ à des valeurs qui permettent ensuite l'emploi d'une ou plusieurs enveloppes minces en matériau de haute perméabilité.

Dans certaines circonstances, une simple boucle de compensation, parcourue par un courant ajustable en amplitude et en phase, sera suffisante pour protéger un appareil individuel.

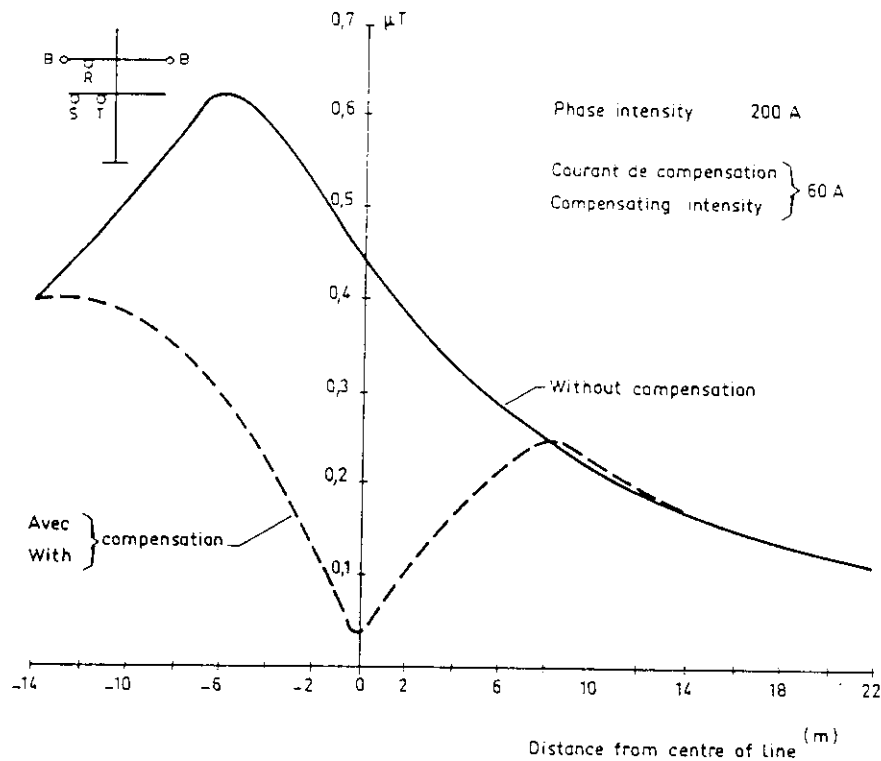


FIG. 4.7. - Compensation of magnetic flux density of a 110 kV line.

Load current : 200 A.

Compensating current : 60 A.

B-B : isolated earth wires.

Both saturation and eddy-current flow are likely to reduce the screening-efficacy : practical arrangements sometimes utilize thick outer housings, say of cast iron, to reduce the field to values which can then be handled by one or more internal enclosures of thinner, high-permeability material.

Under special circumstances even a simple compensating loop - fed by a current generator, which is adjustable in phase angle and amplitude - might be sufficient, to protect a single piece of apparatus.

5. MÉTHODES DE MESURE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

5.1. Principe des mesureurs de champ

Deux types différents de mesureurs sont décrits dans la littérature :

- 1) Les mesureurs à potentiel flottant qui mesurent le courant (ou la charge) induit, oscillant à la fréquence industrielle entre les deux moitiés d'un boîtier conducteur plongé dans le champ électrique,
- 2) les mesureurs "à la masse" qui mesurent le courant entre une sonde introduite dans le champ électrique et le sol.

Le mesureur à potentiel flottant convient pour les mesures courantes, car il est portable, il permet d'effectuer des mesures en des points quelconques au-dessus du plan du sol, et ne requiert pas de référence au sol connue.

Un type d'instrument est caractérisé par la forme de ses électrodes et par l'utilisation de ses électrodes en tant que source de tension ou source de courant pour l'électronique de mesure.

Il faut cependant indiquer que, du fait de la taille de ces appareils, il n'est pas possible de mesurer des champs trop fortement divergents, tels que les champs perturbés par le voisinage immédiat d'objets à forte courbure. Il est alors inutile de vouloir mesurer, avec un appareil de ce type, la distribution du champ autour d'une personne debout au sol, par exemple.

5.1.1. Le dipôle sphérique

Les deux hémisphères du dipôle sont isolés l'un de l'autre le long du cercle équatorial commun, et reliés entre eux par une faible impédance. Lorsque le dipôle est placé dans un champ électrique alternatif, le courant d'influence fait apparaître une faible tension aux bornes de l'impédance. C'est cette tension qui attaque l'électronique de mesure (voir le schéma-bloc de la Figure 5.1a).

La présence du dipôle dans le champ introduit bien entendu une distorsion locale des lignes de force et des surfaces équipotentielles, mais dans le cas particulier d'une sphère, cette distorsion peut être calculée. On démontre en effet que lorsque le plan équatorial de séparation des hémisphères coïncide avec une surface équipotentielle du champ non perturbé E_0 , le champ superficiel $E(s)$ vaut, aux deux pôles, $3 E_0$. Il varie ensuite, le long d'un méridien, de façon sinusoïdale.

L'appareil étant symétrique, les charges portées par chaque hémisphère sont égales et de signe opposé, et le courant d'échange qui en résulte sera donné par l'expression déjà indiquée en 3.2.3. :

$$i_0 = j \omega \epsilon_0 \int_S E(s) ds$$

où S est ici la surface d'un hémisphère.

Compte tenu de la loi de distribution du champ superficiel $E(s)$, on obtient pour une sphère de rayon a :

$$i_0 = E_0 \cdot 3 \pi \epsilon_0 \omega a^2$$

5.1.2. Dipôles à boîtier

Certains types d'appareils se distinguent du cas idéal de la sphère par leur boîtier, de forme généralement parallélépipédique. Ce boîtier est également réalisé en deux moitiés isolées, jouant un rôle équivalent à celui des hémisphères (Fig. 5.1b). Dans ce cas, la relation entre champ et courant d'influence doit faire intervenir un coefficient de forme k . On a :

$$i_0 = k \omega \epsilon_0 E_0$$

k est déterminé par l'une des méthodes d'étalonnage qui seront décrites plus loin.

5. METHODS OF MEASUREMENTS OF ELECTRIC FIELDS

5.1. Principle of field meters

Two different types of meter are described in the literature :

- 1) self-contained or free-body meters, which measure the induced power-frequency current or charge oscillating between two halves of an isolated conductive body in an electric field, and
- 2) ground reference meters which measure the current to ground from a probe introduced into an electric field.

The free-body meter is suitable for survey-type measurements because it is portable, allows measurements anywhere above the ground plane, and does not require a known ground reference.

An instrument type is characterised by the shape of its electrodes and by the use of its electrodes as a voltage source or as a current source for the measuring electronics.

Nevertheless, it must be pointed out that, because of the size of these instruments, it is not possible to measure highly non uniform fields such as the fields which are perturbed by the immediate proximity of sharply curved objects. Thus, with an instrument of this type, it is useless to attempt to measure the field distribution around a person standing on the ground, for example.

5.1.1. The spherical dipole

The two hemispheres of the dipole are insulated from one another along the common equatorial circle and are connected together by a low impedance. When the dipole is placed in an alternating electric field, the induced current causes a low voltage to appear at the terminals of the impedance. This voltage is applied to the measuring electronics (see block diagram in Figure 5.1 a.)

Of course, the presence of the dipole in the field introduces a distortion of the lines of force and equipotential surfaces, but in the particular case of a sphere, this distortion can be calculated. It is shown, in fact, that when the equatorial plane separating the hemispheres coincides with an equipotential surface of the unperturbed field E_0 , the surface field $E(S)$ has a value, at the two poles, of $3 E_0$. It then varies sinusoidally along a meridian.

Since the apparatus is symmetrical, the charges carried by each hemisphere are equal and of opposite sign, and the resultant exchange current will be given by the expression already stated in 3.2.3. :

$$i_0 = j \omega \epsilon_0 \int_S E(S) dS$$

where S in this case is the surface area of a hemisphere.

Taking account of the law of distribution of the surface field $E(s)$, then for a sphere of radius a :

$$i_0 = E_0 \cdot 3 \pi \epsilon_0 \omega a^2$$

5.1.2. Housed dipole types

Some types of available instrument differ from the ideal case of the sphere in their housing, which is generally in the form of a rectangular box. This housing is also constructed in two insulated halves, playing an equivalent part to that of the hemispheres (Fig. 5.1b). In this case, the relationship between the field and the induced current must include a form factor k . We have :

$$i_0 = k \omega \epsilon_0 E_0$$

k is determined by one of the calibration methods which will be described later.

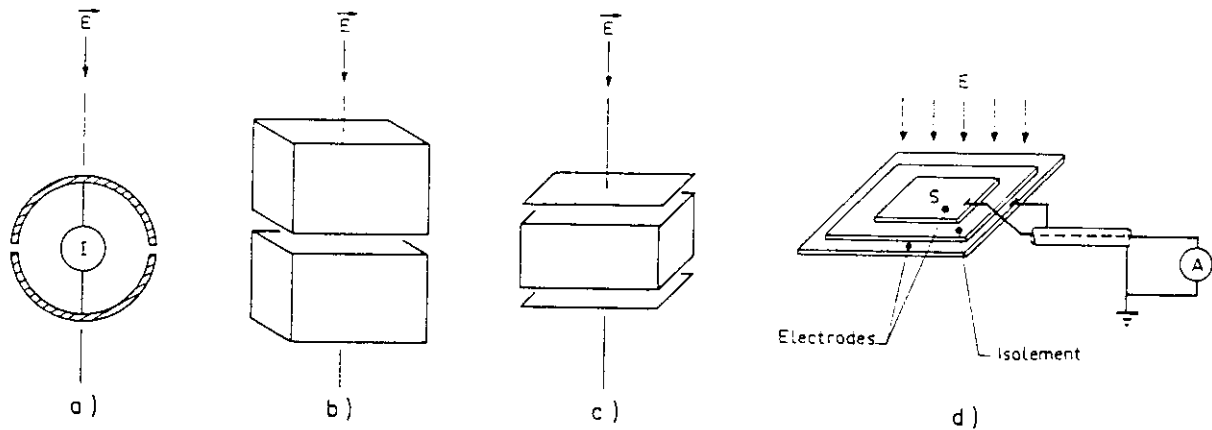


FIG. 5.1. (a, b, c, d). — Principaux types de mesureurs de champ électrique :

- a) dipôle sphérique
- b) dipôle parallélépipédique
- c) appareil à plaques parallèles
- d) sonde au sol.

On notera que le rayon "effectif" ou "équivalent" de ces mesureurs de champ, à géométrie parallélépipédique, peut être estimée, de façon approximative comme égal à la moitié de la plus grande diagonale.

5.1.3. Appareil à plaques parallèles.

Dans ce dispositif, qui fonctionne également à potentiel flottant, les électrodes sont des plaques conductrices parallèles reliées électriquement entre elles par une très forte impédance. De ce fait, ce dispositif est mieux adapté à la mesure de la différence de potentiel V entre les deux plaques (Fig. 5.1c). Si celles-ci sont distantes de d , on mesure une tension :

$$V = E_0 d$$

5.1.4. Sonde au sol.

Ce mesureur de champ est utilisé pour effectuer des relevés au niveau du sol, il comprend deux plaques parallèles isolées l'une par rapport à l'autre, la plaque inférieure étant reliée à la terre (Fig. 5.1d).

L'impédance d'entrée de l'ampèremètre est faible par rapport à l'impédance de la capacité des deux plaques parallèles y compris le câble de raccordement. L'intensité de courant i , conséquence de la présence du champ électrique d'intensité E prend la forme :

$$i_0 = S \omega \epsilon_0 E_0$$

S étant la surface de la plaque supérieure.

5.1.5. Emploi des divers types d'appareils.

La formule pour la sphère (en fait deux hémisphères), comme source de courant, est considérée comme très précise et un instrument construit sur ce principe a été proposé comme étalon.

Les électrodes parallèles peuvent être utilisées comme source de tension ou comme source de courant. Un avantage de la source de tension à électrodes parallèles est que la perturbation qu'elle apporte dans un champ homogène est négligeable. Un inconvénient résulte dans la construction mécanique plus compliquée de l'instrument pour maintenir un champ électrique non perturbé entre les électrodes et dans les exigences concernant l'amplificateur de mesure, qui doit présenter une très grande impédance d'entrée.

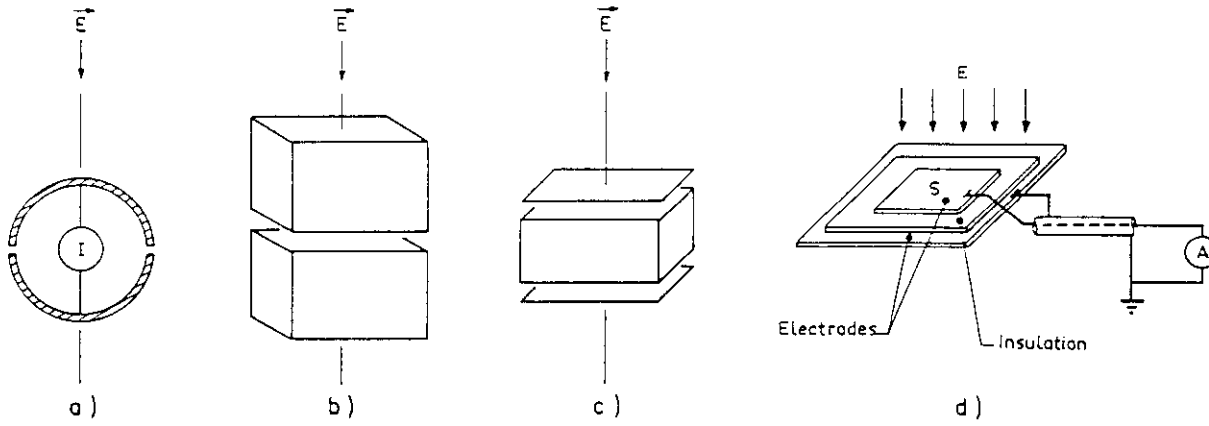


FIG. 5.1. (a, b, c, d). – Main types of field meters

- a) spherical dipole
- b) housed dipole
- c) parallel plate instrument
- d) ground probe.

It should be noted that the "effective" or "equivalent" radius of available E-field meters which have rectangular geometries can approximately be taken as half of the largest diagonal dimension.

5.1.3. Parallel plate instrument

In this device, which also works at a floating potential, the electrodes are parallel conductive plates, connected electrically to one another by a very high impedance. Because of this, the device is more suited for measuring the potential difference V between the two plates (Fig. 5.1c). If these are separated by a distance d , the measured voltage is :

$$V = E_0 d$$

5.1.4. Ground probe

This field meter is used to carry out surveys at ground level. It comprises two parallel plates, insulated from one another and the lower plate being connected to earth (Fig. 5.1d).

The input impedance of the ammeter is low in relation to the impedance of the capacitance of the two parallel plates, including the connecting cable. The current value i , resulting from the presence of the electric field for intensity E_0 , takes the form :

$$i_0 = S \omega \epsilon_0 E_0$$

S being the area of the upper plate.

5.1.5. Use of the various types of instrument

The formula for the sphere (in fact two hemispheres) as a current source is considered to be very accurate and an instrument constructed on this principle has been proposed as a standard.

Parallel electrodes can be used as a voltage source or as a current source. One advantage of the parallel-electrode voltage source is that the perturbation which it causes in a homogeneous field is negligible. A resultant disadvantage lies in the more complicated mechanical construction of the instrument to maintain an unperturbed electric field between the electrodes and in the requirements concerning the instrument amplifier, which must have a very high input impedance.

La sonde au sol (que l'on désigne aussi souvent par "sonde capacitive") est facile d'emploi, et sa réalisation ne pose aucun problème particulier. Si la feuille isolante est suffisamment mince, la surface S de la plaque supérieure coïncide avec sa surface réelle ; dans le cas contraire, S est une surface corrigée par étalonnage. Ce type de sonde sera celui que l'on utilisera dans les modèles réduits d'installations (voir en 5.6).

5.1.6. Dosimètres de champ.

Afin de mesurer l'exposition du personnel aux champs électriques, des "dosimètres" ont été élaborés. Ces appareils, placés sur la tête ou sur le casque d'un agent, intègrent, par l'intermédiaire d'une cellule électrolytique la charge totale induite pendant un séjour dans un champ. Cette charge, proportionnelle à l'intensité du champ et au temps d'exposition, donne la quantité $\int E dt$, que l'on peut appeler "dose de champ reçue".

Dans le but de mettre en évidence un éventuel effet de seuil, un dosimètre amélioré a été imaginé, qui mesure le nombre d'heures d'exposition et les classe selon plusieurs plages d'intensités de champ. L'appareil réalisé fournit 4 doses, relatives à 4 plages d'intensités croissantes.

Les figures 5.2., 5.3. et 5.4 montrent quelques réalisations de mesureurs de champ.

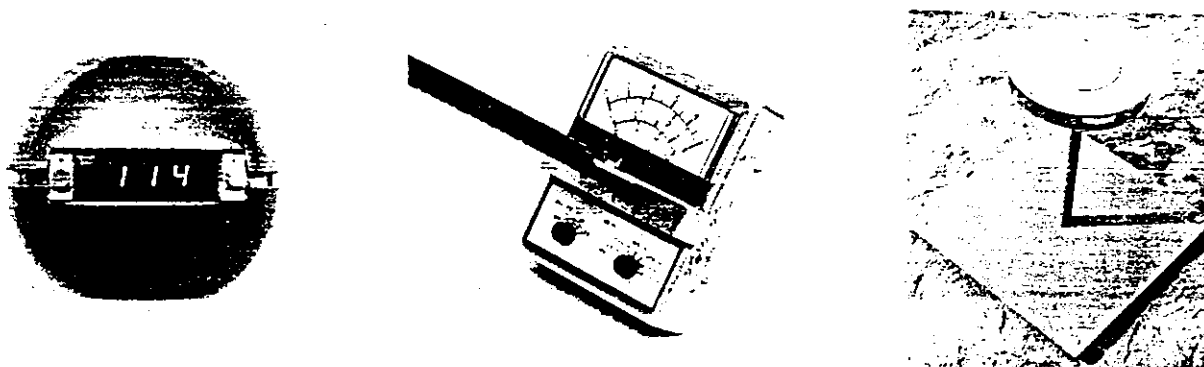


FIG. 5.2., 5.3., 5.4., — Photographie de trois mesureurs de champ

5.2. Conditions requises pour l'étalonnage des mesureurs.

5.2.1. Directives générales

Pour étalonner un mesureur, il est nécessaire de créer une zone de champ électrique homogène, d'un volume suffisant, et dont l'intensité est connue avec précision. On pourra utiliser le champ quasi-homogène engendré par une sphère au-dessus d'un plan conducteur, ainsi que le champ existant entre deux plans parallèles ou régnant sous une ligne expérimentale. Dans tous ces cas, les effets secondaires dus aux électrodes situées au voisinage de l'appareil doivent être négligeables.

L'instrument sera étalonné, de préférence, avec l'opérateur en position de travail normale. Si le champ produit pour cette opération ne permet pas la présence d'un opérateur, l'appareil complet avec son manche sera placé en équilibre sur un appui de telle manière que l'instrument soit maintenu librement dans le champ.

5.2.2. Réalisation d'un champ homogène dans un volume suffisant.

a) Sphère au-dessus d'un plan

En laboratoire, on peut utiliser une sphère de gros diamètre (par exemple sphère d'un éclateur à sphère de 1 m de diamètre) placée au-dessus du sol plan. Ce sol devra être suffisamment conducteur, éventuellement par la mise en place d'un grillage ou d'une tôle métallique, dont le côté sera égal au double au moins de la distance entre sphère et sol.

The ground probe (which is also often called a "capacitive probe") is easy to use and its production presents no particular problem. If the insulating foil is sufficiently thin, the area S of the upper plate coincides with its true area ; otherwise S has to be corrected by calibration. This type of probe will be used in reduced-scale models of installations. (See 5.6).

5.1.6. Field dosimeters

In order to measure the exposure of personnel to electric fields, "dosimeters" have been developed. These devices, placed on the head or helmet of an employee, integrate, by means of an electrolytic cell, the total induced charge received during a stay in a field. This charge, proportional to the intensity of the field and to the time of exposure, gives the quantity $\int E dt$, which can be called the "field dose received".

For the purpose of showing any possible threshold effect, an improved dosimeter has been designed, measuring the number of hours of exposure and classifying them according to a number of levels of field intensity. The apparatus produced provides 4 doses, relating to 4 levels of increasing intensity.

Figures 5.2, 5.3 and 5.4 show some kinds of field meters.

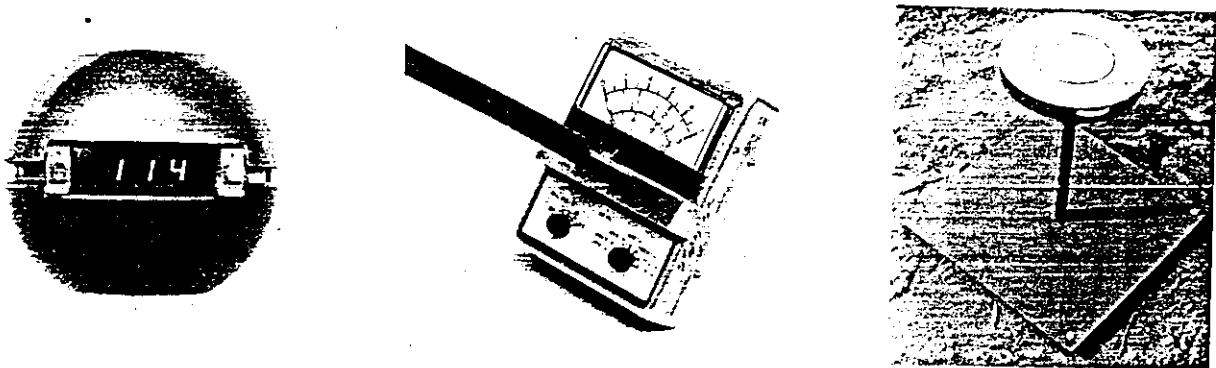


FIG. 5.2., 5.3., 5.4., – Photographs of three field meters

5.2. Requisite conditions for the calibration of field meters

5.2.1. General rules

A sufficient volume of homogeneous electric field, of accurately known intensity, is required for calibration. The quasi-homogeneous field produced by a sphere above a conductive plane is convenient, as are those from parallel planes and test-lines. In all cases, all secondary effects of electrodes in the neighbourhood of the instrument must be made negligible.

Preferably, the instrument is calibrated with the operator in his normal working position, since his body will act as a perturbing electrode. If the arrangement for producing the field does not permit the presence of an operator, the instrument, complete with its handle, will be balanced on a support in such a way that the instrument is held freely in the field.

5.2.2. Production of homogeneous field in sufficient volume

a) Sphere above a plane

In the laboratory, a sphere of large diameter can be used (for example a sphere of a sphere spark gap, of 1 m diameter), placed above the ground plane. This ground must be sufficiently conductive ; if necessary this can be achieved by the installation of a metal grille or plate, the length and breadth of which will each be at least twice the distance between the sphere and ground.

Sur l'axe vertical h de ce générateur de champ, on a :

$$E(h) = V \cdot 2R \left(1 + \frac{R}{2H} \right) \cdot \frac{H^2 + h^2}{(H^2 - h^2)^2}$$

Ainsi par exemple, pour une sphère de $R = 1$ m de diamètre dont le centre serait à $H = 5$ mètres au-dessus du sol, le champ à hauteur h vaut :

$$E = 0,042 \text{ V pour } h = 0$$

$$E = 0,047 \text{ V pour } h = 1 \text{ m}$$

$$E = 0,069 \text{ V pour } h = 2 \text{ m}$$

b) Electrodes planes parallèles

Il est possible d'engendrer, à l'aide de plaques parallèles, des volumes à champ électrique homogène, d'amplitude et de direction bien déterminées, à condition que l'écartement entre les plaques soit suffisamment faible devant leurs dimensions. L'intensité E_0 du champ uniforme est donnée par V/t , où V est la ddp appliquée aux plaques et t leur écartement. A titre indicatif, pour déterminer cet écartement, l'amplitude du champ normalisé E/E_0 régnant sur la surface et à mi-distance d'électrodes planes parallèles semi-infinies est donnée à la figure 5.5. en fonction de la distance normalisée x/t du bord des électrodes. En l'absence d'objets ou de surfaces voisins, ce diagramme peut être utilisé pour la réalisation d'un dispositif à électrodes parallèles finies, à condition que les effets de bord (non uniformités) causés par les bords opposés des électrodes tombent en leur centre à moins de 0,5 %. Il convient également de tenir compte de la compatibilité avec les dimensions de l'appareil de mesure.

Comme des surfaces à potentiel nul existent toujours à proximité, on peut utiliser des électrodes de garde auxiliaires, dont le rôle est de "piloter" le champ autour de la structure et d'assurer une barrière contre les perturbations extérieures. Il n'existe pas de solution théorique à ce problème pour des configurations rectangulaires, mais des solutions analytiques ont été établies pour des structures à symétrie cylindrique.

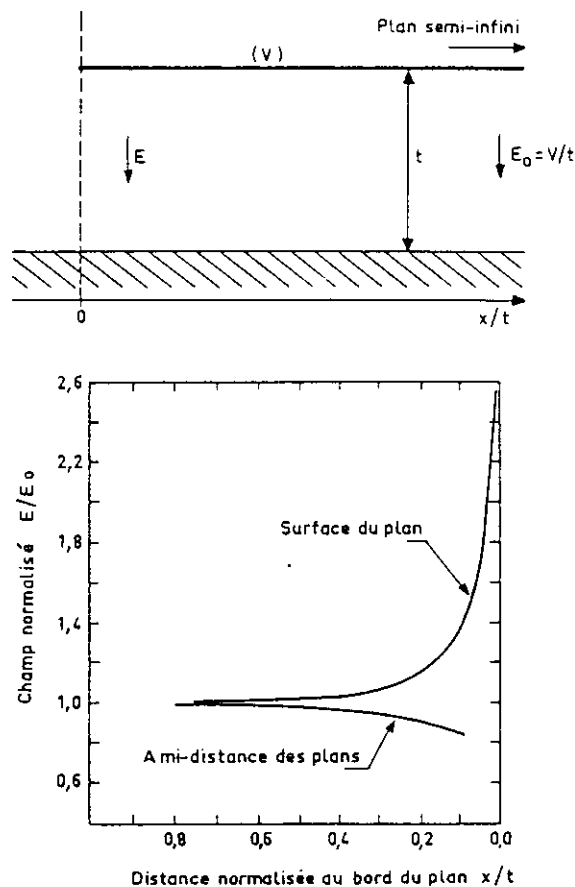


FIG. 5.5. — Champ électrique entre un plan semi-infini et le sol (représentation normalisée).

On the vertical axis h of this field generator,

$$E(h) = V \cdot 2R \left(1 + \frac{R}{2H} \right) \cdot \frac{H^2 + h^2}{(H^2 - h^2)^2}$$

Thus, for example, for a sphere of $R = 1$ m diameter, the centre of which is at height $H = 5$ m above the ground, the field at height h has a value :

$$E = 0.042 \text{ V for } h = 0$$

$$E = 0.047 \text{ V for } h = 1 \text{ m}$$

$$E = 0.069 \text{ V for } h = 2 \text{ m}$$

b) Parallel plates.

Regions of uniform electric field having known magnitude and direction can be created with parallel plates provided that the spacing of the plates, relative to the plate dimensions, is sufficiently small. The uniform field intensity E_0 is given by V/t where V is the applied potential difference and t is the plate spacing. As a guide for determining plate spacing, the magnitudes of the normalized field, E/E_0 , at the plate surface and midway between semi-infinite parallel plates is plotted as a function of normalized distance x/t from the plate edge in Fig. 5.5. In the absence of nearby objects or surfaces, these results can be used to design a finite-sized parallel plate structure if the edge effects (non uniformities) caused by the opposite edges of the plate fall to less than 0.5 % at the centre. Compatibility with the probe size should also be considered.

Because nearby ground surfaces are always present, guard rings may be employed to grade the field at the perimeter of the structure and provide isolation from surrounding perturbations. No theoretical treatment of the problem is available for rectangular geometries, but analytical solutions do exist for structures of cylindrical symmetry.

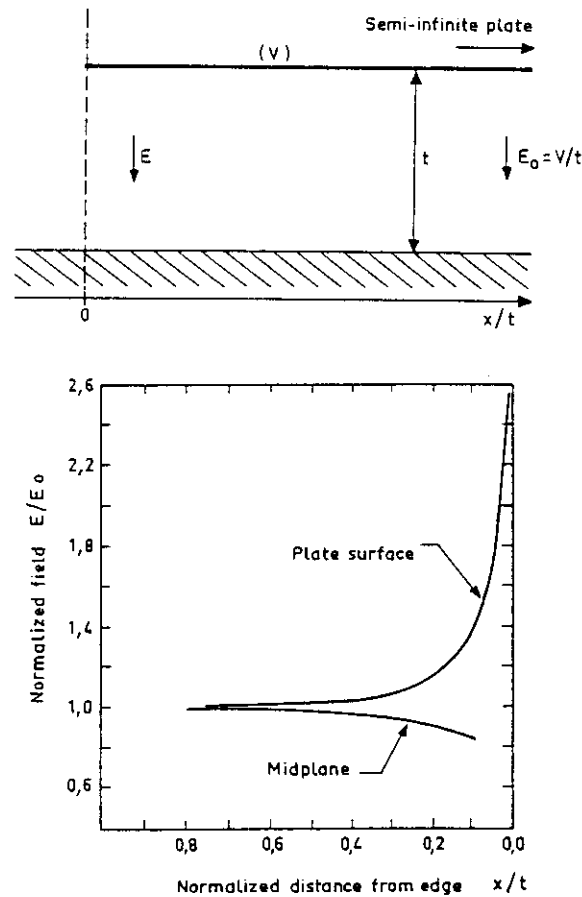


FIG. 5.5. - Electric field between a semi-infinite plane and ground (normalized representation).

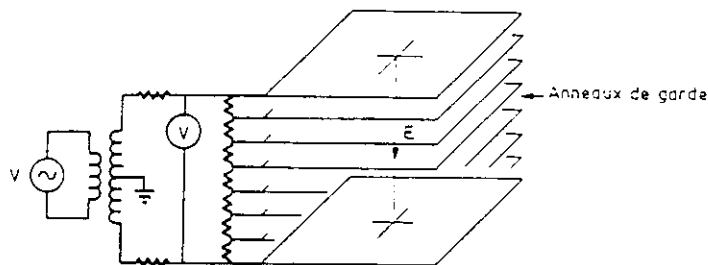


FIG. 5.6. — Dispositif à plans parallèles utilisé pour l'étalonnage de mesureurs de champs.

Les électrodes parallèles sont alimentées soit en dissymétrique, l'une d'elle étant au potentiel zéro, soit au moyen d'un transformateur à prise milieu, comme indiqué à la figure 5.6. Dans un exemple de dispositif pratiquement réalisé, on a utilisé des électrodes en métal déployé, tendues sur un cadre de 3 m x 3 m. avec un écartement de 1 mètre, et complétées par quatre électrodes de garde auxiliaires. Les potentiels convenables sont appliqués à ces électrodes à l'aide d'un diviseur résistant. On utilisera des résistances qui "court-circuitent" efficacement les capacités parasites entre électrodes de garde et surfaces voisines. Des considérations théoriques ainsi que l'expérience montrent que l'alimentation des électrodes par un transformateur à prise milieu assure une meilleure protection contre les perturbations des objets voisins que l'alimentation dissymétrique.

c) Ligne aérienne à Haute Tension

Le calcul du champ électrique sous une ligne aérienne est suffisamment précis pour considérer la ligne comme un moyen d'étalonnage, ayant connaissance des dimensions de la ligne, de sa hauteur et de la tension et pour autant que le sol soit suffisamment plat. On se placera au point bas d'une portée horizontale : la meilleure solution est l'utilisation de lignes expérimentales alimentées par une tension stabilisée et parfaitement connue.

5.2.3. Effet de proximité des électrodes planes.

L'influence de la proximité des électrodes entre lesquelles les instruments sont positionnés pour l'étalonnage peut être évaluée de la manière suivante. Considérons une sphère parfaitement conductrice plongée dans un champ électrique uniforme infini de 1 V/m. Le relief de la surface équipotentielle à 50 cm du plan médian est une indication de l'erreur qui se produira dans le dispositif de mesure, résultant de la proximité de grandes électrodes (fig. 5.7.).

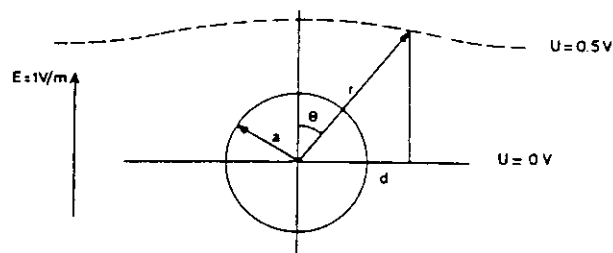


FIG. 5.7. — Schéma relatif au calcul d'erreur due à la proximité d'électrodes planes parallèles.

En choisissant le plan équipotentiel passant par le centre de la sphère comme référence zéro pour le potentiel, utilisant des coordonnées cylindriques avec l'axe perpendiculaire à ce plan et supposant la sphère au potentiel zéro, les surfaces équipotentielles seront calculées à partir de relation suivante :

$$V = E \left(\frac{a^3}{r^2} - r \right) \cos \theta$$

avec :

V = potentiel au point (r, θ)

a = rayon de la sphère

E = intensité du champ électrique

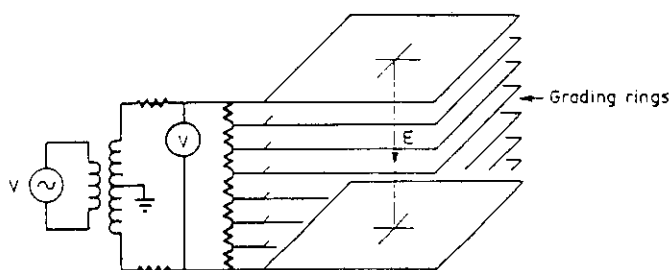


FIG. 5.6. - Parallel plates used for calibration of E-field meters.

The parallel plates are energized either with one plate at zero potential or by means of a centre-tapped transformer as shown in Fig. 5.6. Expanded-metal screens on a 3 m x 3 m frame with a 1 m separation and four guard rings have been employed in one practical arrangement. Potentials are conveniently applicable to the grading rings from a resistive divider. Resistors which effectively "short out" stray capacitances between the guard rings and nearby surfaces should be used. Theoretical considerations and experimental measurements indicate that energization of both plates from a centre tapped transformer gives better protection against perturbation by nearby objects than does the asymmetric connection.

c) Overhead line at high voltage

The electric field under an overhead line is calculable with sufficient accuracy to constitute a means of calibration, if the dimensions of the line, its height and the voltage are known and if the ground is sufficiently flat. A location at the lowest point of a horizontal span will generally be selected : test lines fed from precisely controlled sources are best.

5.2.3. Effect of proximity of the plane electrodes.

The influence of the proximity of the electrodes between which the instruments are positioned for calibration can be evaluated in the following manner. Let us consider a perfectly conductive sphere immersed in an infinite uniform electric field of 1 V/m. The contour of the equipotential surface at 50 cm from the median plane is an indication of the error which will occur in the measuring device, resulting from the proximity of large electrodes (Fig. 5.7).

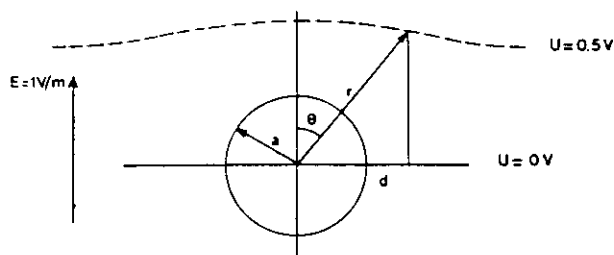


FIG. 5.7. - Diagram for calculation of error due to proximity of plane electrodes.

Selecting the equipotential plane passing through the centre of the sphere as the zero reference for potential, using cylindrical coordinates with the axis perpendicular to this plane and assuming that the sphere is at zero potential, the equipotential surfaces will be calculated from the following relationship :

$$V = E \left(\frac{a^3}{r^2} - r \right) \cos \theta$$

Where :

V = potential at point (r, θ)

a = radius of the sphere

E = intensity of the electric field.

A partir de cette formule la distance h entre une surface équipotentielle et le plan de référence peut être calculée en fonction de la distance d du centre de la sphère. Dans un champ non perturbé la distance $h = 0.5$ m correspond à la surface équipotentielle $- 0.5$ V. Vu la distorsion du champ par la présence de la sphère, la variation Δh est donnée par :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{a^3}{(h^2 + d^2)^{3/2}}$$

En remplaçant h par 0,5 m dans la formule, la variation relative peut aisément être estimée. Elle est donnée par le tableau ci-dessous :

Estimation de l'erreur de mesure du champ causée par la proximité d'électrodes planes parallèles

Distance d (mm)	Rayon de la sphère $a = 50$ mm		Rayon de la sphère $a = 100$ mm	
	Δh (mm)	$\Delta h/h(10^{-4})$	Δh (mm)	$\Delta h/h(10^{-4})$
0	0.50	9.9	4.0	80
50	0.49	9.9	3.9	79
100	0.47	9.4	3.8	75
200	0.40	8.0	3.2	64
500	0.18	3.5	1.4	28
1000	0.04	0.9	0.4	7

Ces résultats montrent qu'il est hautement improbable que la proximité des grandes électrodes, qui produisent le champ, puissent influencer de manière significative les résultats des mesures.

5.3. Paramètres affectant la précision des mesureurs de champ

Lors de mesures courantes sur le terrain, et en utilisant des mesureurs à potentiel flottant disponibles dans le commerce, l'erreur peut approcher 10 %, bien que la précision puisse être améliorée par des conditions de mesure plus strictes. Les sources d'erreur les plus probables sont la difficulté à positionner l'appareil, les erreurs de lecture, la non-uniformité du champ électrique, les effets de température et d'humidité, proximité des électrodes ou de l'observateur, éventuellement fuites le long du manche ou du support. Plusieurs de ces causes vont être examinées dans ce qui suit.

5.3.1. Inclinaison de l'appareil

De par sa conception, un mesureur de champ ne mesure que la composante du champ parallèle à son axe vertical, c'est-à-dire à l'axe perpendiculaire au plan de séparation des électrodes. Il faut donc orienter l'appareil de telle sorte que le maximum de déviation soit atteint sur l'instrument de lecture. On mesure à ce moment la valeur maximale du champ et on en déduit sa direction. S'il s'agit d'un champ elliptique, c'est la direction du grand axe de l'ellipse, la position du minimum donnant alors la direction du petit axe de l'ellipse.

5.3.2. Non-uniformité (divergence) du champ

Comme l'appareil est étalonné en champ uniforme, des non-uniformités du champ électrique à mesurer peuvent réduire la précision de la mesure. Il est à cet effet intéressant de savoir que le courant induit dans un dipôle sphérique, plongé dans le champ d'une charge ponctuelle $Q(\omega t)$ est donné, en l'absence du sol, par :

$$I = 3 \pi a^2 \omega \epsilon_0 E \left[1 - \frac{7}{12} \left(\frac{a}{d} \right)^2 + \frac{11}{24} \left(\frac{a}{d} \right)^4 - \dots \right]$$

où

$$E = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q(\omega t)}{d^2}$$

From this formula, the distance h between an equipotential surface and the reference plane can be calculated as a function of the distance d from the centre of the sphere. In an unperturbed field, the distance $h = 0.5$ m corresponds to the equipotential surface -0.5 V. In view of the distortion of the field by the presence of the sphere, the variation Δh is given by :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{a^3}{(h^2 + d^2)^{3/2}}$$

Replacing h by 0.5 m in the formula, the relative variation can easily be estimated. It is given by the Table below :

Estimate of the error in calibration caused by the proximity of plane parallel electrodes

Distance d (mm)	Radius of the sphere $a = 50$ mm		Radius of the sphere $a = 100$ mm	
	Δh (mm)	$\Delta h/h$ (10^{-4})	Δh (mm)	$\Delta h/h$ (10^{-4})
0	0.50	9.9	4.0	80
50	0.49	9.9	3.9	79
100	0.47	9.4	3.8	75
200	0.40	8.0	3.2	64
500	0.18	3.5	1.4	28
1 000	0.04	0.9	0.4	7

These results show that it is highly improbable that the proximity of the large electrodes which produce the field will significantly influence the results of the measurements.

5.3. Parameters affecting the accuracy of field measurements

The error during practical outdoor measurements using available free-body meters may approach 10 %, although this can be reduced under more controlled conditions. The most likely sources of error are difficulty in positioning the meter, reading errors, non-uniformity of the field, humidity and temperature effects, electrodes and observer proximity, handle or support leakage in some case. Several of these parameters will be considered here.

5.3.1. Inclination of the instrument

From its design, a field meter only measures the field component which is parallel to its vertical axis, i.e. to the axis which is perpendicular to the plane of separation of the electrodes. The meter must therefore be oriented in such a way that the maximum deflection is obtained on the indicating instrument. At that time, the maximum value of the field is measured and its direction is deduced. In the case of an elliptical field, this is the direction of the major axis of the ellipse, the position of the minimum thus giving the direction of the minor axis.

5.3.2. Non-uniformity (divergence) of the field

Non-uniformity in the electric field can reduce the accuracy of measurement because the instrument is calibrated in a uniform field. Furthermore, it is noteworthy that the current induced in a spherical dipole located within the field generated by a point charge $Q(\omega t)$ is given, in the absence of nearby ground planes, by ;

$$I = 3 \pi a^2 \omega \epsilon_0 E \left[1 - \frac{7}{12} \left(\frac{a}{d} \right)^2 + \frac{11}{24} \left(\frac{a}{d} \right)^4 - \dots \right]$$

where

$$E = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q(\omega t)}{d^2}$$

a est ici le rayon du dipôle sphérique, et d la distance entre la charge ponctuelle $Q(\omega t)$ et le centre du dipôle. L'axe de celui-ci est colinéaire à la direction du champ. En se référant à l'équation du dipôle sphérique (en 5.1.1.) on voit que le courant induit est le même que celui qui engendre un champ uniforme d'amplitude $Q/4 \pi \epsilon_0 d^2$, si les termes en a/d sont négligés.

5.3.3. Humidité ambiante

Quelle que soit la qualité d'étanchéité du boîtier, une couche de condensation superficielle créera une résistance de fuite entre les deux demi-électrodes de l'appareil, court-circuitant partiellement le circuit de mesure interne. Pour cette raison, on évitera d'effectuer des mesures lorsque les conditions atmosphériques entraînent un risque de condensation. En pratique, des précautions doivent être prises dès que l'humidité relative dépasse 80 %.

5.3.4. Présence de l'opérateur

Avec les appareils tenus au bout d'une perche, leur distance à l'opérateur est fixe, et par conséquent aussi l'erreur de proximité.

Lorsque l'appareil est maintenu par un pied isolant, on observe très nettement une variation du champ mesuré, au fur et à mesure de l'approche de l'opérateur. Le sens de l'erreur dépend de la hauteur de l'appareil au-dessus du sol. Pour une hauteur de 1,6 à 1,7 mètres (appareil à hauteur des yeux), l'erreur dépasse 30 pour cent pour une distance appareil-tête de l'opérateur de 0,2 m. Une distance appareil-opérateur de 1,6 mètres au moins est nécessaire pour que la mesure ne soit pas affectée par cette proximité.

La vérification de cette erreur peut se faire par le calcul, en utilisant le modèle d'opérateur proposé au chap. 3. Il suffit pour cela de calculer la variation de la composante verticale ΔE_v du champ créée par les charges q_1 et q_2 , comme le montre la figure 5.8. On trouve facilement l'expression ΔE_v rapportée à E_0 :

$$\frac{\Delta E_v}{E_0} = \frac{4}{9} \left[\frac{1}{(1 + \beta^2)^{3/2}} - \frac{3}{(9 + \beta^2)^{3/2}} - \frac{2}{(16 + \beta^2)^{3/2}} \right]$$

avec :

$$\beta = \frac{x}{h}$$

5.3.5. Influence du support diélectrique

Lorsqu'il est nécessaire de placer le mesureur de champ directement sur un support diélectrique, comme c'est le cas pour l'étalonnage par la méthode des plans parallèles, il convient de prendre garde au fait qu'un tel support va

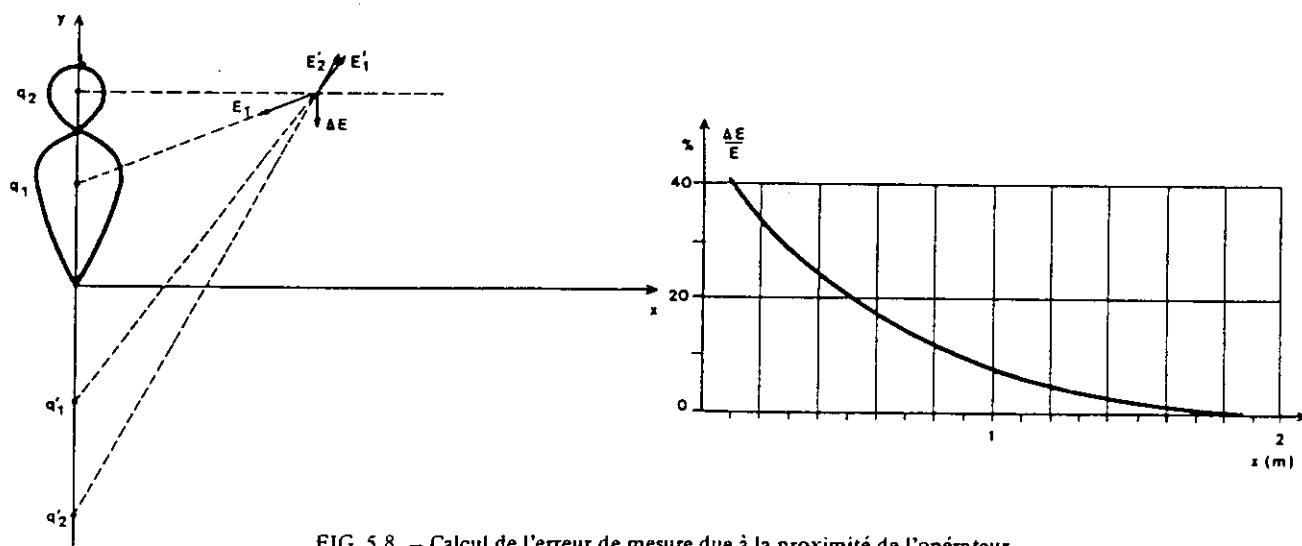


FIG. 5.8. — Calcul de l'erreur de mesure due à la proximité de l'opérateur.

Here a is the radius of the spherical dipole and d is the distance between the point charge $Q(mt)$ and the centre of the dipole ; the axis of the probe is aligned with the field direction. Reference to the equation of the spherical dipole in 5.1 reveals that the induced current is the same as that produced by a uniform field of magnitude $Q/4\pi\epsilon_0 d^2$ if the terms in (a/d) are neglected.

5.3.3. Ambient humidity

However watertight the instrument-housing a layer of surface condensation will form in high humidities, and create a leakage resistance between the two half-electrodes of the apparatus, partially short-circuiting the internal measuring circuit. For this reason, measurement is best avoided when the atmospheric conditions entail a risk of leakage by condensation. In practice, caution is needed in making measurements when the relative humidity exceeds 80 %.

5.3.4. Presence of the operator

With meters held at the end of a pole, their distance from the operator is fixed and consequently so is the proximity error.

When the apparatus is held by means of an insulating support, a change in the measured field is clearly seen as the operator approaches. Furthermore, the height of the apparatus above ground determines the sense of the error. For a height of 1.6 to 1.7 metres (apparatus at eye-level), the error exceeds 30 % for a distance of 0.2 m between the operator's head and the apparatus. A distance of at least 1.6 metres is necessary between the operator and the apparatus, to avoid this proximity effect.

This error can be verified by calculation, using the model of the operator proposed in Chapter 3. For this, it is only necessary to calculate the change in the vertical component ΔE_v of the field caused by the charges q_1 and q_2 , as is shown in figure 5.8. The expression for $\Delta E_v/E_0$ is easily found :

$$\frac{\Delta E_v}{E_0} = \frac{4}{9} \left[\frac{1}{(1 + \beta^2)^{3/2}} - \frac{3}{(9 + \beta^2)^{3/2}} - \frac{2}{(16 + \beta^2)^{3/2}} \right]$$

where

$$\beta = \frac{x}{h}$$

5.3.5. Influence of the dielectric support

If, as in the case of calibration between plane electrodes, it is necessary to mount the field-meter on a dielectric support, it must be recognized that such a support will generally perturb the field and upset the calibration. An experi-

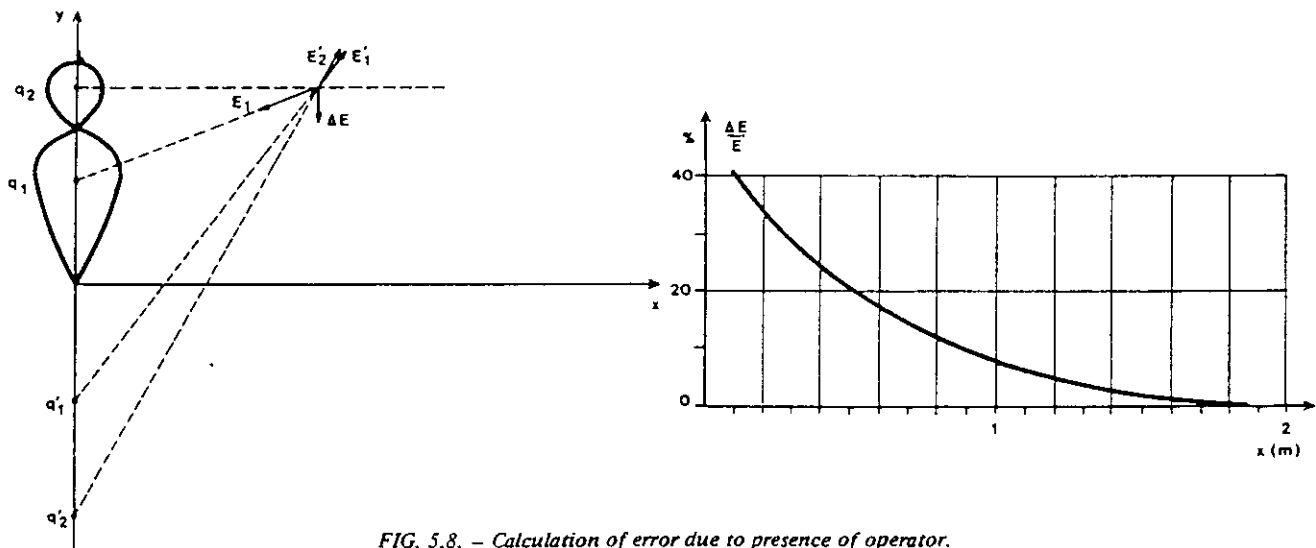


FIG. 5.8. – Calculation of error due to presence of operator.

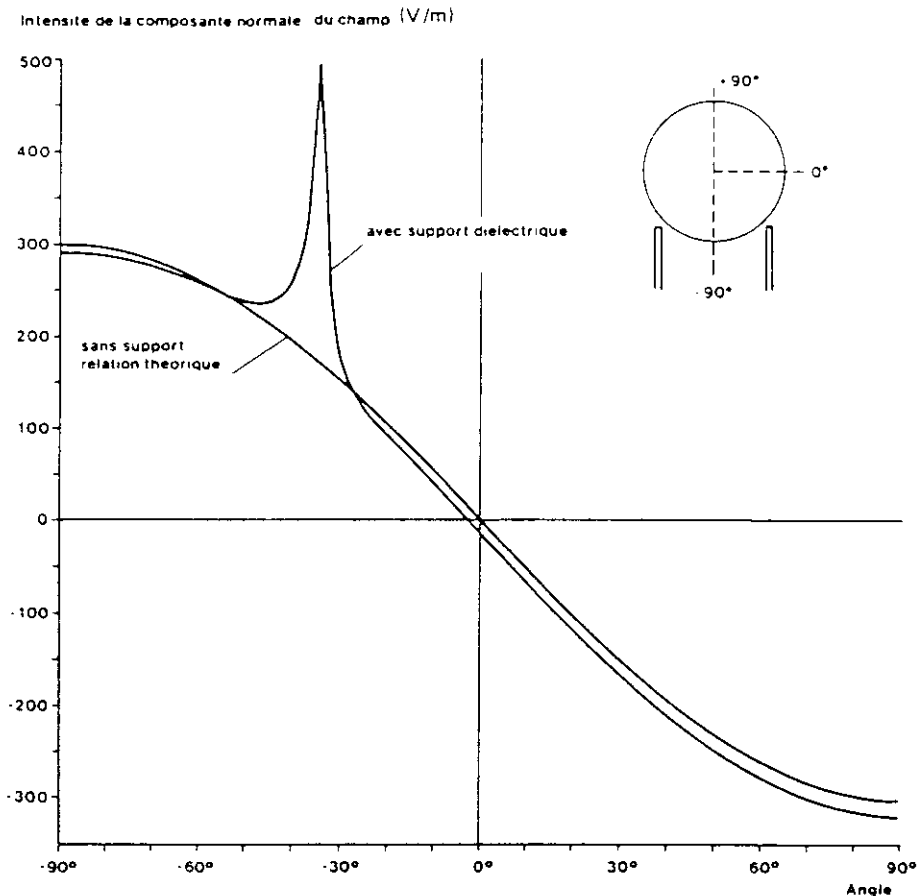


FIG. 5.9. — Champ électrique à la surface d'un dipôle sphérique en l'absence et en présence d'un support diélectrique.

généralement perturber le champ et fausser l'étalonnage. Une expérience, effectuée à l'aide d'un tube creux de 50 mm de diamètre extérieur, de 42,5 de diamètre intérieur, et dont la constante diélectrique était $\epsilon' = 5$, a montré une majoration du champ de 10 % environ, au-dessus de la valeur calculée en l'absence de support.

Un calcul numérique montre que des erreurs de cet ordre de grandeur sont effectivement à attendre. La figure 5.9 représente la distribution du champ autour d'un dipôle sphérique, en l'absence et en présence d'un support diélectrique.

5.4. Qualités requises pour un appareil de mesure de champ

Il paraît utile de résumer les caractéristiques principales que doit présenter un mesureur de champ de qualité satisfaisante, compte tenu de l'état actuel du développement de tels instruments.

5.4.1. Domaine d'application du mesureur.

- L'instrument sera conçu et calibré pour la mesure du champ électrique non perturbé tel qu'il était avant la présence de l'instrument et de l'opérateur.
- L'instrument sera au moins capable de mesurer la composante verticale du champ électrique. Le champ dans l'espace à une certaine distance du sol est généralement elliptique compte tenu du système générateur triphasé. En vue d'applications spéciales, il pourra être nécessaire de localiser et de mesurer la composante maximale de ce champ.
- Il devra être possible de positionner l'instrument à une hauteur comprise entre 0,5 et 2 m au-dessus du sol. Le support qui permettra ce positionnement produira une erreur négligeable sur la mesure du champ électrique. La valeur mesurée sera lue à une distance de 1,6 m minimum.

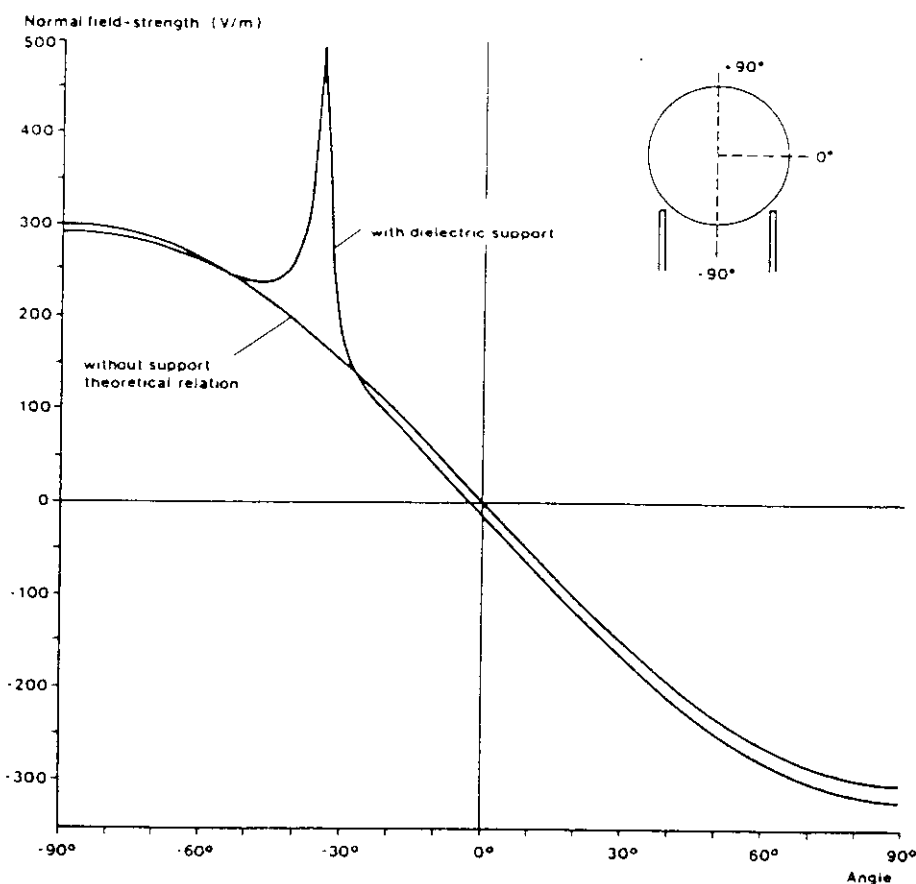


FIG. 5.9. – Electric field at the surface of a spherical dipole in absence and presence of a dielectric support.

ment made using a hollow tube of 50 mm o.d. and 42.5 i.d., 1 m long and having dielectric constant $\epsilon' = 5$, showed an increase of some 10 % above the calculated value with the support disregarded.

A numerical calculation shows that errors of this order of magnitude are to be expected. Figure 5.9 shows the field distribution around a spherical dipole in the absence and presence of a dielectric support.

5.4. Qualities required in field-meters

It is useful to summarize the principal features of a satisfactory field-meter, as seen in the present state of development of such instruments.

5.4.1. Application of meter

- The instrument will be designed and calibrated for the measurement of the unperturbed electric field as it was before the instrument and the operator were present.
- The instrument will at least be capable of measuring the vertical component of the electric field. The field in space at a given distance from the ground is generally elliptical, because of the three-phase generator system. With a view to special applications, it may be necessary to locate and measure the maximum component of this field.
- It will be possible to position the instrument at a height between 0.5 and 2 m above the ground. The support enabling this positioning to be carried out will produce a negligible error on the measurement of the electric field. The measured value will be legible from a distance of at least 1.6 m.

5.4.2. Propriétés du circuit électrique

- L'instrument sera alimenté par batterie. Des dispositions seront prises pour vérifier l'état de la source.
- L'impédance d'entrée de l'amplificateur sera compatible avec le type d'électrodes pour minimiser l'erreur due à la charge.
- Un filtre sera nécessaire pour éliminer les conséquences de l'effet de couronne sur la forme de l'onde. On suggère une fréquence de coupure supérieure de 300 Hz à 3 dB.
- Le redresseur double alternance, calibré en valeur efficace, est le type de détection préféré.
- L'indicateur permettra une lecture aisée, en pleine lumière, à 2 m de distance.
- L'instrument aura au moins la gamme d'échelles suivantes : 3, 10, 30, 100 kV/m.
- Un dispositif de calibrage sera disponible avec l'appareil pour vérifier la précision globale de l'amplificateur et de l'indicateur.
- Le circuit électrique, la batterie et les électrodes seront conçus dans un ensemble compact sans altérer le fonctionnement spécifique des électrodes. On évitera avec soin tout courant de fuite qui s'écoulerait à travers le support et modifierait l'indication correcte de l'instrument. L'instrument sera conçu pour être utilisé à l'extérieur.
- L'instrument indiquera moins de 5 pour cent de la déflexion à fond d'échelle dans la gamme la plus sensible lorsqu'il est placé dans un champ magnétique de 400 A/m.

5.4.3. Dimensions

- L'instrument sera portable et de ce fait aussi léger et compact que possible.
- Pour des mesures spéciales, il sera nécessaire de situer l'instrument en vue de déterminer la composante maximale du champ.
- Les instruments supportés à bout de bras auront une perche d'au moins 1,50 m de longueur et seront maintenus en position horizontale pendant la mesure.

5.5. Emploi de modèles

5.5.1. Principe de la méthode

La modélisation du champ consiste à appliquer à une maquette à échelle réduite de l'ouvrage considéré une tension de fréquence surélevée, afin d'augmenter la sensibilité de la mesure, mais de valeur réduite. La mesure du champ au sol est effectuée par l'intermédiaire de la mesure du courant d'influence recueilli par une sonde capacitive (voir 5.1.4.).

Désignons alors respectivement par D et D_m , U et U_m , f et f_m les dimensions, les tensions et les fréquences réelles et appliquées au modèle (indice m). Pour une même sonde de surface S , qui serait placée soit au sol de l'ouvrage réel, soit au sol de la maquette, les courants d'influence i et i_m seront dans le rapport :

$$\frac{i}{i_m} = \frac{D_m}{D} \cdot \frac{f}{f_m} \cdot \frac{U}{U_m}$$

le champ au sol étant relié à i par $i = 2 \pi f \epsilon_0 E S$, on aura :

$$E = \frac{i_m}{2 \pi f_m \epsilon_0 S} \cdot \frac{D_m}{D} \cdot \frac{U}{U_m}$$

Ainsi, avec un rapport linéaire $D_m/D = 1/100$, un rapport des tensions $U/U_m = 1000$, une fréquence de mesure $f_m = 10$ kHz pour $f = 50$ Hz, on a :

$$\frac{i}{i_m} = \frac{1}{20}$$

5.4.2. Properties of the electric circuit :

- The instrument will be fed by battery. Provisions will be made for verifying the state of the power source.
- The input impedance of the amplifier will be compatible with the type of electrodes, to minimise the error due to load.
- A filter will be necessary to eliminate the consequences of corona effect on the waveform. An upper cut-off frequency of 300 Hz at 3 dB is suggested.
- The preferred type of detection is the full-wave rectifier, calibrated in rms values.
- The indicator will permit easy reading, in full daylight, at a distance of 2 m.
- The instrument will have at least the following scale ranges : 3, 10, 30, 100 kV/m.
- A calibration device will be available with the instrument to verify the overall accuracy of the amplifier and indicator.
- The electrical circuit, the battery and the electrodes will be designed in a compact assembly without modifying the specific functioning of the electrodes. Care will be taken to avoid any leakage current which might flow through the support and which could modify the correct indication of the instrument. The instrument will be designed for outdoor use.
- The instrument will indicate less than 5 % deflection at the lower end of the scale, in the most sensitive range, when it is placed in a magnetic field of 400 A/m.

5.4.3. Dimensions

- The instrument will be portable and therefore as light and compact as possible.
- For special measurements, it will be necessary to locate the instrument with a view to determining the maximum component of the field.
- Instruments supported at arm's length will have a pole of at least 1.50 m in length and will be held in a horizontal position during the measurement.

5.5. Use of models

5.5.1. Principle of the method

Modelling of the field consists in applying, to a reduced-scale model of the installation in question, a voltage of increased frequency, in order to increase the measurement sensitivity, but of reduced value. The field at ground level is measured by measuring the induced current picked up by a capacitive probe (see 5.1.4).

Let us then denote the actual dimensions, voltages and frequencies and those applied to the model (subscript m), respectively by D and D_m , U and U_m , f and f_m . For the same probe of area S , placed either on the ground in the real installation or on the ground in the model, the induced currents i and i_m will be in the ratio :

$$\frac{i}{i_m} = \frac{D_m}{D} \cdot \frac{f}{f_m} \cdot \frac{U}{U_m}$$

since the field at ground level is related to i by $i = 2 \pi f \epsilon_0 \cdot S \cdot E$, we have :

$$E = \frac{i_m}{2 \pi f_m \epsilon_0 S} \cdot \frac{D_m}{D} \cdot \frac{U}{U_m}$$

Thus, with a linear ratio $D_m/D = 1/100$, a voltage ratio $U/U_m = 1\,000$ and a measuring frequency $f_m = 10\text{ kHz}$ for $f = 50\text{ Hz}$, we have :

$$\frac{i}{i_m} = \frac{1}{20}$$

Cet accroissement relatif de la sensibilité de mesure du courant autorise l'emploi de très petites sondes sur le modèle, par exemple des sondes de 5 mm de diamètre.

Nous allons indiquer très brièvement quelques précautions à respecter pour effectuer ce genre de mesures.

5.5.2. Source de tension

La source de tension doit nécessairement être triphasée, elle aura un niveau de tension de l'ordre de 100 à 300 volts. Un tel système pourra avantageusement être obtenu à l'aide de trois amplificateurs de puissance de type "haute fidélité", d'une centaine de watts chacun ; ces amplificateurs seront excités par un générateur à basse fréquence par l'intermédiaire de trois pré-amplificateurs et de trois déphaseurs RC. Il faut prendre garde au fait que le modèle constitue une charge pratiquement capacitive, ce qui nécessite quelques précautions pour assurer la stabilité des amplificateurs. Régulation de tension et stabilité de la fréquence sont indispensables pour maintenir constants le niveau et le déphasage des trois tensions appliqués au modèle.

5.5.3. Sondes de mesure

Pour obtenir une mesure précise, il faut que la sonde soit noyée dans la plaque métallique représentant le sol, de telle sorte que le plan de la surface S affleure exactement le plan de la plaque. Une bonne solution qui a été adoptée par un expérimentateur consiste à utiliser pour le "sol" de la tôle perforée, à perforations circulaires, et à réaliser la sonde de façon à ce qu'elle puisse prendre place dans les perforations. Par ailleurs, pour pouvoir évaluer la surface S à prendre en considération, il faut tenir compte de l'effet de bord, non négligeable, pour les très petites surfaces. La figure 5.10 montre un exemple de réalisation, dans laquelle la surface est carrée, de côté p. On a alors :

$$S = (p + g - 2\delta)^2$$

où g est l'intervalle d'air

$$\delta = \frac{2t}{\pi} \ln \left(\operatorname{ch} \frac{\pi g}{4t} \right)$$

t est l'épaisseur de la feuille isolante.

La figure 5.10 donne également le schéma équivalent de la sonde.

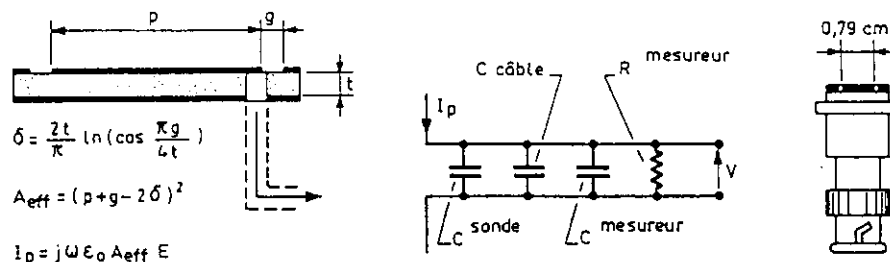


FIG. 5.10. — Sonde capacitive pour la mesure du champ en modèle réduit.
(d'après S.A. Sebo, R. Caldecott, IEEE Paper 1978).

5.5.4. Fidélité de représentation du modèle

Les pièces métalliques sous tension devront être fidèlement représentées, notamment les courbures des coudes, la présence d'anneaux de garde équipant l'appareillage, et dans une moindre mesure, les structures métalliques au potentiel du sol, tels que les poutres et portiques.

En ce qui concerne le respect de l'échelle de réduction utilisée pour les différents éléments du poste, deux exemples donneront une indication concrète des tolérances.

This relative increase in the current measuring sensitivity permits the use of very small probes on the model, for example probes of 5 mm in diameter.

Very briefly, we will show a few precautions to be observed when carrying out this kind of measurement.

5.5.2. Voltage source

The voltage source must be three-phase with a voltage level of the order of 100 to 300 volts. Such a system can be obtained advantageously by means of three power amplifiers of the "hi-fi" type, each of about a hundred watts ; these amplifiers will be driven by a low frequency generator through three pre-amplifiers and three RC phase-shift networks. Attention must be paid to the fact that the model constitutes practically a capacitive load, which necessitates some precautions to ensure the stability of the amplifiers. Voltage regulation and frequency stability are essential, to maintain a constant level and phase displacement of the three voltages applied to the model.

5.5.3. Measuring probes

To obtain an exact measurement, the probe must be set into the metal plate which represents the ground, so that the plane of the surface area S is exactly flush with the plane of the plate. One good solution which has been adopted by an experimental worker consists of using a perforated plate, with circular holes, for the "ground" and constructing the probe so that it can fit into the perforations. Furthermore, in order to be able to evaluate the area S to be taken into consideration, account must be taken of the not inconsiderable edge effect for very small areas. Figure 5.10 shows a design example, in which the area is square, of side p . We then have :

$$S = (p + g - 2\delta)^2$$

where g is the air gap and :

$$\delta = \frac{2t}{\pi} \ln \left(\cosh \frac{\pi g}{4t} \right)$$

t being the thickness of the insulating foil.

Figure 5.10 also gives the equivalent circuit of the probe.

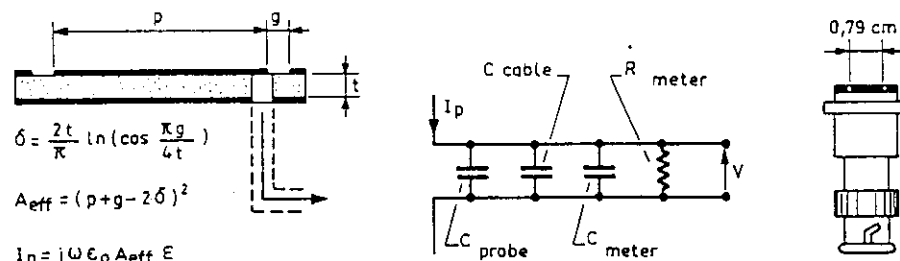


FIG. 5.10. – Capacitive probe for field measurement in scale model.

(from S.A. Sebo, R. Caldecott, IEEE paper 1978).

5.5.4. Accuracy of representation of the model

Live metal parts must be represented faithfully particularly the curvatures of bends, the presence of guard-rings fitted to the equipment and, to a lesser extent, metal structures at earth potential, such as stanchions and gantries.

As for compliance with the reduction scale used for the various parts of the substation, two examples will give a specific indication of the tolerance.

Le champ au sol engendré par une barre cylindrique, de rayon r , placée à une hauteur h , s'exprime par :

$$E(x) = \frac{2h}{(x^2 + h^2) \ln \frac{2h}{r}} V$$

x étant la distance le long d'un profil horizontal.

L'erreur due à un écart à l'échelle de réduction dans la modélisation du rayon r est donnée par :

$$\frac{dE}{E}(r) = \frac{dr}{r} \cdot \frac{1}{\ln 2h/r}$$

De même, l'erreur due à un écart de la hauteur h est :

$$\frac{dE}{E}(h) = -\frac{dh}{h} \left[\frac{1}{\ln 2h/r} + \frac{h^2 - x^2}{h^2 + x^2} \right]$$

En prenant alors $h = 7,6$ m et $r = 0,05$ m, pour exemple numérique, on peut voir que l'influence d'un écart Δr est peu significatif :

$$\frac{dE}{E}(r) = 0,17 \frac{dr}{r}$$

Par contre, l'influence d'un écart sur la hauteur h est assez important pour qu'un ajustement précis du modèle soit nécessaire. A l'aplomb de la barre, on a en effet :

$$\frac{dE}{E}(h) = 1,17 \frac{dh}{h}$$

The field at ground level, produced by a cylindrical bar, of radius r , located at height h , is expressed by :

$$E(x) = \frac{2h}{(x^2 + h^2) \ln \frac{2h}{r}} \cdot V$$

x being the distance along a horizontal profile.

The error due to a deviation from the scale in the modelling of the radius r is given by :

$$\frac{dE}{E}(r) = \frac{dr}{r} \cdot \frac{1}{\ln(2h/r)}$$

Similarly, the error due to a deviation from the height h is :

$$\frac{dE}{E}(h) = -\frac{dh}{h} \left[\frac{1}{\ln(2h/r)} + \frac{h^2 - x^2}{h^2 + x^2} \right]$$

Thus, taking $h = 7,6$ m and $r = 0.05$ m, for a numerical example, it can be seen that the influence of a difference Δr has little significance :

$$\frac{dE}{E}(r) = 0.17 \frac{dr}{r}$$

On the other hand, the influence of a difference in the height h is sufficiently large for exact adjustment of the model to be necessary. Vertically under the bar, in fact :

$$\frac{dE}{E}(h) = 1.17 \frac{dh}{h}$$

6. LES EFFETS DES CHAMPS ET DES COURANTS

6.1. Les manifestations physiques du champ.

Comme mentionné dans l'introduction, il existe de toute évidence des effets des champs électriques qui règnent autour des lignes et des composants des postes, effets qui se manifestent tant sur les objets vivants qu'inanimés. Tous ces effets ne peuvent s'exercer que par l'intermédiaire d'un transfert d'énergie. Généralement, l'énergie électrostatique est convertie en une autre forme d'énergie, telle que thermique, mécanique, électrique ou électromagnétique. Comme cependant le "récepteur" qui reçoit cette énergie n'est que faiblement couplé à la "source" c'est-à-dire les conducteurs ou le jeu de barre, la quantité maximale d'énergie qui peut être transférée est limitée. Des effets ne peuvent habituellement être observés que dans ceux des cas pratiques où l'énergie électrostatique est collectée, puis concentrée dans le temps, dans l'espace, ou dans les deux simultanément.

Un exemple va illustrer ce point. Un homme, debout sous une ligne et immergé dans un champ dont l'intensité "non perturbée" est aussi forte que 30 kV/m, recevra une puissance thermique inférieure à 200 μ W, un niveau totalement indécélable comparé au dégagement thermique de son métabolisme, qui est de quelque 100 W. Si cependant, ses chaussures étant isolantes, il touche un objet mis à la terre, il va se produire un train de petites décharges, audibles et lumineuses, qui seront certainement perceptibles et éventuellement même douloureuses (voir en 3.5).

Le transfert d'énergie est dans ce cas concentré spatialement dans le volume infime du canal de la décharge, et temporellement, dans l'instant de la décharge de son corps en tant que condensateur. La puissance de crête est suffisante pour ioniser l'air, pour produire des ondes de choc audibles et pour exciter le système nerveux. Selon la capacité au sol de l'homme considéré, l'énergie emmagasinée dans son corps pourra varier entre 0,2 et 14 mJ. Mais comme ces petites quantités d'énergie sont dissipées en des temps très courts, des puissances de crête de quelques dizaines de watts peuvent être obtenues. Les conséquences en seront discutées en 6.2. (Effets perceptibles).

En valeur absolue, ces quantités d'énergie sont insignifiantes : à titre de comparaison, en une seconde d'exposition à la lumière solaire, plus de 25 joules sont déposés sur un visage humain ! Néanmoins, dans les cas où la puissance est collectée par un volume important, tel un gros véhicule en stationnement sous un conducteur, plusieurs mA s'écoulent par le chemin conducteur, produisant chez un homme touchant le véhicule des sensations tout à fait désagréables.

Le fait de négliger les impédances du circuit, qui limitent les courants de décharge, conduit généralement à une estimation inutilement pessimiste de ces effets d'induction. En pratique, des impédances faibles sont généralement associées à une atmosphère humide et à des sols mouillés : heureusement d'autre part, ce sont aussi les conditions qui favorisent les fuites des charges emmagasinées. Ainsi, un véhicule placé sur un sol sec acquerra sans nul doute une charge substantielle, mais dans ce cas, les impédances limitant le courant seront également élevées. Inversement, de faibles résistances de mise à la terre sont habituellement associées à des pneumatiques mouillés et des énergies stockées faibles. Ces cas ont été traités récemment par Deno (1976) : quelques détails sont donnés à la figure 3.8.

Certains effets des courants d'influence, qui risquent de faire problème, incluent les perturbations que peuvent subir certains appareils électroniques sensibles, et en particulier les stimulateurs cardiaques.

Lorsqu'il s'agit d'appareils tels que microvoltmètres enregistreurs, détonateurs basés sur l'allumage électrique, ordinateurs et leurs périphériques, il est rare que leur protection contre les champs électriques, par mise en place d'écrans électrostatiques, entraîne des difficultés. La suppression des champs magnétiques est par contre plus difficile (voir en 4.).

Le cas des stimulateurs cardiaques exige un examen plus détaillé en raison des conséquences possibles d'un fonctionnement défectueux prolongé. L'analyse (Bridge 1978 ; Hauf 1976) montre que le produit de la résistance du corps mesurée entre l'électrode cardiaque et le point d'implantation du boîtier, par le courant induit, correspond à une ddp qui peut être suffisante pour perturber le fonctionnement de certains types de stimulateurs, et ceci pour des champs d'intensités semblables à celles que l'on rencontre sous les lignes de transport. L'effet n'est pas une paralysie de l'appareil, mais une substitution : de fonctionnement *à la demande* (c'est-à-dire lorsque les ondes R naturelles sont absentes), l'appareil passe au fonctionnement *imposé*, ou l'appareil se substitue aux impulsions électriques naturelles.

6. EFFECTS OF FIELDS AND CURRENTS

6.1. Physical manifestations of fields

As stated in the Introduction, effects evidently exist, both upon living and inanimate objects, of the electric fields which surround lines and components of substations. All such effects must require the transfer of energy. Generally, the electrostatic energy is converted to another form such as thermal, mechanical, electrical or electromagnetic. Since, however, in most cases the "sink", in which this energy is deposited, is only lightly coupled to the "source", e.g. the conductor or busbar, the maximum rate at which energy can be transferred is limited. Only in those practical cases where the electrostatic energy is collected and then concentrated, in time, in space, or both, can effects usually be observed.

An example illustrates this point. A man, standing under a line, in a field of unperturbed intensity as high as 30 kV/m, will receive a continuous thermal input less than 200 μ W, a level completely undetectable against his metabolic output of some 100 W. If, however, because his shoes are insulating and he touches an earthed object, a train of sparks passes, this will be audible and luminous, it will certainly be perceptible and may even be quite painful. (See Section 3.5).

The transferred energy in this case is concentrated, in space, into the microscopic volume of the spark channel and, in time, into the period of discharge of his body as a capacitor. The peak powers are sufficient to ionise air, to produce sound waves and to energise the recipient's nervous system. Depending on the capacitance of the man to ground, the stored energy on his body will vary from about 2 to 14 mJ. Because these small quantities of energy are discharged in very short times, peak powers of some tens of watts may be obtainable. The consequences are discussed in 6.2 (Perception of fields)

In absolute terms these quantities of energy are trivial : for comparison, in one second's exposure to full sunlight more than 25 J falls onto a human face ! However, in those circumstances where power is collected from a substantial volume, as by a large vehicle parked under a conductor, several mA may flow into the discharge path producing, in a man who touches the vehicle, quite unpleasant sensations.

An unnecessarily pessimistic view of these induction-effects generally may result if the circuit impedances, which limit the discharge currents, are ignored. In practice, low circuit impedances are generally associated with humid atmospheres and wet grounds : fortunately, these are the very conditions which promote leakage of stored charge. Thus a large vehicle, on a dry area, will undoubtedly acquire a substantial charge. However, the current-limiting impedances in this case are also large. Conversely, low resistance earths commonly accompany wet tyres and low stored energies. Recent treatments of these cases were given by Deno (1976) : details are shown in figure 3.8.

Some effects of induced currents which may cause concern include interference with sensitive electronic and similar devices, particularly cardiac pacemakers.

Insofar as devices like recording microvoltmeters, detonators etc. which rely on electric ignition and computers or computer-ancillaries are concerned there is rarely any difficulty in the provision of electrostatic screening against electric fields. Exclusion of magnetic fields is, however, more difficult : (See Chapter 4).

The case of cardiac pacemakers requires more detailed consideration because of the possible consequences of prolonged malfunction. Analysis (Bridges 1978 ; Hauf 1976) shows that the product of the body-resistance between heart-electrode and implant-housing with the induced current can, in a field-intensity likely to occur under power-lines, give a potential difference sufficient to interfere with the operation of some pacemakers. The effect is not paralysis of the device but reversion from operation on demand, (i.e. when natural R-waves are missing), to impressed operation, i.e. where the device overrides the natural electrical impulses.

Selon Bridges, les cardiologues sont d'accord pour penser que des périodes limitées de fonctionnement en mode imposé ou asynchrone n'entraîne aucun risque sérieux pour les patients passant sous une ligne.

Ce n'est que dans le cas rare de l'implantation abdominale des types de stimulateurs les plus sensibles qu'une induction directe dans le corps peut causer, sous les lignes, de tels fonctionnements défectueux. Ceux-ci ne se produisent que pour des intensités de champs aussi élevées que 3,4 kV/m, valeurs qui ne sont pas habituelles, sauf sous les lignes à très haute tension.

Des fonctionnements défectueux peuvent être causés par des courants plus intenses, tels que ceux qui parcourent le corps lors d'un contact avec des véhicules sous les lignes : de tels courants sont cependant perceptibles et n'auraient de ce fait qu'une faible durée.

Il est utile de rappeler que, dans la vie quotidienne, des courants de fuite peuvent parcourir le corps humain, tels les courants provenant de petits appareils portatifs. Certaines normes (NFC 73200 ; ANSI C 101.1) fixent la valeur maximale admissible de ces courants de fuite. Or, ceux-ci sont généralement supérieurs aux courants engendrés dans le corps humain par l'effet d'induction des lignes, alors qu'on présente maintenant ces derniers comme dangereux pour la santé.

6.2. Effets perceptibles

Une inquiétude sans aucun fondement est provoquée, en particulier parmi des lecteurs non-techniciens, par le fait que l'intensité des champs électriques est exprimée en "kilovolts par mètre". Le non-spécialiste imagine, notamment lorsqu'on le confronte à des démonstrations tendancieuses avec des tubes fluorescents, que des milliers de volts doivent en quelque sorte exister entre sa tête et ses pieds. En réalité, il n'existe des intensités de champ considérablement plus élevées que 10 kV/m qu'à l'extérieur du corps, autour de la tête, de l'extrémité des doigts, etc. . . de personnes se tenant debout sous des lignes, mais les intensités de champ *internes* excèdent rarement un millionième du champ externe (voir en 3.3.). La raison en est que les courants d'influence et la résistivité électrique des organismes sont très faibles : de l'ordre du microampère pour les premiers, de l'ohm-mètre pour les seconds.

La perception directe des *champs électriques alternatifs extérieurs*, par exemple due à un mouvement des poils, est relativement peu fréquente chez l'homme aux intensités de champs que l'on rencontre sous les lignes à haute et très haute tension. La figure 6.1. montre la "réponse" au champ d'un échantillonage de population.

L'expérience quotidienne montre que les champs dont l'intensité se situe entre une fraction et plusieurs dizaines de kV/m au niveau de la surface du corps (c'est-à-dire les champs superficiels réels et non les champs ambiants) sont imperceptibles ; telles sont les intensités de champ auxquelles sont constamment soumises les personnes utilisant l'appareillage domestique à 240 volts, comme par exemple les couvertures électriques.

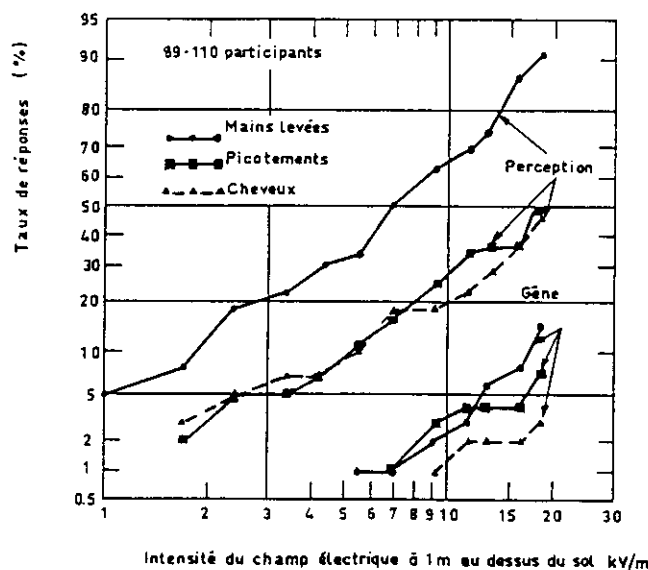


FIG. 6.1. - Seuils de perception et de gêne du champ électrique sous une ligne de transport. (L'abscisse est le champ non perturbé). D'après J.P. Reilly - Cours IEEE, chap. 4.

Cardiologists, according to Bridges, appear to agree that limited periods of reversion, to the impressed or asynchronous mode of operation, pose no serious risk to ambulatory patients.

Only in rare cases, where both abdominal implants and the most sensitive type of pacemaker are employed, can direct induction into bodies under power lines cause reversion. Fields as high as 3.4 kV/m are needed : these are not common under lines except of very high voltage.

Heavier body-currents, caused for example by contact with vehicles under lines, can cause malfunction : such currents however, are perceptible and would therefore be only of short duration.

It is worth recalling that, in everyday life, leakage currents can occasionally flow in human bodies e.g. from portable appliances. Various standards (NFC 73 200 ; ANSI C-101.1) exist giving maximum permitted values of leakage. Such currents are generally higher than those, caused by direct power-line induction into human bodies under lines, which are now alleged to present hazards to health.

6.2. Perception of fields

Undue alarm is caused, especially in non-technical readers, by references to electric field intensities of “kilovolts per metre”. The layman imagines, especially when confronted by misleading demonstrations with fluorescent tubes, that thousands of volts must somehow exist between his head and feet. In fact, although external intensities considerably higher than 10 kV/m commonly exist around heads, fingertips etc. of people standing under lines, the corresponding internal intensities rarely exceed one millionth of the external. (Section 3). This is because the induced currents are small (of μA order) and the internal electrical resistances of human bodies are low (a few hundreds of ohms).

The direct perception by human beings of alternating external electric fields, for example by motion of the hairs on the skin, is somewhat rare at values of field intensity which are appropriate to EHV or UHV transmission. Figure 6.1. shows the response of a sample of population.

It is a matter of everyday experience that fields having intensities from fractions to tens of kV/m at the surfaces of human bodies (i.e. true surface intensities, not unperturbed values) are imperceptible : these are the intensities which are continually experienced by people using 240 V mains-powered equipment eg. electric blankets in the home.

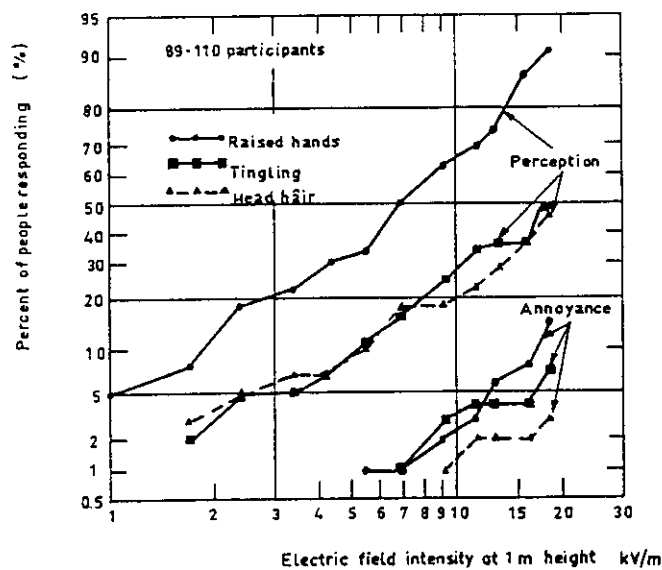


FIG. 6.1. – Thresholds : perception of and annoyance by electric fields under power lines (abscissa is unperturbed field). From J.P. Reilly-IEEE Course, Chap. 4.

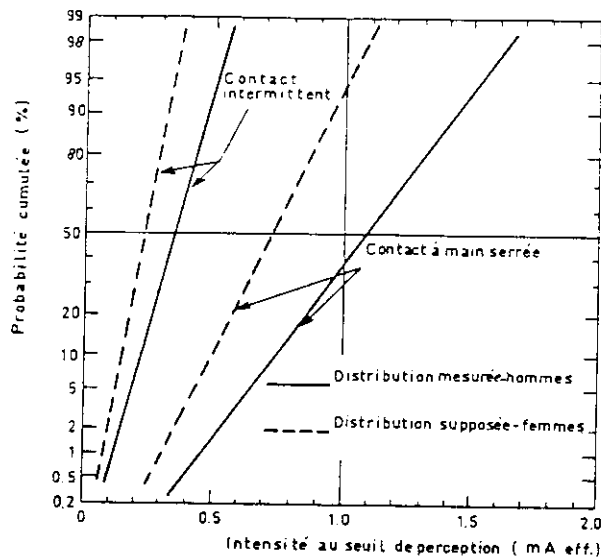


FIG. 6.2. — Seuil de perception d'un courant pénétrant par la main — D'après J.P. Reilly — Cours IEEE, Chap. 4.

La perception des courants est une chose différente. C'est un fait bien établi que, selon la densité de courant et la partie du corps parcourue par le courant, même des intensités de quelques dizaines de μA sont perceptibles. Dalziel indique qu'une intensité de $45 \mu A$ est perceptible lorsque ce courant circule entre deux fils de platine appliqués sur la langue ; des courants aussi faibles que $20 \mu A$ peuvent être la cause de mort par fibrillation, lorsqu'ils traversent directement le coeur humain. Dans des conditions ordinaires, l'homme perçoit tout juste un courant alternatif d'environ $1 mA$, lorsque celui-ci pénètre dans le corps par des électrodes. La perception par les femmes débute pour des valeurs légèrement plus faibles. Il convient de rappeler que ces diverses valeurs sont sujettes à des variations statistiques. Ainsi, 1 % des sujets cités par Dalziel pouvait percevoir des intensités inférieures à $0,5 mA$. La figure 6.2. montre la "réponse" à des courants de faible intensité, d'un échantillonnage de population des deux sexes. Un homme, par exemple un "lignard" travaillant au voisinage de conducteurs sous tension et immergé dans un champ ambiant de $10 kV/m$, ne décèlera probablement pas l'existence de ce champ, jusqu'au moment où il touchera un objet, qui jouant le rôle d'électrode, injectera un courant dans son corps. Les sensations qu'il percevra alors dépendront de la densité locale du courant, ainsi que des paramètres tels qu'humidité de la peau, présence ou absence d'abrasion sur la peau, de la localisation du courant dans le corps. Elles pourront varier depuis une gêne légère jusqu'au choc qui, bien que non dangereux en soi, peut provoquer des incidents tels que chute d'outils ou de pièces d'équipement des pylônes.

Si l'opérateur porte des chaussures conductrices, de telle sorte que l'effet des petits chocs provoqués par les contacts intermittents avec la végétation soit diminué, et même s'il évite le contact avec des objets, sources de courants de décharge, il pourra néanmoins en dressant son bras au-dessus de la tête, avoir une perception directe du champ. Une légère vibration, dont l'origine électrique n'est pas évidente, est alors quelquefois perçue. Des sensations semblables sont quelquefois perçues par les lignards à l'oeuvre sous une ligne sous tension, lorsqu'ils touchent une perche isolante connectée à un conducteur de phase. Ces deux cas sont attribués à l'écoulement d'un courant d'influence. Il est utile de souligner que ces sensations sont entièrement différentes de celles qui sont causées par un courant pénétrant dans le corps par des électrodes.

Pour des intensités de champ un peu plus élevées, certains observateurs signalent une sensation semblable au "souffle de la brise", attribuée à un mouvement des poils provoqué par le champ, comme indiqué plus haut, ou quelquefois de picotement près des oreilles ou des tempes. Aucune de ces sensations n'est semblable, en aucune façon à celles produites par les courants d'électrodes.

Même dans des champs très intenses, tels par exemple ceux auxquels sont soumis des lignards en contact direct avec un conducteur à $400 kV$, alors qu'ils ne portent pas de coiffe conductrice convenable sur leur tête, les sensations restent tout à fait différentes de celles produites par le courant pénétrant par des électrodes. Lorsque l'intensité du champ régnant immédiatement autour de la tête atteint environ $1500 kV/m$, les sensations qui apparaissent sont un bourdonnement à $100 Hz$, que l'on croit entendre mais qui en réalité ne provient pas de l'oreille, et quelquefois des impressions de flashes lumineux au niveau des yeux (phosphène). Le courant d'influence atteint dans ces circonstances le milliampère. Le courant, ou le champ, sont à l'évidence perceptibles, de façon déplaisante, mais les sensations n'ont ici encore aucun rapport avec les sensations familières produites par le passage de courants, d'intensités semblables à travers les muscles, les nerfs, etc. . . , par l'intermédiaire d'une paire d'électrodes.

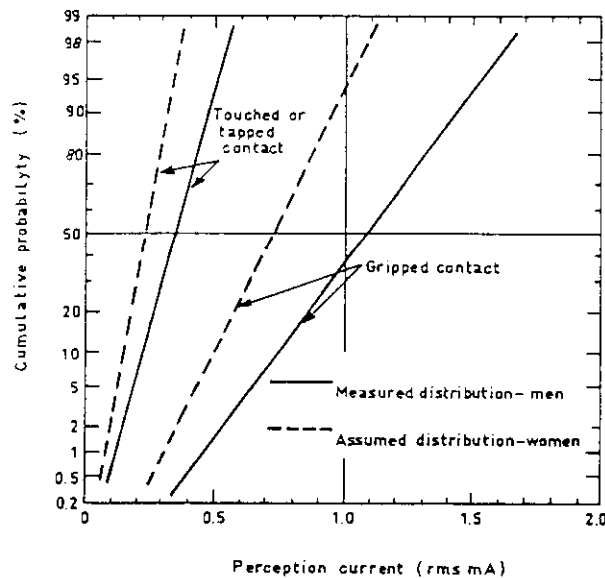


FIG. 6.2. - Thresholds : perception of currents flowing into human hands - From J. P. Reilly - IEEE Course, Chap. 4.

Perception of current is another matter. It is well-established that, depending on the current-densities and the parts of the body through which the currents flow, even a few tens of μA may be perceptible. Dalziel (ref. 1) quotes $45 \mu\text{A}$ as perceptible when flowing between platinum wires on the tongue ; direct passage of currents as small as $20 \mu\text{A}$ through the human heart is stated to be a possible cause of death by fibrillation. In ordinary conditions, men can just perceive alternating currents about the 1 mA level when these flow through their bodies from electrodes. Women's perception begins at somewhat smaller currents. It is worth remembering that all these values are subject to statistical variation. Thus, 1 % of the subjects quoted by Dalziel could perceive currents less than 0.5 mA . Figure 6.2. shows the response of a population of both sexes. A human being, for example a linesman working under energised transmission conductors, who is immersed in a field of unperturbed value about 10 kV/m , will probably be unaware of the existence of this field until he touches electrodes which can inject current into his body. The sensations which he then experiences depend on the current-density and on such parameters as skin-moisture, presence of skin-abrasions, location of current-flow in the body. They may vary from minor annoyance to shocks which, though not directly dangerous, may provoke secondary incidents, such as dropping of tools or equipment from towers.

If the man is wearing conducting shoes, so that the incidence of small shocks arising from intermittent contacts with vegetation is eliminated, and if he avoids making contact with insulated sources of substantial discharge current, he may still be able to perceive the field directly by raising his arm above his head. A slight trembling, not obviously electrical in origin, is then sometimes felt. Similar sensations may be experienced during live line working, when a linesman touches an insulating hot stick which is connected to a live conductor. Both of these cases are attributable to the flow of displacement current. It is worth emphasising that these sensations are entirely different from those caused by current flowing from electrodes.

At somewhat higher field intensities some observers report a "breeze-like" sensation, attributable to motion of the hair, caused by the electric field as previously mentioned, or sometimes a tingling around the ears or temples. None of these sensations is at all similar to those produced by currents from electrodes.

Even in very high intensities of electric field, for example those experienced by a linesman who is in contact with a 400 kV conductor but is not wearing a properly designed conducting cover for his head, the sensations are quite dissimilar from those produced by current-flow in his body from electrodes. A 100 Hz humming, apparently heard but not in fact coming from the ears, and sometimes spurious flashing sensations in the eyes (photism) have been experienced by men around whose heads the field intensity was about 1500 kV/m . The displacement current, in these circumstances, would approach 1 mA . This current or field is definitely, even unpleasantly, "perceptible" but the sensations are again unrelated to the familiar ones produced by the passage of currents of about the same value through muscles, nerves etc. which span electrodes.

En résumé, les effets perceptibles que peut ressentir un opérateur travaillant dans un champ alternatif engendré par une ligne à haute ou très haute tension, sont les suivantes :

- a) Même dans des champs relativement intenses (jusqu'à 25 kV/m), tels que ceux que l'on peut rencontrer à mi-portée, sous une ligne THT, ou dans les postes HT et THT, ou lors de travaux sous tension, la sensation *directement perçue* ne saurait excéder une faible vibration ou un faible fourmillement.
- b) Si, comme conséquence de la présence d'un champ, un courant est injecté dans un corps humain à partir d'électrodes, les effets perceptibles dépendront de l'amplitude et la densité de ce courant, c'est-à-dire des impédances de la source et du circuit, des parties du corps parcourues par le courant, et des conditions physiques du corps. Le domaine des courants perceptibles s'étend d'environ 100 μ A, lorsque cette intensité est associée à des contacts intermittents avec la végétation, causant un léger chatouillement ou picotement, jusqu'à des courants de centaines de milliampères, dans le cas de grands volumes conducteurs à potentiel flottant, courants qui sont alors extrêmement désagréables sinon léthaux. Tous les effets bien connus des courants, c'est-à-dire perception, "let-go", paralysie respiratoire, déclenchement de la fibrillation cardiaque, arrêt du coeur, même brûlure des chairs, pourront être provoqués par des courants *injectés par des électrodes*, sous champ électrique, exactement de la même façon que par des courants provenant de toute autre source.
- c) Des courants d'influence relativement intenses, parcourant la tête, par exemple lors de travaux sous tension incorrectement conduits, peuvent causer des sensations qui, bien qu'angoissantes, sont complètement différentes de celles provenant du contact d'autres parties du corps avec les électrodes.
- d) La densité de courant a une grande influence sur la perception. Des courants très faibles peuvent être perçus s'ils sont très concentrés.

6.3. Effets spéculatifs

Depuis la publication, par Sazanova et al. . . , d'effets qui auraient été observés sur le personnel des postes à haute tension, toute une série d'allégations ont vu le jour, selon lesquelles des effets biologiques et psychologiques se seraient manifestés chez des animaux, et en particulier chez les êtres humains, exposés à des champs électriques. Il a également été dit que d'autres formes de vie, incluant les végétaux et les micro-organismes, seraient affectés.

Ces questions se sont avérées extrêmement difficiles à vérifier objectivement et ont pour cette raison été classées ici comme spéculatives.

Elles sont malheureusement de la plus haute importance, en ce qui concerne le personnel des réseaux à haute tension, car ces allégations de "pollution ambiante" sont de plus en plus mises en avant comme objection à la construction de lignes de transport à haute tension.

Les travaux publiés en ce domaine ont été très complètement passés en revue et seuls les aspects généraux seront examinés ici ; la bibliographie in fine comprend des analyses, des rapports signalant des effets bien définis, d'autres rapports signalant des effets faibles ou inoffensifs, d'autres encore l'absence de tout effet.

Nul doute que des effets biologiques et psychologiques existent réellement lorsque des courants intenses, c'est-à-dire de l'ordre des milliampères, traversent le corps humain (voir 3. et 6.1). Il est donc tout à fait correct de raisonner comme si la seule exigence était d'établir le niveau d'intensité du courant, et par conséquent du champ générateur, au-dessous duquel de tels effets cessent d'être significatifs. Cependant, les valeurs de champ ambiant nécessaires pour engendrer des courants de l'ordre du milliampère sont bien plus élevés que celles que l'on pourra rencontrer dans les cas pratiques. La difficile question qui se pose alors est la suivante : est-il possible que des courants, qui sont trop faibles pour provoquer plus que des irritations mineures, tels que chocs, vibrations des poils, etc. . . , ou même qui sont totalement imperceptibles, puissent néanmoins produire des effets indésirables dans l'organisme de personnes qui les subissent ?

Des travaux expérimentaux bien conduits, portant sur des animaux, ont montré, par exemple en Italie et en France, qu'aucun effet aisément décelable n'était produit, même en champ très intense, de l'ordre de 100 kV/m. Les résultats épidémiologiques obtenus chez des personnes exposées à des champs de moindre intensité se sont généralement révélés négatifs. Des études épidémiologiques récentes, conduites avec plus de détail que les précédentes, n'ont mis en évidence, parmi les personnes exposées professionnellement aux champs électriques, aucun effet médical particulier ou significatif. Au niveau psychologique, tel qu'effets possibles de l'immersion dans un champ sur les performances, des travaux menés en Allemagne et en Suède (Hauf 1976, Johansson 1976) ont montré que, tout au moins à des intensités de 20 kV/m, les effets sont quasiment insignifiants sur le plan statistique, et pourraient même être favorablement stimulants. Ces travaux démontrent manifestement qu'il est peu probable que des perturbations dans les

Summarising the perceptible effects which are experienced by a man working in alternating fields appropriate to EHV or UHV transmission :

- a) Even in the substantial field intensities (up to 25 kV/m) which may be found under some designs of UHV line, within UHV or EHV substations, or during live line working, any directly perceived sensations are unlikely to amount to more than a feeble trembling or tingling.*
- b) If, as a result of the field, currents are injected into a human body from electrodes, the perceptible effects will depend on the amplitude and density of the current, i.e. on the impedances of the source and circuit, on the parts of the body which carry the current and on the condition of the body. The range of perceptible currents is from about 100 μ A, associated with accidental contact with vegetation and causing slight prickling or stinging, to extremely painful or even lethal currents up to hundreds of mA, in the case of large, electrically-floating, conducting bodies. All the well-known effects of currents, respectively perception, "let-go", respiratory paralysis, onset of fibrillation in the heart, stoppage of the heart, even burning of flesh, are just as likely to be produced by injected currents from electrodes in an electric field as by currents from any other source.*
- c) Relatively large displacement currents flowing in the human head, for example during improperly conducted bare hand working, may cause sensations which, though distressing, are completely different from those arising from contact of other parts of the body with electrodes.*
- d) Current density has a great effect on perception. Very small currents are perceptible if they are highly localised.*

6.3. Speculative Effects

Since the publication, by Sazanova et al, of effects claimed to have been observed on workers in high voltage substations, a whole range of allegations has been made that biological and psychological effects have manifested themselves in animals, especially human beings, exposed to electric fields. There have also been suggestions that other forms of life, including vegetation and micro-organisms, are affected.

These matters have proved to be extraordinarily difficult to verify objectively and are therefore classed here as speculative. Their importance, to operators of high voltage networks, is unfortunately considerable since allegations of "environmental pollution" are increasingly being advanced as objections to the installation of overhead high voltage lines.

The published work has been comprehensively reviewed and only the general questions are considered in this Section : the Bibliography includes reviews, papers reporting definite effects, others reporting slight or harmless effects and again others reporting absence of effects.

There is no doubt (Section 3 ; Section 6.1) that both biological and psychological effects do indeed exist when the currents flowing in human bodies are large, i.e. of mA order. It is therefore proper to argue that the only requirement is to establish the level of current, and consequently of energizing field-intensity, below which any such effects cease to be significant. However, the values of unperturbed field which are required to produce current flows of mA order are far higher than any likely to be encountered in practical cases. The difficult question then poses itself – is it possible for currents which are too low to produce more than minor irritations, as by shocks, vibrations etc., or even which are quite imperceptible, nevertheless to produce unwanted effects in the bodies of persons subjected to them ?

Properly controlled experimental work with animals has shown, e.g. in USA, Italy and in France, that no readily detectable effects are produced even in high field-intensities, of order 100 kV/m. Even these effects may well be ascribed to secondary products of the experimental conditions. Epidemiological data from persons exposed to somewhat lower fields have also generally proved negative. Recent epidemiological studies have been more penetrating than earlier ones and have found no significant medical effects peculiar to people occupationally exposed to electric fields. At the psychological level, of possible effect of immersion in electric fields on performance, work in Germany and in Sweden (Hauf, 1976 ; Johansson, 1976) has demonstrated that, at least at the 20 kV/m level, the effects are almost insignificant, statistically, and may even be beneficially stimulating. This work apparently demonstrates that

réactions humaines, causées par des champs rencontrés dans la technique courante, excèdent celles qui sont dues aux sources de stress auxquelles est soumise la vie quotidienne. Il n'est naturellement pas exclu que de faibles courants induits, imperceptibles, puissent avoir une action soit sur le réseau de communication de l'organisme, soit directement sur le cerveau, de telle façon à produire des effets indésirables. La gêne profonde produite par des flashes lumineux pulsés, à certaines fréquences biologiquement significatives, ainsi que des expériences menées sur des animaux soumis à des champs électriques de fréquences comprises entre 6 et 16 Hz montrent que ce type de perturbations existe, mais il n'est pas prouvé que des stimuli électriques *imperceptibles* aient des effets similaires.

D'autre part, il s'est développé dans l'organisme humain une haute sensibilité à bande étroite d'ondes électromagnétiques — il s'agit de la lumière visible — et ceci au cours de millions d'années d'une évolution dans un environnement saturé de lumière solaire. Il n'y a aucune histoire d'une exposition à 50 Hz, s'étendant sur plus de quelques décades : il est donc raisonnable de supposer qu'aucun mécanisme semblable à la vue, mais réagissant à des fréquences industrielles, n'ait pu être développé chez les humains.

Comme indiqué dans l'introduction, il y a malheureusement absence d'unanimité entre les résultats d'investigations, tels qu'annoncés par les chercheurs des différents pays du monde, en ce qui concerne les effets biologiques des champs électriques, aux intensités communément rencontrées sous les lignes et dans les postes.

L'un des groupes, maintient qu'il existe des effets indésirables, et que des règles de protection sont nécessaires pour les éviter. L'autre groupe ne voit aucune nécessité à de telles restrictions et déplore la diffusion de ce qu'il considère être des vues alarmistes. Son opinion est fondée sur les résultats détaillés, publiés, d'enquêtes et d'expérimentation, ainsi que sur l'expérience accumulée au cours de nombreuses années, de lignes de transport surplombant des dizaines de milliers d'habitations.

On peut ³⁰espérer qu'une meilleure liaison entre ces groupes donnera une réponse à cette question, à savoir si oui ou non une limitation à l'exposition est nécessaire, et si tel devait être le cas, à quelles valeurs raisonnables. Cependant, une expérience de plusieurs décades suggère que, même s'il y a quelque effet à des intensités de champ de 10 à 20 kV/m, il ne saurait être significativement nocif, dans le contexte d'un environnement industriel où des courants à fréquence industrielle traversant l'organisme humain sont chose habituelle, puisqu'ils sont associés à l'emploi d'appareillage domestique et d'outils électriques.

Nous nous sentons obligés de poser la question suivante : le problème des effets des lignes de transport sur l'organisme humain aurait-il vu le jour si les phénomènes d'induction avaient été exprimées en millièmes d'ampère, plutôt qu'en milliers de volts par mètre ?

perturbations, in human response, caused by field intensities relevant to practical engineering are no more serious than those arising from everyday sources of stress. The possibility does, of course, exist that imperceptibly small induced currents may interfere either with the body's communications-network or directly with the brain in such a way as to produce unwanted effects. The distress produced by lights which flash at certain biologically significant frequencies and experiments on animals in electric fields at frequencies between 6 and 16 Hz show that this type of "interference" does exist, but there is no evidence that imperceptible electrical stimuli have similar effects.

On the other hand, the human body has developed high sensitivity to a narrow band of electromagnetic waves – the visible spectrum, that is, – through millions of years of evolution in an environment permeated by sunlight. There is no history of 50 Hz exposure extending over more than a few decades : it is therefore reasonable to suppose that no mechanism similar to sight but responding to power-frequencies can have been developed in humans.

As stated in the Introduction, there is an unfortunate lack of unanimity between the claimed results of investigations, into the biological effects of electric fields at intensities relevant to transmission lines and substations, in different parts of the world.

One group maintains that undesirable effects do exist and that protective regulations, to avoid them, are necessary. The other group sees no need for restrictions and deplores the diffusion of what it sees as alarmist views. Its opinion is based on detailed published results, of surveys and experiments, and on many years' experience of transmission lines running over tens of thousands of houses.

It is to be hoped that improved liaison between these groups will provide an answer to the questions whether or not limitation of exposure is required and, if it is, what values are reasonable. However, many decades of experience do suggest that, if there are any effects of fields of intensity 10 to 20 kV/m, these cannot be significantly harmful, in the context of an industrialised environment where occasional current-flows in human bodies at power frequencies, associated with the use of electrically-powered appliances and tools, have long been common place.

We feel obliged to ask : would the effects of power-lines on humans ever have come to prominence if induction had been expressed in millionths of amperes rather than thousands of volts per metre ?

7. CONCLUSIONS

- 1) Les lignes de transport et les postes d'énergie électrique engendrent des champs électriques et magnétiques, qui sont la cause d'une circulation d'un courant électrique dans des objets, personnes humaines incluses, placées à proximité de ces ouvrages.
- 2) Les amplitudes des intensités des champs et des courants induits peuvent être calculées et mesurées avec une précision suffisante pour les besoins pratiques. En particulier, le champ électrique *interne*, induit dans l'organisme humain, qui n'est que de l'ordre du mV/m.
- 3) Les effets de l'induction peuvent être de nature thermique, mécanique, électrique ou électromagnétique, mais du fait que le couplage entre la source d'induction et le récepteur auquel l'énergie est transmise est généralement faible, ces effets sont dans la plupart des cas négligeables.
- 4) L'appareillage sensible nécessite une protection contre les champs par des écrans ; ce procédé est toujours réalisable et est généralement de mise en oeuvre évidente. La perturbation de stimulateurs cardiaques constitue un risque très faible et rare.
- 5) Les effets directement perceptibles s'étendent depuis le mouvement des poils à la surface du corps, lorsque le champ a atteint une intensité suffisante, jusqu'à de forts chocs électriques, ces derniers n'étant néanmoins provoqués que lors d'un contact avec de grands collecteurs tels que des véhicules ou des clôtures.
- 6) Il est important de faire la distinction entre les champs des lignes de transport, à la fréquence de 50 Hz ou 60 Hz, et les champs à fréquences très basses d'une part (6 à 16 Hz), qui exciteraient des processus physiques dans le cerveau, les champs à fréquences radioélectriques et les micro-ondes d'autre part, dont les effets thermiques sur les tissus organiques sont connus.
- 7) L'environnement habituel des personnes vivant à proximité des lignes de transport ne comporte pas de champs d'intensités élevées grâce aux écrans que constituent les toits, les structures métalliques dans les habitations, les arbres.
- 8) Bien qu'il soit prétendu que des courants induits non perceptibles aient des effets indésirables, les preuves en sont ténues et contradictoires. Les amplitudes des courants induits auxquelles on peut s'attendre sont inférieures aux courants de fuite acceptables de l'appareillage électrique familial, utilisé en milieu domestique et industriel, et les puissances induites sont infinitésimales.

REMERCIEMENTS

Une grande partie des informations présentées dans ce guide a été reprise de nombreux travaux, cités dans la bibliographie. Les auteurs de ce guide expriment leur reconnaissance et sont heureux d'en donner acte ici.

Ils s'excusent d'avance vis à vis de ceux dont la contribution leur aurait échappé.

7. CONCLUSIONS

- 1) *Electric power lines and substations give rise to electric and magnetic fields which can cause current-flow in objects, including humans, adjacent to the installations.*
- 2) *The magnitudes of the field-intensities and induced currents can be calculated and measured with sufficient precision for all practical cases, in particular the induced internal E-field intensities, in human bodies adjacent to transmission-lines, which are only of order mV/m.*
- 3) *The effects of induction may be thermal, mechanical, electrical or electromagnetic in nature but, because the coupling between the source of induction and the "sink", in which the energy is deposited, is generally weak such effects are generally negligible.*
- 4) *Sensitive apparatus may require screening from fields ; this is always practicable and is usually straightforward, Interference with cardiac pacemakers presents a very small and rare hazard.*
- 5) *Directly perceptible effects range from motion of hair on the body, in sufficiently intense fields, to severe electric shock, the latter however arising only from contact with large collectors like unearthed vehicles or long fences.*
- 6) *It is important to distinguish power-line fields, at frequencies of 50 or 60 Hz, from the ELF fields which are claimed to excite physical processes within the brain (6 to 16 Hz) and from the radio frequency and microwave fields which have known heating effects on living tissue.*
- 7) *The usual environment of people living close to power-lines does not contain fields of high intensity because of screening by roofs, domestic metalwork and trees.*
- 8) *Although claims are made that imperceptible induced currents may have undesirable effects, the evidence is tenuous and contradictory. The prospective sizes of induced current are smaller than the permitted leakage currents from familiar apparatus, used in the home and factory, and the induced powers are infinitesimal.*

ACKNOWLEDGEMENTS

Much of the information in this guide has been drawn from the work of others, cited in the Bibliography, to whom the authors make grateful acknowledgements.

They apologize for those cases where attribution has been overlooked.

RÉFÉRENCES

- [1] Adey R., Bowin S.M., Brain interaction with weak electric and magnetic fields, *Bulletin Neurosciences Res. Prog.*, Vol. 15 No. 1.
- [2] Adler R.B., Chu L.J., Fano R.M., Electromagnetic energy transmission and radiation, John Wiley, New York 1960.
- [3] Alessandrini V., Fanchiotti H., Garcia Canal C.A., Vecetich H., Exact solution of electrostatic problem for a system of parallel cylindrical conductors, *J.A.P.*, Vol. 45, No. 8, August 1974.
- [4] Armanini D., Brambilla C., Electric field measurement devices used in the 1000 kV Plant at Suvereto. *Third international Symposium on High Voltage Engineering*. Milan 28-31 August 1979.
- [5] Asanova T.P., Rakov A.I., The state of health of persons working in electric field in outdoor 400 and 500 kV switchyards, *Hygiene of Labor and Professional Diseases*, 1966, No. 5, pp. 72-76.
- [6] Atoian G.E., Are there Biological and Psychological effects due to extra high voltage installations ? *IEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, no. 1, January/February 1978.
- [7] Angugliaro, Buccheri P., Carreca E., Dusonchet L., A computer-aided analysis of electrical fields of overhead conductors. Application to EHV and UHV lines and substations structures. *Third International Symposium on High Voltage Engineering*. Milan 28-31 August 1979.
- [8] Bankoske J.W., Poznaniak D.T., McKee G.W., Graves H.B., Bridges J.E., Effets biologiques des champs électriques à fréquence extrêmement faible : quelques résultats de recherches aux Etats-Unis. CIGRE 36-05, 1978.
- [9] Beasley M.D.R., Pickles J.H., D'Amico G., Beretta L., Fanelli M., Guiseppetti G., Dimonaco A., Gallet G., Gregoire J.P., Morin M., Comparative study of three methods for computing electric fields. *Proceedings IEE*, Vol. 126, No. 1, January 1979 (Translations of this paper, in French and Italian, are also published in *Rev. Gen. Electr. and Elettrotecnica*).
- [10] Beischer D., Grisset J., Mitchell R., Exposure of man to magnetic fields alternating at ELF, NAMRL - 1180, July 1973.
- [11] Bianchi D., Cedrini L., Ceria F., Meda E., Re G., Exposure of mammals to strong 50 Hz electric fields. *Arch. Fisiol.* 70, 1973, pp. 30-32.
- [12] Binns J.K., Lawrenson P.J., Analysis and Computation of electric and magnetic field problems, Pergamon Press, Oxford 1963.
- [13] Bracken T.D., Field measurements and calculations of electrostatic effects of overhead transmission lines, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-95, March/April 1976, pp. 494-504.
- [14] Bridges J.E., : Environmental Considerations Concerning the Biological Effects of Power Frequency (50 or 60 Hz) Electric Fields. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, no. 1, January/February 1978.
- [15] Bridges J.E., Final report on project 381-1, IITRI, Nov. 1975.
- [16] Brooks H.B., Defaandorf F.D., Silsbee F.B., An absolute electrometer for the measurement of high alternating voltages. *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, Vol. 20, 1938, pp. 253-316.
- [17] Cabanes J., Action des champs électriques et magnétiques sur les organismes vivantes et plus particulièrement l'homme. *RGE n° special juillet 1976*, pp. 19-26.
- [18] Cerretelli P., C. Malaguti C., Recherches effectuées en Italie par l'ENEL sur l'influence des champs électriques à haute tension., *RGE n° spécial juillet 1976*. pp. 65-74.
- [19] Cerretelli P., Veicsteinas A., Margonato V., Cantone A., Viola D., Malaguti C. and Previ A., "1000 kV Project, Research on the biological effect of 50 Hz electric field in Italy" Paper presented at the 18th Annual Handford Life Science Symposium, Richland, Washington, 16-18 October 1978.

REFERENCES

- [1] Adey R., Bowin S.M., *Brain interaction with weak electric and magnetic fields*, Bulletin Neurosciences Res. Prog., Vol. 15 No. 1.
- [2] Adler R.B., Chu L.J., Fano R.M., *Electromagnetic energy transmission and radiation*, John Wiley, New York 1960.
- [3] Alessandrini V., Fanchiotti H., Garcia Canal C.A., Vecetich H., *Exact solution of electrostatic problem for a system of parallel cylindrical conductors*, J.A.P., Vol. 45, No. 8, August 1974.
- [4] Armanini D., Brambilla C., *Electric field measurement devices used in the 1000 kV Plant at Suvereto*. Third international Symposium on High Voltage Engineering. Milan 28-31 August 1979.
- [5] Asanova T.P., Rakov A.I., *The state of health of persons working in electric field in outdoor 400 and 500 kV switchyards*, Hygiene of Labor and Professional Diseases, 1966, No. 5, pp. 72-76.
- [6] Atoian G.E., *Are there Biological and Psychological effects due to extra high voltage installations ?* IEEE, Vol. PAS-97, no. 1, January/February 1978.
- [7] Angugliaro, Buccheri P., Carreca E., Dusonchet L., *A computer-aided analysis of electrical fields of overhead conductors. Application to EHV and UHV lines and substation structures*. Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milan 28-31 August 1979.
- [8] Bankoske J.W., Poznaniak D.T., McKee G.W., Graves H.B., Bridges J.E., *Biological effects of electric fields at extremely low frequency : Some results of research in the United States*. CIGRE 36-05, 1978.
- [9] Beasley M.D.R., Pickles J.H., D'Amico G., Beretta L., Fanelli M., Guiseppetti G., Dimonaco A., Gallet G., Gregoire J.P., Morin M., *Comparative study of three methods for computing electric fields*. Proceedings IEE, Vol. 126, No. 1, January 1979 (Translations of this paper, in French and Italian, are also published in Rev. Gen. Electr. and Elettrotecnica).
- [10] Beischer D., Grisset J., Mitchell R., *Exposure of man to magnetic fields alternating at ELF*, NAMRL - 1180, July 1973.
- [11] Bianchi D., Cedrini L., Ceria F., Meda E., Re G., *Exposure of mammals to strong 50 Hz electric fields*. Arch. Fisiol., 70, 1973, pp. 30-32.
- [12] Binns J.K., Lawrenson P.J., *Analysis and Computation of electric and magnetic field problems*, Pergamon Press, Oxford 1963.
- [13] Bracken T.D., *Field measurements and calculations of electrostatic effects of overhead transmission lines*, IEEE Vol. PAS-95, March/April 1976, pp. 494-504.
- [14] Bridges J.E., *Environmental Considerations Concerning the Biological Effects of Power Frequency (50 or 60 Hz) Electric Fields*. IEEE, Vol. PAS-97, no. 1, January/February 1978.
- [15] Bridges J.E., *Final report on project 381-1*, IITRI, Nov. 1975.
- [16] Brooks H.B., Defaandorf F.D., Silsbee F.B., *An absolute electrometer for the measurement of high alternating voltages*. J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol. 20, 1938, pp. 253-316.
- [17] Cabanes J., *Effects of electric and magnetic fields on living organisms and in particular on man*. RGE, Special issue, July 1976, pp. 19-26.
- [18] Cerretelli P., C. Malaguti C., *Research carried out in Italy by ENEL on the effects of high voltage electric fields*. RGE, Special Issue, July 1976, pp. 65-74.
- [19] Cerretelli P., Veicsteinas A., Margonato V., Cantone A., Viola D., Malaguti C. and Previ A., *1000 kV project : Research on the biological effect of 50 Hz electric fields in Italy*. Paper presented at the 18th Annual Hanford Life Science Symposium, Richland, Washington, 16-18 October 1978.

- [20] Comsa R.P., René J.G., Air model for the study of electrostatic induction by transmission lines, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, April 1968, pp. 1002-1010.
- [21] Centi R., Previ A., Study, design and construction, in a laboratory, of a system for submitting small animals to high electric field at 50 Hz. *Third International Symposium on High Voltage Engineering*. Milan 28-31 August 1979.
- [22] Conti R., Previ A., Method for the calculation of the voltage and the current induced on metallic bodies close to ground under UHV overhead lines. Comparison with on-the-spot measurements. *Third International Symposium on High Voltage Engineering* Milan 28-31 August 1979.
- [23] Dalziel C.F., Ogden E., Effect of frequency on let-go currents, *Trans. IEEE*, Vol. 62, Dec. 1943, pp. 743-750.
- [24] Dalziel C.F., A study of the hazards of impulse currents, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 72, 1953, pp. 1032-1043.
- [25] Dalziel C.F., The threshold of perception currents, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 73, Aug. 1954, pp. 990-996.
- [26] Dalziel C.F., Lee W.R., Lethal electric currents, *IEEE Spectrum*, 1969, pp. 44-50.
- [27] Dalziel C.F., Electric shock hazard, *IEEE Spectrum*, Feb. 1972, pp. 41-50.
- [28] Deno D.W., Calculating electrostatic effects of overhead transmission lines, *IEEE Transactions on PAS*, 1974, No. 5.
- [29] Deno D.W., Electrostatic effect induction formulae, *IEEE Paper*, No. T 75 203-5.
- [30] Deno D.W., Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field. Measurement and calculation of distribution and dose. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, no. 5, September/October 1977.
- [31] Deno D.W., UHV Transmission line electric field reduction with a set of horizontal wires. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, No. 5, September/October 1977.
- [32] Deuse J., Pirotte P., Three dimensional electric field distribution near high voltage line, *International high voltage Symposium*, Zurich 1975.
- [33] Deuse J., Pirotte P., Calcul et mesure de l'intensité de champ électrique à proximité des installations sous tension, 36-03, CIGRE, Paris, 1976.
- [34] Dietrich F.M., Kolcio N., Phénomènes d'effet de couronne et effets du champ électrique à la station d'essais d'Apple Grove et sous une ligne à 800 kV aux Etats-Unis. CIGRE 31-08, 1976.
- [35] Di Placido J., Shih C.H., Ware B.J., Analysis of proximity effects in field measurements, presented at the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York 1978.
- [36] Eisemann B., Investigations into the long-term effect of small AC currents on man. *Doctoral Thesis*, Freiburg, 1975.
- [37] Fernandez-Fole, PAT effect in electric sub-stations, *Medicina y Seguridad del Trabajo* 31-31, 1973, pp. 15-18.
- [38] Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M., *The Feynman lectures on physics*, Vol. 2, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1964; pp. 17-1 ff.
- [39] Filippov V., The effect of alternating fields on human beings and protective measures. *2nd International Colloquium of ISSA on Prevention of Occupational Risks due to Electricity*, Cologne, 1972.
- [40] Fleischmann L., Gesundheitsschädlichkeit der Magnetwechselfelder *Naturwissenschaften*, 1922.
- [41] Fole F.F., Phänomen "PAT" in den elektrischen Unterwerken. *Colloque International de Prévention des Risques Professionnels dus à l'Electricité*, Cologne, 1972.
- [42] Gary C., Effets biologiques d'un champ électrique. Que peut dire l'électricien à ce sujet ? *Revue Générale de l'Electricité*, No. Spécial Juillet 1976.
- [43] Graves H.B., Carter J.H., Kellmel D., Cooper L., Pozniak D.T. and Bankoske J.W., Perceptibility and Electrophysiological response of small birds to intense 60-Hz electric fields. *IEEE Summer High Voltage Meeting*, 1977, No. F77 670-3.
- [44] Graves H.E., Some biological effects of high intensity, low frequency (60 Hz) electric fields on small birds and animals, *2nd International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility*, Montreux, Switzerland, June 1977.

- [20] Comsa R.P., René J.G., *Air model for the study of electrostatic induction by transmission lines*. IEEE, Vol. PAS-87, April 1968, pp. 1002-1010.
- [21] Conti R., Previ A., *Study, design and construction, in a laboratory, of a system for submitting small animals to high electric fields at 50 Hz*. Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milan 28-31 August 1979.
- [22] Conti R., Previ A., *Method for the calculation of the voltage and the current induced on metallic bodies close to ground under UHV overhead lines. Comparison with on-the-spot measurements*. Third International Symposium on High Voltage Engineering Milan 28-31 August 1979.
- [23] Dalziel C.F., Ogden E., *Effect of frequency on let-go currents*, Trans. IEEE, Vol. 62, Dec. 1943, pp. 743-750.
- [24] Dalziel C.F., *A study of the hazards of impulse currents*, IEEE Trans. PAS, Vol. 72, 1953, pp. 1032-1043.
- [25] Dalziel C.F., *The threshold of perception currents*, IEEE Trans. PAS, Vol. 73, Aug. 1954, pp. 990-996.
- [26] Dalziel C.F., Lee W.R., *Lethal electric currents*, IEEE Spectrum, 1969, pp. 44-50.
- [27] Dalziel C.F., *Electric shock hazard*, IEEE Spectrum, Feb. 1972, pp. 41-50.
- [28] Deno D.W., *Calculating electrostatic effects of overhead transmission lines*, IEEE Trans. on PAS, 1974, No. 5.
- [29] Deno D.W., *Electrostatic effect induction formulae*, IEEE Paper, No. T 75 203-5.
- [30] Deno D.W., *Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field. Measurement and calculation of distribution and dose*. IEEE, Vol. PAS-96, no. 5, September/October 1977.
- [31] Deno D.W., *UHV Transmission line electric field reduction with a set of horizontal wires*. IEEE, Vol. PAS-96, No. 5, September/October 1977.
- [32] Deuse J., Pirotte P., *Three dimensional electric field distribution near high voltage line*, International high voltage symposium, Zurich 1975.
- [33] Deuse J., Pirotte P., *Calculation and measurements of electric field strength near HV structures*, Report 36-03, CIGRE, Paris, 1976.
- [34] Dietrich F.M., Kolcio N., *Corona effect phenomena and effects of the electric field at the Apple Grove test station and under an 800 kV line in the United States*. CIGRE Report 31-08, 1976.
- [35] Di Placido J., Shih C.H., Ware B.J., *Analysis of proximity effects in field measurements, presented at the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York 1978*.
- [36] Eisemann B., *Investigations into the long-term effect of small AC currents on man*. Doctoral Thesis, Freiburg, 1975.
- [37] Fernandez-Fole, *PAT effect in electric sub-stations*, Medicina y Seguridad del Trabajo 31-81, 1973, pp. 15-18.
- [38] Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M., *The Feynman lectures on physics, Vol. 2, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1964, pp. 17-1 ff.*
- [39] Filippov V., *The effect of alternating fields on human beings and protective measures*. 2nd International Colloquium of ISSA on Prevention of Occupational Risks due to Electricity, Cologne, 1972.
- [40] Fleischmann L., *Gesundheitsschädlichkeit der Magnetwechselfelder Naturwissenschaften*, 1922.
- [41] Fole F.F., *Phänomen "PAT" in den elektrischen Unterwerken*. Colloque International de Prévention des Risques Professionnels dus à l'Electricité, Cologne, 1972.
- [42] Gary C., *Biological effects of an electric field. What can an electrician say on this subject ?* Revue Générale de l'Electricité, No. Special Issue, July 1976.
- [43] Graves H.B., Carter J.H., Kellmel D., Cooper L., Pozniak D.T. and Bankoske J.W., *Perceptibility and Electrophysiological response of small birds to intense 60-Hz electric fields*. IEEE Summer High Voltage Meeting, 1977, No. F77 670-3.
- [44] Graves H.E., *Some biological effects of high intensity, low frequency (60 Hz) electric fields on small birds and animals*, 2nd International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Montreux, Switzerland, June 1977.

- [45] Greene F.M., NBS field strength standards and measurements (30 Hz to 1000 MHz), *Proc. IEEE*, Vol. 55, 1967, pp. 970-981.
- [46] Grissett, J., Primate chronic exposure study, Naval Aerospace Medical Research Lab., PME 117, Naval Electronic System Command, Navy Department, Washington, D.C.
- [47] Hauf, R., Wiesinger J., Biological effects of technical electric and electromagnetic VLF fields. *Int. Jour. Biome-teor.* 17-3, 1973, pp. 213-215.
- [48] Hauf, G., Investigations into the effect of power-frequency fields on human beings. *Doctoral Thesis*, Munich, 1974.
- [49] Hauf R., Effect of 50 Hz alternating fields on human beings. *ETZ-B* 26-12, 1974, pp. 318-320.
- [50] Hauf R., Influence of 50 Hz alternating electric and magnetic fields on human beings. *RGE*, Special Issue, July 1976, pp. 31-49.
- [51] Hauf R., Effect of electromagnetic fields on human beings. *ETZ-B* 28-6/7, 1976, pp. 181-183.
- [52] Hylten-Cavallius N., Certain ecological effects of high voltage power lines, IREQ Report No. 1160, Fev. 18, 1975, presented at the Cage Club Meeting, Quebec City, May 1973.
- [53] Jaczewski M., Pilatowicz A., CIGRE 1972, Discussion.
- [54] Jaczewski M., Pilatowicz A., Courant transitoire de contact à proximité des lignes THT. CIGRE 36-02, 1976.
- [55] Jakob G., Steinbigler H., Wiesinger J., Das elektrische Feld unter Hochspannungs-Freileitungen – *Bull. ASE*, 63, 1972, Novembre.
- [56] Johnson J., Connelly K., Smith D.C., Influence of the effects of the electric field on the design of 500 kV systems. CIGRE Report 31-05, 1976.
- [56b] Kaidanov F.G., Perelman L.S. – Screening sheds for the protection of H.V. substation personnel. – *Electric stations*, 1975, No. 1, pp. 75-78 (in Russian).
- [56c] Kaidanov F.G., Protection of substation personnel from electric field effects. *Electric stations*, 1974, No. 1, pp. 63-66.
- [57] Kantz B., Neues über die Wetterwirkung auf die psychologische Reaktionslage des Menschen. *Arch. Phys. Ther.*, 1951, 211, 3.
- [57b] Katz R.A., Perelman L.S., Three phase power line electric field calculation. – *Electricity*, 1978, N° 1, pp. 16-19.
- [58] Knave B. et Coll., Exposition de longue durée aux champs électriques. Enquête épidémiologique multidisciplinaire sur des employés exposés dans des postes électriques à haute tension. *Electra*, N° 65, juillet 1979.
- [59] Knickerbocker G.C., Kouwenhoven W.B., Barnes H.C., Exposure of mice to strong AC electric fields – an experimental study. *IEEE Trans. PAS*, 86-4, April 1967, pp. 498-505.
- [60] Kollewijn W., Vander Weegen A.W., The influence of a dielectric support on the indication of an electrostatic field measuring device, *KEMA Report*, re. 8546-76.
- [61] Kornberg H.A., Effets biologiques des champs électriques. *Revue Générale de l'Electricité*, No. Spécial juillet 1976, pp. 51-64.
- [62] Kornberg H.A., Concern Overhead, *EPRI Journal*, Vol. 2, No. 5, June-July 1977, pp. 6-13.
- [63] Korobkova V.P., Morozov Yu. A., Stolarov M.D., Yakub Yu. A., Influence du champ électrique dans les postes à 500 et 750 kV sur les équipes d'entretien et les moyens de leur protection. CIGRE 1972, No. 23-06.
- [64] Kotter F.R. and Misakian, AC transmission line field measurements, NBS report prepared for U.S. Department of Energy, Report No. HCP/T6010/E1, 1977, available from NTIS, Springfield, Virginia 22161.
- [65] Kouwenhoven W.B., Langworthy O.R., Effect of electric shock, *AIEE Journal*, Vol. 49, 1930, pp. 381-384.
- [66] Kouwenhoven W.B., Knickerbocker G.G., AC shocks of varying parameters affecting the heart. *AIEE Trans. Communications and Electronics*, Vol. 78, 1959, pp. 163-169.
- [67] Kouwenhoven W.B. et al., Medical evaluation of men working in AC electric fields, *IEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-86, No. 4, April 1967, pp. 506-511.
- [68] Lawton R.A., New standard of electric field strength, *IEEE*, Vol. IM 19, No. 1, February 1970, p. 45.
- [69] Leardini T., Effects of electric fields on human beings and animals. *ENEL Report L6/72-27*, February 1975.
- [70] Le Bars H., Effets biologiques d'un champ électrique sur le rat et le lapin, *RGE* No. Spécial, juillet 1976, pp. 91-97.

- [45] *Greene F.M., NBS field strength standards and measurements (30 Hz to 1000 MHz), Proc. IEEE, Vol. 55, 1967, pp. 970-981.*
- [46] *Grissert, J., Primate chronic exposure study, Naval Aerospace Medical Research Lab., PME 117, Navel Electronic System Command, Navy Department, Washington, D.C.*
- [47] *Hauf, R., Wiesinger J., Biological effects of technical electric and electromagnetic VLF fields. Int. Jour. Biome-teor. 17-3, 1973, pp. 213-215.*
- [48] *Hauf, G., Investigations into the effect of power-frequency fields on human beings. Doctoral Thesis, Munich, 1974.*
- [49] *Hauf R., Effect of 50 Hz alternating fields on human beings. ETZ-B 26-12, 1974, pp. 318-320.*
- [50] *Hauf R., Influence of 50 Hz alternating electric and magnetic fields on human beings. RGE, Special Issue, July 1976, pp. 31-49.*
- [51] *Hauf R., Effect of electromagnetic fields on human beings. ETZ-B 28-6/7, 1976, pp. 181-183.*
- [52] *Hylten-Cavallius N., Certain ecological effects of high voltage power lines, IREQ Report No. 1160, Bev. 18, 1975, presented at the Cage Club Meeting, Quebec City, May 1973.*
- [53] *Jaczewski M., Pilatowicz A., CIGRE 1972, Discussion.*
- [54] *Jaczewski M., Pilatowicz A., Transient contact current near to VHT lines. CIGRE 36-02, 1976.*
- [55] *Jakob G., Steinbigler H., Wiesinger J., Das elektrische Feld unter Hochspannungs-Freileitungen – Bull. ASE, 63, 1972, Novembre.*
- [56] *Johnson J., Conelly K., Smith D.C., Influence of the effects of the electric field on the design of 500 kV systems. CIGRE Report 31-05, 1976.*
- [56b] *Kaidanov F.G., Perelman L.S. – Screening sheds for the protection of H.V. substation personnel. – Electric stations, 1975, No. 1, pp. 75-78 (in Russian).*
- [56c] *Kaidanov F.G., Protection of substation personnel from electric field effects. Electric stations, 1974, No. 1, pp. 63-66.*
- [57] *Kantz B., Neues über die Wetterwirkung auf die psychologische Reaktionslage des Menschen. Arch. Phys. Ther., 1951, 211, 3.*
- [57b] *Katz R.A., Perelman L.S., Three phase power line electric field calculation. – Electricity, 1978, N° 1, pp. 16-19.*
- [58] *Knave B. et Coll., Exposure to electric fields : an epidemiological health examination on long-term exposed switchyard workers Electra, N° 65, July 1979.*
- [59] *Knickerbocker G.C., Kouwenhoven W.B., Barnes H.C., Exposure of mice to strong AC electric fields – an experimental study. IEEE Trans. PAS, 86-4, April 1967, pp. 498-505.*
- [60] *Kollewijn W., Vander Weegen A.W., The influence of a dielectric support on the indication of an electrostatic field measuring device, KEMA Report, re. 8546-76.*
- [61] *Kornberg H.A., Biological effects of electric fields, Revue Générale de l'Electricité, Special Number, July 1976, pp. 51-64.*
- [62] *Kornberg H.A., Concern Overhead, EPRI Journal, Vol. 2, No. 5, June-July 1977, pp. 6-13.*
- [63] *Korobkova V.P., Morozov Yu. A., Stolarov M.D., Yakub Yu. A., Influence of the electric field in 500 and 750 kV sub-stations on maintenance crews, and means for their protection. CIGRE 1972, Report No. 23-06.*
- [64] *Kotter F.R. and Misakian, AC transmission line field measurements, NBS report prepared for U.S. Department of Energy, Report No. HCP/T6010/E1, 1977, available from NTIS, Springfield, Virginia 22161.*
- [65] *Kouwenhoven W.B., Langworthy O.R., Effect of electric shock, AIEE Journal, Vol. 49, 1930, pp. 381-384.*
- [66] *Kouwenhoven W.B., Knickerbocker G.G., AC shocks of varying parameters affecting the heart. AIEE Trans. Communications and Electronics, Vol. 78, 1959, pp. 163-169.*
- [67] *Kouwenhoven W.B. et al., Medical evaluation of men working in AC electric fields, IEEE, Vol. PAS-86, No. 4, April 1967, pp. 506-511.*
- [68] *Lawton R.A., New standard of electric field strength, IEEE, Vol. IM 19, No. 1, February 1970, p. 45.*
- [69] *Leardini T., Effects of electric fields on human beings and animals. ENEL Report L6/72-27, February 1975.*
- [70] *Le Bars H., Biological effects of an electric field on rats and rabbits, RGE, Special Issue, July 1976, pp. 91-97.*

- [71] Lee R.H., Electrical safety in industrial plants, *IEEE Trans.*, Vol. IGA-7, No. 1, Jan/Feb. 1971, pp. 10-16.
- [72] Malboysson E., Surveillance médicale du personnel exposé à l'action des champs électromagnétiques. *RGE*, No Spécial Juillet 1976, pp. 75-80.
- [73] Mamontov S.G., Ivanova L.N., Effects of low frequency electric fields on cell division in mouse tissues. *Bull. Exp. Biol. Med.*, 71, 1971, p. 192.
- [74] Mantell B., Untersuchungen über die Wirkung eines magnetischen Wechselfeldes 50 Hz auf den Menschen. *Dissertation*, Fribourg i Br., 1975.
- [75] McElhaney J.H., Stalnaker, R., Electric fields and bone loss of disuse. *J. Biomechanics* 1, 1968, pp. 47-72.
- [76] McKee G.W., Knievel D.P., Poznaniak D.T., Bankoske J.W., Effect of 60 Hz high-intensity electric fields on living plants, *IEEE Summer High Voltage Meeting*, 1977, No. F 77 698-4.
- [77] McKee G.W., Knievel D.P., Poznaniak D.T. and Bankoske J.W., Environmental impact of 60 Hz electric fields on the growth and development of plants. *2nd International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreux, Switzerland, June 1977.
- [78] Mihaileanu C. et al., Mesures des champs électriques dans le voisinage du matériel haute tension et détermination de leurs effets bio-physiologiques perturbateurs. *CIGRE* 36-08, 1978
- [79] Miller C.J., The measurements of electric fields in live line working, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-86, pp. 493-498, April 1967.
- [80] Mott C.W. et al., Conceptions de postes pour réseaux fonctionnant à des tensions de 765 et de 1 050 kV. *CIGRE*, 23-12, Paris, 1976.
- [81] Parekh H., Nasser E., The effects of geometric parameters on electric field and capacitance of stranded conductors above ground / A 75540-5 / *IEEE PES Summer Meeting*, 1975.
- [82] Parekh H., Selim M.S. Nasser E., Computation of electrical field and potential around stranded conductor by analytical method and comparison with charge simulation method. *Proc. IEE*, Vol. 122 No. 5, May 1975.
- [83] Poznaniak D.T., Bankoske J.W. and Mathew H.G., Simulation of transmission line ground-level gradient for biological studies on small plants and animals. *IEEE Summer High Voltage Meeting*, 1977, No. A 77 718-0.
- [84] Reitz J.R., Milford F.J., Foundations of electromagnetic theory. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1960, p. 52.
- [85] Riviere J., Gary C., Vergnaud J.C., Cabanes J., Action of magnetic and electric fields on the growth and rate of mutation of various micro-organisms. *Ann. Tech. Agric.*, 24-1, 1975, pp. 75-82.
- [86] Riviere J., Action des champs électriques et magnétiques sur la croissance et le taux des mutations de divers micro-organismes. *RGE*, No. Spécial juillet 1976, pp. 98-101.
- [87] Roberge P.F., Etude de l'état de santé des électriciens d'entretien préposés à l'entretien des postes 735 kV. de l'Hydro-Québec. Rapport Hydro-Québec, Canada, 1976.
- [88] Rupilius J.P., Untersuchungen über die Wirkung eines elektrischen und magnetischen 50 Hz-Wechselfeldes auf den Menschen. *Dissertation*, Fribourg i Br., 1976.
- [89] Sarma Maruvada P., Hylten-Cavallius N., Capacitance calculations for some basic high voltage electrode configurations, *IEEE*, Paper No. T 75 202-7.
- [90] Sarma Maruvada P., Hylten-Cavallius N., Trinh H.G. and de Vizio M., Effets du champ électrostatique dans le voisinage de lignes de transport d'énergie et dans les postes HT., *CIGRE* 36-04, 1976.
- [91] Sarma Maruvada P., Giao Trinh N., Dellaire R.D., Rivest N., Corona studies for bipolar HVDC transmission at voltages between ± 600 kV and $\pm 1\,200$ KV. Part I : Long term bipolar line studies - Part II : Special bipolar bipolar cage and bus studies. *IEEE Papers* F 79 683-4 and F-79 184-2.
- [92] Sazanova T.E., A physiological assessment of the work conditions in 400-500 kV switchyards. *Compendium of Scientific Work of the Institute of Labour Protection of the All-Union Council of Trades Unions*, No. 46, Moscow 1967, pp. 34-39.
- [93] Schneider K.H., Studinger H., Weck K.H., Steinbigler H., Utmischi D., Wiesinger J., Courants de déplacement vers le corps humain causés par le champ diélectrique sous les lignes de transport d'énergie.
- [94] Sebo S.A., Caldecott R., Scale model studies of substation electric fields ; paper F 78 692-6 presented at *IEEE PES, Summer Meeting*, Los Angeles, July 1978.
- [95] Silny J., Effet d'influence d'un champ électrique à 50 Hz sur l'organisme. *RGE* No. Spécial juillet 1976, pp. 81-90.

- [71] Lee R.H., *Electrical safety in industrial plants*. IEEE Trans., Vol. IGA-7, No. 1, Jan/Feb. 1971, pp. 10-16.
- [72] Malboysson E., *Medical control of men working within electromagnetic fields*. RGE, Special Issue, July 1976, pp. 75-80.
- [73] Mamontov S.G., Ivanova L.N., *Effects of low frequency electric fields on cell division in mouse tissues*. Bull. Exp. Biol. Med., 71, 1971, p. 192.
- [74] Mantell B., *Untersuchungen über die Wirkung eines magnetischen Wechselfeldes 50 Hz auf den Menschen*. Dissertation, Fribourg i Br., 1975.
- [75] McElhaney J.H., Stalnaker, R., *Electric fields and bone loss of disuse*. J. Biomechanics 1, 1968, pp. 47-72.
- [76] McKee G.W., Knievel D.P., Poznaniak D.T., Bankoske J.W., *Effect of 60 Hz high-intensity electric fields on living plants*, IEEE Summer High Voltage Meeting, 1977, No. F 77 698-4.
- [77] McKee G.W., Knievel D.P., Poznaniak D.T. and Bankoske J.W., *Environmental impact of 60 Hz electric fields on the growth and development of plants*. 2nd International Symposium on electromagnetic Compatibility, Montreux, Switzerland, June 1977.
- [78] Mihaileanu C. et al., *Electrical field measurement in the vicinity of H.V. equipment and assessment of its bio-physiological perturbing effects*. CIGRE 36-08, 1976.
- [79] Miller C.J., *The measurements of electric fields in live line working*, IEEE, Vol. PAS-86, pp. 493-498, April 1967.
- [80] Mott C.W. et al., *Design of substations for systems operating at 765 and 1050 kV*, Report 23-12, CIGRE, Paris. 1976.
- [81] Parekh H., Nasser E., *The effects of geometric parameters on electric field and capacitance of stranded conductors above ground / A 75540-5 / IEEE PES Summer Meeting, 1975*.
- [82] Parekh H., Selim M.S. Nasser E., *Computation of electrical field and potential around stranded conductor by analytical method and comparison with charge-simulation method*. Proc. IEE, Vol. 122 No. 5, May 1975.
- [83] Poznaniak D.T., Bankoske J.W. and Mathew H.G., *Simulation of transmission line ground-level gradient for biological studies on small plants and animals*. IEEE Summer High Voltage Meeting, 1977, No. A 77 718-0.
- [84] Reitz J.R., Milford F.J., *Foundations of electromagnetic theory*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1960, p. 52.
- [85] Riviere J., Gary C., Vergnaud J.C., Cabanes J., *Action of magnetic and electric fields on the growth and rate of mutation of various micro-organisms*. Ann. Tech. Agric., 24-1, 1975, pp. 75-82.
- [86] Rivière J., *Effect of magnetic and electric fields on the growth and rate of mutations of various micro-organisms*, RGE, Special Issue, July 1976, pp. 98-101.
- [87] Roberge P.F., *Etude de l'état de santé des électriciens d'entretien préposés à l'entretien des postes 735 kV. de l'Hydro-Québec*. Rapport Hydro-Québec, Canada, 1976.
- [88] Rupilius J.P., *Untersuchungen über die Wirkung eines elektrischen und magnetischen 50 Hz-Wechselfeldes auf den Menschen*. Dissertation, Fribourg i Br., 1976.
- [89] Sarma Maruvada P., Hylten-Cavallius N., *Capacitance calculations for some basic high voltage electrode configurations*, IEEE, Paper No. T 75 202-7.
- [90] Sarma Maruvada P., Hylten-Cavallius N., Trinh H.G. and de Vizio M., *Effects of the electrostatic field in the vicinity of power transmission lines and in HV sub-stations*. CIGRE Report 36-04, 1976.
- [91] Sarma Maruvada P., Giao Trinli N., Dellaire R.D., Rives N., *Corona studies for bipolar HVDC transmission at voltages between ± 600 kV and $\pm 1\,200$ KV. Part I : Long term bipolar line studies – Part II : Special bipolar bipolar cage and bus studies*.
- [92] Sazanova T.E., *A physiological assessment of the work conditions in 400-500 kV switchyards*. Compendium of Scientific Work of the Institute of Labour Protection of the All-Union Council of Trades Unions, No. 46, Moscow 1967, pp. 34-39.
- [93] Schneider K.H., Studinger H., Weck K.H., Steinbigler H., Utmischi D., Wiesinger J., *Displacement currents to the human body caused by the dielectric field under overhead lines*. CIGRE 36-04, 1974.
- [94] Sebo S.A., Caldecott R., *Scale model studies of substation electric fields ; paper F 78 692-6 presented at IEEE PES, Summer Meeting, Los Angeles, July 1978*.
- [95] Silny J., *Effect of a 50 Hz electric field influence on the organism*. RGE, Special Issue, July 1976, pp. 81-90.

- [96] Smith H.P., Effects of electric shock on man, *Electrical Times*, Vol. 141, Jan. 1962, pp. 85-88.
- [97] Singer H., Steinbigler, H., Weiss P., A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. *IEEE, PAS-93*, 1974, 1660-1667.
- [98] Singewald M.L., Langworthy D.R., Kouwenhoven W.B., Medical follow-up study of high-voltage working in A.C. electric fields. *Trans. IEEE, PAS 92-4*, July-August 1973, pp. 1307-1309.
- [99] Stopps G.J., Janischewskyj W., An epidemiological study of personnel working on A.C. Transmission Lines. *Canadian Electrical Association*, Vancouver, British Columbia, March 1979.
- [100] Strumza M.V., Influence on human health of the proximity of high-voltage electrical conductors ; results of an inquiry on "medical consumption". *Archives des Maladies Professionnelles de Médecine du Travail et de Sécurité Sociale*, Paris, 31-6, June 1970, pp. 269-276.
- [101] Strumza M.V., Prolonged exposure of the rat to a strong electric field. *Conseil Supérieur d'Hygiène Publique*, Paris, Meeting of 22nd June, 1971.
- [102] Takagi T., Muto T., Influence of the electrostatic induction due to 500 kV power transmission lines on the human body and on animals. SC 36, CIGRE, February 1971.
- [103] Thacher P.D., Fringing fields in Kerr cells, Sandia Report SLA-74-0302, 1974, See also *IEEE Trans. Elect. Insul.*, Vol. EI-11, pp. 40-50, June 1976.
- [104] Tranen J.D., Wilson G.L., Electrostatically induced voltages and currents on conducting objects under EHV transmission lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-90, March-April 1971, pp. 768-775.
- [105] Vitkovitch D., Van Nostrand D., *Field analysis experimental and computation method*. London 1966.
- [106] Vyalov A.M., Coll., On the problem of the effect of constant and variable magnetic fields on the human organism. *Occupational Pathology*, A.P. Shitskovan, Ed. Ministry of Health, Moscou, 1964, pp. 169-175.
- [107] Waibel R., Der Einfluss niederfrequenter elektrischer Felder auf Lebewesen. *Dissertation* 1975, Graz.
- [108] Watson J., de Haas W.C., Hause S.S., Effect of electric fields on growth rate of embryonic chick tibiae. *Nature*, 254 / 1975 / p. 331.
- [109] Weber E., *Electromagnetic Theory*/Dover, New York, 1969, p. 131 ff.
- [110] Epri Research Project RP 679, Effect of 60 Hz electric and magnetic fields on patients with implanted cardiac pacemakers, September 1975 to December 1975.
- [111] Transmission Line Reference Book – 345 kV and above, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1975.
- [112] IEEE, Study in the USSR of medical effects of electric fields in electric power systems, Special Publication No. 10, *IEEE PAS*, 1975.
- [113] Epri, Transmission Line Reference Book, 345 kV and above, Chapter 8, New York : Fred Weidner and Son, 1975.
- [114] Program Information Notice Electric Energy System/Energy Research and Development Administration, Washington D.C., Sept. 1976.
- [115] Reports of the activities of the medical study group of UNIPEDE ; UNIPEDE Congress, The Hague, 1973, Paper 90, UNIPEDE Congress, Vienna, 1976, Paper 90.
- [116] Epri Project RP 129, Ecological influence of electric fields, June 1974 to June 1977.
- [117] Biologic Effects of Electric and Magnetic fields Associated with Project Seafare/Report of the Committee on biosphere Effects of Extremely-Low Frequency Radiation, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1977.
- [118] Working Group 36-01, Report on results on electric field measurements made by members and guests of CIGRE WG 36-01 (Interference) Doc. 36-77, SC/20 SWD.
- [119] Electrostatic effects of overhead transmission lines. Part 1., Hazards and effects / A report prepared by the working group on electrostatic effects of transmission lines, General Systems Sub-Committee IEEE.
- [120] IEEE Committee Report "Measurement of electric and magnetic fields from AC power lines", Paper F 77 591-1, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-97, July-Aug 1978.

- [96] *Smith H.P., Effects of electric shock on man, Electrical Times. Vol. 141, Jan. 1962, pp. 85-88.*
- [97] *Singer H., Streinbigler H., Weiss P., A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. IEEE. Vol. PAS-93, 1974, 1660-1667.*
- [98] *Singewald M.L., Langworthy D.R., Kouwenhoven W.B., Medical follow-up study of high-voltage working in A.C. electric fields. IEEE, PAS 92-4, July-August 1973, pp. 1307-1309.*
- [99] *Stopps G.J., Janischewskyh W., An epidemiological study of Personnel working on A.C. Transmission Lines. Canadian Electrical Association, Vancouver, British Columbia, Mars 1979.*
- [100] *Strumza M.V., Influence on human health of the proximity of high-voltage electrical conductors ; results of an enquiry on "medical consumption". Archives des Maladies Professionnelles de Médecine du Travail et de Sécurité Sociale. Paris, 31-6, June 1970, pp. 269-276.*
- [101] *Strumza M.V., Prolonged exposure of the rat to a strong electric field. Conseil Supérieur d'Hygiène Publique, Paris, Meeting of 22nd June, 1971.*
- [102] *Takagi T., Muto T., Influence of the electrostatic induction due to 500 KV power transmission lines on the human body and on animals. SC 36 Materials, CIGRE, February 1971.*
- [103] *Thacher P.D., Fringing fields in Kerr cells, Sandia Report SLA-74-0302, 1974, See also IEEE Trans. Elect. Insul., Vol. EI-11, pp. 40-50, June 1976.*
- [104] *Tranen J.D., Wilson G.L., Electrostatically induced voltages and currents on conducting objects under EHV transmission lines. IEEE, Vol. PAS-90, March-April 1971, pp. 768-775.*
- [105] *Witkovitch D., Van Nostrand D., Field analysis experimental and computation method. London 1966.*
- [106] *Vyalov A.M., Coll., On the problem of the effect of constant and variable magnetic fields on the human organism. Occupational Pathology, A.P. Shitskov, Ed. Ministry of Health, Moscou, 1964, pp. 169-175.*
- [107] *Waibel R., Der Einfluss niederfrequenter elektrischer Felder auf Lebewesen. Dissertation 1975, Graz.*
- [108] *Watson J., de Haas W.C., Hause S.S., Effect of electric fields on growth rate of embryonic chick tibiae. Nature, 254 / 1975 / p. 331.*
- [109] *Weber E., Electromagnetic Theory/Dover, New York, 1969, p. 131 ff.*
- [110] *Epri Research Project RP 679, Effect of 60 Hz electric and magnetic fields on patients with implanted cardiac pacemakers, September 1975 to December 1975.*
- [111] *Transmission Line Reference Book – 345 KV and above, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1975.*
- [112] *IEEE, STUDY IN THE USSR of medical effects of electric fields in electric power systems, Special Publication No. 10, IEEE PAS, 1975.*
- [113] *Epri, Transmission Line Reference Book, 345 KV and above, Chapter 8, New York : Fred Weidner and Son, 1975.*
- [114] *Program Information Notice Electric Energy System/Energy Research and Development Administration, Washington D.C., Sept. 1976.*
- [115] *Reports of the activities of the medical study group of UNIPED ; UNIPED Congress, The Hague, 1973, Paper 90, UNIPED Congress, Vienna, 1976, Paper 90.*
- [116] *Epri Project RP 129, Ecological influence of electric fields, June 1974 to June 1977.*
- [117] *Biologic Effects of Electric and Magnetic fields Associated with Project Seafare/Report of the Committee on biosphere Effects of Extremely-Low Frequency Radiation, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1977.*
- [118] *Working Group 36-01, Report on results on electric field measurements made by members and guests of CIGRE WG 36-01 (Interference) Dec. 36-77, SC/20 SWD.*
- [119] *Electrostatic effects of overhead transmission lines. Part 1., Hazards and effect. / A report prepared by the working group on electrostatic effects of transmission lines, General Systems Sub-Committee IEEE.*
- [120] *IEEE Committee Report "Measurement of electric and magnetic fields from AC Power lines", Paper F 77 591-1, IEEE, PAS-97, July-Aug. 1978.*

- [121] **WG 36-01**, Mesures des champs électriques à proximité des ouvrages à haute tension. Résultats et enseignements. CIGRE. 36-07, 1978.
- [122] **IEEE Tutorial Course (n° 79 EH 0145-3-PWR)**, The Electrostatic and Electromagnetic effects of AC Transmission Lines.
- [123] **IEEE Committee Report**, "Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines – Practical Problems, Safeguards, and Methods of Calculation", Paper T 73 441-3, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, May/June, 1974, Vol. PAS-93, No. 3, p. 892.
- [124] **Organisation Mondiale de la Santé. Bureau Régional de l'Europe**, Manual on Health aspects of exposure to nonionizing radiation. Chapter on Electric and Magnetic Fields at Power frequencies, with particular reference to 50 and 60 Hz. (*sous presse*, 1980).

- [121] *WG 36-01, Measurements of electric field in the vicinity of HV installations – Results and lessons, CIGRE 36-07, 1978.*
- [122] *IEEE Tutorial Course (n° 79 EH 0145-3-pwr), The Electrostatic and Electromagnetic effects of AC Transmission Lines.*
- [123] *IEEE Committee Report, “Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines – Practical Problems, Safeguards, and Methods of Calculation”, Paper T 73 441-3, IEEE, Vol. PAS-93, No. 3, p. 892, June 1974.*
- [124] *Organisation Mondiale de la Santé. Bureau Régional de l'Europe, Manual on Health aspects of exposure to nonionizing radiation. Chapter on Electric and Magnetic Fields at Power frequencies, with particular reference to 50 and 60 Hz. (sous presse, 1980).*

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