

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
663**

Première édition
First edition
1980

**Conception des systèmes à courants porteurs
(à bande latérale unique) sur lignes d'énergie**

**Planning of (single-sideband) power line
carrier systems**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 663: 1980

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60 000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60 050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60 027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60 617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60 000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60 050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60 027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60 617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
663**

Première édition
First edition
1980

Conception des systèmes à courants porteurs (à bande latérale unique) sur lignes d'énergie

Planning of (single-sideband) power line carrier systems

© CEI 1980 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Introduction	6
2. Domaine d'application	6
3. Systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie (CPL)	6
3.1 Fréquences utilisées par les CPL	8
3.2 Applications	8
3.3 Supports de transmission et équipement de couplage	12
4. Etude des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie	20
4.1 Fréquences porteuses utilisées	20
4.2 Affaiblissement global	22
4.3 Bruit et perturbations	34
4.4 Rapport signal/bruit admissible	40
4.5 Equipements CPL	40
4.6 Affaiblissement admissible en ligne	50
4.7 Alimentation en énergie	52
5. Mesures	54
5.1 Mesures sur la voie de transmission globale	56
FIGURES	60
ANNEXE A — Remerciements	72
ANNEXE B — Références	74
ANNEXE C — Bibliographie	76
ANNEXE D — Exemple montrant une méthode de calcul pour un équipement CPL de 4 kHz	82

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Introduction	7
2. Scope	7
3. Power line carrier systems (PLC)	7
3.1 PLC frequencies	9
3.2 Applications	9
3.3 Communication paths and coupling equipment	13
4. Power line carrier system planning	21
4.1 Carrier frequencies	21
4.2 Overall loss	23
4.3 Noise and interference	35
4.4 Permissible signal/noise ratio	41
4.5 PLC terminals	41
4.6 Permissible line loss	51
4.7 Power supplies	53
5. Measurements	55
5.1 Measurements of total transmission path	57
FIGURES	60
APPENDIX A — Acknowledgements	73
APPENDIX B — References	75
APPENDIX C — Bibliography	76
APPENDIX D — Typical example showing the calculation for a 4 kHz PLC equipment	83

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONCEPTION DES SYSTÈMES À COURANTS PORTEURS (À BANDE LATÉRALE UNIQUE) SUR LIGNES D'ÉNERGIE

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été préparé par le Comité d'Etudes N° 57 de la CEI: Systèmes à courants porteurs pour lignes de transport d'énergie et équipement de téléconduite.

Il est destiné à être utilisé en tant que guide des règles de l'art pour la conception des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie et aussi en tant que guide pour l'utilisation des publications suivantes de la CEI:

Publications n^{os} 353: Circuits-bouchons.
358: Condensateurs de couplage et diviseurs capacitifs.
481: Groupes de couplage pour systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie.
495: Valeurs recommandées pour les caractéristiques d'entrée et de sortie des équipements à courants porteurs sur lignes d'énergie, à bande latérale unique.

Ce rapport a été préparé conformément à la décision prise lors de la réunion tenue à Athènes en 1972. Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Ljubljana en 1973, à Moscou en 1975, à Oslo en 1976 et à Stockholm en 1977. A la suite de cette dernière réunion, des informations complémentaires concernant les précautions à prendre pour éviter les perturbations avec les services aéronautiques furent ajoutées et un nouveau projet, document 57(Bureau Central)16, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en février 1978.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Afrique du Sud (République d')
Allemagne
Autriche
Belgique
Canada
Danemark
Egypte
Espagne

Etats-Unis d'Amérique
France
Italie
Japon
Norvège
Pologne
Roumanie
Royaume-Uni

Suède
Suisse
Tchécoslovaquie
Turquie
Union des Républiques
Socialistes Soviétiques
Yougoslavie

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PLANNING OF (SINGLE-SIDEBAND) POWER LINE CARRIER SYSTEMS

FOREWORD

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

PREFACE

This report has been prepared by IEC Technical Committee No. 57: Power Line Carrier Systems and Telecontrol Equipment.

It is intended to be used as a guide to good practice when designing power line carrier systems and also to the use of the following IEC publications:

Publications Nos. 353: Line Traps.
358: Coupling Capacitors and Capacitor Dividers.
481: Coupling Devices for Power Line Carrier Systems.
495: Recommended Values for Characteristic Input and Output Quantities of Single-sideband Power Line Carrier Terminals.

This report has been prepared in accordance with the decision taken at the meeting held in Athens in 1972. Drafts were discussed at the meetings held in Ljubljana in 1973, in Moscow in 1975, in Oslo in 1976 and in Stockholm in 1977. As a result of this latter meeting, additional information concerning the precautions to be taken to avoid interference with aeronautical services was added and a new draft, Document 57(Central Office)16, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in February 1978.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria
Belgium
Canada
Czechoslovakia
Denmark
Egypt
France
Germany

Italy
Japan
Norway
Poland
Romania
South Africa (Republic of)
Spain
Sweden

Switzerland
Turkey
Union of Soviet
Socialist Republics
United Kingdom
United States of America
Yugoslavia

CONCEPTION DES SYSTÈMES À COURANTS PORTEURS (À BANDE LATÉRALE UNIQUE) SUR LIGNES D'ÉNERGIE

1. Introduction

Le transport de l'énergie électrique des centres de production vers les centres de consommation et leur interconnexion a conduit, pour des raisons économiques et de sécurité, au développement de réseaux nationaux et internationaux complexes. De tels systèmes exigent de vastes moyens de télécommunication pour la téléphonie et la transmission de signaux tels que télégraphie, télémesure, téléconduite et signaux de protection, moyens qui s'étendent entre les centres de commande et les centres de production, les postes d'interconnexion et les points de livraison.

Les compagnies d'électricité utilisent de nombreux moyens de transmission pour leurs systèmes de communication, le choix de l'un d'entre eux dépendant de la largeur de bande nécessaire à l'information, de facteurs économiques et de divers facteurs techniques. Les compagnies d'électricité ont la propriété particulière de disposer physiquement d'un chemin très sûr, à savoir les lignes d'énergie qui relient les centres de production et de consommation et par l'intermédiaire desquelles des signaux peuvent être transmis au moyen d'une porteuse HF. Parmi les systèmes les plus utilisés par les compagnies d'électricité figurent, outre les courants porteurs sur lignes d'énergie, les circuits loués (compagnies publiques de téléphone, administrations nationales des télécommunications), les câbles souterrains et aériens et les liaisons radio appartenant au domaine privé.

Les réseaux téléphoniques par courants porteurs sur lignes d'énergie *ne sont pas, normalement, raccordés* au réseau téléphonique public et sont, par conséquent, considérés comme des *réseaux privés* (appartenant à l'entreprise).

2. Domaine d'application

Ce rapport a pour but de fournir des informations concernant les applications des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie aux réseaux de transport d'énergie électrique ainsi que des informations spécifiques sur les propriétés et les performances des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie et des équipements associés, informations utiles aux ingénieurs chargés de la conception des réseaux CPL, et également des informations sur les précautions à prendre pour s'assurer que le rayonnement des CPL ne perturbe pas d'autres services de radiocommunication.

La figure 1, page 60, illustre les publications de la CEI associées aux systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie.

Comme les systèmes à bande latérale unique (BLU) sont à l'heure actuelle d'un emploi quasi universel, ce rapport traite des systèmes à modulation d'amplitude de ce type; cependant, d'autres types, tels que la modulation d'amplitude à deux bandes latérales ou la modulation de fréquence, existent (voir paragraphe 4.5.1).

3. Systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie (CPL)

Cet article donne une brève description de l'utilisation des systèmes CPL ainsi que des méthodes fondamentales de couplage. Il existe des variantes aux méthodes fondamentales

PLANNING OF (SINGLE-SIDEBAND) POWER LINE CARRIER SYSTEMS

1. Introduction

The transportation of electrical energy from the production plants to the load centres and the interconnection of plants for reasons of economy and security has resulted in the development of complex national and international networks. Such systems require extensive telecommunications facilities for speech and data such as telegraph, telemetering, telecontrol and protection signals extending between control centres and generating stations, switching stations and supply points.

The electricity industries use a variety of transmission media for their communication systems depending on the required information bandwidth, the economic and various technical factors. The electricity industries are unique in that they have available to them very reliable physical paths viz. – the power lines which interconnect the points of generation and supply and between which the signals can be transmitted by means of an HF carrier. Amongst the systems in extensive use in addition to power line carriers are rented circuits, (public telephone company, national telecommunications authority) buried and overhead cables, and privately owned radio links.

Power line carrier telephone systems are *not normally interconnected* with the public telephone network and are therefore considered as *private* (utility-owned) *systems*.

2. Scope

This report is intended to provide information regarding the application of power line carrier systems to electricity supply networks and to provide specific information on the properties and the performance of power line carrier (PLC) systems and associated equipment useful to the systems planning engineer, and on the precautions to be taken in order to ensure that PLC radiations do not interfere with other radiocommunication services.

Figure 1, page 60, illustrates the associated IEC standards for PLC-Systems.

As single-sideband (SSB) systems are now almost universal, the report is concerned with amplitude modulated systems of this type, however other types of system such as double-sideband and frequency modulated systems exist as described in Sub-clause 4.5.1.

3. Power line carrier systems (PLC)

This clause gives a brief description of the use of PLC systems together with the basic means of coupling. Variations of the basic methods outlined exist. Consideration of high voltage and

décrites. Ce sont les problèmes techniques de transport d'énergie et de télécommunication, les considérations économiques et d'autres paramètres qui indiqueront quelle méthode employer pour un cas donné.

3.1 *Fréquences utilisées par les CPL*

La gamme des fréquences convenant à la transmission conventionnelle par courants porteurs sur lignes s'étend de 30 kHz à 500 kHz environ, quelquefois jusqu'à 1 MHz; la limite inférieure est fixée par les limitations techniques et le coût du dispositif de couplage, la limite supérieure par l'affaiblissement en ligne.

Pour une transmission sur câble de terre isolé, la gamme des fréquences s'étend de 5 kHz à 500 kHz environ.

Les systèmes CPL ne doivent pas perturber les services de radiocommunication prioritaires dans les bandes de fréquence fixées par le Règlement des radiocommunications de l'UIT (Union internationale des télécommunications).

La gamme des fréquences effectivement utilisables dans un pays donné doit tenir compte des besoins de diverses installations radio et d'installations de radiodiffusion, y compris les systèmes de navigation aéronautique ou maritime; elle doit également tenir compte de toute restriction et de toute réglementation valables sur un plan local ou national, qui assurent à ces systèmes la protection appropriée.

3.2 *Utilisations*

Les systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie servent essentiellement à acheminer:

- des informations analogiques comme la téléphonie, et/ou
- des informations analogiques ou numériques appelées «signaux» (télégraphie, télémessure, téléconduite, téléprotection, données, etc.).

Les «signaux», suivant les besoins, sont transmis avec des rapidités de modulation comprises entre 50 et 1200 bauds (Bd), essentiellement par canaux télégraphiques à fréquences vocales situés dans la bande téléphonique ou superposés à une bande téléphonique réduite (fonctionnement en «téléphonie plus signaux»), mais la manipulation directe de la porteuse peut également être employée.

3.2.1 *Téléphonie*

Les systèmes CPL peuvent être utilisés pour assurer des conversations téléphoniques allant des systèmes à lignes partagées exploités en simplex aux réseaux intégrés automatiques privés, quelquefois équipés de priorités pour des abonnés importants pour l'exploitation.

La connexion automatique en quatre fils de liaisons en série est la pratique normale.

Compte tenu de la longueur et du nombre de sections exploitées en série dans ces réseaux privés, une bande de fréquences de parole effectivement transmise de 300 Hz à 2400 Hz peut être considérée comme convenable pour la qualité de service requise. Cependant, afin de pouvoir disposer de plus de canaux de signaux superposés, ou de canaux plus larges, certaines compagnies d'électricité ramènent la limite supérieure à 2000 Hz environ.

3.2.2 *Télégraphie et fac-similé*

Il existe également des réseaux privés de télégraphie (téléimprimeur) empruntant les circuits CPL. Ces applications peuvent également inclure la transmission de fac-similés.

telecommunication engineering, economic and other factors will dictate which method is employed in a given case.

3.1 *PLC frequencies*

The range of frequencies suitable for conventional power line carrier transmission extends from about 30 kHz to 500 kHz and sometimes up to 1 MHz, the lower limit being fixed by the limitations and cost of coupling equipment, the upper limit by line attenuation.

For insulated earth wire transmission, the range of frequencies extends from about 5 kHz to 500 kHz.

PLC systems must not cause interference to priority radiocommunication services within the frequency bands laid down by the ITU Radio Regulations (International Telecommunication Union).

The actual range of frequencies available for use in a specific country must take account of the needs of various radio services and broadcasting services, including aeronautical and maritime navigation systems, together with any local or national restrictions or regulations affording them the appropriate protection.

3.2 *Applications*

Power line carrier systems are principally used to carry:

- either analogue information in the form of speech, and/or
- digital or analogue information, termed “signals” representing telegraph, telemetering, telecontrol, teleprotection, data, etc.

“Signals” are, depending upon requirements, transmitted at modulation rates from 50 to 1200 bauds (Bd), mainly by voice frequency telegraph channels (VFT) located in the speech band or superimposed on a reduced speech band (“speech-plus signals” operation), but direct keying of the carrier may also be employed.

3.2.1 *Telephony*

PLC systems can be used to provide speech facilities ranging from a simplex party line system to integrated private automatic subscriber trunk dialling networks, sometimes equipped with priority facilities for operationally important subscribers.

Four-wire tandem switching is normal practice.

Considering the size and the number of tandem-operated trunk sections in such private networks an effectively transmitted speech frequency band of 300 Hz to 2400 Hz may be regarded as desirable for the required grade of service. However, in order to accommodate even more superimposed signalling channels or wider band channels, some authorities reduce the upper limit further to about 2000 Hz which would of course reduce the speech performance but this may still be considered to be acceptable in practice.

3.2.2 *Telegraphy and facsimile*

Private telegraph (teleprinters) facilities are also operated over PLC circuits. Such applications may also include facsimile transmission.

Certaines compagnies d'électricité préfèrent l'usage du téléimprimeur pour la conduite opérationnelle du réseau parce qu'un exemplaire écrit de l'information échangée est obtenu aux deux extrémités, celle qui donne l'ordre et celle qui l'exécute. On utilise des circuits point à point et des circuits commutés.

La rapidité de modulation est généralement de 50 Bd ou 75 Bd suivant les téléimprimeurs utilisés; le fac-similé peut nécessiter des rapidités plus élevées.

D'une façon générale, les canaux télégraphiques à fréquences vocales doivent être conformes aux recommandations du C.C.I.T.T. qui les concernent (C.C.I.T.T. = Comité consultatif international télégraphique et téléphonique).

3.2.3 *Téléconduite et télésignalisation*

Dans le but de fournir des moyens de téléconduite et de télésignalisation, les systèmes CPL utilisent généralement des signaux codés afin d'obtenir un très haut degré de sécurité et d'éviter des fonctionnements intempestifs ou défaillants.

La vitesse de transmission pour des systèmes simples peut descendre jusqu'à 50 Bd mais, pour des systèmes complexes multipoints à temps partagé, des débits binaires allant jusqu'à 2400 bits/s ou plus sont utilisés.

D'une façon générale, les canaux télégraphiques à fréquences vocales doivent être conformes aux recommandations du C.C.I.T.T. qui les concernent.

3.2.4 *Téléprotection*

Dans le but d'éviter des dangers pour les vies humaines et des dégâts aux installations ainsi que pour assurer une continuité d'alimentation aussi bonne que possible, tout réseau de transport d'énergie doit être protégé contre les défauts. Pour obtenir ce résultat, des signaux à grande vitesse sont transmis entre les extrémités des lignes.

D'une façon générale, trois types de systèmes de protection sont utilisés:

- a) Déclenchement direct du disjoncteur à partir du dispositif de protection situé à l'autre extrémité de la ligne.
- b) Transmission d'une information de type binaire des relais de protection situés à l'une des extrémités de la ligne vers ceux de l'autre extrémité, pour obtenir par exemple une fonction de verrouillage ou d'accélération.
- c) Transmission d'une information de type analogique entre les dispositifs de protection situés à chacune des extrémités de la ligne pour commander le fonctionnement des relais.

Les signaux de protection doivent pouvoir être reçus pendant que le défaut affecte le réseau, ce qui peut donner lieu à une augmentation du niveau de bruit et de l'affaiblissement sur la voie de télécommunication à l'instant de la transmission du signal.

Le temps de propagation global maximal admissible d'un canal de téléprotection est très faible, couramment inférieur à 50 ms.

L'équipement de téléprotection peut utiliser un canal parmi d'autres d'un réseau de télécommunication (par exemple un canal harmonique d'un système CPL à usage mixte) ou il peut nécessiter la totalité d'un canal aux fréquences porteuses. Le choix dépend de la sécurité requise, du temps alloué au fonctionnement ainsi que de considérations économiques et/ou de largeur de bande disponible.

Les équipements de téléprotection sont caractérisés par le temps limité disponible pour la transmission et l'identification du signal de téléprotection qui est transmis très rarement (quelques fois par an) et à des instants quelconques. Ils exigent toujours d'avoir une très

Some electricity industries favour the teleprinter in operational management due to the fact that hard copies of the information exchanged are produced both at the command and at the execute levels. Both point-to-point and switched circuits are used.

The modulation rate is usually 50 Bd or 75 Bd, depending on the teleprinters used; facsimile may require higher rates.

In general, VFT channels should conform to the appropriate C.C.I.T.T. Recommendations. (C.C.I.T.T. = International Telephone and Telegraph Consultative Committee).

3.2.3 *Telecontrol and teleindication*

For the purpose of providing telecontrol and teleindication facilities, PLC systems generally use coded signals in order to achieve a high degree of security over the PLC systems and to avoid maloperation or loss of information.

The transmission speed for single systems may be as low as 50 Bd but in complex multi-point time-shared systems bit rates of up to 2400 bits/s or more are in use.

In general, VFT channels should conform to the appropriate C.C.I.T.T. Recommendations.

3.2.4 *Teleprotection*

In order to prevent danger to life, damage to plant, and also to ensure the best possible continuity of supply, a power system must be protected against faults. In order to do this, high speed signals are transmitted between the ends of a line.

Three types of protection system are in general use:

- a) For direct tripping of a circuit-breaker from a protection device at the other end of the line.
- b) For transferring discrete information from the protection relays at one end of the line to those at the other, for example to perform an accelerating or blocking function.
- c) For transmitting analogue information between the protective devices at each end of the line to control the operation of the relays.

Protection signalling must be capable of being received during power system fault conditions which may introduce additional noise and attenuation in the circuit at time of transmission.

The permissible maximum overall signalling time of a protection channel is quite small, typically less than 50 ms.

Protection equipment may share a channel in the utility telecommunications system (e.g. a VF channel in a multipurpose PLC system), or may require a complete carrier frequency channel. The choice will depend on the security required, time for operation and on economic and/or bandwidth availability considerations.

Protection signalling equipment is characterized by the limited time available for the transmission and the recognition of the teleprotection signal transmitted very infrequently (a few times per annum) at unpredictable times. It invariably requires an extremely high

grande probabilité d'exécuter une opération «volontaire» et une très faible probabilité d'exercer une action «non volontaire» (par exemple un déclenchement intempestif dû au bruit) ou un actionnement «défaillant» (retard ou absence de déclenchement ou de verrouillage, suivant le cas, lorsqu'il était nécessaire de le faire).

Dans certains systèmes CPL (utilisés pour la téléprotection), le signal à fréquence porteuse est normalement au repos et il n'est émis qu'à de rares instants et pendant un temps court lorsqu'il faut transmettre un signal de protection. Souvent, on incorpore une horloge grâce à laquelle un bref signal d'essai est transmis d'une extrémité à l'autre à des intervalles réguliers (30 min par exemple) pour vérifier le bon état des équipements.

Pour les problèmes d'attribution de fréquences, là où il faut se préoccuper des risques d'éventuelles perturbations mutuelles entre émetteurs CPL, il est évident que des considérations différentes s'appliquent aux systèmes normalement au repos par opposition aux systèmes CPL conventionnels pour lesquels la téléphonie et les autres signaux doivent être émis de façon permanente.

Pour les systèmes CPL comprenant des signaux de protection, il est d'usage courant, dans certains pays, de mettre hors service la voie téléphonie et tous les canaux superposés (ou quelques-uns seulement) lorsque les signaux de protection sont transmis, si bien que le niveau de ces derniers peut être renforcé en conséquence.

3.3 *Supports de transmission et équipement de couplage*

Pour pouvoir utiliser les conducteurs d'une ligne à haute tension à des fins de télécommunication, il faut avoir un dispositif de couplage qui, quel qu'il soit, permette d'injecter les courants porteurs à haute fréquence sans pertes excessives et, en même temps, permette de découpler l'équipement de transmission de la ligne d'énergie dans la mesure où la tension du réseau et les surtensions dues aux manœuvres ou à la foudre sont en cause. Ce dispositif de couplage est également nécessaire pour diminuer les pertes dues à l'impédance du poste vue en parallèle et pour rendre l'impédance aux fréquences porteuses raisonnablement indépendante du schéma du poste.

La valeur à prendre pour l'impédance de la ligne pour la conception du dispositif de couplage est, dans le cas où les câbles de phase de la ligne sont formés d'un seul conducteur, de l'ordre de 400 Ω pour un couplage phase-terre et de l'ordre de 600 Ω pour un couplage interphase. Si les câbles sont formés d'un faisceau de conducteurs, les valeurs à prendre sont respectivement 300 Ω et 500 Ω .

Il convient de remarquer que les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes valables pour toute la gamme des fréquences porteuses et pour toutes les terminaisons possibles des phases non couplées. Par conséquent, les valeurs réelles peuvent être considérablement différentes de la valeur moyenne; mais ce fait n'est, en général, pas important du point de vue de la conception du système car il augmente simplement l'affaiblissement global de quelques dixièmes de décibel, à moins qu'une désadaptation trop importante ne provoque de l'intermodulation dans l'amplificateur de sortie.

Un dispositif de couplage comprend essentiellement:

- a) Un «condensateur de couplage ou un transformateur condensateur de tension (TCT)» présentant des propriétés de tenue en tension convenables, qui est placé entre l'équipement à courants porteurs et le conducteur à haute tension. Sa valeur est de l'ordre de 1000 pF à 10000 pF.

Une certaine attention doit être portée à son choix afin d'assurer le meilleur rapport entre le coût et la bande passante nécessaire. On se reportera également à la Publication 358 de la CEI: Condensateurs de couplage et diviseurs capacitifs.

probability of achieving “wanted” operation, and an extremely low probability of “unwanted” action (e.g. false tripping due to noise) and “missing” action (delay or total failure to trip or to block, whichever is appropriate, when required to do so).

In certain PLC systems (used for teleprotection) the carrier signal is normally quiescent and it is only sent for the brief and infrequent time when a protection signal is required to be transmitted. Often a clock test facility is included whereby a brief test signal is sent through the complete system at regular intervals of, say, 30 min to prove that the equipment is healthy.

In questions of frequency assignment where the risks of possible interference from PLC transmitters require to be considered, it is clear that different considerations apply to such quiescent carrier systems as opposed to the conventional PLC systems in which speech and other signals necessitate continuous transmission of carrier.

For PLC systems when protection signals are included, it has become common practice in some parts of the world to disable the speech circuit and all or some predetermined superimposed channels whilst active protection signals are transmitted so that the level of the protection signal may be boosted accordingly.

3.3 *Communication paths and coupling equipment*

To enable the conductors of a high-voltage line to be employed for communication purposes, some form of coupling equipment is required which will permit the injection of the high-frequency carrier signal without undue loss and at the same time de-couple the communication equipment from the power line in so far as the power system power-frequency voltage, switching surges, lightning surges etc. are concerned. The coupling system is also required to minimize the shunt loss caused by the substation equipment, and to render the impedance at carrier frequencies reasonably independent of switching conditions at the substation.

The value of line impedance to be assumed for designing the coupling system is, in the case of single conductor phase wires, about 400 Ω for phase-to-earth coupling and about 600 Ω for phase-to-phase coupling. If the phase conductors are of the bundle type, values of 300 Ω and 500 Ω respectively are assumed.

It should be noted that the figures quoted are mean values calculated over the entire frequency range and for all possible terminations of the uncoupled phases. Thus the actual values may differ considerably from the mean but this is generally not significant from the system design point of view, as it only increases the overall loss by some tenths of a decibel, unless excessive mismatch causes intermodulation in the final amplifier.

Essentially coupling equipment comprises:

- a) A coupling capacitor or capacitor voltage transformer (CVT) of suitable voltage withstand properties which is inserted between the coupling device and the high-voltage conductor. Values are of the order of 1000 pF to 10000 pF.

Consideration must be given to the choice of the coupler design to ensure an optimum selection based on capacitor cost versus bandwidth requirements. Reference should also be made to IEC Publication 358: Coupling Capacitors and Capacitor Dividers.

- b) Un dispositif connu sous le nom de «circuit-bouchon» qui se trouve placé en série dans la ligne d'énergie entre le point de raccordement du condensateur de couplage et le poste électrique; il peut également se trouver placé aux dérivations situées sur le parcours de la ligne. Un circuit-bouchon est essentiellement constitué d'une inductance dimensionnée pour écouler le courant de la ligne, d'un dispositif d'accord et d'un dispositif de protection. La valeur de l'inductance du circuit-bouchon est de l'ordre de 0,1 mH à 2,0 mH. La figure 4, page 63, donne des valeurs courantes de largeurs de bande de blocage. On se reportera également à la Publication 353 de la CEI: Circuits-bouchons.

Les dispositifs d'accord, utilisés pour améliorer l'efficacité du blocage du circuit-bouchon, peuvent être de différents types. Ceux à bande étroite assurent une grande impédance de blocage pour un canal de la gamme des fréquences porteuses; ceux à double bande présentent une grande impédance de blocage pour deux canaux non adjacents; enfin, ceux à large bande présentent une impédance de blocage pour plusieurs canaux. Ce dernier type est recommandé lorsque l'accord est fait pour obtenir une composante résistive minimale donnée.

- c) Un «groupe de couplage» qui est placé entre la borne basse tension du condensateur de couplage et le circuit de raccordement à l'équipement à courants porteurs; il comprend une bobine de drainage, des parafoudres et un transformateur d'adaptation qui, dans certains équipements, est également conçu comme une bobine de drainage pour le courant à la fréquence du réseau. Les figures 2 et 3, pages 61 et 62, donnent des valeurs courantes de largeurs de bande de couplage. Les caractéristiques exigées pour les groupes de couplage sont couvertes par la Publication 481 de la CEI: Groupes de couplage pour systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie.

Le rôle de la bobine de drainage est de présenter une faible impédance à la fréquence du réseau et une grande impédance aux fréquences porteuses. Elle est conçue pour écouler à la terre le courant à la fréquence du réseau qui traverse le condensateur de couplage et par conséquent pour limiter le potentiel de la borne basse tension de celui-ci dans l'intérêt de la sécurité. Etant donné que le groupe de couplage est placé entre la borne basse tension du condensateur de couplage et la terre, un sectionneur de mise à la terre (couteau à la terre) est prévu; il permet d'assurer la mise à la terre directe du condensateur de couplage pendant la maintenance ou la mise en service.

Des dispositions réglementaires de sécurité peuvent imposer des procédures différentes pour le fonctionnement de ce sectionneur de mise à la terre; les dispositions les plus courantes sont les suivantes:

Sectionneur mettant à la terre le condensateur de couplage lorsque le capot du groupe de couplage est ouvert.

Sectionneur manuel à verrouillage ne permettant pas de retirer le capot avant qu'il ne soit en position «mise à la terre».

Sectionneur de mise à la terre manœuvré à l'aide d'une perche et muni d'une plaque convenable pour avertir du danger.

Quelle que soit la disposition utilisée, il est recommandé que l'indication de la position «mise à la terre» du sectionneur soit clairement visible.

- d) Un «circuit de raccordement» placé entre les bornes secondaires du groupe de couplage et l'équipement à courants porteurs.

Ce raccordement peut être effectué soit à l'aide d'un câble symétrique, soit à l'aide d'un câble coaxial selon l'impédance de l'équipement à courants porteurs.

Les valeurs d'impédance couramment utilisées sont 150 Ω pour le câble symétrique et 75 Ω pour le câble coaxial.

- b) A device known as a “line trap” (or “wave trap”) which is connected in series with the power line between the point of connection of the coupling capacitor and the substation, or at the line trap. Basically the line trap consists of a choke coil, rated to carry the full line current, a tuning and protective device. The value of line trap inductance is of the order of 0.1 mH to 2.0 mH. Typical blocking bandwidths are shown in Figure 4, page 63. Reference should also be made to IEC Publication 353: Line Traps.

The tuning devices, used to improve the blocking efficiency of line traps, may be of different types. Those with narrow-band characteristics ensure a high blocking impedance for one carrier frequency (CF) channel. Those with double-band characteristics present a high blocking impedance for two non-adjacent CF channels, and those with broad-band characteristics present a blocking impedance for several CF channels. The latter is recommended when tuned for a specified minimum resistive component.

- c) A “coupling device” which is inserted between the low-voltage terminal of the coupling capacitor and the CF connection to the carrier terminal and comprises a drain coil, surge arresters, and a matching transformer, which in some equipment is also designed as a drain coil to the power-frequency current. Typical coupling bandwidths are shown in Figures 2 and 3, pages 61 and 62. The requirements for coupling devices are covered by IEC Publication 481: Coupling Devices for Power Line Carrier Systems.

The function of the drain coil is to offer a low impedance at power frequency and high impedance at carrier frequencies. It is designed to provide a path to earth for the power frequency current through the capacitor and so limit the potential of the capacitor terminal at the point of connection to the carrier equipment, in the interests of safety. As the coupling device is inserted between the low-voltage terminal of the coupling capacitor and earth, an earthing switch (blade earthed) is provided to ensure direct earthing of the coupling capacitor during maintenance or commissioning.

Statutory safety rules may require different procedures for the operation of this earthing switch and typical arrangements are as follows:

- An earthing switch which earths the capacitor when the coupling device housing is opened.
- A manually-operated switch interlock which does not allow the cover to be removed before the switch is operated to the earthed position.
- A pole-operated earthing switch with suitable warning notice.

Whichever arrangement is used, it is recommended that an indication of the earthed position of the earthing switch should be clearly visible.

- d) A “connecting cable” inserted between the secondary terminals of the coupling device and the carrier terminal.

This connection may be made with either a balanced or unbalanced (coaxial) cable depending on the impedance of the carrier terminal.

Commonly used values for the impedance of the cable are 150 Ω for the balanced cable and 75 Ω for the coaxial type.

Lorsqu'on utilise un câble coaxial, on emploie différentes méthodes pour la mise à la terre du conducteur extérieur.

Pour les câbles contenus entièrement dans l'emprise du même réseau de terre, deux méthodes sont utilisées: mise à la terre du conducteur extérieur du câble coaxial aux deux extrémités ou côté équipement à courants porteurs seulement.

La première méthode assure la sécurité du personnel d'entretien puisqu'il n'y aura jamais de différences de potentiel entre la terre locale et le conducteur extérieur du câble. Evidemment, au moment des défauts affectant le réseau d'énergie, il pourra y avoir circulation de courant à la fréquence du réseau dans le conducteur extérieur et dans le conducteur intérieur du câble. Si cela pose des problèmes, par exemple à cause d'enroulements et de bobines à noyau magnétique, on peut utiliser la mise à la terre à une seule extrémité. Cette méthode, qui élimine la circulation de courant à la fréquence du réseau, peut par ailleurs provoquer l'apparition de potentiels élevés sur les enroulements du transformateur de couplage qui devra être conçu pour cet usage. Dès lors, le personnel d'entretien devra prendre des précautions pour se prémunir contre d'éventuelles différences de potentiel entre le conducteur extérieur du câble et la terre locale au moment des défauts sur le réseau.

Lorsque le groupe de couplage et l'équipement à courants porteurs ne sont pas reliés au même réseau de terre, les différences de potentiel entre les terres peuvent être élevées au moment des défauts et la circulation de courant dans le conducteur extérieur du câble coaxial peut être dangereuse. Il est par conséquent courant, dans ce cas, de ne mettre le conducteur extérieur du câble à la terre qu'à une seule extrémité, côté équipement à courants porteurs. Des problèmes du même genre peuvent se poser dans le cas de câbles armés sauf en ce qui concerne les problèmes liés aux bobines et enroulements, et les mêmes considérations s'appliquent. Certains des problèmes mentionnés ci-dessus peuvent être évités en utilisant des câbles symétriques.

Suivant le type de couplage, les groupes de couplage sont du type phase-terre ou interphase.

Dans ce dernier cas, le couplage peut être effectué soit à l'aide d'un seul dispositif interphase, soit à l'aide de deux dispositifs phase-terre correctement reliés. Si le premier des schémas est utilisé, la distance entre les bornes basse tension des condensateurs et les groupes de couplage est en général plus grande que pour le second schéma, ce qui donne une plus grande probabilité de dégâts ou de coupures. En conséquence, afin d'obtenir une plus grande sécurité, on peut utiliser, pour un couplage interphase, deux dispositifs de couplage phase-terre reliés entre eux côté basse tension du transformateur d'adaptation.

3.3.1 *Couplage phase-terre*

Pour ce type de couplage, l'équipement à courants porteurs est raccordé entre un conducteur de phase et la terre, comme le montre la figure 1, page 60. On n'a besoin que d'un seul condensateur de couplage et d'un seul circuit-bouchon en chaque point de couplage, si bien que cette méthode est économique du point de vue dispositif de couplage; mais elle donne normalement un affaiblissement plus grand que le couplage interphase et une sécurité moins grande en cas de défaut à la terre sur la phase utilisée pour le couplage. Il faut également noter que, bien que le couplage soit effectué entre une phase et la terre, en réalité la propagation met en jeu les deux autres phases d'une façon complexe.

A cause de ses avantages économiques, le couplage phase-terre peut être utilisé là où une grande sécurité en présence de défauts n'est pas fondamentale.

3.3.2 *Couplage interphase*

Pour ce type de couplage, deux condensateurs de couplage et deux circuits-bouchons sont nécessaires en chaque point de couplage, si bien que le coût du dispositif de couplage est

When coaxial cable is employed, different methods of earthing the screen may be used.

For cables lying within the same earth mesh, two methods are used; earthing the screen of the coaxial cable at both ends or at the carrier equipment end only.

The first method ensures the safety of maintenance personnel, as there will never be potential differences between local earth and the cable screen. Obviously, during faults, this connection may allow power-frequency currents to circulate in the screen and in the "hot" conductor. If this causes secondary problems, for example with coils and windings having magnetic cores, earthing at one terminal only may be used. This practice, whilst eliminating power-frequency current circulation, may cause high voltage across the windings of the coupling transformer which will need to be designed for this duty. Consequently, maintenance personnel will need to take precautions against the possibility of potential differences, during faults, between cable screen and local earth.

When the coupling device and carrier terminal are not part of the same earth mesh, earth potential differences may be high in the case of a fault and circulating currents in the screen of the coaxial cable may be dangerous. Therefore it is common practice in this instance to earth only one side of the screen at the carrier equipment end. Similar problems can arise in the case of armoured cables, except that secondary problems are unlikely to occur, and the same considerations apply. By the use of balanced cables some of the above problems can be avoided.

With regard to the type of coupling used, coupling devices may be of the phase-to-earth, or of the phase-to-phase types.

In the case of the latter, the coupling may be made with either a single phase-to-phase device or with two phase-to-earth devices properly connected. If the first arrangement is used, the distance between the low-voltage terminals of the capacitors and the coupling device is generally greater than with the second arrangement with a greater possibility of damage and interruption. Consequently, in order to achieve higher security, use of phase-to-phase coupling should be made with two phase-to-earth units, with the connection between them made on the secondary side of the matching transformer.

3.3.1 *Phase-to-earth coupling*

In this type of coupling the carrier equipment is connected between one phase conductor and earth as shown in Figure 1, page 60. Only one coupling capacitor and one line trap is required at each coupling point, so that this system offers economies in coupling equipment but it normally results in higher attenuation than phase-to-phase coupling and less security in the event of an earth fault on the coupled phase. It is to be noted that although the coupling takes place between one phase and earth, the actual transmission involves the two remaining phase conductors in a complex manner.

Because of the economic advantages, phase-to-earth coupling may be employed where high reliability in the presence of line faults is not essential.

3.3.2 *Phase-to-phase coupling*

In this case two coupling capacitors and two line traps are required at each coupling point, so the cost of the coupling equipment will be approximately twice that of phase-to-earth

environ deux fois celui du couplage phase-terre. Cependant, le couplage interphase présente un certain nombre d'avantages importants, parmi lesquels un affaiblissement moins élevé, une meilleure sécurité vis-à-vis des défaillances du système de télécommunication à cause des défauts en ligne et moins de perturbations, à la fois émises et reçues.

Comme environ 80% de tous les défauts en ligne sont monophasés, on peut espérer que cette disposition donne une plus grande sécurité.

3.3.3 *Couplage entre ternes*

Lorsque deux lignes à haute tension parallèles sont portées sans discontinuité par les mêmes pylônes, l'utilisation d'une phase de chacun des ternes peut fournir l'équivalent d'un couplage interphase sur une ligne à un seul terna ou l'utilisation de deux phases de chaque terna peut fournir un type de couplage interphase différentiel. Avec ce type de couplage, la transmission est maintenue même si l'un des ternes est consigné et mis à la terre.

3.3.4 *Couplage au câble de terre isolé*

On a l'habitude d'équiper les lignes à haute tension, en particulier au-dessus de 110 kV, d'un ou de deux câbles de terre situés au-dessus des conducteurs de phases. Ceux-ci ont pour but essentiel de protéger les lignes contre les coups de foudre, mais ils servent également à réduire les tensions de pas qui sans eux existeraient autour des pylônes et des postes électriques en cas de défauts à la terre sur les lignes. En outre, les câbles de terre contribuent à réduire les effets inducteurs sur les circuits de télécommunication proches pendant les défauts à la terre sur les lignes d'énergie.

Les câbles de terre sont normalement en contact galvanique avec les pylônes de la ligne, mais on sait que leur efficacité en tant que dispositif protecteur contre la foudre n'est pas affectée s'ils sont isolés des pylônes, les isolateurs étant court-circuités par des parafoudres dimensionnés pour amorcer de 15 kV à 30 kV environ. Ce fait a conduit à l'utilisation des câbles de terre isolés à des fins de télécommunication, l'avantage essentiel étant les économies réalisées sur le dispositif de couplage; en effet, bien qu'il soit encore nécessaire d'avoir des condensateurs de couplage et des circuits-bouchons, ceux-ci n'ont pas besoin d'être dimensionnés pour la tension nominale ou le courant nominal de la ligne d'énergie.

Cette méthode a, cependant, un certain nombre d'inconvénients:

- a) L'affaiblissement aux fréquences porteuses est en général nettement plus grand que celui obtenu avec les conducteurs de la ligne eux-mêmes lorsque des câbles multibrins en acier sont utilisés pour le câble de terre. Cependant, là où des conducteurs mixtes (acier-aluminium) sont utilisés pour le (ou les) câble(s) de terre, l'affaiblissement est plus acceptable.
- b) La nécessité d'isoler les câbles de terre à chaque pylône et aux extrémités augmente le coût, si bien que, pour les lignes les plus longues, le supplément de prix de revient peut dépasser les économies réalisées sur les dispositifs de couplage.
- c) L'efficacité des câbles de terre dans leur rôle de protection en cas de défauts sur la ligne est dans une certaine mesure réduite par l'isolement à chaque pylône.

A cause de ces inconvénients, l'utilisation des câbles de terre isolés pour les télécommunications à courants porteurs n'a eu, jusqu'à maintenant, que des applications limitées.

3.3.5 *Couplage aux câbles d'énergie*

D'une façon générale, le couplage des équipements à courants porteurs aux câbles d'énergie est réalisé de la même façon que pour les lignes aériennes, aussi bien dans le cas d'un câble

coupling. Phase-to-phase coupling however offers a number of important advantages, including lower attenuation, greater security against communication failure due to line faults, and less interference, both radiated and picked up.

As approximately 80% of all line faults are single-phase, this arrangement may be expected to give higher security.

3.3.3 *Inter-circuit coupling*

When two parallel high-voltage circuits are run without discontinuity on the same poles or towers, it is possible to utilize one phase on each of the circuits to provide the equivalent of phase-to-phase coupling on a single circuit line or two phases on each circuit to provide a double differential form of coupling. With this form of coupling, communication is maintained even if one power circuit is taken out of service and earthed.

3.3.4 *Insulated earth wire coupling*

It is customary on high-voltage lines, particularly those above 110 kV, to provide one or two earth wires above the phase conductors. These are primarily intended to protect the lines against lightning strokes, but they also serve to reduce the step voltage which would otherwise exist at the towers and substations under earth fault conditions on the lines. In addition, the earth wires help to minimize induction effects on nearby telecommunication circuits during earth faults on the power lines.

The earth wires are normally in metallic contact with the line towers, but it is known that their efficiency as lightning protectors is not affected if they are insulated from the towers, the insulators being by-passed by spark gaps rated to flash over at about 15 kV to 30 kV. This fact has led to the utilization of insulated earth wires for communication purposes, the principal advantage being the saving in coupling equipment since although coupling capacitors and choke coils are still required they need not be rated for the full operating voltage and current of the line.

The method has, however, a number of disadvantages:

- a) The attenuation at carrier frequencies is, in general, appreciably greater than that of the power line, where multi-strand steel conductor is employed for the earth wire. However, where composite conductors (for example "Alumoweld") are used for the earth wire(s) the attenuation is more acceptable.
- b) The need for insulating the earth wires at each tower and at the terminal points adds to the costs, and for longer distances the additional costs may exceed the savings in coupling equipment.
- c) The effectiveness of the earth wires in their protective role under line fault conditions is reduced to some extent by the insulation at each tower.

Because of these drawbacks, the use of insulated earth wires for carrier communications has so far found only limited application.

3.3.5 *Coupling to power cables*

In general, coupling of carrier frequency signals to power cables is carried out in the same way as to overhead lines, both in the case of a three-phase cable or three individual

triphase que dans celui de trois câbles monophasés distincts. Les couplages phase-terre et interphase sont possibles, ce dernier donnant généralement un affaiblissement plus faible avec un coût plus élevé.

Comparée à celle des lignes aériennes, l'impédance des câbles d'énergie est plus petite dans un rapport d'environ 10 à 20. Par conséquent, l'inductance des circuits-bouchons est diminuée et la capacité des condensateurs de couplage augmentée dans le même rapport, par rapport aux lignes aériennes, pour des bandes passantes égales.

4. Etude des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie

4.1 Fréquences porteuses utilisées

4.1.1 Largeur de bande

La plupart des systèmes CPL à bande latérale unique (BLU) que l'on trouve actuellement sont conçus pour une bande nominale de 4 kHz choisie dans la gamme des fréquences porteuses. Dans certains pays, on a choisi une bande nominale de 2,5 kHz.

Le tableau I donne la liste des valeurs courantes pour la bande des fréquences effectivement transmises pour un canal unilatéral.

TABLEAU I

Valeurs courantes pour la bande des fréquences effectivement transmises pour un canal unilatéral

Bande nominale des fréquences porteuses	Utilisation	Bande des fréquences effectivement transmises pour la téléphonie et les signaux
4 kHz	Téléphonie Signaux	300 Hz à 3,4 kHz 300 Hz à 3,4 kHz ou au-delà
	Téléphonie et signaux	300 Hz à 2,4 kHz et 2,64 kHz à 3,4 kHz ou au-delà 300 Hz à 2,0 kHz et 2,16 kHz à 3,4 kHz ou au-delà
2,5 kHz	Téléphonie Signaux	300 Hz à 2,4 kHz 300 Hz à 2,4 kHz
	Téléphonie et signaux	300 Hz à 2,0 kHz et 2,16 kHz à 2,4 kHz

Il convient de noter que les équipements CPL utilisés uniquement pour la téléprotection peuvent utiliser une bande nominale de fréquences porteuses plus étroite que celles indiquées ci-dessus; mais des valeurs qui ne sont pas homogènes avec la bande nominale de fréquences porteuses utilisée sur l'ensemble d'un réseau peuvent conduire à une utilisation non optimale du spectre des fréquences.

4.1.2 Attribution des fréquences

La plupart des systèmes CPL mixtes nécessitent une largeur de bande de 4 kHz pour chaque sens de transmission; par conséquent, la gamme disponible des fréquences porteuses (30 kHz à 500 kHz) est divisée en un certain nombre de canaux de 4 kHz chacun. Deux d'entre eux sont nécessaires pour chaque liaison bilatérale, mais ils n'ont pas besoin d'être nécessairement adjacents. Lorsqu'on utilise des largeurs de bande de 2,5 kHz, les canaux font 2,5 kHz, deux d'entre eux étant nécessaires pour chaque liaison bilatérale. D'autres largeurs de bande des canaux ont été choisies dans certains pays pour répondre à leurs besoins particuliers.

single-phase cables. Phase-to-earth or phase-to-phase coupling is possible, the latter generally resulting in lower attenuation figures at the expense of higher costs.

In comparison to overhead lines, the characteristic impedance of power cables is smaller by a factor of 10 to 20. Consequently, the inductance of the line traps decreases, the capacitance of the coupling capacitors increases by the same figure for equal frequency bands compared with overhead lines.

4. Power line carrier system planning

4.1 Carrier frequencies

4.1.1 System bandwidth

The majority of SSB PLC systems that are available are arranged for a 4 kHz nominal carrier frequency band in the carrier frequency range. In some countries an alternative of 2.5 kHz has been adopted.

Table I lists typical values for the effectively transmitted band for a one-way single channel.

TABLE I

Typical values for the effectively transmitted band for a one-way single channel

Nominal carrier frequency band	Use	Effectively transmitted speech and signal bands
4 kHz	Speech Signals Speech plus signals	300 Hz to 3.4 kHz 300 Hz to 3.4 kHz or more 300 Hz to 2.4 kHz plus 2.64 kHz to 3.4 kHz or more 300 Hz to 2.0 kHz plus 2.16 kHz to 3.4 kHz or more
2.5 kHz	Speech Signals Speech plus signals	300 Hz to 2.4 kHz 300 Hz to 2.4 kHz 300 Hz to 2.0 kHz plus 2.16 kHz to 2.4 kHz

It should be noted that PLC equipment used for protection signalling only may use a nominal carrier frequency band of less than the figures quoted above, but values that are not compatible with the nominal carrier frequency band used throughout a system may be wasteful of frequency spectrum.

4.1.2 Frequency allocation

Most of the multi-purpose PLC systems require a bandwidth of 4 kHz for each direction of transmission; therefore, the available range of carrier frequencies (30 kHz to 500 kHz) is divided into a number of channels each 4 kHz wide. Two of these will be required for each two-way carrier circuit but they need not necessarily be adjacent. Where bandwidths of 2.5 kHz are in use, the channels are 2.5 kHz wide, two of these being required for each two-way carrier circuit. Other channel widths have also been adopted in some countries to suit their special needs.

L'attribution des fréquences à une liaison CPL doit tenir compte des conditions suivantes:

- a) Comme déjà indiqué au paragraphe 3.1, certains canaux doivent être complètement exclus ou leur utilisation restreinte dans certaines zones à cause de divers services radio, en particulier les radiobalises aéronautiques; en effet, les signaux reçus à bord des aéronefs peuvent donner lieu à des indications erronées des radio-compas en cas de perturbations. On doit également s'informer des possibilités de transfert des signaux CPL (voir point c)).
- b) Comme l'affaiblissement augmente avec la fréquence, il est préférable d'utiliser les fréquences les plus basses de la gamme disponible pour les liaisons CPL les plus longues (250 km ou plus) et pour le cas particulier des lignes longues transposées à armement horizontal.
- c) Comme les lignes d'énergie forment un réseau maillé, une fréquence utilisée sur un tronçon du réseau peut apparaître sur d'autres tronçons avec un niveau suffisant pour créer des perturbations. Cela limite la mesure dans laquelle les mêmes fréquences peuvent être réutilisées sur le réseau. Les perturbations peuvent être dues pour une part aux fuites à travers les circuits-bouchons et pour une autre part au couplage inductif et capacitif avec les conducteurs non munis de circuits-bouchons. La même fréquence peut être réutilisée pour deux liaisons CPL indépendantes installées sur des lignes d'un même réseau d'énergie si elles sont séparées par au moins deux tronçons de lignes avec postes intermédiaires. Si les deux liaisons CPL sont installées sur des lignes d'énergie exploitées à des tensions différentes, il est possible qu'il n'y ait pas de perturbations mutuelles, même si ces lignes aboutissent au même poste, grâce à l'affaiblissement des fréquences porteuses dans le transformateur de puissance, à moins d'un parallélisme appréciable des lignes considérées. Des difficultés peuvent apparaître à cause de l'évolution de la configuration du réseau d'énergie qui se développe et s'accroît pour faire face à l'augmentation de la puissance appelée.

Pour un réseau CPL qui a atteint la saturation en ce qui concerne l'attribution des fréquences porteuses, une solution pratique pour permettre la réutilisation des mêmes fréquences sur certains tronçons est d'effectuer un découplage pour ces fréquences, c'est-à-dire que le réseau peut être virtuellement séparé en deux parties à l'aide de circuits-bouchons et de condensateurs de couplage installés sur les trois phases et ayant le rôle d'un filtre coupe-bande.

4.2 Affaiblissement global

L'affaiblissement global d'une liaison CPL comprend l'affaiblissement en ligne et les pertes de couplage.

L'affaiblissement en ligne est essentiellement fonction des paramètres suivants:

- Longueur de la ligne et type d'armement.
- Structure des conducteurs de phase, matériau utilisé, etc.
- Structure du ou des câbles de garde, matériau utilisé, etc.
- Fréquences porteuses.
- Méthode de couplage.
- Résistivité du sol.
- Effets des pylônes.
- Conditions atmosphériques.
- Discontinuités (transpositions, dérivations, partie en câble souterrain, etc.).

The frequency allocation for a PLC circuit has to take the following requirements into account:

- a) As already mentioned in Sub-clause 3.1, some channels have to be totally barred or restricted in certain areas because of various radio services in particular for aeronautical radio beacons, since signals received on board aircraft may give false radio compass indications in the event of interference. Cognizance should also be taken of the possibility of transferred PLC signals (see Item c)).
- b) As the attenuation increases with frequency, it is preferable to use the lowest frequencies of the available range for the longer PLC links (say 250 km or more) and particularly for the case of long flat formation transposed lines.
- c) As the power lines form a closed mesh, a frequency used on one section of a network may appear in other sections with a level high enough to cause interference. This limits the extent to which the same frequencies can be re-used in the network. The interference can be due partly to leakage across line traps and partly due to inductive and capacitive coupling with untrapped conductors. The same frequency may be re-used for two different PLC systems working on lines forming a common system if the two are separated by at least two line sections with intermediate substations. If the two PLC systems are used on power lines working at different voltages it is possible that there will be no mutual interference, even if these lines terminate at the same substation, due to the losses in the power transformer at carrier frequencies unless appreciable parallelism of the lines exists. Difficulties may be caused due to the changing configuration of a power network as it develops and extends to meet increased power demand.

On a PLC-network which has reached saturation from the point of view of carrier frequency allocation, a practical solution to enable frequencies to be re-used on certain sections is by carrier decoupling, i.e. the network can virtually be split into two parts by means of line traps and coupling capacitors in all three phases acting as a band-stop filter.

4.2 Overall loss

The overall loss of a PLC circuit consists of the line attenuation and the coupling losses.

The line attenuation is primarily a function of the following parameters:

- Line length and conductor configuration.
- Structure of the phase conductors, material, etc.
- Structure of the earth wire(s), material, etc.
- Carrier frequency.
- Coupling method.
- Earth resistivity.
- Tower effects.
- Weather conditions.
- Discontinuities (transpositions, tapped lines, cable inserts, etc.).

Les pertes de couplage comprennent:

- a) les pertes dans le dispositif de couplage et le circuit de raccordement (coaxial ou symétrique);
- b) l'affaiblissement de mise en dérivation causé par les pertes d'énergie aux fréquences porteuses à travers les circuits-bouchons et les phases non munies de circuits-bouchons;
- c) les pertes supplémentaires, par exemple les pertes dues à la mise en parallèle d'équipements.

4.2.1 Affaiblissement en ligne

Analyse modale

L'analyse d'une ligne à plusieurs conducteurs montre que plusieurs modes de propagation des signaux aux fréquences porteuses sont présents simultanément. On peut montrer que le nombre de modes est égal au nombre de conducteurs impliqués (par exemple il existe trois modes dans le cas d'une ligne à un seul terna munie de deux câbles de garde mis à la terre à chaque pylône et sept modes dans le cas d'une ligne à deux ternes munie d'un câble de garde isolé).

Les principales caractéristiques de ces modes sont:

- a) chaque mode a ses propres constante de propagation, vitesse de propagation et impédance caractéristique;
- b) les modes sont indépendants les uns des autres;
- c) la tension en un point donné est égale à la somme vectorielle des tensions dues à chacun des modes en ce point; de même, le courant est la somme vectorielle des courants dus à chacun des modes.

L'analyse modale montre que le couplage doit être choisi de façon à injecter toute la puissance de l'émetteur sur la ligne sous la forme du mode le moins affaibli. Pour les couplages réalisés dans la pratique, tels que les couplages phase-terre, interphase ou entre ternes, la puissance de l'émetteur est généralement injectée sous la forme d'un mélange des modes dont une partie sous forme d'un mode très affaibli (mode de terre); il en résulte un certain affaiblissement de conversion modale a_c .

L'affaiblissement en ligne a_{ligne} peut être calculé comme suit:

$$a_{\text{ligne}} = \alpha_1 \cdot l + 2a_c + a_{\text{add}}$$

où:

a_{ligne} = affaiblissement en ligne (dB)

α_1 = constante d'affaiblissement du mode le moins affaibli (dB/km)

a_c = affaiblissement de conversion modale (dB) (voir figure 5, page 64); $a_c = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{totale}}}{P_{\text{totale}} - P_{\text{mode de terre}}} \right)$

a_{add} = pertes supplémentaires dues aux discontinuités, par exemple couplage, transposition, etc. (dB) (voir tableau VI, page 65)

l = longueur de la ligne (km)

Un exemple est donné dans l'annexe D (article D5).

A partir de l'analyse d'une quantité considérable de résultats expérimentaux et de calculs sur ordinateur, la formule approchée suivante a été trouvée pour α_1 :

$$\alpha_1 \approx 7 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\sqrt{f}}{d_c \cdot \sqrt{n}} + 10^{-3} \cdot f \right]$$

où:

α_1 = constante d'affaiblissement du mode le moins affaibli (dB/km)

f = fréquence (kHz)

d_c = diamètre d'un conducteur de phase (mm)

n = nombre de conducteurs par phase dans le cas d'un faisceau

The coupling losses consist of:

- a) losses in the coupling device and coaxial or balanced pair cable;
- b) tapping losses due to leakage of carrier energy through the line traps and through the untrapped phases;
- c) additional losses, for example losses due to operating carrier sets in parallel.

4.2.1 Line attenuation

Modal analysis

Analysis of a multi-conductor line shows that several modes of carrier signal propagation take place simultaneously. It can be shown that the number of natural modes is equal to the number of conductors involved in the propagation (e.g. three modes in the case of a single-circuit line with two earth-wires grounded at each tower, and seven modes in the case of double-circuit line with one insulated earth-wire).

The main characteristics of natural modes are:

- a) each mode has its own specific propagation loss, velocity and characteristic impedance;
- b) the modes are independent of each other;
- c) the phase voltage at any location is the vector sum of the phase-mode voltages at that location, similarly the phase current is the vector sum of the phase-mode currents.

Modal analysis shows that the coupling arrangement should be chosen in such a way that the whole transmitter power is injected into the line in the form of the lowest loss mode. For practical coupling arrangements, such as phase-to-earth, phase-to-phase or inter-circuit coupling, the transmitter power is generally injected in the form of a mode-mixture, part of it in a high loss (ground) mode, this resulting in a certain modal conversion loss a_c .

The line attenuation a_{line} can be calculated as follows:

$$a_{\text{line}} = \alpha_1 \cdot l + 2a_c + a_{\text{add}}$$

where:

a_{line} = line attenuation (dB)

α_1 = attenuation constant of the lowest loss mode (dB/km)

a_c = modal conversion loss (dB) (see Figure 5, page 64) $a_c = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{total}} - P_{\text{ground mode}}} \right)$

a_{add} = additional loss caused by discontinuities, for example coupling circuit, transposition, etc. (dB) (see Table VI, page 65)

l = line length (km)

An example is given in Appendix D (Clause D5).

From the analysis of a considerable amount of experimental material and computer calculation the following approximation for α_1 was found:

$$\alpha_1 \approx 7 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\sqrt{f}}{d_c \cdot \sqrt{n}} + 10^{-3} \cdot f \right]$$

where:

α_1 = attenuation constant of lowest loss mode (dB/km)

f = frequency (kHz)

d_c = diameter of phase conductor (mm)

n = number of phase conductors in bundle

Un abaque issu de cette formule est donné à la figure 6, page 66, et il peut être utilisé comme autre méthode de calcul.

La formule donne une bonne approximation (environ $\pm 10\%$ jusqu'à 300 kHz et $\pm 20\%$ jusqu'à 500 kHz) pour la plupart des cas avec des tensions de ligne supérieures à 150 kV et des résistivités du sol comprises entre 100 Ωm et 300 Ωm .

Lignes homogènes

Le choix du couplage est moins critique pour les lignes à un seul terna à armement vertical ou en triangle que pour les lignes à deux ternes; il est fondamental pour les lignes en nappe horizontale. La figure 5, page 64, donne le couplage optimal et l'affaiblissement de conversion modale a_c pour les lignes à armements horizontal, vertical et en triangle.

Les valeurs approximatives suivantes qui donnent les pertes supplémentaires a_{add} peuvent être utilisées pour les différents armements de ligne pourvu que le couplage optimal soit réalisé (voir figure 5):

- ligne à un seul terna, à armement vertical ou en triangle:
 $a_{add} \leq 3$ dB pour les couplages phase-terre et interphase;
- ligne à deux ternes, à armement vertical ou en triangle:
 $a_{add} = 2$ dB à 10 dB pour les couplages phase-terre et interphase;
 $a_{add} \leq 1$ dB pour un couplage interphase double (figure 5k);
- ligne à un seul terna en nappe horizontale:
 $a_{add} = 0$ dB pour le couplage phase-terre;
 $a_{add} = 0$ à 6 dB pour le couplage interphase.

Lignes non homogènes

Des discontinuités telles que les transpositions, les dérivations ou les raccordements de lignes aériennes à des câbles d'énergie peuvent poser des problèmes complexes qui doivent, par conséquent, être examinés avec le plus grand soin lors de l'étude d'un réseau CPL.

Les *transpositions* peuvent conduire, dans certaines circonstances, à des affaiblissements en ligne beaucoup trop élevés. Leur effet sur la transmission des signaux dépend des caractéristiques de la ligne, de sa longueur, du couplage, du type et du nombre de transpositions, de la résistivité du sol et de la fréquence porteuse.

- Dans le cas d'une ligne à un seul terna à armement vertical ou en triangle, les pertes supplémentaires a_{add} sont pratiquement indépendantes de la fréquence porteuse, du type et du nombre de transpositions pourvu que le couplage soit effectué sur la même phase aux deux extrémités. Les valeurs suivantes peuvent être admises:

couplage phase-terre: $a_{add} = 6$ dB à 12 dB;
couplage interphase: $a_{add} = 4$ dB à 8 dB.

- Dans le cas d'une ligne à deux ternes à armement vertical ou en triangle, les pertes supplémentaires a_{add} dépendent du nombre de transpositions, des caractéristiques de la ligne, de la résistivité du sol, du couplage et du produit de la fréquence porteuse par la longueur de la ligne; des valeurs de 2 dB à 10 dB ou même 20 dB ont été mesurées. Il est judicieux, dans les cas critiques, d'évaluer l'affaiblissement global à l'aide d'un calculateur ou d'effectuer des mesures si la ligne est disponible.
- Dans le cas des lignes en nappe horizontale, le choix du couplage correct et de la bande des fréquences porteuses est fondamental. En supposant que le couplage optimal, tel que celui donné à la figure 7, page 67, est utilisé, les pertes supplémentaires sont:

A graph based on this formula is given in Figure 6, page 66, and may be used as an alternative method of calculation.

This formula will give a good approximation (approximately $\pm 10\%$ up to 300 kHz, $\pm 20\%$ up to 500 kHz) for most cases with line voltages above 150 kV and earth resistivities around 100 Ωm to 300 Ωm .

Homogeneous lines

The choice of coupling arrangement is less critical for vertical and triangular single-circuit lines than for double-circuit lines, but is essential for horizontal line configurations. Optimum coupling arrangements and modal conversion loss a_c for horizontal, vertical and triangular lines are shown in Figure 5, page 64.

The following approximate figures for the additional loss a_{add} can be applied to different line configurations, provided that optimum coupling arrangements (see Figure 5) are used;

- single-circuit, vertical or triangular:
 $a_{\text{add}} \leq 3$ dB for phase-to-earth and phase-to-phase coupling;
- double-circuit, vertical or triangular:
 $a_{\text{add}} = 2$ dB to 10 dB for phase-to-earth and phase-to-phase coupling;
 $a_{\text{add}} \leq 1$ dB for double differential coupling (Figure 5k);
- single-circuit, horizontal:
 $a_{\text{add}} = 0$ dB for phase-to-earth coupling;
 $a_{\text{add}} = 0$ to 6 dB for phase-to-phase coupling.

Inhomogeneous lines

Inhomogeneities such as line transpositions, tapped lines or junctions of overhead lines with power cables may cause serious problems and, therefore, have to be studied carefully when planning a PLC network.

Line transpositions can lead to intolerably high line attenuation under certain circumstances. Their effect on carrier signal transmission depends on the line parameters, line length, coupling arrangement, type and number of transpositions, earth resistivity and carrier frequency.

- In the case of single-circuit vertical or triangular line configurations, the additional loss a_{add} is virtually independent of carrier frequency, type and number of transpositions, provided that coupling is done to galvanically through-connected phase conductors. The following figures may be assumed:
phase-to-earth coupling: $a_{\text{add}} = 6$ dB to 12 dB;
phase-to-phase coupling: $a_{\text{add}} = 4$ dB to 8 dB.
- In the case of double-circuit vertical or triangular line configurations the additional loss a_{add} depends on the number of transpositions, line parameters, ground resistivity, coupling arrangement and the product of carrier frequency and line length; figures of 2 dB to 10 dB, or even 20 dB have been measured. It is advisable, in critical cases, to calculate the overall attenuation with the aid of a modal computer programme or carry out field measurements should the line be available.
- In the case of horizontal line configuration the choice of the correct coupling arrangement and carrier frequency range is essential. Assuming that the optimum coupling arrangements given in Figure 7, page 67, are used the additional loss becomes:

- a) Dans le cas d'une transposition à mi-parcours:
 couplage phase-terre (figure 7a): $a_{\text{add}} = 6 \text{ dB}$;
 couplage interphase (figure 7b et 7c): $a_{\text{add}} = 8,5 \text{ dB à } 12 \text{ dB}$;

pour toute la bande des fréquences et pour toute longueur de ligne puisque l'annulation par superposition de modes ne peut avoir lieu.

- b) Dans le cas de deux transpositions également espacées:
 les pertes supplémentaires dépendent beaucoup de la fréquence porteuse, des caractéristiques de la ligne et de la résistivité du sol, et il y a risque d'annulation par superposition de modes.

Par conséquent, le produit fréquence porteuse-longueur de la ligne ($f \cdot l$) ne doit pas dépasser $10^5 \text{ kHz} \cdot \text{km}$ pour les lignes jusqu'à 330 kV et $0,5 \cdot 10^5 \text{ kHz} \cdot \text{km}$ pour les lignes exploitées à des tensions supérieures. Dans ces conditions, les pertes supplémentaires seront, dans la plupart des cas, de l'ordre de:

couplage phase-terre (figure 7d):

$a_{\text{add}} = 1 \text{ dB à } 10 \text{ dB}$; résistivité du sol, $\rho \geq 1000 \text{ } \Omega\text{m}$;

$a_{\text{add}} = 3 \text{ dB à } 8 \text{ dB}$; résistivité du sol, $\rho = 30 \text{ } \Omega\text{m à } 300 \text{ } \Omega\text{m}$;

couplage interphase (figure 7e):

$a_{\text{add}} = 0 \text{ dB à } 8 \text{ dB}$; résistivité du sol, $\rho \geq 1000 \text{ } \Omega\text{m}$;

$a_{\text{add}} = 2 \text{ dB à } 10 \text{ dB}$; résistivité du sol, $\rho = 30 \text{ } \Omega\text{m à } 300 \text{ } \Omega\text{m}$.

Les valeurs les plus petites parmi celles indiquées sont valables pour les petits produits $f \cdot l$ et les plus grandes pour les produits $f \cdot l$ spécifiés ci-dessus.

Les informations données ci-dessus concernant a_{add} sont résumées dans le tableau VI, page 65.

Les *raccordements des lignes aériennes à des câbles d'énergie* donnent lieu à une augmentation de l'affaiblissement global à cause des pertes dues à la désadaptation au niveau des raccordements.

Les équipements CPL doivent être adaptés respectivement à l'impédance caractéristique de la ligne ou à celle du câble. Parfois, des mesures particulières sont nécessaires pour améliorer l'affaiblissement d'adaptation de l'émetteur CPL couplé à la ligne aérienne.

Dans le cas d'un seul passage aéro-souterrain (figure 8a, page 68), l'affaiblissement total a_{tot} (dB) peut s'écrire sous la forme:

$$a_{\text{tot}} = a_{\text{ligne}} + a_{\text{câble}} + a_m$$

L'affaiblissement de désadaptation a_m est pratiquement indépendant de la fréquence et est de l'ordre de 5 dB à 7 dB.

Dans le cas de deux passages aéro-souterrains (figure 8b, page 68), des effets d'ondes stationnaires ont lieu et l'affaiblissement global est alors:

$$a_{\text{tot}} = a_{\text{ligne 1}} + a_{\text{câble}} + a_{\text{ligne 2}} + 2 a_m + a_s$$

où:

a_s = affaiblissement supplémentaire dû à l'effet d'ondes stationnaires.

A cause du terme a_s qui dépend de la fréquence, l'affaiblissement global présente d'importantes fluctuations périodiques en fonction de la fréquence, en particulier pour les petits affaiblissements de câble où a_s varie entre -7 dB et $+5 \text{ dB}$. Si l'affaiblissement du câble dépasse 6 dB environ, les fluctuations deviennent inférieures à $\pm 1 \text{ dB}$ et peuvent par conséquent être négligées.

a) In the case of mid-point transposition:

phase-to-earth coupling (Figure 7a): $a_{add} = 6 \text{ dB}$;

phase-to-phase coupling (Figures 7b and 7c): $a_{add} = 8.5 \text{ dB to } 12 \text{ dB}$;

for the whole frequency range and any line length, since modal cancellation cannot occur.

b) In the case of equi-spaced transpositions:

the additional loss depends very much on the carrier frequency, line parameters and earth resistivity and there is a risk of modal cancellation.

Therefore, the product of carrier frequency and line length ($f \cdot l$) should not exceed $10^5 \text{ kHz} \cdot \text{km}$ for line voltages up to 330 kV and $0.5 \cdot 10^5 \text{ kHz} \cdot \text{km}$ for higher voltages. Then for the majority of cases the additional loss will be of the order of:

phase-to-earth coupling (Figure 7d):

$a_{add} = 1 \text{ dB to } 10 \text{ dB}$; earth resistivity, $\rho \geq 1000 \text{ } \Omega\text{m}$;

$a_{add} = 3 \text{ dB to } 8 \text{ dB}$; earth resistivity, $\rho = 30 \text{ } \Omega\text{m to } 300 \text{ } \Omega\text{m}$;

phase-to-phase coupling (Figure 7e):

$a_{add} = 0 \text{ dB to } 8 \text{ dB}$; earth resistivity, $\rho \geq 1000 \text{ } \Omega\text{m}$;

$a_{add} = 2 \text{ dB to } 10 \text{ dB}$; earth resistivity, $\rho = 30 \text{ } \Omega\text{m to } 300 \text{ } \Omega\text{m}$.

The lower values of the ranges given are applicable for lower $f \cdot l$ products, the higher for $f \cdot l$ given above.

The information given above for a_{add} is summarized in the table shown in Table VI, page 65.

Junctions of overhead lines with power cables result in an increased overall attenuation due to the mismatch loss at the junctions.

The PLC equipment should be matched respectively to the characteristic line impedance—or to the cable impedance. Sometimes, special measures are necessary to improve the return loss seen by the PLC transmitter coupled to the overhead line.

In the case of one junction only (Figure 8a, page 68) the total attenuation a_{tot} (dB) can be written in the following form:

$$a_{tot} = a_{line} + a_{cable} + a_m$$

The mismatch loss a_m is virtually independent of the frequency and is of the order of 5 dB to 7 dB.

In the case of two junctions (Figure 8b, page 68) standing wave effects occur and the overall attenuation then becomes:

$$a_{tot} = a_{line 1} + a_{cable} + a_{line 2} + 2 a_m + a_s$$

where:

a_s = additional attenuation due to standing wave effect

Due to the frequency-dependent term a_s , the overall attenuation shows pronounced periodical fluctuations with frequency, particularly for small cable attenuations where a_s may vary between -7 dB and $+5 \text{ dB}$. If the cable attenuation exceeds approximately 6 dB the fluctuations become less than $\pm 1 \text{ dB}$ and, therefore, may be neglected.

Les équipements CPL aux deux extrémités doivent être adaptés à l'impédance caractéristique de la ligne et il peut être nécessaire d'améliorer l'affaiblissement d'adaptation pour réduire par voie de conséquence les risques d'intermodulation dans les émetteurs.

Dans le cas d'un seul câble triphasé, il y a une conversion des modes aux deux passages aéro-souterrains, ce qui crée encore un affaiblissement supplémentaire outre celui dû à la désadaptation mentionné plus haut. Le calcul de l'affaiblissement global devient complexe et doit être effectué à l'aide d'un calculateur. La conversion des modes n'a pas lieu dans le cas de trois câbles monophasés séparés.

Les lignes avec dérivation peuvent poser de sérieux problèmes à cause de la désadaptation au point de piquage et d'effets d'ondes stationnaires sur la dérivation non munie de circuits-bouchons. Sans mise en jeu d'aucun dispositif supplémentaire, l'affaiblissement de la ligne présente normalement des pointes importantes qui sont espacées de:

$$\Delta f = \frac{150}{l_t}$$

où:

Δf = espacement des pointes d'affaiblissement (kHz)

l_t = longueur de la dérivation (km)

La méthode la plus efficace pour éviter ces pointes d'affaiblissement serait de munir de circuits-bouchons les trois phases de la dérivation au point de piquage. Normalement, il suffit de mettre un circuit-bouchon sur la phase de la dérivation qui transporte l'essentiel de la puissance du signal sur la ligne intéressée. Il importe que le circuit-bouchon soit conçu pour avoir une composante résistive minimale R_0 dans toute la bande de fréquences utilisée plutôt que conçu pour un $|Z_0|$ minimal seulement.

Si le circuit-bouchon ne peut pas être installé au point de piquage pour une raison quelconque, on peut alors le mettre à l'extrémité éloignée de la dérivation. Dans ce cas particulier, la phase munie d'un circuit-bouchon doit être fermée sur l'impédance de la ligne, ce qui nécessite par conséquent un condensateur de couplage supplémentaire dans ce poste.

Lignes parallèles aboutissant dans un poste donné

Il arrive souvent qu'une ligne existante soit déviée pour passer en coupure dans un nouveau poste construit à proximité. Au nouveau poste, il y a alors deux lignes parallèles issues de la ligne d'origine et les canaux CPL doivent être corrélativement modifiés, soit en assurant la continuité à travers le nouveau poste, soit en utilisant deux nouveaux canaux CPL installés entre les extrémités d'origine et le nouveau poste. Cette nouvelle configuration peut apporter une augmentation de l'affaiblissement pour certaines fréquences, ce qui peut être évité par l'introduction d'un réseau déphaseur dans le pont HF du nouveau poste.

Affaiblissement en ligne dans des conditions atmosphériques défavorables

La propagation, le long de la ligne, des signaux aux fréquences porteuses est affectée par la pluie, le brouillard, la neige et le givre. Dans les cas de pluie ou de brouillard, l'augmentation de l'affaiblissement est généralement faible et peut être négligée.

Dans certains cas (dans les zones industrielles ou près du bord de la mer), une averse peut donner lieu à une diminution de l'affaiblissement en nettoyant les isolateurs de la ligne d'énergie.

Dans le cas du givre, la situation est différente car l'augmentation de l'affaiblissement peut atteindre des valeurs inacceptables pour la voie de transmission; l'ingénieur chargé de l'étude doit tenir compte de ce fait. Cependant, il faut considérer que les lignes aériennes sont

The PLC sets at both line ends should be matched to the characteristic line impedance and again it may be necessary to improve the return loss, thus reducing the risk of inter-modulation in the transmitters.

In the case of a single three-phase cable, mode conversion takes place at both junctions, which is an additional loss over and above that due to the above-mentioned mismatch. The calculation of overall attenuation becomes complex and should be carried out by computer. This mode conversion does not occur with three separate single-conductor cables.

Tapped lines may cause serious problems due to the mismatch at the tee-point and standing wave effects on the untrapped tap-line. Without any additional means involved, the line attenuation would normally show accentuated peaks with a spacing of:

$$\Delta f = \frac{150}{l_t}$$

where:

Δf = spacing of attenuation peaks (kHz)

l_t = length of the tap (km)

The most efficient means to overcome these attenuation peaks would be to trap all three phases of the tap-line at the tee-point. Normally it is sufficient to insert a line trap into the phase conductor of the tap which carries the most signal power on the main line. It is important that the line trap be designed for a minimum resistive component R_0 over the whole frequency band used in the system, rather than for a minimum $|Z_0|$ only.

If the line trap cannot be installed at the tee-point for some reason, there is also the possibility of inserting it at the far end of the tap. In this particular case the trapped phase conductor must be terminated by the line impedance, thus requiring an additional coupling capacitor in the substation.

Parallel lines entering a substation

A case that frequently occurs is where an existing line is diverted into a new substation built close to the line. The new substation then has two parallel entries from the original line and the existing PLC channels must also be diverted, either as through-circuits which by-pass the new substation or as new PLC channels operating between the original PLC terminal ends and the new substation. This new configuration may result in an increase in attenuation at certain frequencies which can be overcome by introducing a phase-shift network in the CF by-pass at the new substation.

Line losses in bad weather conditions

The propagation of carrier signals along the line is affected by rain, fog, snow and ice. In the case of rain or fog, the increase of attenuation is generally small, and can be neglected.

In certain cases (in industrial areas or near the sea shore), a rain shower may produce a lower attenuation by cleaning the insulator surface of the power line.

In the case of ice, the situation is different since increase in attenuation may assume unacceptable values for the transmission link and must be considered by the planning engineer.

rarement affectées par le givre sur toute leur longueur. L'augmentation de l'affaiblissement dépend des paramètres suivants:

- a) structure de la ligne d'énergie;
- b) épaisseur de la couche de givre sur les conducteurs;
- c) température ambiante;
- d) fréquence des signaux; les fréquences les plus élevées sont les plus affectées.

Le givre et les manchons de glace sur les conducteurs peuvent, dans des conditions extrêmes, conduire à multiplier jusqu'à six fois, pour les tronçons de ligne affectés, la constante d'affaiblissement valable pour les bonnes conditions atmosphériques. Dans le cas d'un manchon de glace de 0,5 cm d'épaisseur, la constante d'affaiblissement est multipliée par un facteur de 1,5 à 2 pour les fréquences supérieures à 300 kHz. Les facteurs multiplicateurs les plus petits s'appliquent au cas des conducteurs en faisceaux. Pour cette raison, il est recommandé d'utiliser les fréquences porteuses les plus basses pour les lignes sujettes au givre.

4.2.2 Pertes de couplage

Les pertes de couplage sont les suivantes:

Pertes dans le dispositif de couplage et dans le circuit de raccordement à fréquence porteuse

D'après la Publication 481 de la CEI sur les groupes de couplage pour systèmes CPL, l'affaiblissement composite apporté par le quadripôle formé par le groupe de couplage et le ou les condensateurs de couplage associés ne doit pas dépasser 2 dB sur toute la largeur de bande disponible. En général, les pertes de couplage, y compris les pertes diélectriques dans le condensateur de couplage, sont inférieures à 1,5 dB.

Les valeurs courantes d'affaiblissement pour les câbles de raccordement à fréquence porteuse sont de 1 dB/km à 5 dB/km dans la bande des fréquences de 30 kHz à 500 kHz.

Affaiblissement de mise en dérivation

D'après la Publication 353 de la CEI sur les circuits-bouchons, l'affaiblissement de mise en dérivation ne devrait pas, de préférence, dépasser 2,6 dB. Cet affaiblissement correspond à une impédance du circuit-bouchon égale à 1,41 fois l'impédance caractéristique de la ligne.

Pertes supplémentaires

Lorsqu'un certain nombre d'équipements émetteurs-récepteurs CPL sont branchés en parallèle à travers un dispositif de couplage commun, chaque équipement est soumis à une perte de couplage supplémentaire de 0,5 dB à 1 dB; il faut en tenir compte lorsqu'on effectue le calcul de l'affaiblissement global de la liaison.

4.2.3 Pertes dans les ponts HF

La structure d'un réseau à haute tension ne correspond pas toujours aux besoins en télécommunication de ce réseau en ce sens que les canaux haute fréquence ne doivent pas toujours aboutir au même point que les lignes d'énergie. Dans certains cas, les canaux de télécommunication doivent effectuer la transmission sur deux tronçons d'une ligne qui peut présenter une discontinuité à cause de la structure du réseau de transport d'énergie. Dans d'autres cas, certains canaux doivent aboutir en un point intermédiaire tandis que d'autres canaux doivent être transmis au-delà de celui-ci. Il n'est pas économique, tant du point de vue coût que du point de vue utilisation des fréquences, de mettre en place un équipement complet pour démoduler jusqu'aux fréquences vocales; dans ces cas, la méthode courante consiste à

However, it should be appreciated that overhead lines are rarely affected by ice over their total length. The increase of attenuation depends on the following:

- a) the configuration of the power line;
- b) the thickness of the ice sheath over the conductors;
- c) the ambient temperature;
- d) the frequency of the carrier signal; the higher frequencies are most affected.

Hoarfrost and ice coating of the phase-conductors may, under extreme conditions, cause the fair weather attenuation constant to be increased by up to six times for the affected sections of line. In the case of a 0.5 cm thick ice coating, the attenuation constant is increased by a factor of 1.5 to 2 for frequencies above 300 kHz. Factors at the lower end of the range would apply for bundle conductors. For this reason it is recommended that for lines subject to icing the lowest carrier frequencies should be utilized.

4.2.2 *Coupling losses*

The coupling losses consist of:

Losses in the coupling equipment and carrier frequency connection

According to IEC Publication 481 on coupling devices for PLC systems the composite loss brought about by the quadripole made up of the coupling device and associated coupling capacitor(s) shall not be greater than 2 dB over the whole of the available bandwidth. Generally, the coupling loss including dielectric losses in the coupling capacitor may be expected to be less than 1.5 dB.

Typical attenuation figures for carrier frequency connecting cables are 1 dB/km to 5 dB/km in the frequency range from 30 kHz to 500 kHz.

Tapping losses

According to IEC Publication 353 on line traps the tapping loss should preferably not exceed 2.6 dB. This loss corresponds to a line trap impedance 1.41 times the characteristic impedance of a line.

Additional losses

Where a number of PLC sets are connected in parallel to transmit and receive via common coupling equipment, each set is subject to an additional coupling loss of 0.5 dB to 1 dB; due allowance for this should be made when carrying out the overall loss calculations on the link.

4.2.3 *CF by-pass losses*

The design of a high-voltage network does not always correspond with the communication requirements of that network, in that the high-frequency channels are not always required to terminate at the same terminal as the power termination. In some cases the carrier channels are required to transmit over two sections of a line which may have a discontinuity due to the power system configuration. In other cases some channels are required to terminate at the mid point whilst others are transmitted through this point. It is uneconomical from the point of view of cost and frequency planning to provide a full carrier termination to bring the whole circuit down to a voice frequency basis, and in these circumstances the conventional method of achieving this is to provide a high-frequency by-pass circuit. In order to do this and to

créer un chemin direct pour les signaux aux fréquences porteuses. Pour y parvenir et pour éviter que des tensions dangereuses ne soient transmises d'une partie du réseau sous tension à une partie hors tension, on introduit des ponts HF qui sont des dispositifs de couplage normaux montés comme des filtres passe-bande et simplement reliés par un câble coaxial ou symétrique, avec des circuits-bouchons normaux montés de façon classique. La bande passante de l'ensemble correspond à celle des dispositifs de couplage classiques. L'affaiblissement supplémentaire apporté par un pont HF est celui apporté par les dispositifs de couplage, les dispositifs d'adaptation à l'impédance de la ligne, les câbles de raccordement, etc. Les valeurs courantes sont de 4 dB à 8 dB dans le cas d'un pont HF direct et de 5 dB à 9 dB lorsqu'il existe un câble de raccordement.

Dans le cas du couplage phase-terre, un pont HF peut apporter un affaiblissement beaucoup plus important pour certaines fréquences à cause de l'interaction avec les tensions qui arrivent sur l'entrée de la seconde ligne à travers le pont et les phases sans circuits-bouchons du poste intermédiaire.

4.3 Bruit et perturbations

4.3.1 Bruit sur les liaisons CPL

Les liaisons à courants porteurs sur lignes d'énergie sont soumises à deux types principaux de bruit :

- a) des tensions de caractère permanent, à allure de bruit blanc (bruit aléatoire), engendrées par des décharges électriques irrégulières le long des isolateurs et des conducteurs (effet de couronne, aigrettes).

Le bruit dû à l'effet de couronne n'est pas tout à fait « blanc » puisque son amplitude tend à décroître lorsque la fréquence augmente. En outre, étant donné que ce bruit est engendré pendant les demi-périodes positives de la tension sur la ligne, il est constitué essentiellement de rafales de trains d'impulsions brèves ayant une fréquence fondamentale de répétition de 150 Hz (pour un réseau triphasé 50 Hz). Pratiquement, le bruit peut être considéré comme blanc dans la bande nominale des fréquences porteuses de la gamme 30 kHz à 500 kHz.

Des niveaux globaux de la puissance de bruit, tels que ceux mesurés couramment en valeur efficace au point de couplage à la ligne haute tension, sont donnés dans le tableau II. Ces valeurs sont valables pour des conditions atmosphériques défavorables et s'appliquent aux couplages phase-terre et interphase.

TABLEAU II

*Niveaux courants de puissance de bruit dû à l'effet de couronne,
mesurés en valeur efficace et rapportés à une largeur de bande de 4 kHz
pour différentes tensions des réseaux*

Tension du réseau (kV)	Puissance de bruit
< 220	-35 dBm à -25 dBm
≥ 220	-20 dBm à -10 dBm

prevent dangerous voltages from the live power line section being transferred from one side of the disconnected section to the other, by-pass circuits can be introduced which consist of normal coupling units built as band-pass filters and simply interconnected by a coaxial or balanced pair cable with conventional line traps arranged in the usual manner. The pass-band of this arrangement corresponds to that of the usual coupling arrangements. The additional attenuation introduced by such a by-pass consists of the losses introduced by the coupling devices, line matching units, cable connections etc. Typical values are 4 dB to 8 dB in the case of a through-connected by-pass and 5 dB to 9 dB where there is a local connection.

For phase-to-earth coupling, a CF by-pass may introduce a much larger attenuation for certain frequencies due to the interaction of voltages arriving at the input of the second line through the by-pass and untrapped phases of the intermediate substation.

4.3 Noise and interference

4.3.1 PLC noise

Power line carrier links are subject to two main types of noise:

- a) substained white-noise-like voltages (random noise) caused by irregular electric discharges across insulators and conductors (corona, brush discharge).

Corona noise only approximates to "white" since its amplitude tends to decrease as frequency increases. In addition, since the noise is generated during positive half-cycles of the line voltage, it consists essentially of bursts of trains of short pulses having a fundamental burst repetition frequency of 150 Hz (for a three-phase 50 Hz system). For practical purposes the noise can be considered white in the nominal carrier frequency band in the 30 kHz to 500 kHz range.

Typical overall r.m.s. noise power levels, referring to the coupling point of the HV line itself, are shown in Table II. These figures are valid for adverse atmospheric conditions, and apply both for phase-to-earth and phase-to-phase coupling.

TABLE II

*Typical r.m.s. corona noise power levels,
referring to a 4 kHz band width for various system voltages*

System voltage (kV)	Noise power
<220	–35 dBm to –25 dBm
≥220	–20 dBm to –10 dBm

Les corrections pour d'autres largeurs de bande (B) peuvent être effectuées en utilisant la formule suivante:

$$\Delta P_b = 10 \lg \frac{B \text{ (kHz)}}{4 \text{ (kHz)}}$$

Note. — Des variations importantes des valeurs ci-dessus sont possibles à cause des différences de conception des lignes à haute tension qui donnent des valeurs différentes du gradient de potentiel à la surface des conducteurs pour des tensions identiques. D'autres variations sont possibles à cause de la structure, de l'âge et de l'altitude de la ligne; l'effet des conditions atmosphériques peut également être significatif (par exemple, en cas de brouillard, de pluie et de givre).

Des valeurs courantes du niveau de bruit dû à l'effet de couronne sont données à la figure 9, page 69.

b) des pointes brèves et des rafales de grande amplitude engendrées par le fonctionnement des sectionneurs et des disjoncteurs, et par la foudre, les amorçages, etc.

Les valeurs courantes des niveaux de bruit de type impulsionnel sont mesurées à travers 150 Ω dans une largeur de bande de 4 kHz côté circuit de raccordement du groupe de couplage.

La décharge atmosphérique due à la foudre se compose généralement d'un certain nombre de décharges partielles consécutives espacées irrégulièrement, l'espacement variant entre 8 ms et 400 ms. Lorsque la foudre frappe la ligne ou près de la ligne (pylône, câble de garde), les tensions de bruit à caractère impulsionnel ont une grande amplitude, de l'ordre de +20 dBu à +35 dBu (voir tableau III, page 38).

Les amorçages sur un réseau entraînent la production d'une énergie à large bande. En général, l'apparition d'un défaut est si rapide et le courant de défaut si élevé que le trajet de l'arc est très vite hautement ionisé. A l'apparition du défaut et avant que l'arc ne soit complètement établi, les niveaux de bruit, sur les réseaux à haute et très haute tension, sont de l'ordre de +15 dBu à +25 dBu et ils persistent pendant 2 ms à 10 ms. Lorsque l'arc est établi, le bruit retombe à un niveau d'environ -15 dBu à -25 dBu.

Le fonctionnement des disjoncteurs pour enclencher ou déclencher une ligne produit un bruit d'amplitude variant de -10 dBu à +25 dBu qui dure environ 10 ms.

Des manœuvres normales mettant en jeu le fonctionnement de sectionneurs lents peuvent se produire fréquemment. Les perturbations ainsi engendrées sont caractérisées par une grande amplitude de l'ordre de +20 dBu à +35 dBu et une durée relativement longue, de l'ordre de 0,5 s à 5 s selon le type de sectionneur. La faible ionisation de l'arc entraîne des réamorçages répétés (aussi bien à l'ouverture qu'à la fermeture) qui produisent des trains d'oscillations à haute fréquence de grande amplitude dans l'enceinte du poste. Ces oscillations sont couplées, dans le poste, à toutes les lignes à haute tension de diverses façons, par exemple par couplage direct, par induction, par des fuites ou par le réseau de terre commun.

Les informations données ci-dessus pour le bruit de type impulsionnel sont résumées dans le tableau III.

Corrections for different bandwidths (BW) can be made by using the following formula:

$$\Delta P_n = 10 \lg \frac{BW \text{ (kHz)}}{4 \text{ (kHz)}}$$

Note. — Considerable variations to the above figures are possible due to differences in the design parameters of the overhead line which result in differences in the voltage gradient at the surface of the conductors for similar line voltages. Other variations are possible due to the construction, altitude and age of the line, whilst the effect of weather can also be significant, for example during mist, rain and hoarfrost.

Typical values of corona noise level are given in Figure 9, page 69.

b) short spikes and bursts of high amplitude, caused by operation of isolators and breakers and by lightning, flashovers and the like.

Typical values of impulse-type noise levels are measured at the HF-cable of the coupling equipment across 150 Ω in a bandwidth of 4 kHz.

Atmospheric discharge caused by lightning consists frequently of a number of consecutive partial discharges in irregular sequence with a spacing varying between 8 ms and 400 ms. When lightning strikes the line or near the line (tower, ground wire) the impulse-type noise voltages again have a high amplitude of the order of +20 dBu to +35 dBu (see Table III, page 39).

Flashovers on a power system result in the production of broadband energy. In general, the onset of a fault is so rapid and the fault current so high that the arc path quickly becomes highly ionized. At the onset of the fault and before the arc is fully established, the noise levels on the high and extra high voltage networks are of the order of +15 dBu to +25 dBu and have a duration of about 2 ms to 10 ms. When the arc has become established, the noise falls to a lower level of about -15 dBu to -25 dBu.

The operation of circuit-breakers for energizing and de-energizing lines produces noise of magnitude varying from -10 dBu up to +25 dBu and having a duration of about 10 ms.

Normal switching operations involving slow speed isolators ("disconnect") may occur frequently. The interference so generated is characterized by high amplitude noise of the order of +20 dBu to +35 dBu and relatively long duration, i.e. 0.5 s to 5 s, depending on the isolator design. The weak ionization of the arc results in repeated restriking (both on opening and closing) which produces high-amplitude trains of high-frequency oscillations within the area of the substation. These oscillations are coupled in the substation to HV-lines in various ways, for example, by direct coupling, by induction, by leakage or by the common earthing system.

The information given above for impulse-type noise is summarized in Table III.

TABLEAU III

Valeurs moyennes courantes des niveaux de bruit de type impulsionnel, mesurées à travers 150 Ω côté circuit de raccordement du groupe de couplage dans une largeur de bande de 4 kHz

$$\text{Niveau} = 20 \lg \frac{V}{775} \text{ dBu}$$

(avec V = valeur efficace en mV de la tension sinusoïdale de même amplitude que la tension impulsionnelle)

Origine	Niveau de tension (dBu)	Nature du bruit (Impulsions/s)	Durée (ms)
Foudre	+25	1 à 40 en moyenne 2 à 3	Jusqu'à 1000
Manœuvre de sectionneur (ouverture ou fermeture)	+25	300 à 900	500 à 5000
Disjoncteur (mise sous tension ou hors tension d'une ligne)	+20	1 000 à 2 000	5 à 20
Disjoncteur (élimination d'un défaut)	+4	1 000 à 2 000	5 à 20
Défaut (établissement de l'arc)	+20	1 000 à 2 000	5 à 20
Arc établi	-20	100 à 300	—

Note. — Soustraire 4 dB pour une largeur de bande de 2,5 kHz

4.3.2 Perturbations provenant de sources extérieures

Les systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie peuvent être soumis à des perturbations, en particulier celles provenant d'autres systèmes CPL utilisés en d'autres endroits du réseau du fait des fuites ou de couplages se produisant au-delà des circuits-bouchons. Il faut tenir compte de ce fait lorsqu'on fait le projet d'une liaison CPL et qu'on propose le choix d'une fréquence particulière. Selon la conception du système en question, de l'énergie en provenance de sources extérieures, telles que des systèmes à courants porteurs sur fils aériens et plus spécialement des émetteurs radio dans les gammes MF et LF, peut être captée et agir sur les récepteurs à fréquence porteuse.

4.3.3 Possibilités de perturbations

Les systèmes radio qui pourraient être concernés par les perturbations comprennent les systèmes maritimes et aéronautiques, les services de radiodiffusion et d'autres systèmes qui fonctionnent dans les bandes LF et MF. Une catégorie importante est celle des aides à la navigation telles que les systèmes de guidage OMEGA, DECCA, CONSOL et les radiobalises d'approche des aéroports. Certains services nécessitent une protection de signaux très faibles, en particulier lorsque des vies humaines sont en jeu. La protection nécessaire peut être assurée par un écart en fréquence et une séparation géographique appropriés. Cela peut être obtenu par une coopération continue et des consultations entre les services concernés.

Dans de nombreux cas, les marges de protection nécessaires sont fixées par le Règlement des radiocommunications (R.R.) de l'UIT et par l'annexe 10 à la Convention de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale) qui ont pour but de protéger les services radio. Lorsqu'il y a un conflit mutuel d'intérêts entre les autorités responsables du réseau de transport

TABLE III

*Typical average impulse-type noise levels,
measured at the HF-cable side of the coupling across 150 Ω
in a bandwidth of 4 kHz*

$$\text{Level} = 20 \lg \frac{V}{775} \text{ dBu}$$

(with V = r.m.s. value (mV) of the sinusoidal voltage of equal amplitude as the impulse voltage)

Source	Level (dBu)	Pulse density (Pulses/s)	Duration (ms)
Lightning discharge	+25	1 to 40 average 2 to 3	Up to 1 000
Isolator switch (busbar on or off)	+25	300 to 900	500 to 5 000
Circuit breaker (line on or off)	+20	1 000 to 2 000	5 to 20
Circuit breaker (short circuit off)	+4	1 000 to 2 000	5 to 20
Ground fault (onset of line fault)	+20	1 000 to 2 000	5 to 20
Burning arc	-20	100 to 300	—

Note. — Subtract 4 dB for 2.5 kHz bandwidth.

4.3.2 Interference from external sources

Power line carrier systems can suffer from interference, particularly from other power line carriers operating elsewhere on the power network, owing to leakage and coupling of energy past the line traps. This effect has to be taken into account in planning any PLC installation and in recommending the choice of a particular frequency. Depending on the particular system design, energy from external sources such as open-wire carrier systems and more particularly from MF and LF radio transmitters may be picked up and enter the carrier receivers.

4.3.3 Possibility of interference

The radio systems which could be involved in interference include maritime and aeronautical systems, broadcasting services and some systems operating in the MF and LF bands. One major category is that of aids to navigation such as the OMEGA, DECCA, CONSOL guidance systems and approach locators at airports. Some services necessitate protection of very weak signals, particularly when human life is at stake. The necessary protection can be assessed by appropriate frequency and geographical separation. This can be achieved by continuous co-operation and consultation between appropriate services.

In many cases the relative signal ratios required for protection are laid down by the ITU Radio Regulations (RR) and by Annex 10 to the ICAO (International Civil Aviation Organization) Convention for protecting radio services. Where there is a mutual conflict of interests between the authorities responsible for HV networks and aeronautical services,

d'énergie et les services aéronautiques, une concertation au plan national doit alors être mise sur pied entre les organismes concernés. Il est possible de se faire une idée de la protection offerte sachant que, à la limite de la couverture nominale d'une radiobalise aéronautique (en général comprise entre 15 et 100 milles nautiques), le signal reçu de celle-ci doit être supérieur à +37 dB par rapport à 1 $\mu\text{V/m}$ et qu'il doit y avoir un rapport de 15 dB entre le signal de la radiobalise et tout signal perturbateur à la même fréquence. Pour de plus amples renseignements, se reporter à l'annexe B.

4.4 Rapport signal/bruit admissible

4.4.1 Téléphonie

Pour la téléphonie, un rapport signal/bruit (S/B) psophométrique de 25 dB dans des conditions atmosphériques défavorables est considéré comme acceptable pour établir un projet. La plupart du temps, dans les conditions normales de fonctionnement, le rapport S/B à l'entrée du récepteur est de 30 dB à 40 dB. En utilisant un compresseur-expandeur, on introduit une amélioration subjective d'environ 15 dB et le rapport S/B à la sortie à fréquence vocale sera meilleur, à savoir de l'ordre de 50 dB.

Note. — Ces valeurs ne sont que des valeurs minimales et, dans certains pays où on exploite des systèmes CPL sur des lignes longues, avec un certain nombre de liaisons en série, on peut trouver avantageux d'adopter des valeurs plus sévères que celles qui sont indiquées ici.

4.4.2 Signaux

Pour les canaux harmoniques à déplacement de fréquence jusqu'à 1 200 Bd, un rapport signal/bruit de 15 dB environ, dans des conditions atmosphériques défavorables, est considéré comme acceptable pour établir un projet.

4.4.3 Signaux de protection

Pour la transmission des signaux de protection, contrairement à la téléphonie et aux signaux harmoniques, ce n'est pas le bruit dû à l'effet de couronne qui doit être pris en compte, mais le bruit impulsionnel présent au moment du défaut. Le rapport S/B nécessaire dépend du type de transmission des signaux de protection utilisé dans chaque cas et ne peut par conséquent être spécifié.

Le niveau de bruit impulsionnel est généralement plus grand que le niveau du signal et, par conséquent, les systèmes de transmission à large bande, associés à des limiteurs et à des canaux de signalisation à bande étroite, peuvent être utilisés avantageusement.

4.5 Equipements CPL

4.5.1 Modulation

Les méthodes de modulation suivantes sont couramment utilisées pour les systèmes CPL:

Modulation d'amplitude à bande latérale unique (BLU)

La modulation d'amplitude à bande latérale unique est le système le plus employé dans les applications actuelles. Les valeurs recommandées pour de tels équipements sont données dans la Publication 495 de la CEI: Valeurs recommandées pour les caractéristiques d'entrée et de sortie des équipements à courants porteurs sur lignes d'énergie, à bande latérale unique.

Ce système de modulation n'est en général pas sujet au phénomène indésirable de la «modulation par effet de couronne» et il permet de concentrer la puissance d'émission disponible pour la téléphonie et les signaux superposés dans la bande latérale inférieure ou supérieure.

consultation should then take place between the authorities concerned on a national basis. One may gain an idea of protection afforded, if one notes that, at the limit of the normal area of use of aeronautical locators (ranging generally from 15 to 100 nautical miles) the signals received from the locator is required to be greater than +37 dB in relation to 1 μ V/m and that there is to be a ratio of 15 dB between the locator signal and any interfering signal at the same frequency. For further information refer to Appendix B.

4.4 *Permissible signal/noise ratio*

4.4.1 *Speech*

For speech transmission, a signal-to-noise (S/N) ratio of 25 dB, psophometrically measured, under adverse weather conditions would be considered acceptable for design purposes. For the majority of the time during normal operating conditions, the S/N ratio at the input of the receiver, will be about 30 dB to 40 dB. With the use of compandors, the subjective improvement introduced equals approximately 15 dB and the S/N ratio at the LF output will be higher, i.e. about 50 dB.

Note. — These are minimum figures only and certain countries which operate PLC over long lines with numbers of links operating in tandem might find it advantageous to adopt better values than those proposed.

4.4.2 *Signalling*

For the frequency shift keyed (FSK) signalling channels up to 1200 Bd a signal-to-noise ratio of about 15 dB under adverse weather conditions is considered acceptable for design purposes.

4.4.3 *Protection*

For the transmission of protection signals, in contrast to speech and VFT transmission, it is not the corona noise level that has to be taken into account but the impulse noise level during the fault condition. The necessary S/N ratios depend on the type of protection signal transmission used in each case and therefore cannot be specified.

The impulse noise level is generally higher than the signal level and consequently broadband transmission systems combined with limiters and narrow-band signalling channels can be used to advantage.

4.5 *PLC terminals*

4.5.1 *Modulation*

The following modulation methods are currently in use for PLC systems:

Single-sideband (SSB) amplitude modulation

Single-sideband amplitude modulation is the system most used for present-day applications. Recommended values for such terminals are given in IEC Publication 495: Recommended Values for Characteristic Input and Output Quantities of Single Sideband Power Line Carrier Terminals.

This modulation system is generally not subject to the detrimental effect of carrier "corona modulation" and permits the concentration of the available transmitting power to the speech and superimposed signals in the upper or lower sideband.

La modulation BLU peut être utilisée avec une porteuse réduite ou supprimée.

L'avantage des systèmes BLU à porteuse réduite est qu'ils n'introduisent pas d'erreur dans la restitution des fréquences des canaux télégraphiques à fréquences vocales. L'emploi de tels systèmes est particulièrement adapté aux réseaux comprenant des télémètres et des transmissions de données fonctionnant avec plusieurs retransmissions.

Les avantages des systèmes BLU à porteuse supprimée sont la meilleure disponibilité de la gamme de fréquences et la puissance supplémentaire utilisable pour les signaux autres que la porteuse. Le problème de la dérive en fréquence des signaux démodulés reçus peut être résolu par une conception soignée de l'oscillateur à fréquence porteuse.

Modulation d'amplitude à deux bandes latérales

Cette méthode, utilisée dans les débuts de la transmission par CPL, n'est plus aussi répandue actuellement à cause de la grande largeur de bande requise pour un nombre donné de canaux.

L'utilisation des CPL dans de grands réseaux de télécommunication installés sur des réseaux de transport d'énergie de tension plus élevée ayant un niveau de bruit dû à l'effet de couronne plus important a rendu nécessaire le choix d'une méthode de modulation offrant une meilleure utilisation du spectre de fréquence ainsi qu'un meilleur rapport signal/bruit.

Modulation de fréquence (FM)

Les avantages habituellement liés à un système à modulation de fréquence ne sont en général pas mis à profit dans le cas des CPL à cause du spectre de fréquence disponible qui est réduit (cela par rapport aux systèmes à bande latérale unique).

La modulation de fréquence produit des bandes latérales qui peuvent se perturber les unes les autres, ce qui peut être difficile à surmonter dans le cas des systèmes CPL.

4.5.2 Espacement des canaux et mise en parallèle d'équipements CPL à bande latérale unique

La gamme disponible des fréquences porteuses utilisées par les systèmes CPL est divisée en bandes nominales (B) de 4 kHz ou 2,5 kHz.

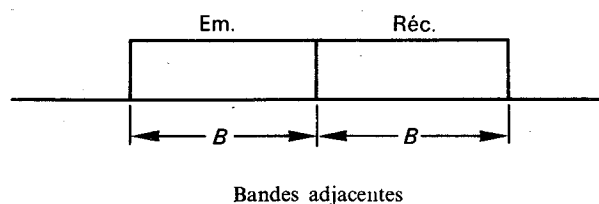
Afin d'obtenir la meilleure utilisation possible de cette gamme, l'espacement en fréquence entre émetteurs et/ou récepteurs est égal à $n \cdot B$, n étant un nombre pair; n dépend essentiellement de la conception des filtres d'aiguillage.

Les paragraphes suivants donnent des détails pour différents cas.

Fonctionnement en duplex

a) Equipements monovoie

Pour une liaison duplex, deux bandes nominales aux fréquences porteuses sont nécessaires. Les bandes de l'émetteur (Em.) et du récepteur (Réc.) peuvent être soit adjacentes soit séparées de $n \cdot B$ où $n \geq 2$.



SSB modulation can be used with reduced or suppressed carrier.

The advantage of SSB systems with reduced carrier is that they produce zero error in the reconstituted VF. (The use of such systems is particularly convenient in networks with telemetering and data transmission operating with two or more transmission sections in tandem).

The advantage of SSB systems with suppressed carrier is the higher availability of frequency space and additional power for other signals. The problem of frequency deviation in the reconstituted VF band can be overcome by careful carrier oscillator design.

Double-sideband amplitude modulation

This method used in the early days of PLC transmission is not so prevalent today because of the large bandwidth requirement for a given number of channels.

With the application of PLC to higher voltage power systems having higher corona noise and to large communication networks it has become necessary to adapt a modulation method offering an improved frequency spectrum utilization with the added advantage of achieving an improved signal-to-noise ratio.

Frequency modulation (FM)

The advantages usually associated with an FM system are not generally realized in the case of PLC because of the restricted frequency spectrum available (i.e. as compared with equivalent SSB systems).

FM produces sidebands which can interact and the effects may be difficult to eradicate in the case of PLC systems.

4.5.2 Channel spacing and paralleling of PLC terminals for SSB operation

The available carrier frequency range for PLC operation is divided into nominal carrier frequency bands (B) of 4 kHz or 2.5 kHz.

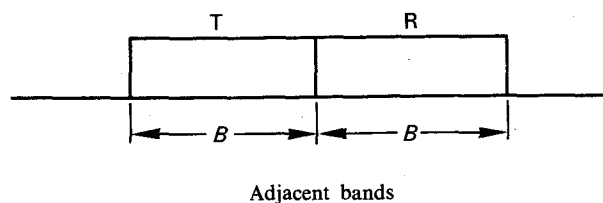
In order to make optimum use of the available range, the frequency spacing between transmitters and/or receivers is equal to $n \cdot B$, where n is an even number, n depends essentially on the design of separation filters.

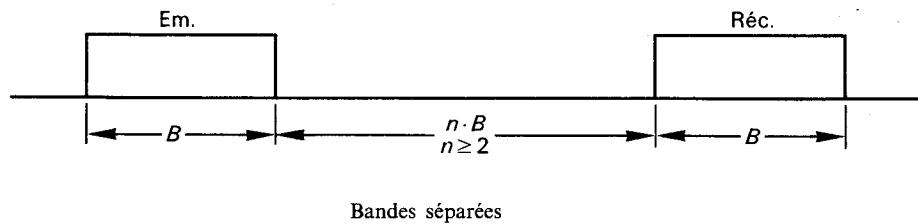
The following sub-clauses give further information for different cases.

Duplex operation

a) Single-channel terminals

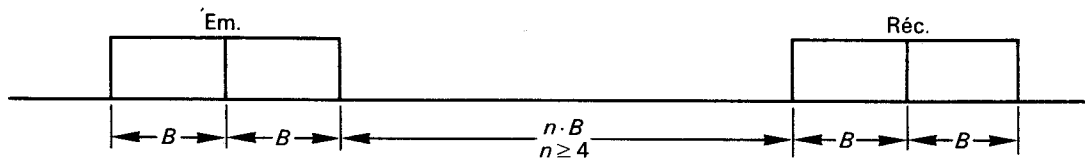
For a duplex link, two nominal carrier frequency bands are required. The transmitter (T) and receiver (R) bands may be either adjacent or with a frequency spacing of $n \cdot B$ where $n \geq 2$.





b) *Equipements multivoies*

A titre d'exemple, pour une liaison duplex à deux voies, quatre bandes nominales aux fréquences porteuses sont nécessaires. Les deux voies se trouvent placées côte à côte dans chaque sens de transmission. L'espacement en fréquence entre les couples de voies est égal à $n \cdot B$ où $n \geq 4$.



Espacement minimal en fréquence d'équipements situés dans un même poste

a) Plusieurs équipements raccordés au même groupe de couplage:

– Equipements monovoie

Pour des émetteurs, ou un émetteur et un récepteur, ou des récepteurs voisins, l'espacement en fréquence peut être égal à $n \cdot B$ où $n \geq 2$.

– Equipements à deux voies

Pour des émetteurs ou des récepteurs voisins, l'espacement en fréquence peut être égal à $n \cdot B$ où $n \geq 2$.

L'espacement en fréquence entre un émetteur et un récepteur voisin peut être égal à $n \cdot B$ où $n \geq 4$.

– Equipements multivoies

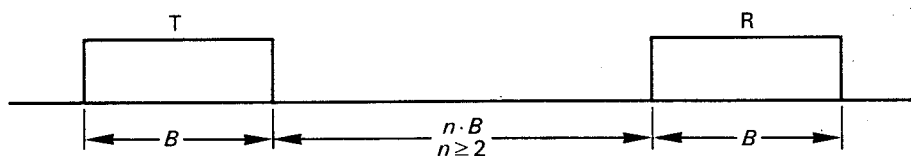
Pour les équipements multivoies, l'espacement nécessaire en fréquence dépend de la structure de ceux-ci. Comme on l'a indiqué ci-dessus, il dépend essentiellement de la conception des filtres d'aiguillage.

Une règle commode pour l'organisation du plan de fréquence consiste à choisir n égal au nombre de voies par équipement (si n est impair, l'espacement en fréquence sera $n+1$).

b) Couplage de plusieurs équipements dans un même poste à des lignes partant dans des directions différentes (Nord et Sud) sans ponts HF.

Si l'affaiblissement apporté par le poste est de l'ordre de 15 dB, les règles suivantes s'appliquent:

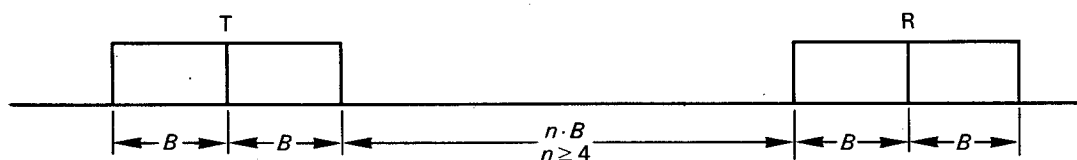
Les canaux de l'émetteur 1, direction N, et de l'émetteur 2, direction S, peuvent être choisis



With band separation

b) Multichannel terminals

As an example for one twin-channel duplex link, four nominal carrier frequency bands are necessary. Two channels are placed side by side in each direction. The frequency spacing between the channel pairs is equal to $n \cdot B$ where $n \geq 4$.



Minimum frequency spacing of terminals at a location

a) Several terminals connected to the same coupling device:

– Single-channel terminals

For neighbouring transmitters, or transmitters and receivers, or receivers, the frequency spacing must be equal to $n \cdot B$ where $n \geq 2$.

– Twin-channel terminals

For neighbouring transmitters or receivers, the frequency spacing must be equal to $n \cdot B$ where $n \geq 2$.

The frequency spacing between neighbouring transmitter and receiver must be equal to $n \cdot B$ where $n \geq 4$.

– Multichannel terminals

For multichannel terminals, the necessary frequency spacing depends on the equipment configuration. As stated above, it depends essentially on the design of separation filters.

A convenient rule for frequency planning is to choose n equal to the number of channels per terminal (if this number is odd, the frequency spacing is $n + 1$).

b) Coupling several terminals at a location to power lines going out in different directions (North and South) at a substation without CF by-pass.

If the substation attenuation is of the order of 15 dB, the following rules apply:

Transmitter 1, direction N, and transmitter 2, direction S, can be placed side by side

côte à côte sans espacement en fréquence. Le récepteur 1 de la direction N et le récepteur 2 de la direction S peuvent également être adjacents.

L'émetteur 1, direction N, et le récepteur 2 de la direction S doivent de préférence être écartés d'un espacement en fréquence égal à $n \cdot B$.

4.5.3 Puissance d'émission

D'après la Publication 495 de la CEI sur les équipements CPL à bande latérale unique, et en tenant compte des définitions contenues dans celle-ci:

Le rapport entre la puissance en crête de modulation et la puissance moyenne dépend de tous les paramètres qui ont une influence sur le signal multiplex (niveau de la téléphonie, présence ou non d'un compresseur-expandeur, nombre, type et niveau des signaux, etc.). A titre indicatif, ce rapport peut être considéré comme étant de l'ordre de 8,5 dB à 10 dB dans des conditions d'exploitation normales. Lorsque la voie téléphonie est attaquée par le signal d'essai, ce rapport peut décroître jusqu'à une valeur comprise entre 3,5 dB et 5 dB.

Limitation de la puissance pour la transmission CPL

Pour limiter les perturbations des autres systèmes de télécommunication par les systèmes CPL conventionnels, certaines administrations nationales des télécommunications limitent la puissance maximale injectée en ligne.

On peut noter que le niveau en question ci-dessus se rapporte à la puissance moyenne à fréquence porteuse. La puissance d'émission à la sortie de l'équipement peut être supérieure à celui-ci d'une quantité égale aux pertes dans le dispositif de couplage (couramment 5 dB).

Des règlements particuliers s'appliquent, dans certains pays, aux systèmes CPL de téléprotection normalement au repos ou aux systèmes CPL comportant un renforcement momentané des canaux de protection.

Répartition de la puissance

Dans les systèmes mixtes, la puissance d'émission disponible doit être répartie soigneusement entre les différents types de signaux. La répartition est déterminée par les propriétés suivantes de chacun des canaux unitaires:

- largeur de bande à prendre en compte pour le bruit;
- rapport signal/bruit nécessaire;
- méthode de modulation.

On fait les hypothèses suivantes:

- la somme des tensions à fréquence porteuse de tous les canaux unitaires est égale à la tension correspondant à la puissance en crête de modulation de l'émetteur;
- le réglage de l'écrêteur téléphonie est 0 dB (pour des écrêteurs permettant d'autres réglages du niveau de la voie téléphonie, il faut en tenir dûment compte pour la répartition de puissance);
- tous les canaux signaux utilisent la FM;
- la plage de fonctionnement doit être égale pour tous les canaux (selon le paragraphe 4.4, le rapport signal/bruit minimal requis est de 25 dB pour la téléphonie et de 15 dB pour les canaux de signalisation binaire);
- un canal harmonique à déplacement de fréquence 50 Bd est utilisé comme canal de référence.

without channel spacing. Receiver 1 from direction N and receiver 2 from direction S can also be placed side by side without band spacing.

Transmitter 1, direction N, and receiver 2 from direction S should preferably be kept apart by a frequency spacing equal to $n \cdot B$.

4.5.3 Sending power

According to IEC Publication 495 on SSB PLC terminals and taking into account the definitions contained therein:

The ratio between peak envelope power and mean power will depend on all factors influencing the multiplex signal (speech level, presence or absence of a compandor, number, type and level of signal, etc.). For information purposes the ratio may be assumed to lie between 8.5 dB and 10 dB under average service conditions. When the speech channel is loaded with the test tone the ratio may be as low as 3.5 dB to 5 dB.

Power limitation for PLC transmission

In order to minimize the interference from conventional PLC systems to other communication systems some national telecommunication authorities limit the maximum power injected to line.

Note that the above-quoted level refers to the mean carrier frequency power. The transmit power at the equipment output may be higher than this by the amount of loss of the coupling system (typically 5 dB).

Special regulations apply in some countries for normally quiescent PLC protection systems, or for PLC systems with temporary boosting of protection channels.

Power allocation

In multipurpose carrier systems the available transmitter power must be carefully allocated to the different types of signals. The allocation is determined by the following properties of the individual sub-channels:

- noise-bandwidth;
- required signal-to-noise ratio;
- method of modulation.

Based on the assumptions that:

- the sum of the voltages of all individual sub-channels at carrier frequencies is equal to the voltage corresponding to the peak envelope power (P.E.P.) of the transmitter;
- the speech limiter rise is 0 dB (for limiters allowing other increases in the speech-channel level, a suitable allowance must be made in the power allocation);
- FM is used for all signalling channels;
- the operating range for all sub-channels should be equal (according to Sub-clause 4.4 a minimum S/N ratio of 25 dB for speech and 15 dB for binary signalling channels is required);
- a 50 Bd FSK channel is used as the reference channel.

La répartition de la puissance peut être calculée comme suit:

$$P_r = P - 10 \lg \left[n_{si} \sqrt{\frac{B_{si}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{ts}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{rc}}{B_r}} + \sqrt{A \cdot \frac{B_a}{B_r}} \right]^2$$

où:

P_r = niveau du signal du canal de référence (dBm)

P = puissance en crête de modulation de l'émetteur (dBm)

B_r = largeur de bande à prendre en compte pour le bruit du canal de référence (Hz)

n_{si} = nombre de canaux ayant une rapidité de modulation i donnée (voir tableau ci-après)

B_{si} = largeur de bande à prendre en compte pour le bruit pour une rapidité de modulation i donnée (Hz)

B_{ts} = largeur de bande à prendre en compte pour le bruit pour le canal d'appel (Hz)

B_{rc} = largeur de bande à prendre en compte pour le bruit pour la porteuse réduite (Hz)

B_a = largeur de bande à prendre en compte pour le bruit du canal téléphonique (Hz)

$A = 10 \exp \frac{S/B_{min} \text{ (téléphonie)} - S/B_{min} \text{ (canal d'appel)} - G_c}{10}$ *

où:

G_c = gain du compresseur-expandeur (dB)

par exemple:

$S/B_{min} \text{ (téléphonie)} = 25 \text{ dB}$
 $S/B_{min} \text{ (canal d'appel)} = 15 \text{ dB}$ } voir paragraphe 4.4

et d'après ce qui précède:

$A = 10$ (sans compresseur-expandeur)

$A = 1$ (avec un compresseur-expandeur de gain $G_c = 10 \text{ dB}$)

* $10 \exp n = 10^n$

Connaissant P_r , le niveau de tous les autres canaux peut être calculé comme suit:

TABLEAU IV
Répartition de la puissance d'émission dans les systèmes mixtes

Canal	Largeur de bande à prendre en compte pour le bruit B (Hz)	Niveau (dBm)	
		Sans compresseur-expandeur	Avec compresseur-expandeur
Canal de référence (50 Bd)	80	P_r	P_r
$i = 50 \text{ Bd}$	80	$P_r + 0$	$P_r + 0$
$i = 100 \text{ Bd}$	160	$P_r + 3$	$P_r + 3$
$i = 200 \text{ Bd (360 Hz)}$	240	$P_r + 5$	$P_r + 5$
$i = 200 \text{ Bd (480 Hz)}$	320	$P_r + 6$	$P_r + 6$
$i = 600 \text{ Bd}$	900	$P_r + 10,5$	$P_r + 10,5$
Canal d'appel	Doit être spécifiée par le constructeur; couramment: 80	$P_r + 0$	$P_r + 0$
Porteuse réduite	Doit être spécifiée par le constructeur; couramment: 200	$P_r + 4$	$P_r + 4$
Téléphonie (300 Hz à 2 000 Hz)	1 700	$P_r + 23$	$P_r + 13$
Téléphonie (300 Hz à 2 400 Hz)	2 100	$P_r + 24$	$P_r + 14$
Téléphonie (300 Hz à 3 400 Hz)	3 100	$P_r + 26$	$P_r + 16$

L'addition des tensions des différents canaux plutôt que celle des puissances est une méthode prudente qui évite de surcharger l'émetteur et, par conséquent, évite les problèmes d'intermodulation. Il en résulte que la puissance moyenne du signal multiplex peut être considérablement inférieure à la puissance en crête de modulation. Si on admet des surcharges

The power allocation can be calculated as follows:

$$P_r = P_{P.E.P.} - 10 \lg \left[n_{si} \sqrt{\frac{B_{si}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{ts}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{rc}}{B_r}} + \sqrt{A \cdot \frac{B_a}{B_r}} \right]^2$$

where:

- P_r = signal level of the reference channel (dBm)
 $P_{P.E.P.}$ = peak envelope power of the transmitter (dBm)
 B_r = noise bandwidth of the reference channel (Hz)
 n_{si} = number of sub-channels of a given transmission speed i (see table below)
 B_{si} = noise bandwidth of sub-channel of a given transmitter speed i (Hz)
 B_{ts} = noise bandwidth of telephone signalling channel (Hz)
 B_{rc} = noise bandwidth of reduced carrier (Hz)
 B_a = noise bandwidth of the speech channel (Hz)
 $A = 10 \exp \frac{S/N_{\min}(\text{speech}) - S/N_{\min}(\text{signal channel}) - G_c^*}{10}$

where:

G_c = gain of compandor (dB)

for example:

$S/N_{\min}(\text{speech}) = 25 \text{ dB}$
 $S/N_{\min}(\text{signal channel}) = 15 \text{ dB}$ } see Sub-clause 4.4

and from the above:

$A = 10$ (without compandor)

$A = 1$ (with compandor where $G_c = 10 \text{ dB}$)

* $10 \exp n = 10^n$

From P_r the level of all other sub-channels can be calculated as follows:

TABLE IV
Allocation of transmitter power in multipurpose situations

Sub-channel	Noise bandwidth B (Hz)	Level (dBm)	
		Without compandor	With compandor
Reference channel (50 Bd)	80	P_r	P_r
$i = 50 \text{ Bd}$	80	$P_r + 0$	$P_r + 0$
$i = 100 \text{ Bd}$	160	$P_r + 3$	$P_r + 3$
$i = 200 \text{ Bd (360 Hz)}$	240	$P_r + 5$	$P_r + 5$
$i = 200 \text{ Bd (480 Hz)}$	320	$P_r + 6$	$P_r + 6$
$i = 600 \text{ Bd}$	900	$P_r + 10.5$	$P_r + 10.5$
Telephone signalling channel	To be stated by manufacturer, typically: 80	$P_r + 0$	$P_r + 0$
Reduced carrier	To be stated by manufacturer, typically: 200	$P_r + 4$	$P_r + 4$
Speech (300 Hz to 2 000 Hz)	1 700	$P_r + 23$	$P_r + 13$
Speech (300 Hz to 2 400 Hz)	2 100	$P_r + 24$	$P_r + 14$
Speech (300 Hz to 3 400 Hz)	3 100	$P_r + 26$	$P_r + 16$

By the conservative procedure of summing sub-channel voltages instead of powers any overloading of the transmitter and, therefore, intermodulation problems are avoided. As a result the mean power of the multiplex signal may be considerably below the P.E.P. If instantaneous overloading of the transmitter can be accepted, more power can be allocated to

instantanées de l'émetteur, un supplément de puissance peut être attribué à tous les canaux ou à seulement quelques-uns d'entre eux, ce qui améliore leur rapport S/B . Des répartitions particulières de la puissance peuvent être nécessaires pour les signaux de téléprotection pour les raisons données au paragraphe 4.4.3.

4.6 Affaiblissement admissible en ligne

L'affaiblissement admissible en ligne dans des conditions atmosphériques défavorables est donné par:

$$a_{\text{ligne max}} = P_r - P_{\text{cor}}^* - S/B_{\text{min}} - a_{\text{coupl}}$$

où:

- P_r = niveau d'émission du signal du canal de référence à la sortie de l'équipement (paragraphe 4.5.3)
 P_{cor}^* = niveau de bruit dû à l'effet de couronne dans la largeur de bande du canal de référence (paragraphe 4.3.1)
 S/B_{min} = rapport S/B minimal acceptable pour les canaux signaux (paragraphe 4.4.2)
 a_{coupl} = pertes de couplage à l'une des extrémités de la ligne (paragraphe 4.2)

Exemple 1

Equipement CPL: puissance nominale de sortie = +40 dBm
 porteuse supprimée
 mode d'exploitation: téléphonie seulement
 (300 Hz à 2400 Hz)

Tension de la ligne d'énergie: 400 kV; P_{cor} (4 kHz) = -10 dBm

Couplage: pertes de couplage $a_{\text{coupl}} = 5$ dB

D'après le paragraphe 4.3.1: $P_{\text{cor}}^* = -10 + 10 \lg \left(\frac{80 \text{ Hz}}{4000 \text{ Hz}} \right) = -27$ dBm

D'après le paragraphe 4.4.2: $S/B_{\text{min}} = 15$ dB

a) Sans compresseur-expandeur:

d'après le paragraphe 4.5.3: $P_r = +15$ dBm
 par conséquent: $a_{\text{ligne max}} = P_r - P_{\text{cor}}^* - S/B_{\text{min}} - a_{\text{coupl}}$
 $= +15 - (-27) - 15 - 5$
 $a_{\text{ligne max}} = 22$ dB

b) Avec compresseur-expandeur:

d'après le paragraphe 4.5.3: $P_r = +24$ dBm
 par conséquent: $a_{\text{ligne max}} = 31$ dB

Exemple 2

Equipement CPL: puissance nominale de sortie = +40 dBm
 porteuse réduite: $B_{\text{rc}} = 200$ Hz
 mode d'exploitation: téléphonie + signaux
 (300 Hz à 2400 Hz + 9 canaux 50 Bd)

Tension de la ligne d'énergie: 400 kV; P_{cor} (4 kHz) = -10 dBm

Couplage: pertes de couplage $a_{\text{coupl}} = 5$ dB

D'après le paragraphe 4.3.1: $P_{\text{cor}}^* = -27$ dBm

D'après le paragraphe 4.4.2: $S/B_{\text{min}} = 15$ dB

all or some of the subchannels, thus improving their S/N ratios. Special power allocation for teleprotection signals may be necessary for reasons given in Sub-clause 4.4.3.

4.6 Permissible line loss

The permissible line loss under adverse weather conditions is given by:

$$a_{\text{line max}} = P_r - P_{\text{cor}}^* - S/N_{\text{min}} - a_{\text{coupl}}$$

where:

- P_r = the transmitted signal level of the reference channel at the terminal output (Sub-clause 4.5.3)
- P_{cor}^* = the corona noise level within the bandwidth of the reference channel (Sub-clause 4.3.1)
- S/N_{min} = the minimum acceptable S/N ratio for data signalling channels (Sub-clause 4.4.2)
- a_{coupl} = the coupling loss at one line end (Sub-clause 4.2)

Example 1

PLC-terminal: nominal output power = +40 dBm (P.E.P.)
 suppressed carrier
 operation mode: speech only
 (300 Hz to 2400 Hz)

Line voltage: 400 kV; P_{cor} (4 kHz) = -10 dBm

Coupling: coupling loss a_{coupl} = 5 dB

From Sub-clause 4.3.1: $P_{\text{cor}}^* = -10 + 10 \lg \left(\frac{80 \text{ Hz}}{4000 \text{ Hz}} \right) = -27 \text{ dBm}$

From Sub-clause 4.4.2: $S/N_{\text{min}} = 15 \text{ dB}$

a) Without compandor:

from Sub-clause 4.5.3: $P_r = +15 \text{ dBm}$

$$\begin{aligned} \text{therefore: } a_{\text{line max}} &= P_r - P_{\text{cor}}^* - S/N_{\text{min}} - a_{\text{coupl}} \\ &= +15 - (-27) - 15 - 5 \\ \underline{a_{\text{line max}} &= 22 \text{ dB}} \end{aligned}$$

b) With compandor:

from Sub-clause 4.5.3: $P_r = +24 \text{ dBm}$

$$\text{therefore: } \underline{a_{\text{line max}} = 31 \text{ dB}}$$

Example 2

PLC-terminal: nominal output power = +40 dBm (P.E.P.)
 reduced carrier: $B_{\text{rc}} = 200 \text{ Hz}$
 operation mode: speech + data
 (300 Hz to 2400 Hz + 9 sub-channels 50 Bd each)

Line voltage: 400 kV; P_{cor} (4 kHz) = -10 dBm

Coupling: coupling loss a_{coupl} = 5 dB

From Sub-clause 4.3.1: $P_{\text{cor}}^* = -27 \text{ dBm}$

From Sub-clause 4.4.2: $S/N_{\text{min}} = 15 \text{ dB}$

- a) Sans compresseur-expandeur:
d'après le paragraphe 4.5.3: $P_r = +11 \text{ dBm}$
par conséquent: $a_{\text{ligne max}} = 18 \text{ dB}$
- b) Avec compresseur-expandeur:
d'après le paragraphe 4.5.3: $P_r = +15,5 \text{ dBm}$
par conséquent: $a_{\text{ligne max}} = 22,5 \text{ dB}$

L'affaiblissement admissible en ligne trouvé est calculé pour les conditions atmosphériques extrêmement défavorables, c'est-à-dire les conditions qui donnent les mauvais rapports S/B indiqués.

Par conséquent, l'affaiblissement en ligne à prendre en compte pour l'étude d'une liaison CPL (et à comparer aux valeurs calculées pour la ligne considérée) doit être inférieur de quelques décibels à l'affaiblissement admissible en ligne; en effet, l'affaiblissement en ligne obtenu à partir des formules est celui correspondant aux conditions sans tenir compte du givre.

La puissance d'émission des équipements CPL peut être augmentée si un plus grand affaiblissement en ligne est attendu ou calculé, afin d'assurer des performances adéquates pour la transmission.

Pour les lignes à haute tension sujettes à un bruit dû à l'effet de couronne plus faible que celui pris comme base pour les calculs, l'affaiblissement admissible en ligne peut être augmenté.

Les modifications de la configuration du réseau de transport d'énergie peuvent occasionnellement augmenter l'affaiblissement en ligne d'une liaison CPL de quelques décibels.

Du fait des variations de l'affaiblissement en ligne de quelque 10 dB à 40 dB, il est nécessaire d'équiper les récepteurs CPL d'une commande automatique de gain efficace pour maintenir un niveau de sortie constant côté fréquences vocales.

4.7 Alimentation en énergie

La continuité de la transmission de l'information sur une liaison CPL doit être assurée, quelles que soient les défaillances de la source d'alimentation. Par conséquent, l'alimentation en énergie des équipements CPL ne peut pas être effectuée directement à partir du réseau mais doit être prise sur une batterie-tampon installée spécialement pour les besoins des télécommunications. L'utilisation des batteries du poste n'est pas recommandée à cause de la plage de variation éventuelle de leur tension et à cause du fait qu'elles sont couramment sujettes à des surtensions transitoires produites par le fonctionnement des disjoncteurs.

La batterie-tampon installée en général pour les besoins de l'autocommutateur téléphonique local convient beaucoup mieux à cet usage. Les batteries de ce type doivent avoir la capacité adéquate pour alimenter tous les équipements de télécommunication et l'autocommutateur local pour la période probable la plus longue de coupure de la source d'énergie primaire. Les conducteurs utilisés pour relier la batterie aux différents équipements de télécommunication doivent avoir une section suffisante pour que la chute de tension qui leur est due reste en tout état de cause inférieure à 1 V.

Dans les pays où l'on dispose d'alimentations primaires de secours, une réserve de 1 h à 3 h peut être suffisante et d'autres sources d'énergie comme des diesels peuvent ne pas être nécessaires.

Une batterie au plomb de 48 V (50 V) avec le pôle positif relié à la terre est recommandée du fait qu'elle est d'utilisation quasi universelle pour le fonctionnement des autocommutateurs, bien que, dans certaines installations, d'autres types de batteries (par exemple cadmium-nickel) soient utilisés.

- a) Without compandor:
from Sub-clause 4.5.3: $P_r = +11 \text{ dBm}$
therefore: $a_{\text{line max}} = 18 \text{ dB}$
- b) With compandor:
from Sub-clause 4.5.3: $P_r = +15.5 \text{ dBm}$
therefore: $a_{\text{line max}} = 22.5 \text{ dB}$

The permissible line loss found is calculated in extremely adverse weather conditions, that is, conditions that produce the poor S/N ratios stated.

The line loss to be taken into account in designing the PLC link (and to be compared with the values calculated for the line under consideration) has to be lower by some decibels than the permissible line loss, as the line losses obtained from formulae are for conditions without taking icing conditions into consideration.

The transmit power of PLC terminals may be increased if larger line losses are expected or calculated, in order to ensure adequate transmission performance.

For high voltage lines with a corona noise level lower than that assumed as a basis for calculation, the permissible line loss may be increased.

Variations in the power network configuration may occasionally increase the line losses of a PLC link by some decibels.

Because of line loss variations from say, 10 dB to 40 dB, it is necessary to provide PLC receivers with an efficient automatic gain control to maintain a constant output level at the VF side.

4.7 Power supplies

The continuity of information transmitted over a PLC link must be ensured for all emergency conditions of the power system. Hence the power supply for PLC terminals cannot be taken directly from the mains network, but must be derived from a storage battery, especially installed for telecommunication purposes. The use of station batteries is not recommended because of the possible range of variation of battery terminal voltage and the fact that such batteries are commonly subject to transient overvoltages produced by the operation of switchgear.

The storage battery generally installed for local telephone exchange facilities is much more suitable for this purpose. Such a battery must have adequate capacity to feed all the telecommunication terminals and local exchange facilities for the longest likely period of shut-down of the primary energy source. The conductors used to connect the battery to the various items of communications equipment should be large enough to ensure that a voltage drop of less than 1 V occurs at the equipment terminals.

In those countries where alternative primary supplies are available, 1 h to 3 h standby may be sufficient and other supplies, for example diesel, may not be necessary.

A 48 V (50 V) positive earthed lead-acid battery is recommended since 48 V is almost universal for P.A.X. operation although on some installations, other types of battery such as nickel-cadmium etc. are used.

Il est cependant possible d'utiliser un convertisseur statique pour fournir une alimentation alternative aux équipements à courants porteurs en un lieu donné, le convertisseur pouvant fonctionner sur la batterie du poste.

L'alimentation basse tension alternative du poste est alors utilisée comme source de secours pour les équipements dans le cas de panne du convertisseur à l'aide d'un dispositif de commutation très rapide ne provoquant pas de coupure.

Dans le cas d'une batterie au plomb, on considère qu'il est bon de la charger à l'aide d'un redresseur réglé pour obtenir une tension constante pendant le temps de fonctionnement normal et pour lui assurer une longue durée de vie. Après décharge éventuelle, le même redresseur recharge la batterie à courant constant jusqu'à atteindre une tension d'environ 2,4 V par élément, puis la charge continue à tension constante. Comme il est dangereux de maintenir cette tension élevée pendant un temps long, il est recommandé de ramener la tension à environ 2,2 V par élément lorsque le courant de charge est tombé à environ 20 mA/Ah. Cette fonction est en général assurée par un relais de mesure de courant.

5. Mesures

Pour obtenir une image objective des performances d'une liaison à courants porteurs, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre de mesures, en particulier au moment du réglage initial d'une liaison CPL ou à la suite du réaménagement d'un réseau CPL.

Les différentes mesures décrites s'efforcent de tenir compte des difficultés pratiques rencontrées sur le site.

La mesure des impédances peut être effectuée soit en mesurant le courant et la tension, soit à l'aide d'un pont, à condition d'utiliser un voltmètre sélectif. La mesure du courant et de la tension n'est pas commode dans la pratique car elle nécessite de faire des calculs.

Certains paramètres sont fonction des conditions atmosphériques qui règnent au moment de la mesure. La pluie augmente le niveau de bruit et le givre augmente l'affaiblissement. L'affaiblissement dépend également des variations du rapport d/h de la ligne consécutives aux variations de température des conducteurs de celle-ci (d = distance horizontale entre les conducteurs utilisés pour la transmission par CPL; h = hauteur moyenne des conducteurs au-dessus du sol).

Normalement, la mesure de ces paramètres ne peut pas être effectuée avec les appareils inclus dans les équipements CPL. Ceux-ci sont en général destinés à vérifier, à intervalles réguliers, les valeurs des réglages des équipements CPL pour détecter les détériorations des performances de la liaison dans le temps. Le tableau V donne la liste des appareils de mesure nécessaires pour le réglage et les mesures détaillées sur les liaisons CPL; les spécifications générales de ces appareils et la description des méthodes de mesure sont indiquées.

It is feasible however to use a single static inverter to provide a.c. supplies to the carrier sets at a location, and this inverter could operate from the station battery.

The substation low tension a.c. supply would be used as an emergency supply to the carrier sets in the event of an inverter failure by means of a high-speed, no-break switching arrangement.

In the case of a lead-acid battery, it is considered to be good practice to feed the battery by means of a regulated rectifier to provide a constant voltage during the normal working period and to ensure a long life for the battery. After an emergency discharge the same rectifier will re-charge the battery with a constant current to reach a top voltage of approximately 2.4 V per element and then the charge will continue at constant voltage. As it is dangerous to maintain this high voltage for a long time, it is recommended to restore the voltage to approximately 2.2 V per element after the charging current decreases to about 20 mA/Ah. This operation is generally provided by a current-measuring relay.

5. Measurements

To obtain an objective picture of the performance of a power line carrier link, a number of measurements are required, especially during the initial line-up of a PLC-link or when rearranging a carrier network.

The different measurements described endeavour to take into account the practical difficulties at the place of installation.

The measurement of impedance may be made either by a current-voltage method or by a bridge-method, providing that a selective measuring set is used. Note, the current-voltage method is cumbersome in practice, because of the need to calculate.

Certain characteristics will change with the weather prevailing at the time of measurement. Rain will increase the noise-level and icing the attenuation. The attenuation will also change due to the alteration of the d/h ratio of the line when the temperature of the overhead line conductors change (d = horizontal distance between PLC conductors; h = average conductor height above ground).

Measurement of these properties cannot normally be done with the instruments built into PLC-terminals. These are generally required to check the operating values of the PLC-equipment at regular intervals to detect the deterioration in the performance of a carrier-link with time. The instruments required for lining-up and detailed investigations of PLC-circuits are listed in Table V where their general specifications are given and method of application described.

TABLEAU V

Liste des appareils de mesure convenant aux essais des CPL

Appareils de mesure	Utilisations	Spécifications
1) Banc de mesure HF (générateur et voltmètre)	Mesures des niveaux, des affaiblissements, des gains et des impédances dans la gamme 10 kHz à 600 kHz environ, en large bande ou en sélectif Emission des niveaux de référence Mesure des niveaux de bruit	<i>Générateur:</i> Fréquence: réglable de façon continue de 10 kHz à 600 kHz réglage fin: ± 5 kHz Impédances de sortie (commutables): 75, 100, 150, 600 Ω, 0 ($< 3 \Omega$), symétrique Niveau de sortie: réglable par bonds de -60 dBm à +20 dBm réglage fin: 20 dB de façon continue <i>Voltmètre:</i> Gamme de fréquences: 10 kHz à 600 kHz Plage de mesures en large bande: -60 dBm à +40 dBm Plage de mesures en sélectif: -80 dBm à +40 dBm Largeur de bande à 3 dB pour les mesures en sélectif: ± 40 Hz Affaiblissement hors bande: 60 dB à ± 300 Hz Affaiblissement de distorsion non linéaire: > 70 dB Impédances d'entrée (commutables): 75, 100, 150, 600, 6 000 Ω, symétrique Erreur de mesure: $\pm 0,2$ dB
2) Banc de mesure BF (générateur et voltmètre)	Mesures des niveaux, des affaiblissements, des gains et des impédances dans la gamme des fréquences vocales (300 Hz à 4 000 Hz) Emission des niveaux de référence Large bande Sélectif Psophométrie	<i>Générateur:</i> Fréquence: réglable de façon continue de 200 Hz à 4 000 Hz Impédances de sortie (commutables): 0 ($< 6 \Omega$), 600 Ω, symétrique Niveau de sortie: réglable par bonds de -40 dBm à +10 dBm réglage fin: 15 dB de façon continue <i>Voltmètre:</i> Gamme de fréquences: 200 Hz à 4 000 Hz Plage de mesures en large bande: -70 dBm à +20 dBm Impédances de sortie (commutables): 6 000 Ω, 600 Ω, symétrique Erreur de mesure: $\pm 0,2$ dB

5.1 Mesures sur la voie de transmission globale

Mesures effectuées côté équipement à courants porteurs du câble de raccordement (voir figures 10 et 11, pages 70 et 71).

5.1.1 Impédance d'entrée (voir figure 11)

Pour obtenir un fonctionnement optimal, l'impédance vue côté équipement du câble de raccordement doit s'adapter au mieux à celle de l'équipement à courants porteurs. Cependant,

TABLE V

List of instruments suitable for PLC testing

Instrument	Application	Specification
1) CF-transmission measuring set (level oscillator and level meter)	Measurement of levels, attenuations, amplifications, impedances in the M.F. range from approximately 10 kHz to 600 kHz, wideband or selective Transmitting of standard levels Noise measurement	<i>Level oscillator:</i> Frequency: continued adjustment $f = 10$ kHz to 600 kHz fine adjustment $f = \pm 5$ kHz Output impedance (switchable): 75, 100, 150, 600 Ω 0 ($< 3 \Omega$), symmetrical Output level: -60 dBm to $+20$ dBm in steps fine adjustment: 20 dB continuous <i>Level meter:</i> Frequency range: 10 kHz to 600 kHz Measuring range, wideband: -60 dBm to $+40$ dBm Measuring range, selective: -80 dBm to $+40$ dBm Bandwidth for selective measurements (3 dB): ± 40 Hz Stopband-attenuation: 60 dB at ± 300 Hz Non-linear distortion attenuation: > 70 dB Input impedance (switchable): 75, 100, 150, 600, 6000 Ω symmetrical Measuring error: ± 0.2 dB
2) VF-Transmission measuring set (level oscillator and level meter)	Measurement of levels, attenuations, amplifications, and impedances in the v.f.-range from 300 Hz to 4000 Hz. Transmitting of standard levels Wide band Selective Psophometric	<i>Level oscillator:</i> Frequency: continued adjustment from 200 Hz to 4000 Hz Output impedance (switchable): 0 ($< 6 \Omega$), 600 Ω, symmetrical Output level: -40 dBm to $+10$ dBm in steps fine adjustment: 15 dB continuous <i>Level meter:</i> Frequency range: 200 Hz to 4000 Hz Measuring range, wideband: -70 dBm to $+20$ dBm Input impedance (switchable): 6000 Ω, 600 Ω, symmetrical Measuring error: ± 0.2 dB

5.1 Measurements of total transmission path

Measurements made at the carrier-terminal ends of carrier cables (see Figures 10 and 11, pages 70 and 71).

5.1.1 Input impedance (see Figure 11)

For optimum performance, the impedance at the input of the carrier cable should match that of the carrier terminal as close as possible. However, since coupling devices with broad-band

étant donné que les groupes de couplage à large bande sont devenus les plus courants, on mesure une impédance complexe qui dépend de la fréquence lorsque le câble est connecté à la ligne de transport d'énergie. Par conséquent, l'adaptation exacte du groupe de couplage ne peut pas être obtenue sur la totalité de la largeur de bande.

L'impédance d'entrée (partie réelle et partie imaginaire) peut être mesurée en utilisant la méthode indiquée à la figure 11, page 71, si l'appareil dont on dispose ne permet pas une mesure directe. Cette méthode suppose que R est négligeable devant Z_1 .

La mesure et le calcul peuvent être conduits comme suit:

Calcul de $|Z_1|$ à partir des niveaux de tension V_1 et V_2 , le condensateur C_N étant court-circuité, et calcul de $|Z_2|$, le condensateur C_N étant normalement en place:

$$|Z_1| \text{ ou } |Z_2| = R_0 \cdot 10^{\exp \left| \frac{V_1 - V_2}{20} \right|}$$

où:

V_1, V_2 = niveau de tension en dBu

0 dBu $\triangleq$ 775 mV (valeur efficace)

Note. — Le condensateur C_N doit être choisi de telle façon que $|Z_c|$ soit de l'ordre de grandeur de $|Z_1|$

$$|Z_c| = \frac{1}{\omega \cdot C_N}$$

Pour couvrir toute la gamme des fréquences des courants porteurs et des impédances, un condensateur compris entre 1 nF et 100 nF est en général nécessaire.

Ensuite, la partie réelle (R_1) et la partie imaginaire (X_1) de Z_1 peuvent se calculer ainsi:

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$X_1 = \frac{|Z_1|^2 - |Z_2|^2 + |Z_c|^2}{2 |Z_c|}$$

$$R_1 = \sqrt{|Z_1|^2 - |X_1|^2}$$

Afin d'avoir une idée d'ensemble, les mesures doivent être faites pour différentes fréquences dans la bande passante du groupe de couplage.

5.1.2 Affaiblissement de la voie de transmission

En utilisant la méthode de mesure de la figure 10, page 70, l'affaiblissement de transmission de la totalité de la voie est:

$$a_{\text{tot}} = V_1 - V_2 + 10 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right) - 6 \text{ dB}$$

On ne doit pas tenir compte du dernier terme (-6 dB) dans le cas où le générateur a une résistance d'adaptation R_1 incorporée parce que le niveau V_1 lu sur l'indicateur tient compte de la baisse de 6 dB.

L'affaiblissement de la liaison est l'un des paramètres qui définit le rapport S/B de celle-ci. Par conséquent, il est conseillé d'effectuer des mesures pour toutes les fréquences de la bande passante du dispositif de couplage pour détecter les pointes d'affaiblissement éventuelles. Le rôle des circuits-bouchons et les pertes introduites par le poste peuvent être vérifiés en recommençant les mesures pour différents schémas du poste, à savoir par exemple:

- ligne ouverte aux deux extrémités;
- ligne mise à la terre aux deux extrémités;
- ligne connectée au jeu de barres aux deux extrémités.

characteristic have come to be standard, a frequency dependent complex impedance will be measured when connected to the power line. Therefore, exact matching of the coupling device will not be achieved over the total bandwidth.

The input impedance (both ohmic and reactive component) can be measured by employing the method indicated in Figure 11, page 71, if the available instrument does not permit direct measurement. A prerequisite is that R is negligible compared to Z_1 .

The measurement and determination should be carried out as follows:

Calculate $|Z_1|$ from the voltage levels V_1 and V_2 with capacitor C_N short-circuited and $|Z_2|$ with C_N in circuit

$$|Z_1| \text{ or } |Z_2| = R_0 \cdot 10^{\exp \left| \frac{V_1 - V_2}{20} \right|}$$

where:

V_1, V_2 = voltage level in dBu

0 dBu $\triangleq$ 775 mV (r.m.s.)

Note. — The capacitor C_N should be chosen in such a way that $|Z_c|$ is of the order of $|Z_1|$.

$$|Z_c| = \frac{1}{\omega \cdot C_N}$$

To cover the whole range of carrier frequencies and impedances, a capacitor of 1 nF to 100 nF will generally be necessary.

Now, both the ohmic (R_1) and reactive (X_1) component of Z_1 can be calculated:

$$Z_1 = R_1 + j \cdot X_1$$

$$X_1 = \frac{|Z_1|^2 - |Z_2|^2 + |Z_c|^2}{2 |Z_c|}$$

$$R_1 = \sqrt{|Z_1|^2 - |X_1|^2}$$

To obtain an overall picture, measurements should be taken at different frequencies within the pass-band of the coupling device.

5.1.2 Attenuation of transmission path

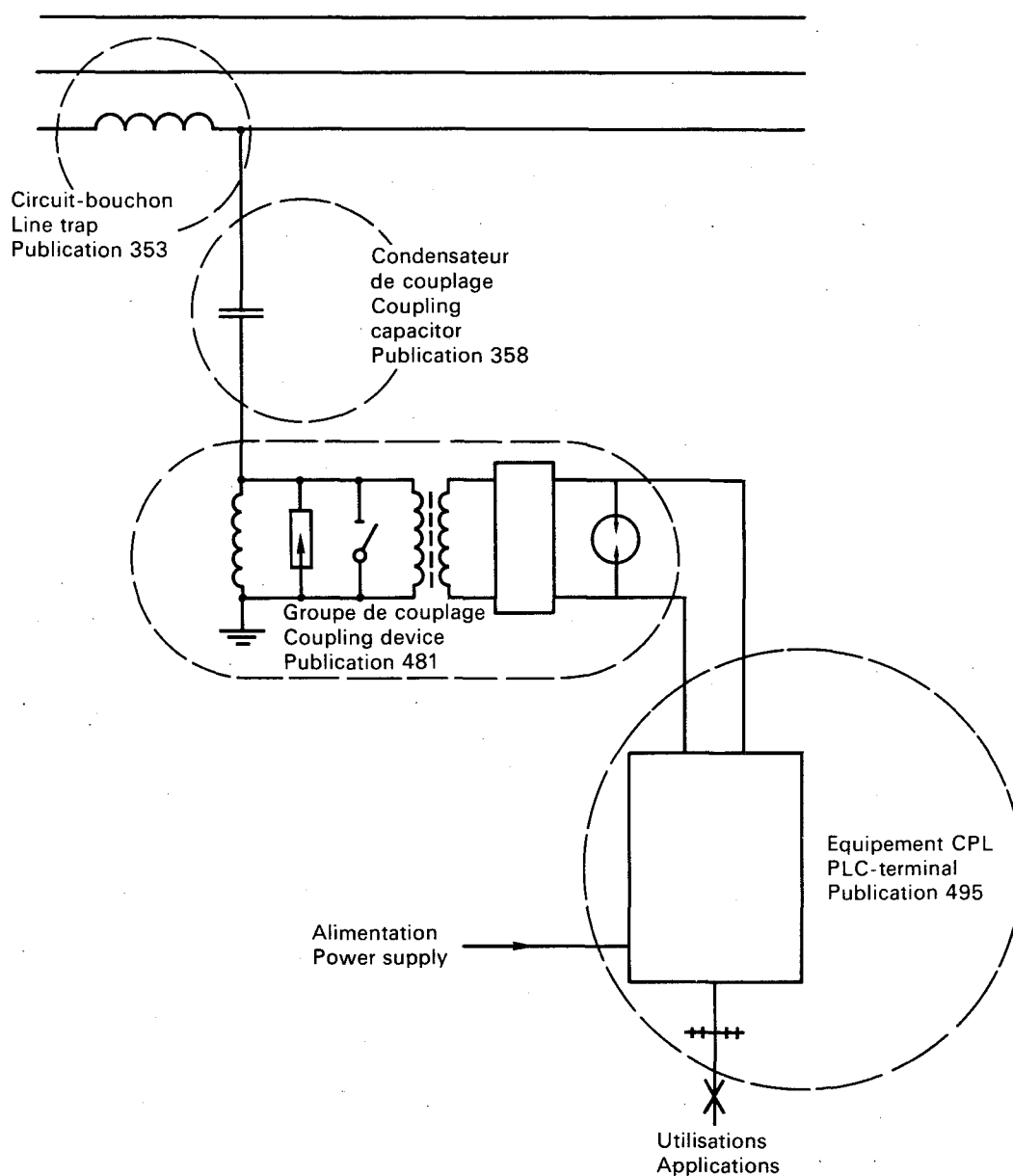
Using the measuring arrangement of Figure 10, page 70, the transmission loss of the total circuit will be:

$$a_{\text{tot}} = V_1 - V_2 - 10 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right) - 6 \text{ dB}$$

The last term (−6 dB) has to be disregarded in those cases where the test-oscillator has a built-in matching resistor R_1 because level V_1 indicated by the built-in instrument takes the 6 dB reduction into account.

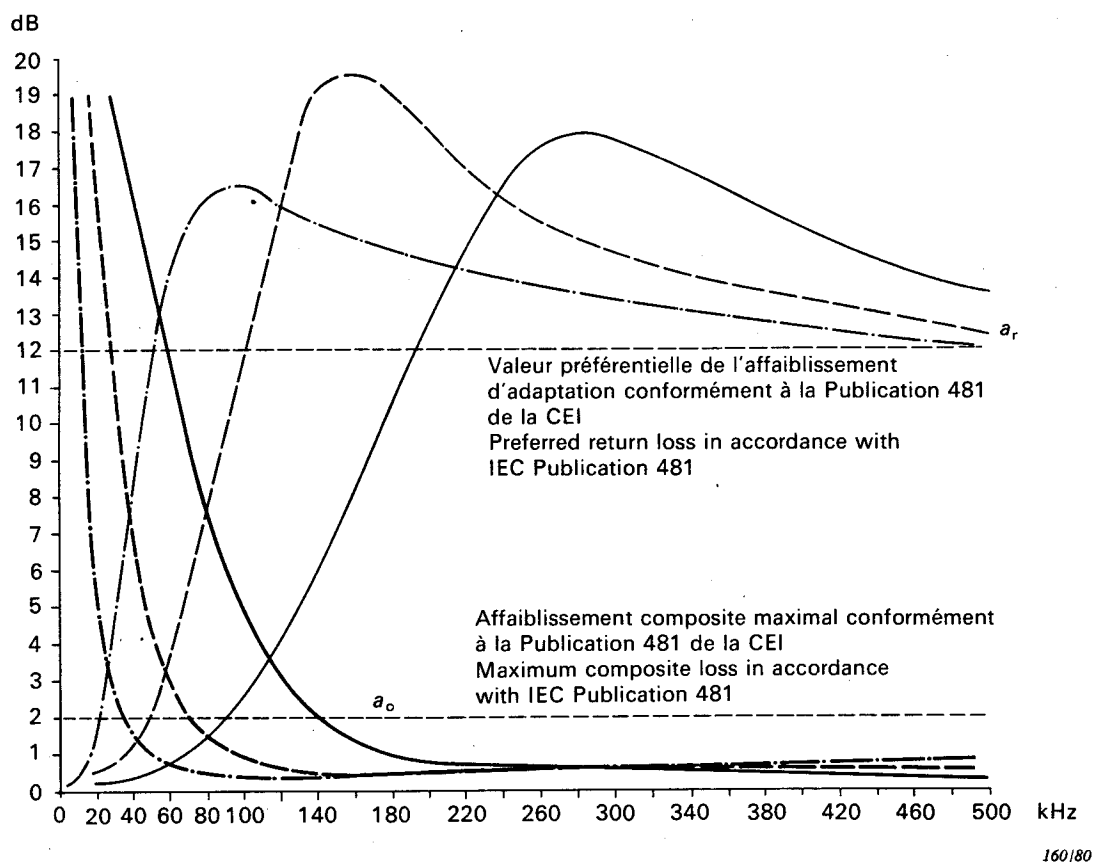
The transmission loss is one of the factors that decides the S/N ratio of the carrier link. It is, therefore, advisable to take measurements over the whole frequency range passed by the coupling circuits to detect possible attenuation peaks. The effect of line traps and losses introduced by substations can also be checked by repeating the measurements under different switching conditions; as for example:

- HV-line open at both ends;
- HV-line earthed at both ends;
- HV-line connected to substation busbar at both ends.



159/80

FIG. 1. — Figure expliquant la coordination entre les publications associées de la CEI.
Explanatory figure co-ordinating the associated IEC publications.



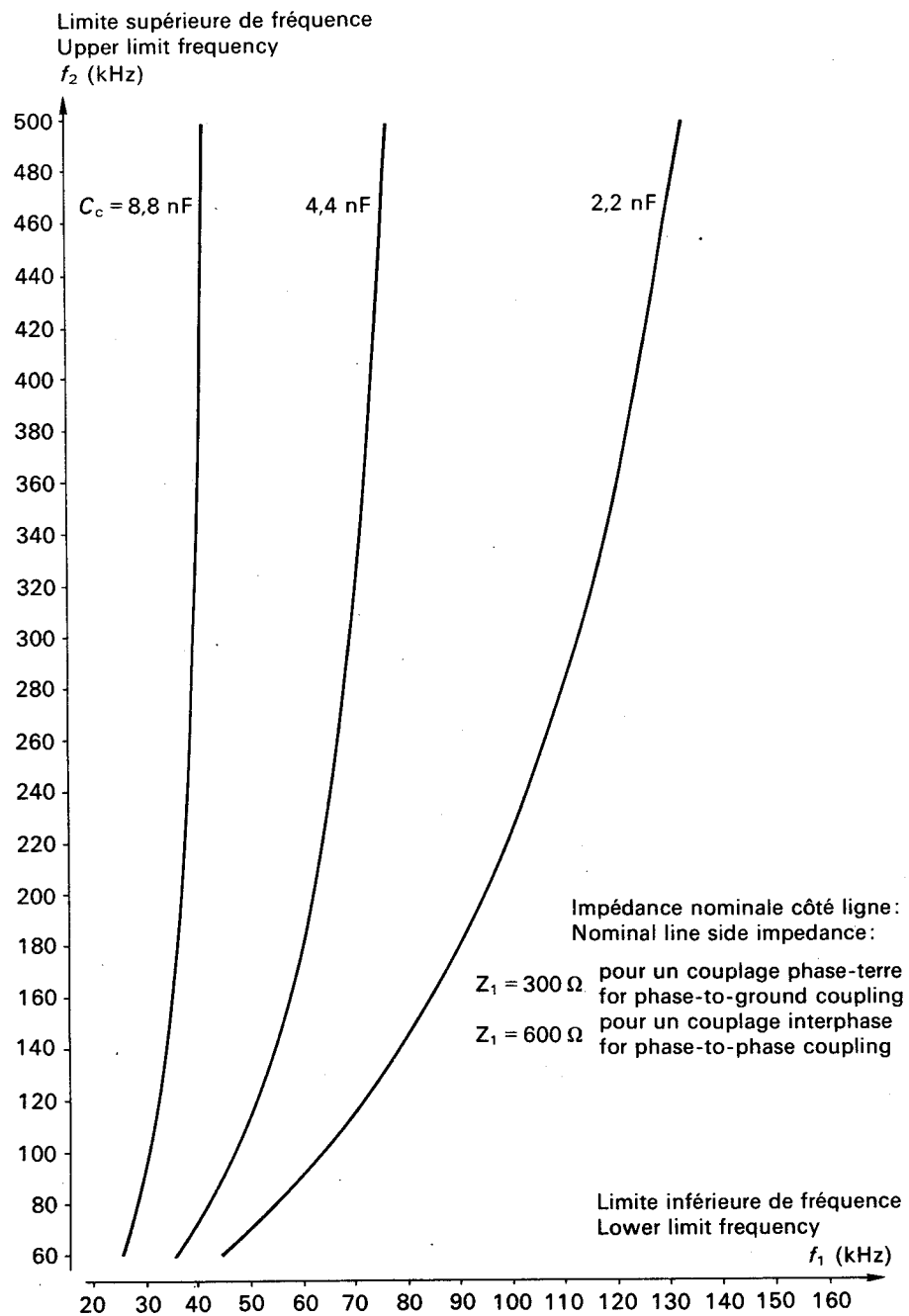
Impédance nominale côté ligne $Z_1 = 600 \Omega$ en interphase
 a_c = affaiblissement composite
 a_r = affaiblissement d'adaptation

Nominal line side impedance $Z_1 = 600 \Omega$ phase-to-phase
 a_c = composite loss
 a_r = return loss

— pour un condensateur de couplage $C_c = 2,2 \text{ nF}$
 for coupling capacitor
 --- pour un condensateur de couplage $C_c = 4,4 \text{ nF}$
 for coupling capacitor
 -.- pour un condensateur de couplage $C_c = 8,8 \text{ nF}$
 for coupling capacitor

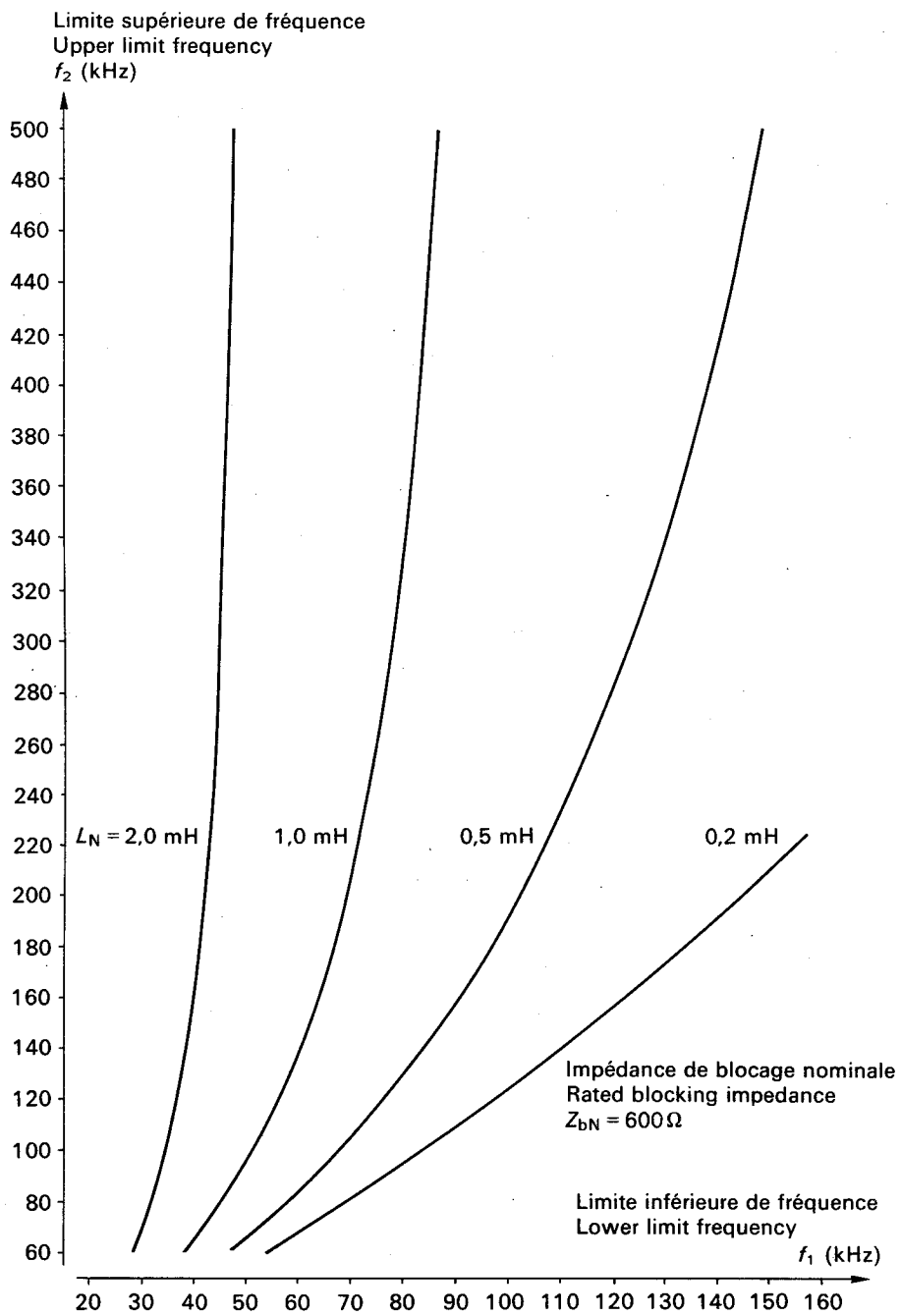
FIG. 2. — Courbes donnant la bande passante disponible pour les filtres passe-haut couramment utilisés.

Graph of bandwidth availability for typical high-pass filters.



161/80

FIG. 3. — Courbes donnant la bande passante disponible pour les filtres passe-bande couramment utilisés et pour un affaiblissement d'adaptation de 12 dB.
Graph of bandwidth availability for typical band-pass filters with a return loss $a_r = 12 \text{ dB}$.



162/80

FIG. 4. — Courbes donnant la bande passante disponible pour des circuits-bouchons à bande accordée.

Graph of bandwidth availability for typical band tuned line traps.

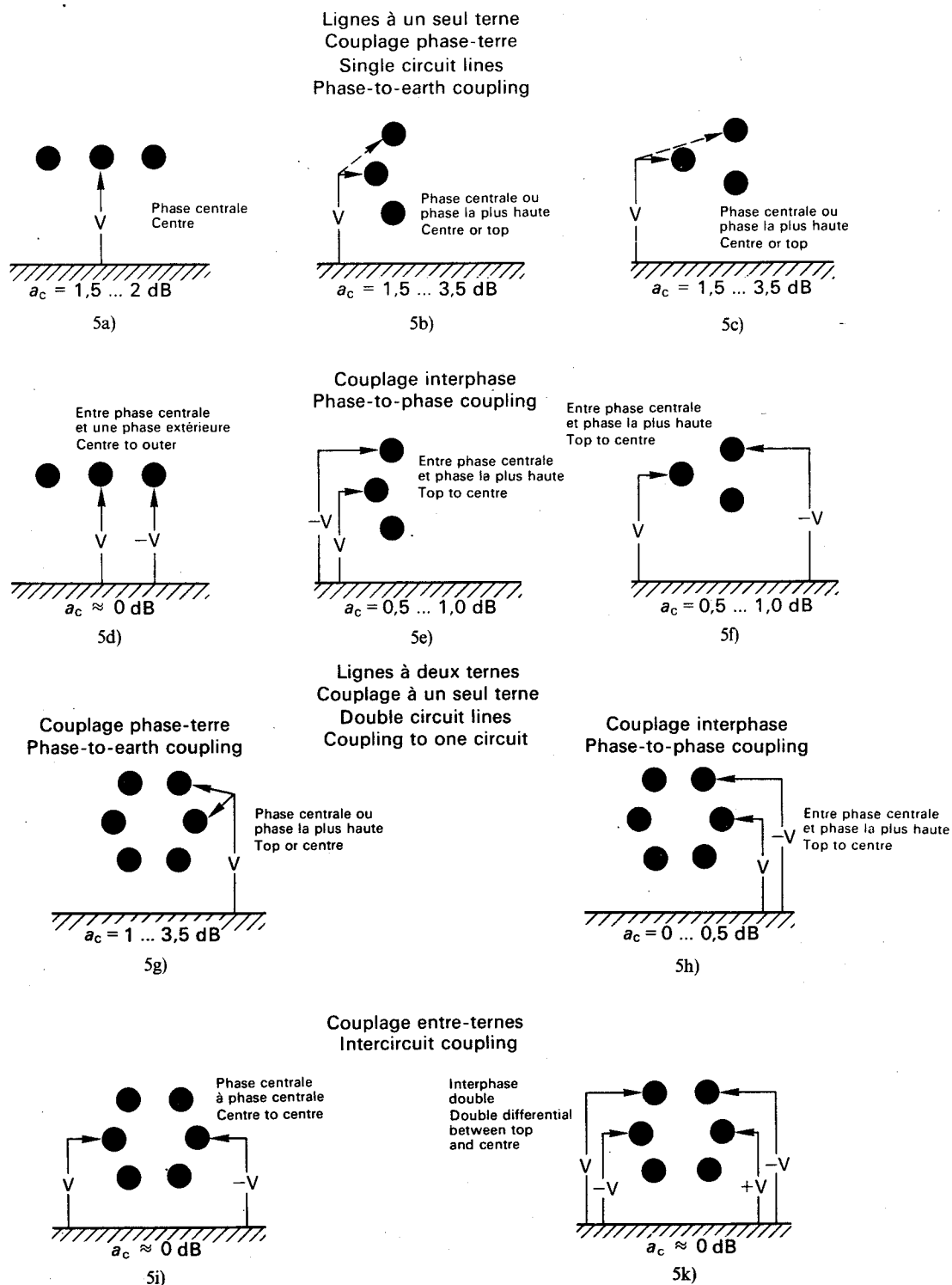


FIG. 5. — Couplage optimal et affaiblissement de conversion modale a_c (voir tableau VI ci-contre).
Optimum coupling arrangements and modal conversion loss a_c (see Table VI opposite).

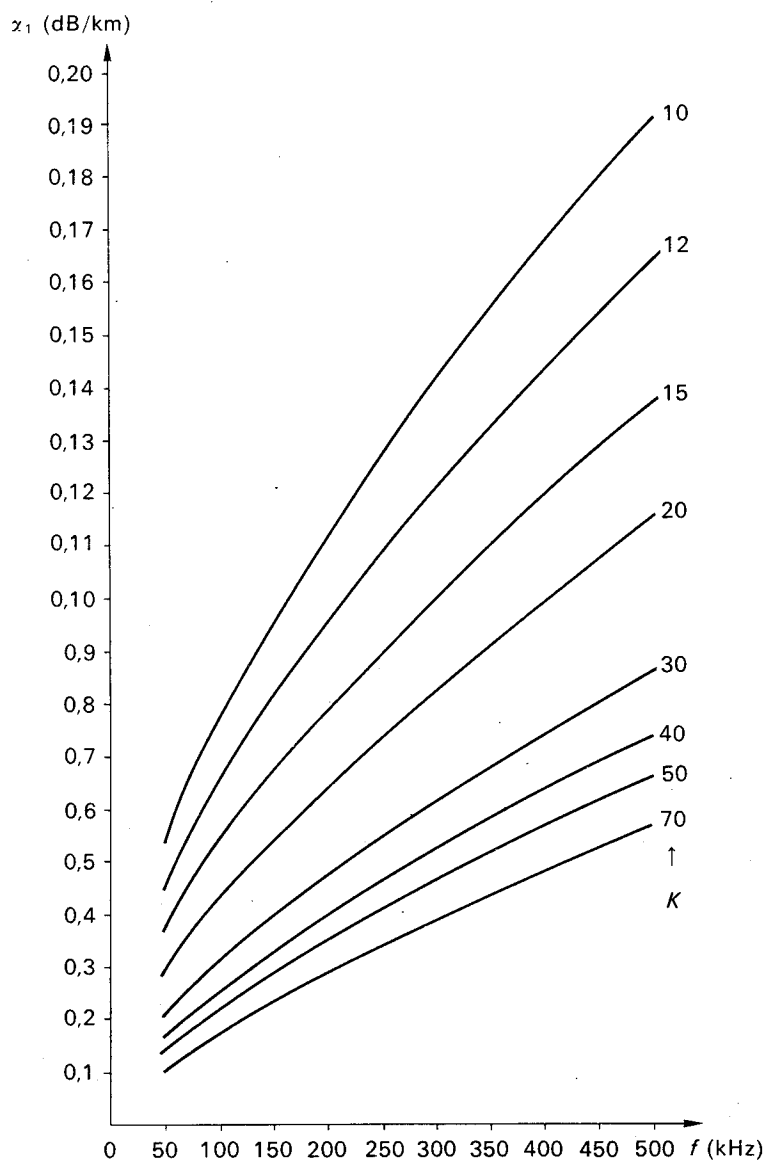
TABLEAU VI
Pertes supplémentaires a_{add} [dB] pour différents armements de ligne et pour le couplage optimal

TABLE VI
Additional loss a_{add} [dB] for various line configurations and optimum coupling arrangements

Armement de la ligne et couplage Line configuration and coupling Figure 5	Nombre de transpositions Number of transpositions			
	0	1	2	Plus de 2 More than 2
5a) $\varrho = 30 \Omega \text{ m à/to } 300 \Omega \text{ m}$ $\varrho \geq 1000 \Omega \text{ m}$	0 0	6 6	3 à/to 8 ¹⁾ 1 à/to 10 ¹⁾	— —
5b)	0 à/to 3	6 à/to 12	6 à/to 12	6 à/to 12
5c)	0 à/to 3	6 à/to 12	6 à/to 12	6 à/to 12
5d) $\varrho = 30 \Omega \text{ m à/to } 300 \Omega \text{ m}$ $\varrho \geq 1000 \Omega \text{ m}$	0 à/to 4,5 0 à/to 5,5	8,5 à/to 11 8,5 à/to 12	2 à/to 10 ¹⁾ 0 à/to 8 ¹⁾	— —
5e)	0 à/to 3	4 à/to 8	4 à/to 8	4 à/to 8
5f)	0 à/to 3	4 à/to 8	4 à/to 8	4 à/to 8
5g)	2 à/to 10	2 à/to 10 ²⁾	2 à/to 10 ²⁾	2 à/to 10 ²⁾
5h)	2 à/to 10	2 à/to 10 ²⁾	2 à/to 10 ²⁾	2 à/to 10 ²⁾
5i)	2 à/to 10	2 à/to 10 ²⁾	2 à/to 10 ²⁾	2 à/to 10 ²⁾
5k)	0 à/to 1	0 à/to 4	2 à/to 8 ²⁾	2 à/to 8 ²⁾

¹⁾ $l \cdot f_{\max} \leq 1 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$ ($\leq 330 \text{ kV}$);
 $l \cdot f_{\max} \leq 0,5 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$ ($> 330 \text{ kV}$).

²⁾ $l \cdot f_{\max} \leq 2 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$.



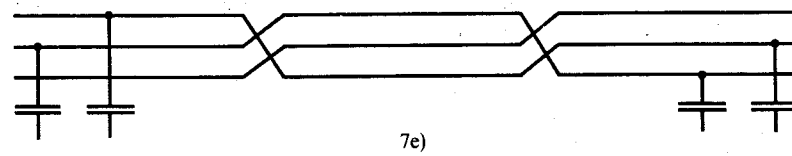
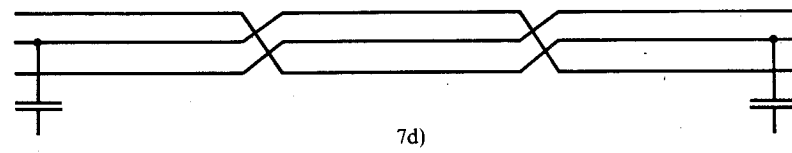
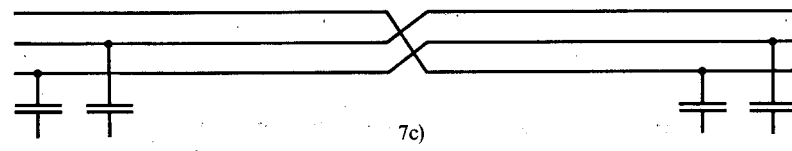
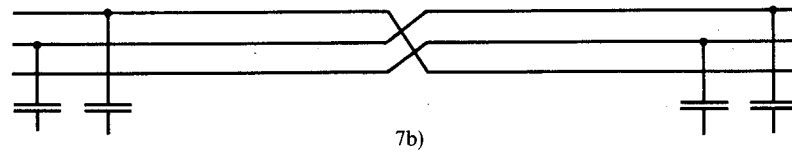
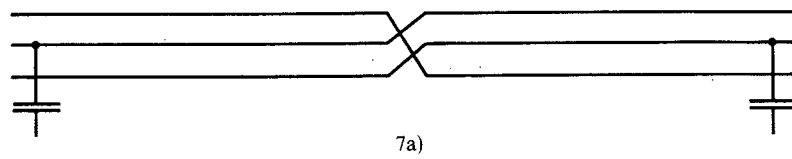
164/80

$$K = d_c \sqrt{n}$$

d_c = diamètre d'un conducteur de phase (mm)
diameter of a phase conductor

n = nombre de conducteurs par phase dans le cas d'un faisceau
number of phase conductors in bundle

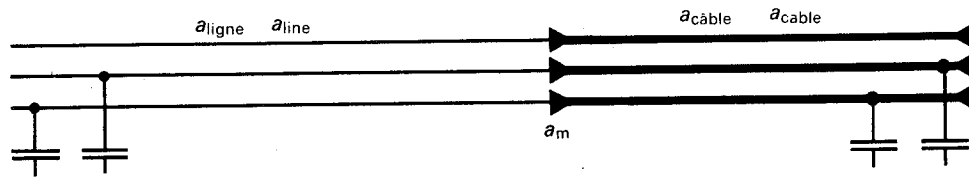
FIG. 6. — Courbes donnant la constante d'affaiblissement α_1 (mode le moins affaibli).
Curves showing the line attenuation constant α_1 (for the lowest loss mode).



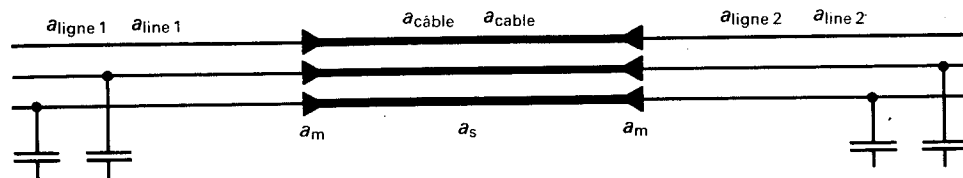
165/80

Les couplages 7b) et 7c) sont identiques.
Couplings 7b) and 7c) are identical.

FIG. 7. — Couplages optimaux phase-terre et interphase.
Optimum coupling arrangements for phase-to-earth and phase-to-phase.



8a)

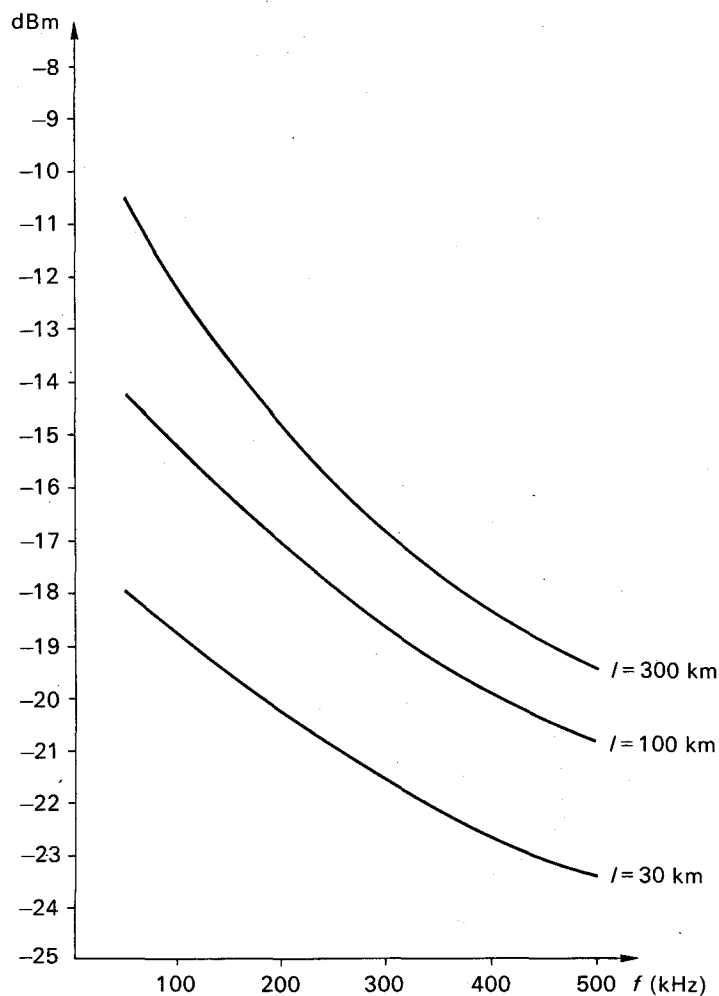


8b)

166180

a_m = affaiblissement de désadaptation
mismatch loss
 a_s = affaiblissement, fonction de la fréquence, dû aux effets d'ondes stationnaires
frequency-dependent loss due to standing wave effects

FIG. 8. — Raccordements de lignes aériennes à des câbles d'énergie.
Junctions of overhead lines with power cables.



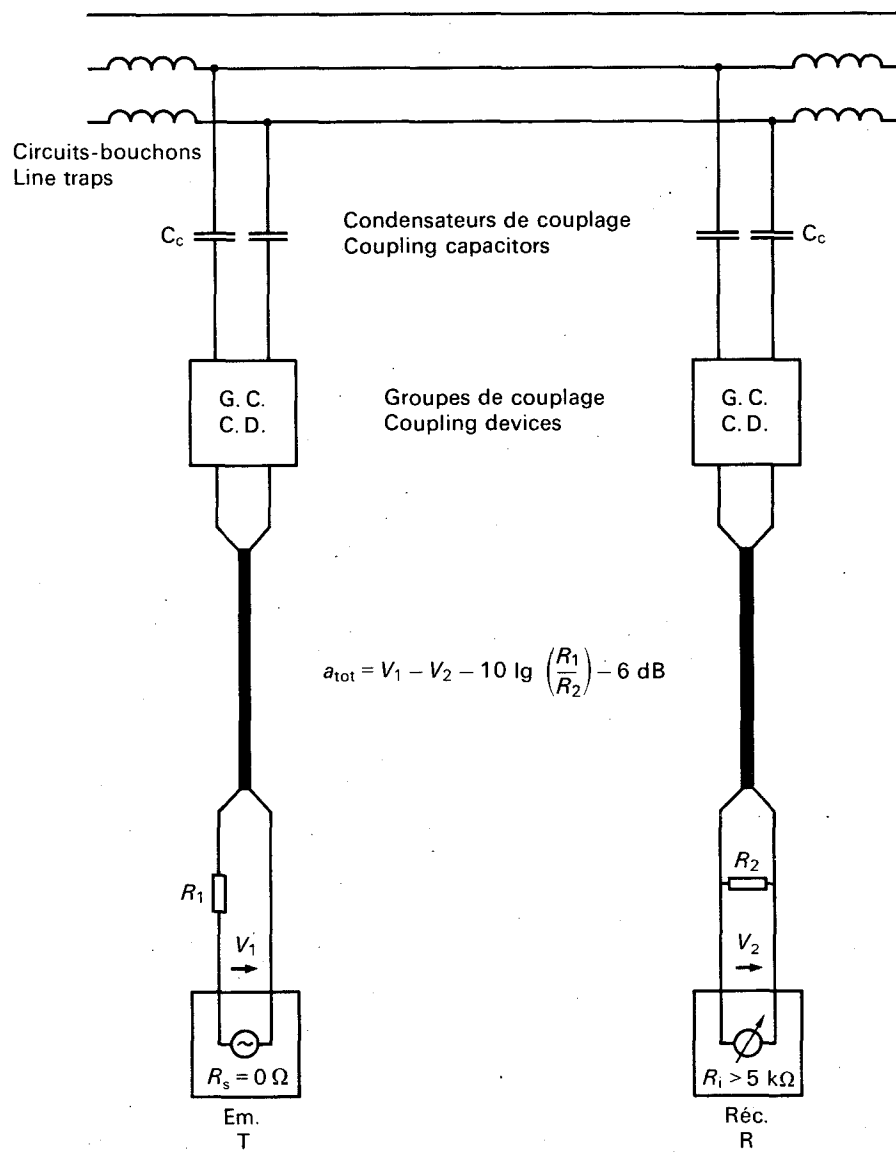
167/80

- a) Largeur de bande: 2,1 kHz (téléphonie 300 Hz à 2400 Hz).
- b) La courbe est tracée pour un gradient de potentiel de 17 kV/cm (valeur efficace); pour d'autres valeurs du gradient de potentiel, ajouter $\pm 3,5$ dBm par kV/cm (valeur efficace); par beau temps ajouter -17 dBm.
- c) Les niveaux de bruit dû à l'effet de couronne sont inférieurs aux valeurs indiquées pendant 90% du temps.

- a) Bandwidth: 2.1 kHz (speech 300 Hz to 2400 Hz).
- b) Graph is drawn for a voltage gradient of 17 kV r.m.s./cm for changes in voltage gradient add ± 3.5 dBm/kV r.m.s./cm for dry weather conditions add -17 dBm.
- c) Corona noise levels will be less than values shown for 90% of the time.

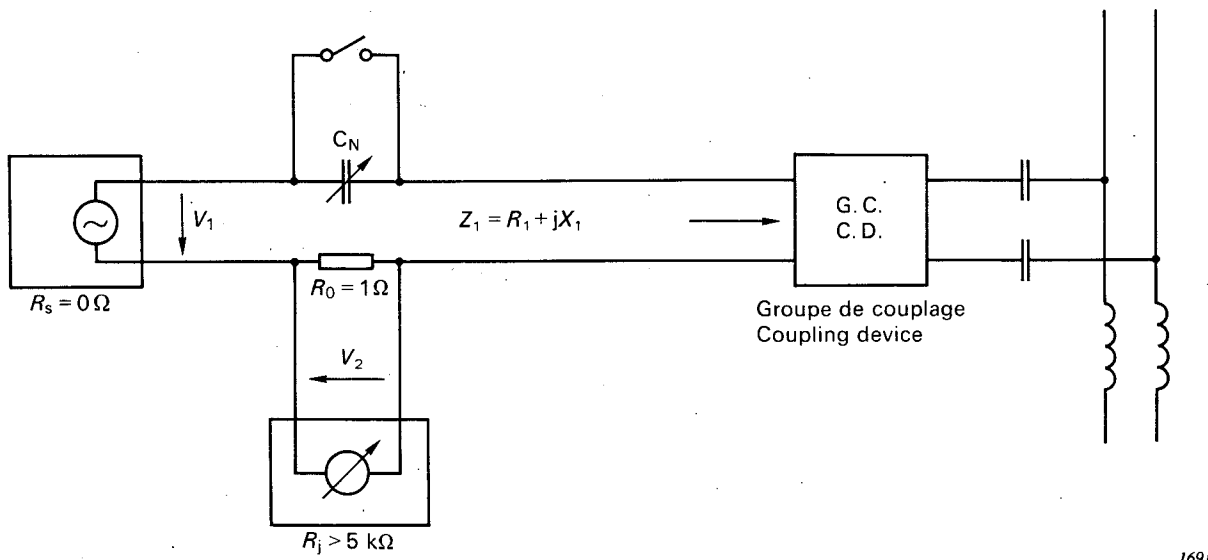
FIG. 9. — Niveaux courants de bruit dû à l'effet de couronne par temps de pluie pour un couplage interphase.

Typical corona noise levels for a line with phase-to-phase coupling during rain.



168/80

FIG. 10. — Montage pour la mesure de l'affaiblissement global a_{tot} de la voie de transmission.
Arrangement for measuring the total transmission loss a_{tot} .



169/80

FIG. 11. — Montage pour la mesure de l'impédance d'entrée Z_1 .
Arrangement for measuring the input impedance Z_1 .

ANNEXE A

REMERCIEMENTS

Le Groupe de travail 4 du Comité d'Etudes N° 57 de la CEI remercie le Comité d'Etudes N° 35 de la CIGRÉ pour l'assistance apportée en lui permettant d'utiliser son Mémoire sur les systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie 1974 (préparé par son Groupe de travail 4).

APPENDIX A

ACKNOWLEDGEMENTS

IEC Working Group 4 of IEC Technical Committee No.57 acknowledges the assistance of CIGRÉ Study Committee No.35 by making the memorandum on Power Line Carrier Systems 1974 (prepared by their Working Group 4) available for use.

ANNEXE B

RÉFÉRENCES

CEI:

Publication 50(55) (1970): Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), Groupe 55: Télégraphie et téléphonie.

Publication 353 (1971).

Publication 358 (1971).

Publication 481 (1974).

Publication 495 (1974).

C.C.I.T.T.:

Livre orange, volume III (1976).

Livre orange, volume IV (1976).

C.C.I.R.:

XIV^e Assemblée plénière, volume I (1978).

U.I.T.:

Règlement des radiocommunications (1975).

Règlement des radiocommunications (433-437) et (458-464).

Ces chiffres ont été révisés en novembre 1979 par la CAMR
(Conférence administrative mondiale des radiocommunications).

O.A.C.I. (Organisation de l'aviation civile internationale):

Annexe 10 à la Convention (Première partie), paragraphes 3.4.1.1 à 3.4.1.4, 3.4.2.1, 3.4.3 et 3.9.1.

Annexe 10, Deuxième partie, paragraphe 33.

Réunion de la Division télécommunication, juin 1978, Doc. 9239 - COM 78, Recommandation 5/3, page 5.4.

APPENDIX B

REFERENCES

IEC:

Publication 50(55) (1970): International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), Group 55: Telegraphy and Telephony.

Publication 353 (1971).

Publication 358 (1971).

Publication 481 (1974).

Publication 495 (1974).

C.C.I.T.T.:

Orange Book, Volume III (1976).

Orange Book, Volume IV (1976).

C.C.I.R.:

XIV Plenary Assembly, Volume I (1978).

I.T.U.:

Radio Regulations (1975).

Radio Regulations (433–437) and (458–464).

These figures have been revised in November 1979 by the WARC (World Administrative Radio Conference).

I.C.A.O. (International Civil Aviation Organization):

Annex 10 to Convention (Part 1), paragraphs 3.4.1.1 to 3.4.1.4, 3.4.2.1, 3.4.3 and 3.9.1.

Annex 10, Part II, paragraph 33.

Telecommunication Division Meeting, June 1978, Doc. 9239 – COM 78, Recommendation 5/3, page 5.4.

ANNEXE C

APPENDIX C

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHY

Cette annexe donne une bibliographie de documents sélectionnés qui est divisée en deux parties, traitant d'une part de la propagation des ondes et de la théorie du couplage et d'autre part des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie, des mesures de bruit et du rayonnement et de l'attribution des fréquences.

A bibliography of selected papers is given in this appendix which is divided into two parts dealing with wave propagation coupling theory and with PLC systems, noise and radiation measurement and with frequency assignment.

C1. Propagation des ondes, théorie du couplage

Wave propagation, coupling theory

- Adams, C. E.: "Wave propagation along unbalanced high-voltage transmission lines", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 78, August 1959, pp. 639-657.
- Adams, G. E., et Barthold, L. O.: "The calculation of attenuation constants for radio noise analysis of overhead lines", *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs. III, Power apparatus systems*, December 1960, 79, pp. 975-981.
- Baranowsky, M.: "Operational Experience with Carrier Frequency Transmissions via Insulated Earth Wires", *CIGRÉ Paper*, No. 320, 1962.
- Barthold, L. O.: "RF propagation on polyphase lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83, July 1964, pp. 665-671.
- Barthold, L. O., et Clade, J.: «La propagation des hautes fréquences sur les lignes aériennes», *CIGRÉ*, 1964, Report, N° 420.
- Bozoki, B., and Jones, D. E.: "PLC Coupling Investigations on a 500 kV Line", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 84, March 1965; also *IEEE* 31, TP 65-53.
- Carson, J. R.: "Wave propagation in overhead wires with earth return", *Bell System Technical Journal*, October 1926, No. 5, pp. 539-554.
- Carson, J. R., Hoyt, R. S.: "Propagation of periodic currents over a system of parallel wires", *Bell System Technical Journal*, New York, 6, 1927, pp. 495-545.
- Chevallier, A.: «Propagation des ondes à haute fréquence le long d'une ligne triphasée symétrique», *Revue générale d'électricité*, Paris, 54, janvier 1945, pp. 25-42.
- Clade, J., et Gary, C.: «Les perturbations radioélectriques engendrées par les lignes de transport d'énergie», *Revue générale d'électricité*, mai 1966, t. 75, pp. 659-681.
- Combs, E. E.: "Power line carrier coupling", *Trans. IEEE*, Vol. PAS-87 No. 2, February 1968.
- "High-frequency communication channels on the shield wires of 750 kV lines", *Elekt. Stanstii (USSR)*, 1966, No. 11, 64-8, November (in Russian).
- Farmer, G. E.: Tennessee Valley Authority: "The Use of Insulated Ground Wires on a Transmission Line for Communication Channels", *Trans. IEEE*, Pas. No. G 9, December 1963.
- Fleischhauer, W., Podszcek, H.-K., and Vogl, W., Siemens und Halske AG, Munich: "Multichannel Carrier Transmission over H.T. Bundle Conductors".
- Galloway, R. H., Shorrocks, W. B., and Wedepohl, L. M.: "Calculation of electrical parameters for short and long polyphase transmission lines". *Proc. IEE.*, 111, No. 12, December 1964, pp. 2051-2059.

- Hedman, D. E.: "Propagation on Overhead Transmission Lines", Part I: *Theory of Model Analysis*, *IEEE*, 31, TP 65-101, Part II: Earth Conduction Effects and Practical Results, *IEE*, 31, TP 65-102.
- Jones, D. E.: "Power Line Carrier Radiation from high-voltage lines", *Ontario Hydro Research Quarterly*, third quarter, 1965, pp. 10-16.
- Jones, D. E.: "Parallel-wire couplers for power line carrier" *Ontario Hydro Research Quarterly*, first quarter, 1967, pp. 21-25.
- Jones, D. E. "Parallel wire couplers for power line carrier analysis and field studies", *IEEE Paper*, 68 CP 49-PWR.
- Jordan, E. C.: *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, Constable and Sons, London, 1962.
- Keyser, G. M., and Aicks, R. C., "A directional coupler for power line carrier", *IEEE*, 31 PT 65-183.
- Kostenko, M. B., Perelman, L. S., Shkarin, Yu. P.: "Wave processes and electric noises in multiconductor high-voltage lines", *Energy*, 1974 (in Russian).
- Kostenko, M. V.: "Propagation of electromagnetic waves along a line with many conductors", *Elektrichestvo*, November 1960, pp. 8-12.
- Leng, L.: "Propagation of Electric Waves in Space and Along Conductors", *Information Handling Techniques*, Brown Boveri Co.
- Mikkelsen, A.: "Attenuation of carrier transmission on power lines, especially during formation of ice and rime on the conductor"; «Affaiblissement de la transmission par courants porteurs sur ligne d'énergie, spécialement pendant la formation de verglas et de givre sur les conducteurs», *CIGRÉ*, N° 323, 1950.
- Mikutsky, G. V., Perelman, L. S., Sidelnikov, V. V., and Shkarin, Yu. P.: Investigation of high-frequency characteristics of 750 kV lines with conducting insulated earth wires, *CIGRÉ*, 1970, *Paper*, 35-03.
- Pélissier, R.: «La propagation des ondes transitoires et périodiques le long des lignes électriques», *Revue générale d'électricité*, septembre, octobre, novembre 1950, pp. 397-399, 437-454, 502-512.
- Perz, M. C.: "Method of evaluating corona noise generation from measurements on short test line", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, December 1963, No. 69; pp. 833-844.
- Perz, M. C.: "Natural modes of PLC on horizontal three-phase lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83, July 1964, pp. 679-686.
- Perz, M. C.: "A method of analysis of PLC problems on three-phase lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83, July 1964, pp. 686-692.
- Perz, M. C.: "Propagation Analysis of HF currents and voltages on lossy power lines", (*IEEE Trans*, T-PAS 73, November/December, pp. 2032-2043 (5006).
- Pollaczek, F. (traduit par Pomey, J. B.): «Sur le champ produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif», *Revue générale d'électricité*, 30 Mai 1931, t. 29, pp. 851-867.
- Schelkunoff, S. A.: *Electromagnetic Waves*, Van Nostrand, New York, 1943.
- Senn, W. H., Morf, K. P.: *Optimum power line carrier (PLC) coupling arrangement on transposed single circuit power lines*, *CIGRÉ*, 1974, 35-02.
- Stratton J. A.: *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill, New York, 1941.
- Schulz, E., and Vogl, W.: «Beeinflussung von Trägerfrequenz-Nachrichtensystemen durch hochfrequente Beeinflussungsquellen», *Elektrotechnische Zeitschrift*, A, 85 (20), pp. 658-666, 2. Oktober 1964.
- Ushirozawa, M.: "HF propagation on non-transposed power lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 84, November 1964, pp. 1137-1142.
- Wasley, R. G.: "Intrabundle and power line carrier loss characteristics including effects of ice", *Proc. IEE*, 1974, 121 (6), pp. 432-434.
- Wedepohl, L. M.: "Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems", *Proc. IEE*, 110, No. 12, December 1963.
- Wedepohl, L. M., and Wasley, R. G.: "Wave propagation in polyphase transmission systems. Resonance effects due to discretely bonded earth wires", *Proc. IEE*, Vol. 112, No. 11, November 1965.
- Wedepohl, L. M.: "Electrical characteristics of polyphase transmission systems with special reference to boundary value calculations at power line carrier frequencies", *Proc. IEE*, 112, No. 11, November 1965.
- Wedepohl, L. M., and Wasley, R. G.: "Wave propagation in multiconductor overhead lines". *Proc. IEE*, 113, No. 4, April 1966.
- Wedepohl, L. M., and Wasley, R. G.: "Wave propagation in polyphase transmission systems". *Proc. IEE*, 112, No. 11, November 1965.

Wedepohl, L. M., and Wasley, R. G.: "Some problems in power line carrier transmission on overhead line and overhead line/cable circuits", *IEE Colloquium Digest*, No. 1968/19, pp. 374-381.

C2. Systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie. Mesures du bruit et du rayonnement. Attribution des fréquences

Power line carrier systems. Noise and radiation measurements. Frequency assignment

Aiminio, M., Starace, C.: «Disturbi alle telecomunicazioni a onde convogliate causati da un impianto di conversione in corrente continua», *AEI Annual Reunion*, 1970, *Paper*, 2.4.06/1970.

Aiminio, M., Starace, C.: «Caratteristiche di trasmissione in alta frequenza di una linea a 380 kV», *Elettrotecnica*, No. 10, Vol. LV, 1968.

Aiminio, M.: «Sicurezza e continuità di esercizio degli impianti a onde convogliate», *L'Energia Elettrica*, No. 6, Vol. XLII, 1965.

Airborne field strength measurements of radiation from power line carrier telephone systems in the band 200-500 kHz, Commonwealth of Australia, Department of Civil Aviation, 1956.

Allen, G. J. R.: "Communication Protective Coupling Devices for use with insulated Static Wire", *Conference Paper IEEE*, CP 64-127.

Alsleben, E.: "Guiding values for the planning of power line carrier communication systems and information on the determination of line characteristics", Report presented on behalf of Committee No. 14: Transmission; «Valeurs des grandeurs caractéristiques des réseaux à haute tension à prendre en considération pour l'établissement d'un projet d'installation à courants porteurs et données pour la mesure de ces grandeurs», rapport présenté au nom du Comité d'Etudes N° 14: Télétransmissions, *CIGRÉ*, N° 319, 1962.

Bozoki, B.: "Improved tuned coupler for power line carrier", *Ontario Hydro Research Quarterly*, Vol. 20, No. 1, first quarter 1968, pp. 20.

Bozoki, B.: "Effects of noise on transfer trip carrier relaying", *AIEE Paper*, 31, pp. 67-78, 1967.

Braine, M. R.: "The siting of earths for telecommunication installations", *Point to Point Telecommunications*, Vol. 13, No. 1, January 1969, p. 47, Marconi, Chelmsford.

"Brief submitted to the Department of Transport in respect of Canadian Electrical Power Utilities Power Line Carrier Frequency Assignments", Canadian Electrical Association, October 1965.

Bartsch, R., and Bergmann, G.: "Carrier communication over extra-high voltage lines", *Siemens Rev. (Germany)*, 32, No. 12, December 1965, pp. 399-404.

Bartsch, R., and Bergmann, G.: "Transmission of the line protection signals over power line carrier circuits", *Siemens Rev. (Germany)*, 28, No. 7, July 1961, pp. 231-236.

Bykhovskii, Y. I., et al.: "Characteristics of carrier current channels"; «Caractéristiques des voies de liaison par courant porteur sur ligne de transport d'énergie», *CIGRÉ*, N° 312, 1962.

CCRM (Centre de contrôle des radiocommunications mobiles Bruxelles-Ophain): *Measurement of PLC radiation causing interference in radionavigation service*, 1975.

CIGRÉ Study Committee No. 14/Comité d'Etudes N° 14 de la CIGRÉ: *Standardization of coupling elements (not directly connected to HV conductors)*.

CIGRÉ Study Committee No. 14, July, 1967/Comité d'Etudes N° 14 de la CIGRÉ, juillet 1967: *Recommended Values for Characteristic Data of Power Line Carrier Current Equipment*.

Combs, E. E.: "Power line carrier coupling", *Trans. IEEE*, Vol. PAS-87, No. 2, February 1968.

Eltringham, G. C.: "Some measurements of radio frequency noise radiated from extra-high tension power transmission lines", *GPO Memorandum W.I.*, 3/3, No. 884, January 1965.

Eltringham, G. C.: "The measurement of the levels of radiated fields generated by a continuous carrier communication system on a 275 kV power line", *GPO Memorandum W.I.*, 3/3, No. 885.

Eltringham, G. C.: "Empirical determination of attenuation laws with distance of radio noise radiated from a.c. power lines", *GPO Memorandum W.I.*, 3/3, No. 886, March 1965.

Eltringham, G. C.: "Determination of the attenuation laws with distance of radiation from 0.084 and 3.8 MHz carrier-circuit systems on a.c. overhead power lines", *GPO Memorandum W.I.*, 3/3, No. 888, March 1965.

- Eltringham, G.C.: "Radiation from extra-high tension a.c. power lines, levels and attenuation laws with distance", *GPO Memorandum W.I.*, 3/3, No. 895, June 1965 (obtainable from Post Office Engineering Dept., W.I., 3/3, 2-12 Gresham Street, London, EC2).
- Evaluation of Transfer-trip Relaying using PLC, *AIEE Committee Report, Transactions on Power Apparatus and Systems*, 81, August 1962, pp. 250-255.
- Evaluation of transfer-trip relaying using power-line carrier. *Trans. AIEE*, III, 81, 250-259, 1962, Power Apparatus Syst., No. 61, August 1962.
- Feil, R.: "Transmission Terminals of the 400 series for Power Distribution Systems", *Siemens Review*, Vol. XL, January 1973, No. 1, pp. 2-9.
- Feil, R., and Gutwill, K.: "Transistorized s.s.b. power line carrier equipments for telephony and telemetry", *Siemens-Z* (Germany), 36 No. 4, 305-308 (April 1962). (In German).
- Foulds, D., Hill, A.S., Howle, S., and Wedepohl, L.M.: "Capacitor voltage transformer and carrier coupling equipment", *IEE Conf. Publ.* (G.B.), 1965, No. 15, pp. 209-215.
- Hahn, C.: "Power system communications using power lines or radio", *Brown Boveri Review*, 46, No. 11/12, November/December 1959, pp. 704-716.
- Haug, H.: "Carrier transfer for the protection of tapped and two-circuit lines", *Brown Boveri Review*, 49, No. 3/4, March/April 1962, pp. 133-146.
- Hooper, J., Pullen and F. Discussion: *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, 84, No. 6, June 1965, pp. 492-494.
- Publication 353 de la CEI: Circuits-bouchons/IEC Publication 353: Line Traps.
- Publication 358 de la CEI: Condensateurs de couplage et diviseurs capacitifs/IEC Publication No. 358: Coupling Capacitors and Capacitor Dividers.
- Imaide S., and Kakigawa, K.: "Characteristics of impulsive noise in power line carrier systems and its effect on low speed data transmission channels", *Elect. Eng. g. Japan* (U.S.A.), 85, No. 5, 1-11, May 1965.
- Imaide, S., Kogure, J., Kakigawa, K., Moriwaki, T., Takamatsu, T., and Nakamoto, K.: "Noise due to switching operations in a 120 kV power system and its effects on 600 baud data transmission over power line carrier channels", *Elect. Eng. g. Japan*, 86, No. 6, June 1966, pp. 86-94.
- Jones, D.E., Leslie, J.R.: "Carrier Radiation from High-voltage Power Lines", *Report Con.*, 64-158, Hydro Electric Power Commission of Ontario.
- Jones, D.E.: "Power line carrier operation during line faults", *Ontario Hydro Research News*, 12, No. 3, July-September 1960.
- Jones, D.E.: "Operation of a PLC system during sustained line faults", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 79, August 1960, pp. 556-560.
- Jones, D.E., and Leslie, J.R.: "Amplification of power line carrier signals at intermediate stations", *Ontario Hydro Research News*, February 1962.
- Jones, D.E., and Leslie, J.R.: "Amplification of PLC at intermediate stations", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 82, October 1963, pp. 683-686.
- Jones, D.E., and Bozoki, B.: "Experimental evaluation of PLC propagation on a 500 kV line", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83, January 1964, pp. 16-23.
- Jones, D.E.: "Staged faults with PLC transferred-trip relaying for line protection", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 78, August 1959, pp. 588-595.
- Jones, D.E.: "Parallel-wire couplers for power line carrier", *Ontario Hydro Research Quarterly*, first quarter, 1967, pp. 21-25.
- Jones, D.E.: "Parallel-wire couplers for power line carrier analysis and field studies", *IEEE Paper*, 68 CP 49-PWR.
- Keyser, G.M., and Hicks, R.L.: "A directional coupler for power line carrier", *IEEE*, 31 TP 65-183.
- Kuhn, K.H.: "Influence of faults in power lines upon HF telecommunication"; «Influence des défauts des lignes d'énergie sur les télécommunications à haute fréquence», *CIGRÉ*, No. 309, 1948, 1950, No. 312, 1952.
- Lindig, K.: "Transistorized carrier system Z 1 H for transmission of telephone and telecontrol channels on HT power and communication lines". *SEL Nachr.* (Germany), 8, No. 4, 1960 pp. 198-202 (in German).
- Leorcher, O., and Lucht, H.: "Power supply to all transistor equipment for carrier systems". *SEL Nachr.* (Germany), 8, No. 4, 1960, pp. 191-198 (in German).
- Mikutski, G.V.: "High-frequency channels for teleprotection and automation", *Energy*, 1977 (in Russian).

- ONERA/CERT (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales - Centre d'Etudes et de Recherches, Toulouse, France): *Study of radiation from PLC* (in French), April 1976.
- Podszeck, H. K.: "Carrier Communication over power lines", Springer-Verlag, Berlin, 1972.
- "Power line carrier frequency planning, selection and use of frequencies" July 1969, Electricity Council (U.K.)
- Pullen, F. D., and Terry, B. J.: "The effects of isolator noise on power line carrier intertripping equipment" *IEE Colloquium publication*, 1968/19: "Some present-day protection problems".
- "Radiation from Carrier Telephone Systems on High-tension Power Transmission Lines", Commonwealth of Australia, PMG's department, *Research Report*, No. 3800, July 1954.
- Reichmann, J.: "Insulated overhead ground wires - protective carrier relaying investigations", *Trans. IEEE*, Vol. PAS-87, No. 4, January 1968.
- Report of Methods of Measurements for the Application of PLC: *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 81, February 1962, pp. 1046-1052.
- Sailer, E., and Serge, G.: "Results of tests on telecommunication network servicing power production and transmission"; «Relevés effectués dans un réseau de télétransmissions au service de la production et du transport d'énergie», *CIGRÉ*, No. 321, 1958.
- Sakić, B.: "Special properties of isolator noise", *Brown Boveri Review*, No. 4/5, 1968.
- Sakić, B., and Bitran, M.: "Error Distribution in Digital Data Transmitted along Power Line Carrier Systems", *Brown Boveri Review*, 6/7-70, pp. 289-296.
- Senn, W. and Friedmann, W.: "New carrier-frequency equipment for communication over power lines", *Brown Boveri Review*, No. 5, 1964.
- Senn, W.: "Fully transistorised power line carrier equipment", *Brown Boveri Review*, 5/6, 1965.
- Sherman, M. S.: "High-frequency channels along a lightning shield wire", *Elekt. Stantsii* (USSR), 1962, No. 9, 91, September (in Russian).
- Wagner, C. L., et al.: "Evaluation of power line carrier transfer trip relaying", *AIEE*, February 1962.
- Wedepohl, L. M., and Wasley, R. G.: "Some problems in power line carrier transmission on overhead line and overhead line/cable circuits", *IEE Colloquium Digest*, No. 1968/19, pp. 374-381.
- Wohlgemuth, D. G., Gillies, D. A., and Dietrich, R. E.: "Transfer-trip relaying field tests and operating experience". *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 81, August 1962, pp. 225-233.
- Wohlgemuth, D. G., Gillies, D. A., and Dietrich, R. E.: "Field tests and operation experience with carrier transfer trip relaying through line faults" («Essais à pied d'œuvre et expérience d'exploitation avec un système de relais de transfert de déclenchement à courant porteur à travers les défauts de la ligne»), *CIGRÉ*, N° 305, 1962.

— Page blanche —

— Blank page —

ANNEXE D

EXEMPLE MONTRANT UNE MÉTHODE DE CALCUL POUR UN ÉQUIPEMENT CPL DE 4 kHz

D1. Données concernant la ligne d'énergie

Un seul terne à armement horizontal

Tension de la ligne:	400 kV
Longueur de la ligne:	390 km
Transpositions:	deux, situées à 130 km et 260 km
Conducteurs de chaque phase:	faisceau de deux conducteurs: $n = 2$
	diamètre d'un conducteur: $d_c = 31,8 \text{ mm}$
	hauteur au pylône: $h_s = 20,6 \text{ m}$
	flèche: $s = 11,8 \text{ m}$
	distance entre phases adjacentes: $d = 11,5 \text{ m}$
Câbles de terre:	deux
	diamètre d'un câble: 11,0 mm
	hauteur au pylône: 29,0 m
Mode de couplage:	interphase

D2. Signaux à transmettre

Canal téléphonie:	300 Hz à 2 400 Hz
Canal d'appel téléphonique:	$B_{ts} = 80 \text{ Hz}$
Canaux signaux:	deux canaux 50 Bd
	un canal 200 Bd (largeur de bande: 480 Hz)

D3. Equipement CPL

Bande nominale aux fréquences porteuses:	4 kHz
Type de modulation:	BLU à porteuse réduite
Puissance nominale à fréquence porteuse:	+43 dBm en crête de modulation
Porteuse réduite:	$B_{rc} = 200 \text{ Hz}$
Fréquences porteuses:	96 kHz à 100 kHz

APPENDIX D

TYPICAL EXAMPLE SHOWING THE CALCULATION FOR A 4 kHz PLC EQUIPMENT

D1. Line data

Single circuit, horizontal

Line voltage:	400 kV
Line length:	390 km
Transpositions:	two at 130 km and 260 km
Phase conductors:	twin bundle: $n = 2$
	conductor diameter: $d_c = 31.8 \text{ mm}$
	suspension height: $h_s = 20.6 \text{ m}$
	sag: $s = 11.8 \text{ m}$
	conductor separation: $d = 11.5 \text{ m}$
Ground wires:	two
	conductor diameter: $= 11.0 \text{ mm}$
	suspension height: $= 29.0 \text{ m}$
Coupling arrangement:	phase-to-phase

D2. Channel requirements

Speech channel:	300 Hz to 2 400 Hz
Telephone signalling channel:	$B_{ts} = 80 \text{ Hz}$
Data signalling channels:	two $\times 50 \text{ Bd}$
	one $\times 200 \text{ Bd}$ (480 Hz channel spacing)

D3. PLC-terminal

Nominal c.f. band:	4 kHz
Type of modulation:	SSB, reduced carrier
Nominal c.f. power:	+43 dBm, P.E.P.
Reduced carrier:	$B_{rc} = 200 \text{ Hz}$
Carrier frequencies:	96 kHz to 100 kHz

D4. Répartition de la puissance sans compresseur-expandeur (voir paragraphe 4.5.3)

$$P_r = P - 10 \lg \left[n_{si} \sqrt{\frac{B_{si}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{ts}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{rc}}{B_r}} + \sqrt{A \cdot \frac{B_a}{B_r}} \right]^2$$

$$A = 10$$

$$\begin{aligned} P_r &= +43 - 10 \lg \left[2 \sqrt{\frac{80}{80}} + 1 \sqrt{\frac{320}{80}} + \sqrt{\frac{80}{80}} + \sqrt{\frac{200}{80}} + \sqrt{10 \cdot \frac{2100}{80}} \right]^2 \\ &= +43 - 27,15 \approx 16 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_r &= +16 \text{ dBm} \\ P_{50} &= +16 \text{ dBm} \\ P_{200} &= +22 \text{ dBm} \\ P_{ts} &= +16 \text{ dBm} \\ P_{rc} &= +20 \text{ dBm} \\ P_a &= +40 \text{ dBm (signal d'essai)} \end{aligned}$$

D5. Affaiblissement en ligne (voir paragraphe 4.2.1)

$$a_{\text{ligne}} = \alpha_1 \cdot l + 2 a_c + a_{\text{add}}$$

D5.1 Constante d'affaiblissement du mode le moins affaibli

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 7 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\sqrt{f}}{d_c \cdot \sqrt{n}} + 10^{-3} \cdot f \right] = 7 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\sqrt{100}}{31,8 \cdot \sqrt{2}} + 10^{-3} \cdot 100 \right] \\ \alpha_1 &= 0,023 \text{ dB/km} \end{aligned}$$

D5.2 Affaiblissement de conversion modale

D'après la figure 5d), page 64: $a_c = 0 \text{ dB}$

D5.3 Pertes supplémentaires

D'après le tableau VI, page 65: $a_{\text{add}} = 0 \text{ à } 10 \text{ dB}$
dépendant de la résistivité du sol, de la fréquence porteuse et du rapport d/h , pourvu que $l \cdot f_{\text{max}} = 0,5 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$ pour des lignes de tension $\geq 330 \text{ kV}$. Dans le cas particulier de l'exemple: $l \cdot f_{\text{max}} = 390 \times 104 = 0,41 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$.

D5.4 Affaiblissement en ligne

$$a_{\text{ligne}} = \alpha_1 \cdot l \times 2 a_c + a_{\text{add}} = (0,023 \times 390) + (2 \times 0) + (0 \text{ à } 10)$$

$$\underline{a_{\text{ligne}} = 9 \text{ dB à } 19 \text{ dB}}$$

On peut calculer la hauteur moyenne des conducteurs de phase au-dessus du sol à partir des données de l'article D1:

$$h = h_s - 0,7s = 20,6 - (0,7 \times 11,8) = 12,3 \text{ m}$$

Le rapport d/h (d = distance horizontale entre conducteurs de phase adjacents, h = hauteur moyenne des conducteurs de phase au-dessus du sol) est par conséquent:

$$d/h = \frac{11,5}{12,3} = 0,93$$

D4. Power allocation without compandor (see Sub-clause 4.5.3)

$$P_r = P_{P.E.P.} - 10 \lg \left[n_{si} \sqrt{\frac{B_{si}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{ts}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{rc}}{B_r}} + \sqrt{A \cdot \frac{B_a}{B_r}} \right]^2$$

$$A = 10$$

$$\begin{aligned} P_r &= +43 - 10 \lg \left[2 \sqrt{\frac{80}{80}} + 1 \sqrt{\frac{320}{80}} + \sqrt{\frac{80}{80}} + \sqrt{\frac{200}{80}} + \sqrt{10 \cdot \frac{2100}{80}} \right]^2 \\ &= +43 - 27.15 \approx 16 \text{ dBm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_r &= +16 \text{ dBm} \\ P_{50} &= +16 \text{ dBm} \\ P_{200} &= +22 \text{ dBm} \\ P_{ts} &= +16 \text{ dBm} \\ P_{rc} &= +20 \text{ dBm} \\ P_a &= +40 \text{ dBm (test-tone)} \end{aligned}$$

D5. Line attenuation (see Sub-clause 4.2.1)

$$a_{\text{line}} = \alpha_1 \cdot l + 2a_c + a_{\text{add}}$$

D5.1 Attenuation constant of lowest loss mode

$$\alpha_1 = 7 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\sqrt{f}}{d_c \cdot \sqrt{n}} + 10^{-3} \cdot f \right] = 7 \cdot 10^{-2} \left[\frac{\sqrt{100}}{31.8 \cdot \sqrt{2}} + 10^{-3} \cdot 100 \right]$$

$$\alpha_1 = 0.023 \text{ dB/km}$$

D5.2 Modal conversion loss

From Figure 5d), page 64: $a_c = 0 \text{ dB}$

D5.3 Additional attenuation

From Table VI, page 65: $a_{\text{add}} = 0 \text{ to } 10 \text{ dB}$
depending on ground resistivity, carrier frequency and the d/h ratio, provided $l \cdot f_{\text{max}} = 0.5 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$ at line voltages $\geq 330 \text{ kV}$. In this particular case: $l \cdot f_{\text{max}} = 390 \times 104 = 0.41 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{kHz}$.

D5.4 Line attenuation

$$a_{\text{line}} = \alpha_1 \cdot l + 2a_c + a_{\text{add}} = (0.023 \times 390) + (2 \times 0) + (0 \text{ to } 10)$$

$$a_{\text{line}} = 9 \text{ dB to } 19 \text{ dB}$$

From the line data given in Clause D1 the average conductor height above ground can be calculated:

$$h = h_s - 0.7s = 20.6 - (0.7 \times 11.8) = 12.3 \text{ m}$$

The d/h ratio (d = horizontal separation between adjacent conductors; h = average conductor height above ground) becomes:

$$d/h = \frac{11.5}{12.3} = 0.93$$

Ce rapport d/h est plus grand que celui auquel on peut s'attendre pour une ligne exploitée à cette tension, et par conséquent les valeurs pour a_{add} données au tableau VI, page 65, doivent faire l'objet d'une vérification par détermination au moyen d'un calculateur. Le résultat ainsi obtenu montre que pour une résistivité du sol de 300 Ωm , on a $a_{add} = 20$ dB au lieu de 0 à 10 dB comme il était indiqué sous paragraphe D5.3; cela montre qu'avec ces paramètres, on s'approche de la condition d'annulation par superposition des modes. Il faut par conséquent choisir des fréquences porteuses plus basses: par exemple 80 kHz à 84 kHz.

Pour ces fréquences, $a_{add} = 10$ dB, et l'affaiblissement en ligne devient alors:

$$a_{ligne} = \alpha_1 \cdot l + 2 a_c + a_{add} = 8 + 0 + 10$$

$$\underline{a_{ligne} = 18 \text{ dB}}$$

L'affaiblissement global de la liaison CPL est donc:

$$a_{tot} = a_{ligne} + 2 a_{coupl} = 18 + (2 \times 3,5) = 25 \text{ dB}$$

$$\underline{a_{tot} = 25 \text{ dB}}$$

D6. Niveau de bruit dans des conditions atmosphériques défavorables (voir paragraphe 4.3.1)

D'après la figure 9, page 69, le niveau de bruit dû à l'effet de couronne dans la bande téléphonique ($B_a = 2,1$ kHz) sera de l'ordre de:

$$P_{cor}(2,1 \text{ kHz}) = -11 \text{ dBm}$$

et, par conséquent, le niveau de bruit dû à l'effet de couronne dans le canal de référence sera:

$$P_{cor}^* = -25 \text{ dBm}$$

D7. Rapports S/B (sans compresseur-expandeur)

Canal de référence:

$$S/B_{canal \text{ réf.}} = P_r - P_{cor}^* - a_{ligne} - a_{coupl} = +16 - (-25) - 18 - 3,5$$

$$\underline{S/B_{canal \text{ réf.}} = 19,5 \text{ dB}}$$

Canal téléphonique:

$$S/B_{téléphonie} = P_a - P_{cor}(2,1 \text{ kHz}) - a_{ligne} - a_{coupl}$$

$$= +40 - (-11) - 18 - 3,5$$

$$\underline{S/B_{téléphonie} = 29,5 \text{ dB}}$$

Ces chiffres montrent que la qualité de la liaison CPL est acceptable mais qu'elle pourrait être améliorée par l'utilisation de compresseurs-expandeurs.

This d/h ratio is higher than one would expect for a line of this voltage and thus, the figures for a_{add} given in Table VI, page 65, should be verified against a computer calculation. This computer result shows that for a ground resistivity of $300 \Omega\text{m}$ $a_{\text{add}} = 20 \text{ dB}$ instead of 0 to 10 dB as stated above and this indicates that with these parameters a condition of modal cancellation is being approached. Therefore, lower carrier frequencies have to be chosen: for example 80 kHz to 84 kHz.

For these frequencies $a_{\text{add}} = 10 \text{ dB}$ and the line loss becomes now:

$$a_{\text{line}} = \alpha_1 \cdot l + 2a_c + a_{\text{add}} = 8 + 0 + 10$$

$$\underline{a_{\text{line}} = 18 \text{ dB}}$$

The overall loss of the PLC link becomes:

$$a_{\text{tot}} = a_{\text{line}} + 2a_{\text{coupl}} = 18 + (2 \times 3.5) = 25 \text{ dB}$$

$$\underline{a_{\text{tot}} = 25 \text{ dB}}$$

D6. Noise level under adverse weather conditions (see Sub-clause 4.3.1)

From Figure 9, page 69, the corona noise level in the speech band ($B_a = 2.1 \text{ kHz}$) will be of the order of:

$$P_{\text{cor}} (2.1 \text{ kHz}) = -11 \text{ dBm}$$

and therefore the corona noise level in the reference channel:

$$P_{\text{cor}}^* = -25 \text{ dBm}$$

D7. S/N ratios (without compandor)

Reference channel:

$$S/N_{\text{ref.ch.}} = P_r - P_{\text{cor}}^* - a_{\text{line}} - a_{\text{coupl}} = +16 - (-25) - 18 - 3.5$$

$$\underline{S/N_{\text{ref.ch.}} = 19.5 \text{ dB}}$$

Speech channel:

$$S/N_{\text{speech}} = P_a - P_{\text{cor}} (2.1 \text{ kHz}) - a_{\text{line}} - a_{\text{coupl}}$$

$$= +40 - (-11) - 18 - 3.5$$

$$\underline{S/N_{\text{speech}} = 29.5 \text{ dB}}$$

These figures illustrate that the quality of the PLC link is acceptable but could be improved by the use of compandors.

D8. Répartition de la puissance avec compresseur-expandeur (voir paragraphe 4.5.3.)

$$P_r = P - 10 \lg \left[n_{si} \sqrt{\frac{B_{si}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{ts}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{rc}}{B_r}} + \sqrt{A \cdot \frac{B_a}{B_r}} \right]^2$$

$$A = 1$$

$$P_r = +43 - 10 \lg \left[2 \sqrt{\frac{80}{80}} + 1 \sqrt{\frac{320}{80}} + \sqrt{\frac{80}{80}} + \sqrt{\frac{200}{80}} + \sqrt{1 \cdot \frac{2100}{80}} \right]^2$$

$$= +43 - 21,37 \approx +22 \text{ dBm}$$

$$P_r = +22 \text{ dBm}$$

$$P_{50} = +22 \text{ dBm}$$

$$P_{200} = +28 \text{ dBm}$$

$$P_{ts} = +22 \text{ dBm}$$

$$P_{rc} = +26 \text{ dBm}$$

$$P_a = +36 \text{ dBm}$$

D9. Rapports S/B (avec compresseur-expandeur)

Canal de référence:

$$S/B_{\text{canal ref.}} = P_r - P_{\text{cor}}^* - a_{\text{ligne}} - a_{\text{coupl}}$$

$$= +22 - (-25) - 18 - 3,5$$

$$\underline{S/B_{\text{canal réf.}} = 25,5 \text{ dB}}$$

Canal téléphonique:

en supposant que le gain du compresseur-expandeur est d'environ 15 dB, le rapport S/B subjectif est:

$$\underline{S/B_{\text{téléphonie}} = 40 \text{ dB}}$$

D8. Power allocation with compandor (see Sub-clause 4.5.3)

$$P_r = P_{P.E.P.} - 10 \lg \left[n_{si} \sqrt{\frac{B_{si}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{ts}}{B_r}} + \sqrt{\frac{B_{rc}}{B_r}} + \sqrt{A \cdot \frac{B_a}{B_r}} \right]^2$$

$$A = 1$$

$$P_r = +43 - 10 \lg \left[2 \sqrt{\frac{80}{80}} + 1 \sqrt{\frac{320}{80}} + \sqrt{\frac{80}{80}} + \sqrt{\frac{200}{80}} + \sqrt{1 \cdot \frac{2100}{80}} \right]^2$$

$$= +43 - 21.37 \approx +22 \text{ dBm}$$

$$P_r = +22 \text{ dBm}$$

$$P_{50} = +22 \text{ dBm}$$

$$P_{200} = +28 \text{ dBm}$$

$$P_{ts} = +22 \text{ dBm}$$

$$P_{rc} = +26 \text{ dBm}$$

$$P_a = +36 \text{ dBm}$$

D9. S/N ratios (with compandor)

Reference channel:

$$S/N_{\text{ref.ch.}} = P_r - P_{\text{cor}}^* - a_{\text{line}} - a_{\text{coupl}}$$

$$= +22 - (-25) - 18 - 3.5$$

$$\underline{S/N_{\text{ref.ch.}} = 25.5 \text{ dB}}$$

Speech channel:

assuming a compandor gain of approximately 15 dB the subjective S/N ratio is:

$$\underline{S/N_{\text{speech}} = 40 \text{ dB}}$$

ICS 29.240.20

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND