

14

**MEMORANDUM SUR LES SYSTEMES A
COURANTS PORTEURS SUR LIGNES
D'ENERGIE**

**Study Committee 35
(Communication and Telecontrol)**

1974



**MEMORANDUM SUR LES SYSTEMES A
COURANTS PORTEURS SUR LIGNES D'ENERGIE**

MEMORANDUM ON POWER LINE CARRIER SYTEMS

**Comité d'Etudes 35 (Télétransmissions)
*Study Committee 35 (Communication)***

1974

Copyright © 2005

"Ownership of a CIGRE publication, whether in paper form or on electronic support only infers right of use for personal purposes. Are prohibited, except if explicitly agreed by CIGRE, total or partial reproduction of the publication for use other than personal and transfer to a third party; hence circulation on any intranet or other company network is forbidden".

Disclaimer notice

"CIGRE gives no warranty or assurance about the contents of this publication, nor does it accept any responsibility, as to the accuracy or exhaustiveness of the information. All implied warranties and conditions are excluded to the maximum extent permitted by law".

CONFÉRENCE INTERNATIONALE
DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES A HAUTE TENSION

INTERNATIONAL CONFERENCE
ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS

Memorandum sur les systèmes à courants
porteurs sur lignes d'énergie

Memorandum on power line carrier systems

Ce memorandum a été établi par le Groupe
de Travail 04 du Comité d'Etudes n° 35 de la
CIGRE (Chef de file : M. R.E. MARTIN)

*This memorandum has been established by
Working Group 04 of CIGRE Study Committee
No. 35 (Convener : R.E. MARTIN)*

Il a été approuvé par le Comité d'Etudes
n° 35 de la CIGRE en mai 1973.

*It was approved by CIGRE Study Committee
No. 35 in May 1973.*

CIGRÉ
MEMORANDUM
SUR LES COURANTS PORTEURS SUR LIGNES D'ÉNERGIE

Considérant :

- (a) que la continuité de la fourniture d'énergie électrique est d'une importance primordiale pour la sécurité et la vie de la société,
- (b) que les "courants porteurs sur lignes d'énergie" (C.P.L.) constituent un moyen de communication important et essentiel pour l'exploitation de la plupart des entreprises d'énergie électrique, et le resteront dans l'avenir,
- (c) que les courants porteurs sur lignes d'énergie ne sont pas jusqu'à présent universellement reconnus par les administrations nationales et les organismes internationaux chargés de la répartition des fréquences radio et de leur attribution,
- (d) que pendant les 50 dernières années les courants porteurs sur lignes d'énergie ont coexisté avec les systèmes radio des bandes hectométriques et kilométriques auxquels un spectre de fréquences est alloué par l'Article 5 du Règlement des radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications.
- (e) que de nouveaux services radio sont créés dans plusieurs pays, qui risquent de compromettre l'exploitation de systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie existants, et d'accroître les perturbations mutuelles,
- (f) qu'une approche commune du problème de l'utilisation des courants porteurs sur lignes d'énergie est souhaitable, particulièrement en ce qui concerne les administrations nationales de pays limitrophes dont les réseaux d'énergie peuvent être interconnectés par des lignes utilisant des C.P.L.

Il est donc demandé aux administrations nationales de reconnaître l'usage des courants porteurs sur lignes d'énergie et de s'assurer, lorsqu'elles établissent des services radio dans les bandes hectométriques et kilométriques, qu'une protection mutuelle convenable est assurée entre ces systèmes et les installations à courants porteurs sur lignes d'énergie.

Compte tenu de ce qui précède, la CIGRE soumet pour information le présent memorandum sur les courants porteurs sur lignes d'énergie aux représentants des entreprises électriques et aux administrations nationales.

CIGRÉ

MEMORANDUM ON POWER LINE CARRIER SYSTEMS

Considering :

- (a) that the provision of reliable electrical power is of paramount importance to the safety and livelihood of the communities,*
- (b) that "power line carrier" (P.L.C.) is an important communications facility essential to the operation of the majority of the electrical power authorities and will remain so in future,*
- (c) that power line carrier has so far not been generally recognised by national administrations and international authorities responsible for radio frequency planning and frequency allocation,*
- (d) that for the past 50 years power line carrier has co-existed with LF and MF radio systems for which spectrum is allocated under Article 5 of the Radio Regulations of the International Telecommunications Union.*
- (e) that new radio services are being established in some countries, such that the operation of existing power line carrier systems could be jeopardised and mutual interferences increased,*
- (f) that a common approach to the use of power line carrier is desirable, particularly by national administrations of adjoining countries whose power systems may be interconnected by lines using P.L.C.*

National administrations are therefore asked to recognise the use of power line carrier and to ensure when they are establishing radio services in the LF and MF bands, that the appropriate mutual protection is afforded between such systems and power line carrier installations.

Having regard to the above the CIGRE submit this memorandum on Power Line Carrier for the information of power system authorities and national administrations.

PRÉFACE

Ce memorandum a pour but de fournir des informations sur l'emploi déjà très répandu et croissant des systèmes à haute fréquence à courants porteurs sur lignes d'énergie, par les entreprises d'énergie électrique dans de nombreux pays. Etant donné que ces systèmes de télécommunications fonctionnent sur des lignes aériennes conçues pour un transport massif d'énergie, il peut, en principe, y avoir un rayonnement d'énergie à haute fréquence et inversement le système de télécommunications (du fonctionnement duquel dépendent souvent la sécurité des personnes et celle d'installations coûteuses) peut subir lui-même des perturbations provoquées par d'autres systèmes. En pratique, ceci n'a pas soulevé de problèmes sérieux jusqu'à présent. L'assurance de la continuité de la fourniture d'énergie, à laquelle sont liés le bien-être et la sécurité de la population, ainsi que le nombre croissant des lignes d'interconnexion réunissant les réseaux de différents pays à travers leurs frontières nationales militent en faveur de la diffusion d'une information autorisée sur les courants porteurs sur lignes d'énergie, insistant particulièrement sur l'utilisation du spectre et la compatibilité électro-magnétique. Ce document a pour but de faciliter une approche plus uniforme et mieux raisonnée des problèmes de courants porteurs par les autorités chargées de l'allocation du spectre dans chaque pays. Bien que les courants porteurs sur lignes d'énergie constituent une catégorie spéciale des télécommunications pour les réseaux d'énergie, leur emploi ne supprime pas le besoin d'autres systèmes, propriété des entreprises, tels que les câbles ou la radio. Ce document ne traite néanmoins que des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie.

FOREWORD

The memorandum is intended to provide information on the already extensive and growing use of high frequency "power line carrier" systems by the power authorities in many countries. Since such telecommunications systems are operated over open wire lines designed for the bulk transmission of energy, there can in principle be some radiation of high frequency energy and conversely the communication system (whose functions often involve the safety of human life and of costly plant) may itself suffer interference from other systems. In practice this has not been a serious problem. The continuation of reliable bulk energy supplies in relation to the well being and safety of the community, coupled with the increasing number of tie-lines linking networks in different countries across national frontiers commends the promulgation of authoritative information on power line carrier, with particular emphasis on spectrum utilisation and electromagnetic compatibility. The document is intended to facilitate a more uniform and reasoned approach to power line carrier by the spectrum assignment authorities in all countries. While power line carrier provides a special category of power system communications its use does not supplant the need for other utility owned systems such as line and radio. However, this paper is concerned only with power line carrier systems.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
1. DOMAINE D'APPLICATION	10
2. INTRODUCTION	10
3. SYSTEMES A COURANTS PORTEURS SUR LIGNES D'ENERGIE	12
3.1 <i>Supports de transmission et couplage</i>	12
3.1.1 Couplage phase-terre	14
3.1.2 Couplage interphase	16
3.1.3 Couplage entre ternes	16
3.1.4 Couplage au câble de terre isolé	16
3.1.5 Couplage entre conducteurs d'un faisceau	16
3.2 <i>Applications</i>	18
3.2.1 Généralités	18
3.2.2 Téléphonie	20
3.2.3 Télégraphie	20
3.2.4 Téléconduite	20
3.2.5 Téléprotection	20
3.2.6 Utilisation mixte	22
3.2.7 Systèmes normalement au repos, renforcement de puissance	24
3.3 <i>Utilisation des courants porteurs sur lignes d'énergie dans différents pays</i>	24
3.3.1 Importance d'utilisation	24
3.3.2 Problèmes d'attribution de fréquences	24
3.3.3 Gammes de fréquences utilisées dans divers pays	28
4. ETUDE DES SYSTEMES A COURANTS PORTEURS SUR LIGNES D'ENERGIE	28
4.1 <i>Propagation modale</i>	28
4.1.1 Effet des pylônes, transpositions	30
4.1.2 Rayonnement	30
4.2 <i>Bruit sur les liaisons C.P.L.</i>	30
4.3 <i>Perturbations provenant de sources extérieures</i>	38
4.4 <i>Méthodes de modulation</i>	38
4.5 <i>Largeur de bande et espacement des canaux</i>	40
4.6 <i>Puissance d'émission</i>	40
4.7 <i>Valeur visée pour le bruit de fond et niveau reçu</i>	42
4.8 <i>Affaiblissement admissible en ligne</i>	44
4.9 <i>Possibilité de perturbations mutuelles</i>	46
4.9.1 Systèmes radio	46
4.9.2 Systèmes à courants porteurs sur fils aériens	46
4.9.3 Systèmes C.P.L.	48
5. CONCLUSIONS	48
6. RECOMMANDATIONS	50
7. COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL	50
8. REMERCIEMENTS	50
9. REFERENCES	52
10. BIBLIOGRAPHIE	53
11. ANNEXE	58

CONTENTS LIST

	Pages
1. SCOPE	11
2. INTRODUCTION	11
3. POWER LINE CARRIER SYSTEMS	13
3.1 Communication paths	13
3.1.1 Phase-earth coupling	15
3.1.2 Interphase coupling	17
3.1.3 Intercircuit coupling	17
3.1.4 Insulated earth wire coupling	17
3.1.5 Intrabundle coupling	17
3.2 Applications	19
3.2.1 General	19
3.2.2 Speech	21
3.2.3 Telegraph	21
3.2.4 Telecontrol	21
3.2.5 Teleprotection	21
3.2.6 Speech-plus-signals operation	23
3.2.7 Quiescent systems, power boosting	25
3.3 The use of P.L.C. in various countries	25
3.3.1 Extent of use	25
3.3.2 Frequency assignment problems	25
3.3.3 Frequency ranges in use in various countries	29
4. POWER LINE CARRIER SYSTEMS PLANNING	29
4.1 Modal propagation	29
4.1.1 The effect of towers, transpositions	31
4.1.2 Radiation	31
4.2 P.L.C. Noise	31
4.3 Interference from external sources	39
4.4 Modulation methods	39
4.5 System bandwidth and channel spacing	41
4.6 Transmit power	41
4.7 Noise objective and receive level	43
4.8 Permissible line loss	44
4.9 Possible mutual interference	47
4.9.1 Radio systems	47
4.9.2 Open wire carrier systems	47
4.9.3 P.L.C. systems	49
5. CONCLUSIONS	49
6. RECOMMENDATIONS	51
7. MEMBERSHIP OF WORKING GROUP	51
8. ACKNOWLEDGEMENTS	51
9. REFERENCES	52
10. BIBLIOGRAPHY	53
11. APPENDIX	59

1. DOMAINE D'APPLICATION

Ce memorandum a pour but de fournir

a) des informations générales, quoique concises, sur l'utilisation des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie dans les réseaux d'énergie électrique, essentiellement pour attirer l'attention des autorités nationales responsables des allocations de fréquence.

b) des informations spécifiques sur les propriétés et le fonctionnement des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie et les matériels associés, informations utiles aux ingénieurs ayant à concevoir ces systèmes.

Ces informations sont présentées sous une forme très condensée mais on donne une bibliographie assez étendue qui couvre la littérature moderne disponible sur ce sujet.

2. INTRODUCTION

On sait que la demande d'énergie électrique dans le monde entier augmente rapidement. La consommation mondiale actuelle d'électricité s'élève à quelques 5.000 millions de MWh par an. Le taux d'augmentation est de l'ordre de 8 % par an [1, 2].

Le transport de cette énergie des centres de production vers les centres de consommation et leur interconnexion pour des raisons de sécurité ont conduit au développement de réseaux nationaux complexes dans lesquels le but est la configuration économique optimale dans une situation dynamique où la demande d'énergie varie sans cesse. De tels systèmes exigent de vastes moyens de télécommunication pour la téléphonie et la transmission de signaux tels que télégraphie, télémessure, téléconduite et signaux de protection, moyens qui s'étendent entre les centres de commande et les centaines de centrales de production, postes électriques d'interconnexion et centres de consommation.

Ces dernières années il y a eu une nette augmentation du nombre, de la taille et de la complexité des réseaux de transport ainsi que des réseaux de télécommunication qui leur sont associés, et de leurs interconnexions à travers les frontières.

Les industries électriques utilisent de nombreuses techniques pour leurs vastes systèmes de communication, le choix de l'une d'elles dépendant de la largeur de bande nécessaire à l'information, de facteurs économiques et de divers facteurs techniques. Parmi les systèmes les plus utilisés par les industries électriques figurent, outre les courants porteurs sur lignes d'énergie, les circuits loués à une entreprise (compagnie publique de téléphones, administrations nationales de télécommunications) et les liaisons radio leur appartenant en propre.

L'importance de ces liaisons qui assurent une alimentation fiable en électricité, aussi bien pour la vie de chacun que pour l'industrie, est un fait acquis. Nombre de ces liaisons sont utilisées pour la transmission de signaux de "protection" qui sont vitaux pour la sécurité des personnes et pour la protection de coûteuses installations contre des dégâts importants, ainsi que pour assurer une alimentation économique et sans interruption en énergie électrique aussi bien à l'industrie qu'aux usagers domestiques. Dans le domaine de la protection, les courants porteurs sur lignes d'énergie sont particulièrement commodes puisqu'il est souvent nécessaire d'échanger des informations avec une vitesse de transmission relativement élevée et une extrême sécurité de fonctionnement entre les postes électriques déjà reliés par le réseau de transport d'énergie lui-même. Comme ce dernier est construit pour transporter des courants importants, il est mécaniquement très solide et par conséquent moins sujet aux avaries ou aux coupures qu'une ligne ou un câble de télécommunication séparé qui est comparativement moins robuste. Les signaux de protection commandent le fonctionnement automatique de disjoncteurs qui peuvent nécessiter le transfert de l'information en des temps de l'ordre de 10 millisecondes avec un taux d'erreur plus petit de plusieurs ordres de grandeur que ceux considérés comme acceptables pour les télécommunications conventionnelles.

Les signaux des courants porteurs sur lignes d'énergie, qui sont généralement situés dans la bande 30 – 500 kHz, peuvent se propager sur les lignes de différentes façons, comme entre un conducteur et la terre, ou entre deux conducteurs ou plus. Comme la plupart des lignes de transport d'énergie sont exploitées en courant alternatif triphasé et comme les trois phases sont souvent disposées de façon asymétrique, le choix du ou des conducteurs à utiliser est important dans la mesure où les facteurs économiques du couplage, l'affaiblissement et le rayonnement sont en cause. Les pylônes de la ligne peuvent porter deux lignes triphasées indépendantes et il peut également y avoir un conducteur de terre qui sert à protéger la ligne contre la foudre ou en cas de défaut. Les couplages mutuels entre ces sept conducteurs (et la terre) ont pour résultat un échange complexe d'énergie à haute fréquence entre ceux-ci si bien que, sans une connaissance de

1. SCOPE

This memorandum is intended to provide

a) general, but concise information on the use of Power Line Carrier Systems in Electricity Supply Networks, mainly for the information of National Frequency Allocation Authorities,

b) specific information on the properties and the performance of Power Line Carrier Systems and their equipment, useful for the System Planning Engineer.

The information is presented in a very condensed form, but a rather extensive bibliography is given which covers the modern literature available.

2. INTRODUCTION

It is well known that the demand for electrical energy throughout the world is rising rapidly. The present world electricity consumption amounts to some 5000 million MWh annually. The rate of increase is of the order of 8% per annum. [1, 2].

The transportation of this energy from the production plants to the load centres and the interconnection of plants for security reasons has resulted in the development of complex national networks in which the aim is the optimum economic configuration in a dynamic situation of changing energy demand. Such systems require extensive telecommunications facilities for speech and data such as telegraph, telemetering, telecontrol and protection signals extending between control centres and the many hundreds of generating stations, switching stations and supply points.

In recent years there has been a marked increase in the number, size and complexity of such power networks together with their associated telecommunications networks and in their linking across national frontiers.

The electricity industries continue to use a variety of techniques for their widespread communication systems depending on the required information bandwidth, the economics and various technical factors. Amongst the systems in extensive use in addition to power line carrier are circuits rented from a common carrier (public telephone company, national telecommunications authority) and privately owned radio links.

The importance of such links both to the life of the community and to industry in ensuring a reliable power supply is clearly recognised. Many such links are used for the transmission of "protection" signals which are vital to the safety of life and to the prevention of extensive damage to costly plant, as well as to ensuring the continuation of an uninterrupted economic electricity supply to industry and to the ordinary users alike. In the protection field power line carrier is especially useful since it is often necessary to exchange signals at relatively high speed and with the utmost reliability between switching stations which will already be linked via the power network itself. Since the latter is constructed to carry heavy currents, it is very robust mechanically and is thus much less liable to damage or interruption than a comparatively thin separate telecommunications cable or line. The protection signals control the automatic operation of circuit-breakers which may require the transfer of information in times of the order of 10 milliseconds with an error rate orders of magnitude lower than that considered acceptable in conventional telecommunications.

Power line carrier signals, which are usually in the band 30-500 kHz, may be propagated on the lines in various ways such as between one conductor and earth, or between two or more conductors. Since most lines use the three-phase alternating current system and the three phases are often arranged asymmetrically, the choice of conductor or conductors to be used is important insofar as economics of coupling, attenuation and radiation are concerned. The transmission line towers may support two independent three-phase lines and there may also be an earth continuity conductor which is concerned with lightning and fault protection. Mutual couplings between the resulting seven conductors (and the earth) result in a complex transfer of high frequency energy between the conductors so that without a knowledge of these effects

ces phénomènes, il n'est pas possible de prévoir la valeur du champ électromagnétique en n'importe quel point de la ligne ou à proximité de celle-ci. Ces dernières années, une théorie très complète, qui facilite une utile prévision de la distribution des courants et des tensions pour une configuration donnée de la ligne d'énergie, a été élaborée [3 à 11 inclus].

Une autre méthode pour les télécommunications par courants porteurs sur lignes d'énergie est celle dans laquelle les signaux se propagent sur le "câble de terre" ("câble de garde") qui est pour cela légèrement isolé de chaque pylône. Cette méthode est peu utilisée parce qu'elle met en jeu le "mode avec retour par la terre" et ce dernier est caractérisé par un grand affaiblissement et une augmentation du rayonnement. Cependant, une application courante du couplage aux câbles de terre isolés est d'en utiliser deux en tant que paire disposée dans un plan horizontal. On effectue généralement des transpositions de place en place. L'affaiblissement et le rayonnement sont moindres que dans le cas d'un seul câble. Pour les lignes disposées horizontalement, on gagne quelque peu en puissance en utilisant les deux câbles de terre, isolés et transposés.

Une autre méthode possible, qui est en cours d'étude, concerne la transmission de signaux entre les conducteurs d'une phase qui forment un faisceau. Rappelons que pour les lignes à très haute tension, les conducteurs de chacune des phases sont souvent formés d'un faisceau de 2, 3 ou 4 conducteurs unitaires étroitement espacés et théoriquement au même potentiel au point de vue haute tension. Toutes ces méthodes ont chacune leurs avantages.

Soulignons que le choix définitif d'une méthode pour chaque cas particulier peut souvent dépendre pour une plus grande part de considérations économiques et de considérations de transport d'énergie que de considérations de télécommunication telles que les propriétés des courants porteurs.

La sensibilité aux perturbations de tout système à courants porteurs et ses effets perturbateurs sur les autres systèmes avec lesquels il doit co-exister dépendent également de la méthode utilisée. En clair, un système de protection qui émet un signal pendant quelques millisecondes par an (dans l'éventualité d'un défaut affectant la ligne à haute tension peu fréquemment mais à des instants imprévisibles), peut causer moins de perturbations qu'un système en fonctionnement permanent pour de la téléphonie ou des télémesures. Par conséquent le memorandum traite des méthodes d'utilisation et de fonctionnement des systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie étant donné que celles-ci sont des facteurs dont il faut tenir compte dans tous les cas pratiques avant que de considérer l'étendue et les effets de tout rayonnement à la fois causé par et causé au système à courants porteurs.

3. SYSTEMES A COURANTS PORTEURS SUR LIGNES D'ENERGIE (C.P.L.)

Ce chapitre donne une brève description des méthodes fondamentales de couplage et de l'utilisation des systèmes C.P.L. Il existe des variantes aux méthodes fondamentales 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 Supports de transmission (et 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 qui, en même temps, protège les équipements de télécommunications des surtensions. 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.

Un dispositif de couplage comprend essentiellement :

(i) Un condensateur de couplage 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 comprise entre 2000 et 4000 pF environ bien que l'on puisse trouver d'autres valeurs là où il fait partie d'un transformateur de tension destiné à la mesure de la tension de la ligne, ou bien lorsque l'on a besoin d'une grande bande passante pour les courants porteurs.

(ii) 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. Un circuit-bouchon est essentiellement constitué par une inductance dimensionnée pour écouler le courant de la ligne d'énergie ; il peut être accordé de façon à former un circuit accordé parallèle. Un condensateur de couplage,

it is not possible to predict the electromagnetic field at any point along or near the line. In recent years a very complete theory has been evolved which facilitates a useful prediction of the current and voltage distribution for a given configuration [3 – 11 inclusive].

An alternative method of power line carrier communication is one in which carrier signals are propagated on the "earth wire" ("sky wire") which is in this case lightly insulated at each transmission line tower. This method has limited application because the "earth mode" is involved and this is characterised by high attenuation and increased radiation. However, a common application of insulated earth wires is to use two such wires as a horizontally disposed pair. Transpositions are usually provided at intervals. The attenuation and radiation are less than in the single wire case. For horizontal line configurations, some power savings are made by insulating and transposing both earth wires.

A second possible method under study involves the transmission of signals between the conductors forming a "bundle". It will be recalled that on extra high voltage lines the individual phase conductors are often constructed from a bundle of 2, 3 or 4 individual conductors closely spaced and at a nominally equal power frequency voltage. These methods each have their merits.

It is emphasised that the final choice of method in any particular case may often depend to a greater extent on economic and power frequency considerations rather than on telecommunication considerations such as the carrier frequency properties.

The interference susceptibility of any carrier system itself and its interfering effects on other systems with which it must co-exist depends also on its method of use. Clearly a protection system which sends a signal for a few milliseconds per year (in the event of an infrequent but unpredictable power system fault) may cause less interference than a system in continuous use for telephony or telemetering. The memorandum therefore refers to the methods of use and operation of power line carrier systems inasmuch as these are factors to be considered in any practical case, before going on to consider the extent and effects of any radiation both caused by and caused to the power line carrier system.

3. POWER LINE CARRIER SYSTEMS (P.L.C.)

This section gives a brief description of the basic means of coupling and use of P.L.C. systems. Variations of the basic methods outlined exist. Considerations of high voltage and telecommunications engineering, economics and other factors will dictate which method is employed in a given case.

3.1 Communication Paths (and Coupling)

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 without undue loss, and at the same time protect the communications equipment from overvoltage surges. The coupling equipment is also required to minimise the shunt loss caused by the substation equipment, and to render the impedance at carrier frequencies reasonably independent of switching conditions at the substation.

In its essentials coupling equipment comprises :

(i) A coupling capacitor of suitable voltage withstand properties which is inserted between the carrier equipment and the high voltage conductor. The value is of the order of 2000 – 4000 pF although other values may be found where the coupling capacitor forms part of a voltage transformer for line voltage measurement, or when broad carrier bandwidth is required.

(ii) 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. Basically the line trap consists of a choke coil rated to carry the full line current, and may be tuned so as to produce a parallel

associé à un groupe de couplage et à un circuit-bouchon, forme une cellule de filtre passe-bande en π . L'inductance du circuit-bouchon est comprise entre 100 μ H et 2 mH, les valeurs les plus élevées étant utilisées là où il y a besoin d'une grande bande passante.

(iii) Un "groupe de couplage" qui est placé entre la borne basse tension du condensateur de couplage et l'équipement à courants porteurs ; il comprend une bobine de drainage, un transformateur d'adaptation et des parafoudres. Les schémas classiques sont indiqués figures 1 et 2. Le rôle de la bobine de drainage, qui est conçue pour présenter une faible impédance à fréquence industrielle et une grande impédance aux fréquences porteuses, est d'écouler à la terre le courant à fréquence industrielle qui traverse le condensateur de couplage et par conséquent de limiter le potentiel de la borne basse tension de celui-ci dans l'intérêt de la sécurité.

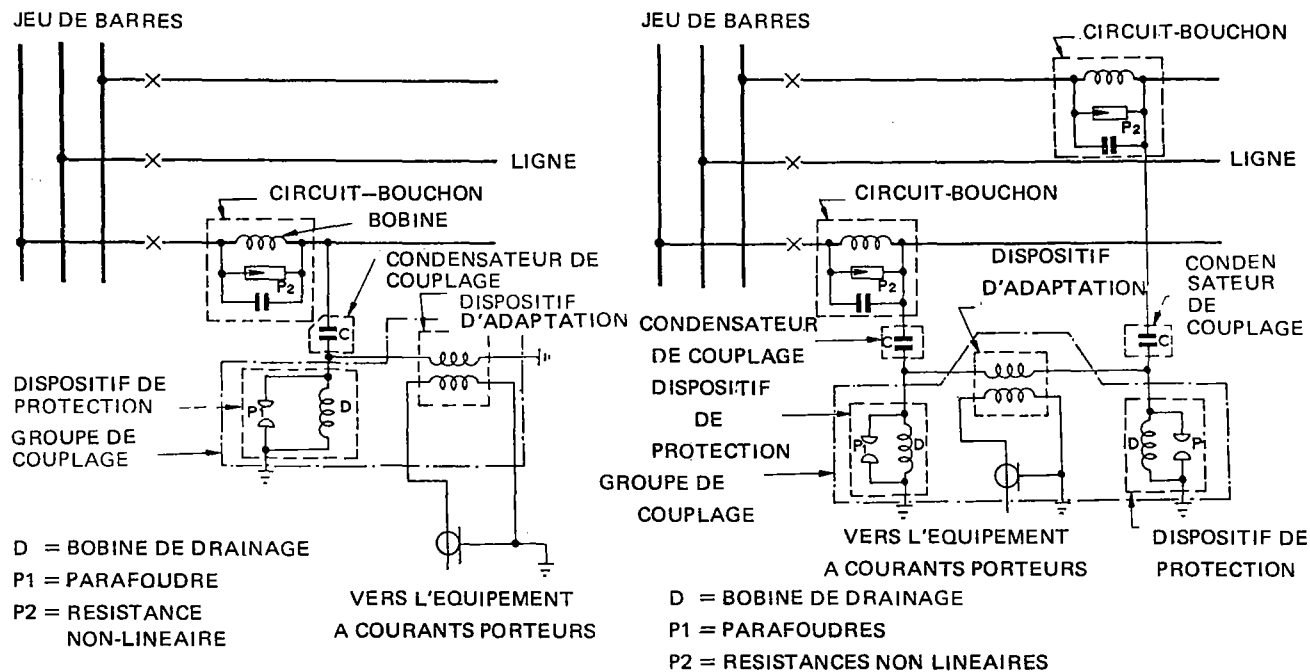


Figure 1 - Schéma simplifié d'un couplage CPL phase-terre.

Figure 2 - Schéma simplifié d'un couplage CPL interphases.

Ce qui précède, sous une forme ou une autre, est la description du dispositif de couplage classique qui est à l'heure actuelle d'usage courant dans le monde entier. D'autres dispositifs utilisant une ligne de transmission quart d'onde parallèle à la ligne d'énergie ont été développés mais n'ont pas jusqu'à maintenant été largement employés.

Les systèmes à courants porteurs utilisant les méthodes de couplage classiques peuvent fonctionner entre phase et terre, entre phases (interphase) ou entre phases (entre ternes) et ces différents cas vont maintenant être décrits plus en détail.

3.1.1 Couplage phase-terre

Dans 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. 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 important que le couplage interphase, et une sécurité moins grande en cas de défaut sur la phase concernée. 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. S'il n'en était pas ainsi, l'affaiblissement serait très grand à cause des pertes dans le sol aux fréquences porteuses. Le mode de propagation et les caractéristiques d'affaiblissement sont discutés plus en détail au chapitre 4.

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

tuned circuit. The coupling capacitor with its associated coupling device and line trap together form a Π section bandpass filter. The line trap inductance varies from $100 \mu\text{H}$ to 2 mH , the larger values being employed where broad band coupling is required.

(iii) A "coupling device" which is inserted between the low voltage terminal of the coupling capacitor and the carrier equipment, comprising a drain coil, matching transformer, and surge arresters. The connections are typically as shown in Figures 1 and 2. The function of the drain coil, which is designed to offer a low impedance at power frequency and a high impedance at carrier frequencies, is 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.

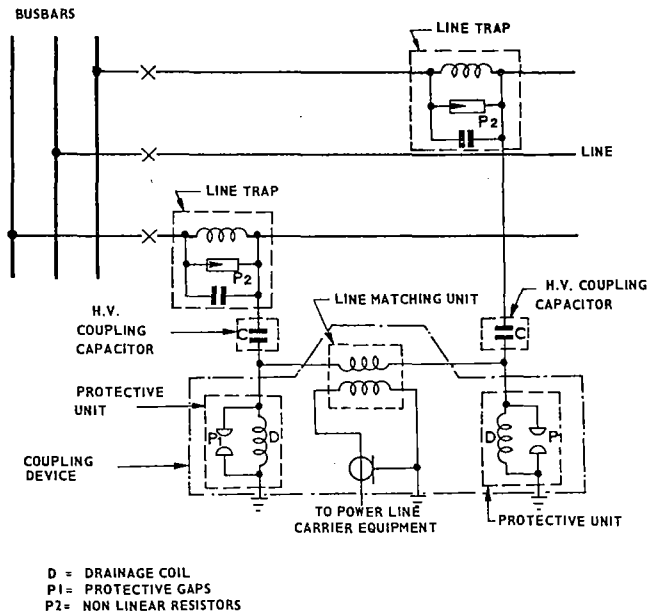
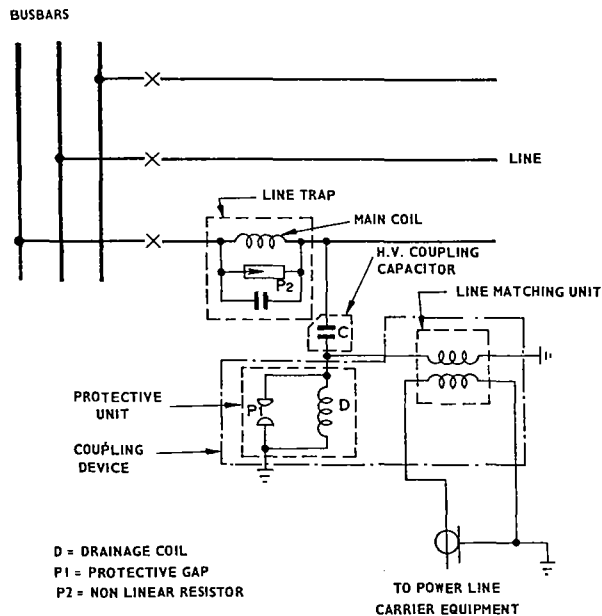


Figure 1 – Simplified circuit of phase-earth PLC coupling arrangement.

Figure 2 – Simplified circuit of interphase PLC coupling arrangement.

The foregoing, in one form or another, represents the conventional coupling equipment which is now in general use throughout the world. Alternative systems employing a quarter wave transmission line run parallel to the power line have been developed but so far have not found any extensive use.

Carrier systems employing the conventional coupling methods may work phase-to-earth, phase-to-phase (interphase) or intercircuit, and these alternatives will now be described in more detail.

3.1.1 Phase-Earth Coupling

In this type of coupling the carrier equipment is connected between one phase conductor and earth as shown in Figure 1. 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 interphase coupling and less security, in the event of an earth fault on the phase concerned. 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. If this were not so the attenuation would be very high due to losses in the ground at the carrier frequency. The mode of transmission and attenuation characteristics are discussed in more detail in Section 4.

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

3.1.2 Couplage interphase

La figure 2, qui donne un schéma de ce type de couplage, montre qu'il est nécessaire d'avoir deux condensateurs de couplage et deux circuits-bouchons en chaque point de couplage si bien que le coût du dispositif de couplage est environ deux fois celui du couplage phase-terre. Cependant le fonctionnement en 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.

Le couplage interphase est utilisé pour les lignes les plus longues et pour les plus hautes tensions ou bien lorsque la sécurité la plus grande est nécessaire, comme par exemple lorsque des dispositifs de protection sont en cause.

3.1.3 Couplage entre ternes

Lorsque deux lignes à haute tension indépendantes sont portées 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 terne. Comme environ 90 % de tous les défauts en ligne sont monophasés, on peut espérer que cette disposition donne une plus grande sécurité.

3.1.4 Couplage au câble de terre isolé.

On a l'habitude d'équiper les lignes à haute tension, en particulier au-delà de 110 kV, d'un ou de deux câbles de terre situés au-dessus des conducteurs des 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 aident 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 shuntés par des parafoudres dimensionnés pour amorcer à 15 – 30 kV environ. Ce fait a conduit à l'idée d'utiliser des câbles de terre isolés à des fins de télécommunication, l'avantage essentiel étant les économies réalisées sur les dispositifs 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.

Là où il y a deux câbles de terre, ils peuvent être isolés tous les deux pour former le circuit de télécommunication. Outre qu'ils offrent la possibilité de faire des économies sur les dispositifs de couplage, les câbles de terre isolés ont également l'avantage de permettre d'abaisser la limite inférieure des fréquences porteuses utilisables jusqu'à 5 kHz environ.

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

(i) L'affaiblissement aux fréquences porteuses est nettement plus grand que celui obtenu avec les conducteurs de la ligne eux-mêmes lorsque des câbles multibrins en acier sont utilisés pour les câbles de terre. Cependant, là où des conducteurs mixtes ("Alumoweld" etc.) sont utilisés pour les câbles de terre, l'affaiblissement est plus acceptable.

(ii) Dans le cas d'un seul câble, le mode de propagation présente des pertes élevées et le rayonnement est augmenté du fait que la terre est mise en jeu. Lorsque deux câbles sont utilisés, il circule seulement un courant de terre transversal et l'affaiblissement comme le rayonnement sont réduits en conséquence.

(iii) 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.

(iv) 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. Davantage de détails comprenant des descriptions d'installations peuvent être trouvés dans la bibliographie et dans les références [12].

3.1.5 Couplage entre conducteurs d'un faisceau

Les conducteurs en faisceau, constitués de deux conducteurs unitaires ou plus par phase, sont d'usage courant sur les lignes à haute tension au-delà de 220 kV (et quelquefois à 220 kV) dans le but de réduire

3.1.2 Interphase Coupling

This type of coupling is shown in Figure 2 from which it will be seen that 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-earth coupling. Interphase working 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.

Interphase coupling is employed for the longer lines and the higher voltages, or when the maximum security is required, as for example when protection relaying is involved.

3.1.3 Inter-circuit Coupling

When two independent high voltage circuits are run on the same poles or towers, it is possible to utilise one phase on each of the circuits to provide the equivalent of interphase coupling on a single circuit line. As approximately 90% of all line faults are single phase, this arrangement may be expected to give higher security.

3.1.4 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 intended primarily to protect the lines against lightning strokes, but they also serve to reduce the step voltages which would otherwise exist at the towers and substations under earth fault conditions on the lines. In addition the earth wires help to minimise 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 15-30 kV. This discovery led to proposals to utilise insulated earth wires for communication purposes, the principal advantage being the saving in coupling equipment, as although coupling capacitors and choke coils are still required they need not be rated for the full operating voltage and current of the line.

Where two earth wires exist they may both be insulated to form the communication circuit. Apart from offering the possibility of savings in relation to coupling equipment, insulated earth wires also have the advantage that they enable carrier frequencies down to about 5 kHz to be employed.

The method has, however, a number of disadvantages :

(i) The attenuation at carrier frequencies is appreciably greater than that of the power lines themselves where multi-strand steel conductor is employed for the earth wire. However, where composite conductors ("Alumoweld" etc.) are used for the earth wire(s) the attenuation is more acceptable.

(ii) The propagation mode is lossy and radiation is increased since the earth is involved in the single wire case. Where two wires are used only a transverse earth current flows and the attenuation and radiation are accordingly reduced.

(iii) The need for insulating the earth wires at each tower and at the terminal points adds to the costs, and for the longer distances the additional costs may exceed the savings in coupling equipment.

(iv) 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. Further details including descriptions of practical installations will be found in the bibliography and in reference [12].

3.1.5 Intrabundle Coupling

Bundle conductors consisting of two or more standard individual conductors per phase are commonly employed on high voltage lines above 220 kV (and sometimes at 220 kV) to reduce corona losses and

les pertes par effet couronne et les perturbations radio résultantes. Les conducteurs d'un faisceau sont normalement en contact galvanique mais ils peuvent être isolés l'un de l'autre de façon que la transmission des courants porteurs puisse s'effectuer entre eux [13]. Le schéma utilisé est donné par la figure 3 et il présente les avantages suivants, par rapport à la transmission conventionnelle des courants porteurs.

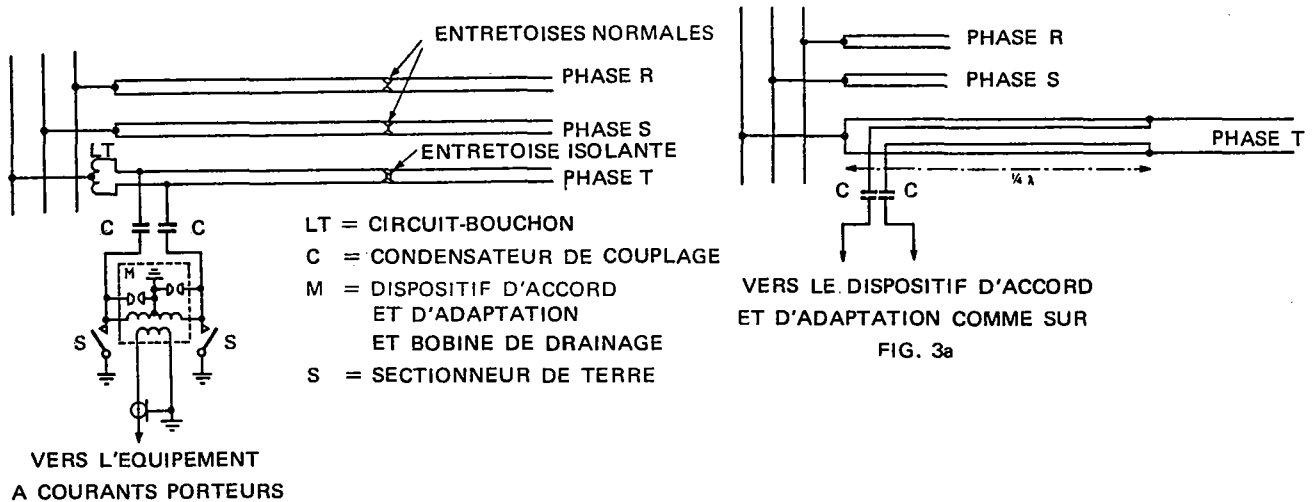


Figure 3a - Couplage entre conducteurs d'un faisceau utilisant un circuit-bouchon. Figure 3b - Couplage entre conducteurs d'un faisceau utilisant une ligne quart d'onde.

(i) Du fait de la distance relativement faible entre deux conducteurs unitaires d'un faisceau, la puissance rayonnée est très faible et la puissance de bruit reçue également. Ceci entraîne que les mêmes fréquences peuvent être ré-utilisées dans une plus large mesure qu'avec des courants porteurs sur lignes couplés en interphases ou en phase-terre.

(ii) Des économies sont possibles sur le coût du dispositif de couplage par rapport à celui qui est nécessaire pour les courants porteurs sur lignes conventionnels. Par exemple, un simple circuit-bouchon à large bande d'environ 2 mH d'inductance, avec une prise médiane et branché comme le montre la figure 3a, suffit en chaque point de couplage. Le courant à fréquence industrielle circule dans les deux moitiés de l'enroulement en sens contraires si bien que la réactance inductive est réduite. Les pertes à fréquence industrielle sont également moindres que dans le cas classique des courants porteurs pour lequel la totalité du courant traverse toute l'impédance de la bobine. Une autre méthode évitant l'utilisation du circuit-bouchon a été proposée (Fig. 3b).

Le principal inconvénient de la transmission de fréquences porteuses entre conducteurs d'un faisceau est que la construction de la ligne est compliquée par la nécessité d'isoler entre eux les conducteurs unitaires du faisceau ; ceci s'applique à l'appareillage de suspension et d'ancrage aussi bien qu'aux entretoises qui sont disposées de place en place entre les conducteurs.

Il importe de noter que de nombreuses lignes à haute tension n'ont pas de conducteurs en faisceau si bien que la possibilité d'utiliser cette méthode ne supprime pas les besoins en systèmes C.P.L. conventionnels. De plus, l'idée de la transmission entre conducteurs d'un faisceau est récente et le système n'a pas encore été exploité.

3.2 Applications

3.2.1 Généralités

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

- des informations analogiques comme la téléphonie
- et/ou des informations analogiques ou digitales appelées "signaux" (télégraphie, télémessure, téléconduite, données etc).

Les "signaux" suivant les besoins, sont transmis avec des vitesses de modulation comprise entre 50 et 1.200 bauds, essentiellement par canaux télégraphiques à fréquences vocales situés dans la bande téléphonique ou superposés à une bande téléphonique réduite (fonctionnement en "téléphonie plus signaux").

resulting radio interference. The bundle conductors are normally metallicly interconnected but they can be insulated from each other in such a way that carrier transmission can take place on an intrabundle basis [13]. The arrangement is shown in Figure 3 and has the following advantages when compared with conventional power line carrier transmission.

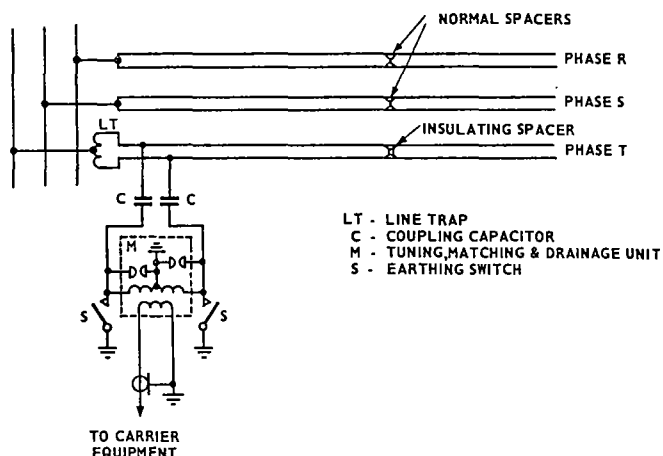


Figure 3 a – Intrabundle carrier coupling using line trap.

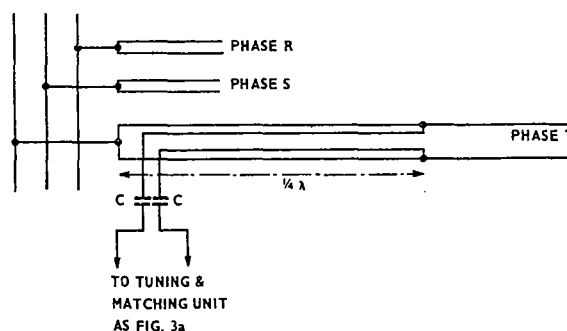


Figure 3 b – Intrabundle carrier coupling using quarter wave-length signal conductors.

(i) Because of the relatively close spacing of the two individual conductors of the bundle, very little signal power will be radiated, and very little noise power will be picked up. This means that the same frequencies can be re-employed to a much greater extent than is possible with power line carrier operating interphase or phase-to-earth.

(ii) Savings are possible in the cost of coupling equipment as compared with that required for conventional power line carrier. For example a single broadband line trap of inductance about 2 mH with a centre tap and connected as shown in Figure 3a is sufficient at each coupling point. The power current flows through the two halves of the winding in opposite directions so that the inductive reactance will be reduced. The power loss will also be less as compared with conventional carrier, where all the current has to flow through the entire impedance of the coil. An alternative method avoiding the line trap has been proposed (Fig. 3b).

The principal disadvantage of intrabundle carrier transmission is that the line construction is complicated by the need to provide insulation between the individual conductors of the bundle and this applies to both suspension and dead ending arrangements as well as to the spacers which are inserted at intervals between the conductors.

It should be noted that many high voltage lines do not employ bundle conductors so that the availability of this method does not supplant the need for conventional P.L.C. systems. Furthermore, the intrabundle concept is relatively recent and the system has not yet been exploited.

3.2 Applications

3.2.1 General

Power line carrier systems are, in principle, used to carry

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

“Signals” are, depending upon requirements, transmitted at modulation rates varying from 50 to 1200 Bd, mainly by V.F. telegraph channels located in the speech band or superimposed on a reduced speech band (“speech-plus signals” operation).

Dans le cas de vitesses de modulation élevées ou pour des applications particulières de téléprotection, on peut employer la manipulation directe de la porteuse.

3.2.2 Téléphonie

Aux débuts de l'utilisation des systèmes C.P.L., les conversations téléphoniques à l'intérieur d'une zone limitée (celle d'une unité opérationnelle d'une compagnie d'électricité) étaient le seul besoin ressenti ; ceci était obtenu avec des systèmes à lignes partagées exploités en simplex.

De nos jours, des conversations téléphoniques à plus grande échelle, quelquefois couvrant tout un pays sont essentielles pour l'exploitation et le fonctionnement d'un réseau de transport d'énergie.

La plupart des circuits téléphoniques sont intégrés dans des réseaux automatiques privés, quelquefois équipés de priorités pour des abonnés importants pour l'exploitation.

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

Compte tenu de la taille et du nombre de sections exploitées en série dans ces réseaux privés, une bande des fréquences de parole effectivement transmise de 300 à 2400 Hz peut être considérée comme convenable pour la qualité de service requise.

Cependant, afin de pouvoir disposer d'un plus grand nombre de canaux de signaux superposés, certaines compagnies d'électricité ramènent la limite supérieure à 2000 Hz environ.

Les réseaux téléphoniques C.P.L., *normalement, ne sont pas raccordés* au réseau téléphonique public et sont par conséquent considérés comme des *réseaux privés* (appartenant à l'entreprise).

3.2.3 Télégraphie

Il existe également des réseaux privés de télégraphie (téléimprimeur) empruntant les circuits C.P.L. Ces applications peuvent également inclure la transmission de fac-similé.

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 vitesse de modulation est généralement de 50 ou 75 bauds suivant les téléimprimeurs utilisés ; le fac-similé peut nécessiter des vitesses plus élevées.

3.2.4 Téléconduite

L'exploitation d'un grand réseau de transport d'énergie fait appel à une fonction en boucle fermée dans laquelle l'état des installations en de nombreux points éloignés est surveillé en un point central, les informations obtenues sont traitées et les décisions prises. (Il peut y avoir des dispositifs automatiques comme des calculateurs et/ou des hommes pour effectuer cette fonction). Des ordres sont alors émis vers les installations éloignées pour en modifier l'état. Le changement d'état résultant est vu par le dispositif de surveillance. Par conséquent les fonctions de surveillance et de commande ne peuvent pas être considérées séparément du fait qu'elles sont des parties d'un concept global de conduite dans lequel les propriétés de chacune des parties doivent inévitablement être considérées en fonction de celles de l'autre et en fonction de l'ensemble du système en boucle fermée.

La fonction surveillance comprend la transmission d'informations concernant des grandeurs analogiques telles que tension, courant et puissance aussi bien que d'informations relatives à l'état des appareils de coupure, sectionneurs etc.

La fonction de commande concerne le fonctionnement à distance des appareils de coupure du réseau, la régulation des centrales etc. L'usage moderne est d'intégrer dans un seul système les fonctions de surveillance et de commande.

Les informations de téléconduite exigent un très haut degré de sécurité vis-à-vis des fonctionnements intempestifs ou défailants [14].

La vitesse de transmission pour des systèmes simples peut descendre jusqu'à 50 bauds mais, pour des systèmes complexes multipoints à temps partagé, des vitesses allant jusqu'à 2.400 bauds ou plus sont utilisées.

3.2.5 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 [15].

In the case of high modulation rates, or special teleprotection applications direct keying of the carrier may be employed.

3.2.2 Speech

In the early days of P.L.C., speech communication within a limited area (of an operational unit of a power supply board) was the only facility called for, and this was provided by party line systems operated in a simplex mode.

Today speech communication in a much larger area, sometimes covering a whole nation, is normally essential for the management and operation of the power system.

The majority of the speech circuits are integrated in private automatic subscriber trunk dialling networks, sometimes equipped with priority facilities for operationally important subscribers.

Tandem group switching is the 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 to 2400 Hz may be regarded as adequate for the required grade of service.

However, in order to accommodate more superimposed signalling channels, some power boards reduce the upper limit to about 2000 Hz.

P.L.C. telephone systems are not normally interconnected with the public telephone network, and are therefore considered as private (utility-owned) systems.

3.2.3 Telegraphy

Private telegraph (teleprinter) facilities are also operated over P.L.C. circuits. Such applications may also include facsimile transmission.

Some power utilities favour the teleprinter in operational management because hard copies of the information exchanged are produced both at the command and at the executive levels. Both point-to-point and switched circuits are used.

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

3.2.4 Telecontrol

The control of a large power network comprises a closed loop activity in which the status of plant at many remote points is monitored centrally, the resulting information is processed and decisions taken. (There may be automatic devices such as computers and/or men in this function). Commands are then sent out to the distant plant to modify its status. The resulting changed status is observed by the monitoring system. The monitoring and command functions cannot therefore be regarded in isolation since they form part of an overall control concept in which the properties of each part must inevitably be considered in relation to one another and to the whole closed loop system.

The monitoring function comprises the transmission of information concerning analogue quantities such as voltage, current and power, as well as the information relating to switch-gear and isolator status etc. The command function allows for the remote operation of h.v. switchgear, the regulation of generating plant etc. Modern practice is to integrate the monitoring and command function in a single system.

Telecontrol information requires a very high degree of security with respect to maloperation or loss of information [14].

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

3.2.5 Teleprotection

In order to prevent danger to life and damage to plant and also to ensure the best possible continuity of supply any power system must be protected against faults [15].

Alors que la protection d'un abonné est tout à fait simple, il n'en est pas ainsi lorsqu'il s'agit de protéger un réseau de transport à haute ou très haute tension fortement maillé. Ces réseaux, essentiellement constitués de lignes aériennes, sont prédisposés à des courts-circuits à la terre ou entre conducteurs (appelés défauts en ligne) dus à des causes telles que la foudre, les surtensions de manoeuvre, etc. La protection est obtenue par élimination du défaut, c'est-à-dire mise hors tension de la ligne en défaut en déclenchant les disjoncteurs associés sur l'ordre d'un dispositif de mesure qui détecte le défaut (habituellement appelé la protection).

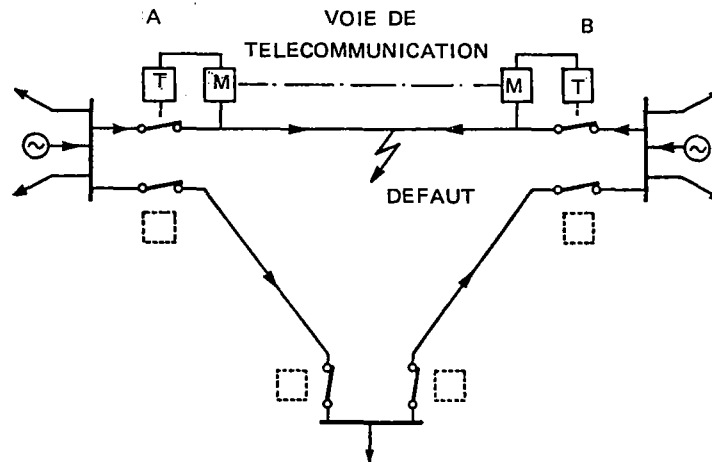


Figure 4 - Exemple de téléprotection.

L'examen de l'exemple donné par la figure 4 montre que, pour éliminer le défaut sur la ligne A - B, il faut non seulement déclencher le disjoncteur A, mais également le disjoncteur B, pour éviter que le défaut ne soit alimenté à partir de B.

Pour ce faire en un minimum de temps tout en empêchant tous les autres disjoncteurs concernés de déclencher, il faut établir une liaison de signalisation entre les relais de protection A et B.

Il existe deux grandes catégories de systèmes de téléprotection à savoir premièrement la transmission d'ordres binaires (déclenchement à distance, déclenchement interdépendant, etc.) et deuxièmement la transmission de grandeurs analogiques (phase, courant, etc.) à des fins de comparaison (protection différentielle, protection par comparaison de phase, etc.). Pour ce faire, et lorsqu'il faut couvrir des distances supérieures à 10 km environ, il est d'usage courant d'établir la liaison de protection à l'aide d'un canal de signalisation fonctionnant en fréquence vocale ou dans la bande des fréquences porteuses.

Le temps de propagation global maximal admissible d'un canal de téléprotection est très faible, couramment de l'ordre de 10 à 50 ms.

L'équipement de téléprotection peut utiliser un canal parmi d'autres d'un système de télécommunication (par exemple un canal à fréquence vocale d'un système C.P.L. à usage mixte) ou il peut être installé sur un circuit de protection séparé. Le choix dépend des différentes sécurités de fonctionnement requises et de considérations économiques.

Les systèmes 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 an) et à des instants quelconques. Ils nécessitent toujours d'avoir une très grande probabilité d'exécuter un actionnement "volontaire" et une très faible probabilité d'avoir un actionnement "non-volontaire" (par exemple à cause du bruit).

L'actionnement non-volontaire peut consister en un retard ou même une absence totale de déclenchement quand celui-ci est nécessaire aussi bien qu'en un déclenchement intempestif quand celui-ci ne doit pas avoir lieu.

3.2.6 Utilisation mixte

Pour les systèmes C.P.L. de 4 kHz, il est d'usage courant d'utiliser un seul canal de 4 kHz de largeur de bande pour la transmission mixte de téléphonie et de signaux de téléconduite. Le canal est divisé en

Whereas the protection of a consumer is quite straightforward this is not the case when a closely meshed h.v. or e.h.v. transmission system is to be protected. Such a system, mainly consisting of overhead lines, is prone to earth and/or conductor-to-conductor short-circuits (so-called line faults) due to such causes as lightning strokes, switching overvoltages, etc. Protection is accomplished by fault clearance, i.e. de-energisation of the faulty line by tripping the associated circuit-breakers under control of a fault-detecting measuring device (usually called the protection relay).

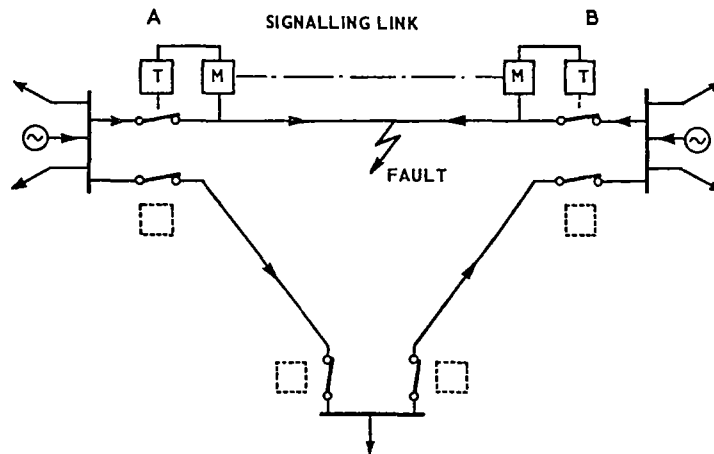


Figure 4 – Example of teleprotection.

Considering the following example shown in Figure 4 it is seen that, in order to clear a line fault on line A-B, it will be required not only to trip breaker A, but also B in order to prevent the fault being fed from B.

To do so in minimum time whilst preventing all other breakers involved from tripping it is required to establish a signalling link between the protection relays A and B.

There are two broad categories of teleprotection systems, comprising firstly the transmission of binary commands (transfer tripping, intertripping etc.) and secondly the transmission of analogue values (phase, current etc) for comparison purposes (differential protection, phase comparison protection etc.). For these purposes and when distances in excess of, say, about 10 km are to be covered it is current practice to establish such a protection link with a telecommunication signalling channel operating in the V.F. or C.F. range.

The permissible maximum overall propagation delay of a teleprotection channel is quite small, typically of the order of 10 to 50 msec.

Teleprotection equipment may share a channel in the utility telecommunications systems (e.g. a V.F. channel in a multi-purpose P.L.C. system), or may rely on a separate protection circuit. The choice will depend on the relative reliabilities required, and on economic considerations.

Teleprotection schemes are characterised 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. They invariably require an extremely high probability of achieving "wanted" operation, and an extremely low probability of "unwanted" action (e.g. due to noise). Unwanted action may comprise both a delay or even a total failure to trip when required to do so as well as false tripping when not required to do so.

3.2.6 Multi-channel use

On 4 kHz P.L.C. systems it has become standard practice to utilise a single channel of 4 kHz bandwidth for the composite transmission of speech and telecontrol signals. The channel is divided into a band 300-2400 Hz

une bande s'étendant de 300 à 2400 Hz (ou moins) utilisée pour la téléphonie, tandis que le reste du canal est utilisé pour les autres usages. Ainsi, couramment, un certain nombre de canaux télégraphiques à faible vitesse de modulation, généralement 50, 100 ou 200 bauds, ou un canal à vitesse moyenne de modulation (600 bauds) peuvent être superposés dans la bande restante.

3.2.7 *Systèmes normalement au repos, renforcement de puissance*

Dans certains systèmes C.P.L. (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 signal d'essai est transmis d'une extrémité à l'autre à des intervalles réguliers (30 minutes par exemple) pour vérifier le bon état des équipements. Pour les problèmes des perturbations que peut produire un émetteur C.P.L. et les problèmes d'allocation de fréquence, il est évident que des considérations différentes s'appliquent aux systèmes normalement au repos par opposition aux systèmes C.P.L. conventionnels pour lesquels la téléphonie et les autres signaux doivent être émis de façon permanente.

Pour les systèmes C.P.L. conventionnels mixtes "téléphonie plus signaux", et lorsqu'il existe en outre des signaux de protection, il est d'usage courant de mettre hors service la voie réservée à la téléphonie pendant que sont transmis les signaux de protection, si bien que le niveau de certains canaux superposés donnés ou de tous ceux-ci peut être renforcé jusqu'à la pleine puissance en crête de l'amplificateur de sortie de l'émetteur.

3.3 Utilisation des courants porteurs sur lignes d'énergie dans différents pays

3.3.1 *Importance d'utilisation*

Le tableau I indique le nombre d'équipements à courants porteurs (au 1er Janvier 1972) installés dans différents pays pour lesquels on dispose de chiffres ; il indique également le nombre de circuits téléphoniques, de canaux de téléconduite et de canaux de téléprotection en service sur ces installations. Les canaux de téléconduite comprennent ceux qui servent aux fonctions de surveillance et ceux qui servent aux fonctions de commande.

Le tableau II donne une comparaison entre l'utilisation des différents moyens de télécommunication, y compris les courants porteurs sur lignes, pour les pays figurant au tableau I.

On voit que les courants porteurs sur lignes d'énergie sont un moyen de télécommunication largement utilisé par les compagnies d'électricité. Bien plus, les systèmes C.P.L. sont souvent choisis pour les applications les plus importantes et les plus vitales. Cependant, dans de nombreux pays, les courants porteurs sur lignes conventionnels sont maintenant exploités à la limite de leurs possibilités d'extension et il est probable que dans ces pays, dans le futur, on devra utiliser plus largement les liaisons radio. En même temps, les courants porteurs sur lignes constitueront toujours un moyen important dans de nombreux pays et leur utilisation sera complémentaire de celle des liaisons radio et d'autres systèmes de télécommunication.

Les télécommunications pour un réseau de transport d'énergie nécessitent souvent une sécurité de fonctionnement dont l'ordre de grandeur ne peut être atteint sur les circuits prévus pour le service public. Dans certains pays, les circuits que l'on peut obtenir auprès de l'administration des P.T.T. ou auprès des compagnies privées ne conviennent pas ou bien ne sont pas disponibles, en particulier dans les zones éloignées des centres de population. Les centrales et les postes électriques sont souvent situés dans ces zones éloignées. Dans ces circonstances, les systèmes C.P.L. sont largement utilisés lorsque le nombre de canaux requis est petit ou bien lorsque des faisceaux hertziens ne peuvent pas se justifier sur le plan économique.

3.3.2 *Problèmes d'attribution de fréquences*

La gamme des fréquences convenant à la transmission par courants porteurs sur lignes conventionnels s'étend de 30 kHz à 500 kHz environ, la limite inférieure étant fixée par les limitations techniques et le coût du dispositif de couplage et la limite supérieure par l'affaiblissement en ligne. (Comme on l'a fait remarquer aux sous-paragraphes 3.1.4 et 3.1.5, la limite inférieure peut descendre jusqu'à 5 kHz environ pour une transmission sur câble de terre isolé et, pour une transmission entre conducteurs d'un faisceau, des fréquences plus élevées, jusqu'à 2 MHz environ, peuvent être utilisées). La gamme des fréquences effectivement utilisables doit normalement tenir compte des besoins de diverses installations radio et d'installations de radiodiffusion, y compris les systèmes de navigation aéronautique ou maritime. Dans certains cas, il est possible de partager les fréquences avec ces installations sous certaines conditions telles qu'une distance minimale spécifiée entre la ligne d'énergie et les installations radio. Dans d'autres cas, le partage

(or less) used for speech, whilst the remainder is used for the other purposes. Thus, typically, a varying number of low speed telegraph channels, generally of 50, 100 or 200 Bd signalling speed, or one medium speed 600 Bd channel can be superimposed in the remaining space.

3.2.7 Quiescent systems, power boosting

In certain P.L.C. systems (used for teleprotection) the carrier signal is normally quiescent and it is sent only 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 minutes to prove the equipment as being healthy. In questions of possible interference caused by a P.L.C. transmitter and frequency assignment, it is clear that different considerations apply to such quiescent carrier systems as opposed to the conventional P.L.C. systems in which speech and other signals necessitate continuous transmission of carrier.

In conventional P.L.C. systems operated in the "speech plus signals" mode, and when protection signals are included, it has become standard practice to disable the speech circuit whilst active protection signals are transmitted, so that the level of all or some predetermined superimposed channels may be boosted to the full peak level of the transmit line amplifier.

3.3 The use of Power Line Carrier in Various Countries

3.3.1 Extent of use

Table I sets out the number of power line carrier terminals installed in various countries for which figures are available, as at 1 January 1972 and also shows the number of telephone circuits, telecontrol channels, and teleprotection channels operated over these installations. Telecontrol channels include those provided for both monitoring and command functions.

Table II gives a comparison between the use of different communication media, including power line carrier, in the countries included in Table II.

It will be seen that power line carrier is a widely used communications medium for power utilities. Furthermore, P.L.C. is often selected for the most important and vital applications. In many countries, however, conventional power line carrier has now been exploited to the maximum extent possible and it is probable that in such countries in future more use will have to be made of radio links. At the same time power line carrier will continue to be an important medium in most countries, and its use will be complementary to radio links and to other forms of communication.

Power system telecommunications often necessitates orders of reliability unattainable over circuits designed for the public service. In some countries the facilities available from Public Telecommunication Authorities or commercial companies are inappropriate or are not available, particularly in remote areas away from the population centres. It is in these remote areas that power plants and stations are often located. In such instances P.L.C. is extensively used, when the number of channels required is small, and when microwave systems cannot be economically justified.

3.3.2 Frequency Assignment Problems

The range of frequencies suitable for conventional power line carrier transmission extends from about 30 kHz to 500 kHz, the lower limit being fixed by the limitations and cost of coupling equipment, and the upper limit by line attenuation. (As pointed out in Sections 3.1.4 and 3.1.5 the lower limit is extended to about 5 kHz for insulated earth wire transmission and for intrabundle transmission higher frequencies up to about 2 MHz may be usable). The actual range of frequencies available for use will normally take account of the needs of various radio services and broadcasting services, including aeronautical and maritime navigation systems. In some cases it may be possible to share frequencies with such services, subject to certain conditions such as a specified minimum separation in distance between the power line and the radio installations. In other cases sharing may not be permissible and the frequencies in use for the radio

peut n'être pas tolérable et les fréquences utilisées par les installations radio ne peuvent alors pas l'être pour les courants porteurs. Les gammes des fréquences utilisées dans un certain nombre de pays sont indiquées au sous-paragraphe 3.3.3.

Tableau I : Equipements à courants porteurs sur lignes d'énergie pour les pays pour lesquels des statistiques sont disponibles (au 1er Janvier 1972) :

Pays	Nombre d'équipements	Circuits téléphoniques	Canaux de téléconduite	Canaux de protection
Allemagne fédérale	7000	2030	1410	100
Autriche (1)	705	283	546	49
Australie	709	218	475	157
Belgique	32	15	27	5
Danemark (2)	379	97	295	32
Finlande	213	83	362	18
France	1287	550	1000	112
Grande Bretagne (3)	394	90	45	184
Irlande	196	72	114	14
Italie	3232	1682	3942	70
Japon	5911	2170	803	796
Norvège	362	179	524	103
Portugal	243	113	53	22
Suède	686	135	207	78
Suisse	854	381	1200	500
Tchécoslovaquie	366	225	58	10
Canada	1382	271	445	626
Etats-Unis (4)	1542	103	181	372
Totaux	25493	8697	11687	3248
U.R.S.S. (5)		6582	19240	
Totaux généraux		15279	24175	

(1) Chiffres de 1968

(2) Chiffres de 1971

(3) Ces chiffres tiennent compte du North of Scotland Hydro-electric Board

(4) Ces chiffres concernent uniquement la Tennessee Valley Authority

(5) Chiffres de 1969 (les chiffres distincts pour les équipements ne sont pas disponibles).

On estime la production mondiale d'équipements C.P.L. à 2000 à 3000 unités par an (1972).

Les équipements mixtes modernes à bande latérale unique pour courants porteurs conventionnels nécessitent une largeur de bande de 4 kHz environ pour chaque sens de transmission et la gamme disponible des fréquences porteuses 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. Lorsque des liaisons à courants porteurs à bande latérale unique sont installés pour la téléphonie, une largeur de bande de 2,5 kHz est normalement suffisante ce qui a conduit certains pays à avoir une répartition de fréquence basée sur des canaux de 2,5 kHz, deux d'entre eux étant nécessaires pour chaque liaison bilatérale. D'autres largeurs de bande des canaux ont également été choisies dans certains pays pour convenir à leurs propres équipements ou répondre à des besoins particuliers.

La grande difficulté pour attribuer des fréquences aux systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie est due au fait que les lignes à haute tension forment un réseau maillé si bien qu'une fréquence utilisée sur une section du réseau peut apparaître sur d'autres sections avec un niveau suffisant pour produire des perturbations. Ceci limite la mesure dans laquelle la même fréquence peut être réutilisée sur un réseau. Les perturbations peuvent être dues pour une part aux fuites à travers les circuits bouchons qui ne peuvent jamais présenter un blocage parfait et, pour une autre part, au couplage inductif et capacitif avec les conducteurs qui ne sont pas munis de circuits bouchons. Ce couplage mutuel peut également exister entre des lignes de niveaux de tension différents qui autrement seraient raisonnablement bien découplées par les pertes

services cannot then be employed for power line carrier. The frequency ranges employed in various countries are referred to in Section 3.3.3.

Table I : Power Line Carrier installations as at 1st January 1972 in countries for which statistics are available :

Country	Number of Terminals	Telephone Circuits	Telecontrol Channels	Protection Channels
Germany (FED)	7000	2030	1410	100
Austria (1)	705	283	546	49
Australia	709	218	475	157
Belgium	32	15	27	5
Denmark (2)	379	97	295	32
Finland	213	83	362	18
France	1287	550	1000	112
Gt. Britain (3)	394	90	45	184
Ireland	196	72	114	14
Italy	3232	1682	3942	70
Japan	5911	2170	803	796
Norway	362	179	524	103
Portugal	243	113	53	22
Sweden	686	135	207	78
Switzerland	854	381	1200	500
Czechoslovakia	366	225	58	10
Canada	1382	271	445	626
U.S.A. (4)	1542	103	181	372
Totals	25493	8697	11687	3248
U.S.S.R. (5)		6582	19240	
GRAND TOTAL		15279	24175	

(1) 1968 Figures

(2) 1971 Figures

(3) Figures shown include North of Scotland Hydro-Electric Board

(4) Figures shown are for Tennessee Valley Authority only

(5) 1969 Figures (separate figures not available for terminals)

An estimate of world production of P.L.C. terminals is 2000 to 3000 units per annum (1972).

Modern single-sideband multi-purpose conventional power line carrier circuits require a bandwidth of about 4 kHz for each direction of transmission, and the available range of carrier frequencies 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 channels. Where single-sideband carrier circuits are provided for speech a bandwidth of 2.5 kHz is normally sufficient, and this has led to some countries having allocations based on channels 2.5 kHz in width, two of these being required for each two-way speech circuit. Other channel widths have also been adopted in certain countries to suit their own equipment and special needs.

A major difficulty in assigning frequencies for power line carrier systems is that the high voltage lines normally form a closed mesh, so that a frequency used on one section of a network may appear also in other sections with a level high enough to cause interference. This limits the extent to which the same frequency can be re-used in the network. The interference can be due partly to leakage across line traps, which can never provide perfect blocking, and partly due to inductive and capacitive coupling with untrapped conductors. This mutual coupling can also exist between lines of different voltages which would otherwise be reasonably well decoupled by the losses at carrier frequencies in the power transformers.

aux fréquences porteuses dans les transformateurs de puissance. Il est évident que l'attribution de fréquences aux systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie est un problème compliqué, et les difficultés sont augmentées par la configuration de la plupart des réseaux de transport d'énergie qui est en évolution constante puisque ceux-ci se développent et s'étendent pour répondre à l'augmentation de la demande d'énergie. Différentes approches du problème d'attribution de fréquences aux systèmes C.P.L. ont été effectuées dans un certain nombre de pays ; l'utilisation grandissante (et la concentration géographique) des systèmes C.P.L., alors qu'en comparaison le spectre disponible ne s'accroît que de façon négligeable, met l'accent sur la nécessité d'une planification permettant d'utiliser au mieux le spectre sur un plan national (ou même international). L'annexe donne, à titre d'exemple, une approche pour une attribution logique des fréquences des courants porteurs sur lignes d'énergie [16].

Tableau II : Importance d'utilisation des différents moyens de télécommunications pour les pays figurant au *Tableau I* (1er Janvier 1972).

Moyens de télécommunications	Nombre d'équipements	Circuits téléphoniques	Canaux de téléconduite	Canaux de protection
Courants porteurs sur lignes d'énergie	25 493	8 697	11 687	3 248
Courants porteurs sur câble ou fils aériens privés	3 516	2 955	610	121
Liaisons radio	6 230	8 012	7 347	984
Câble ou fils aériens privés (sans transposition de fréquence)	-	24 570	14 105	5 281
Circuits loués aux P.T.T. ou à d'autres compagnies de téléphone	-	6 180	2 684	2 387

Notes -

(1) Le tableau ne tient pas compte des chiffres de l'URSS car on ne dispose pas d'informations suffisantes.

(2) Pour les chiffres concernant les circuits loués aux P.T.T., le tableau ne tient pas compte de l'Autriche car on ne dispose pas d'informations suffisantes.

3.3.3 Gammes de fréquences utilisées dans divers pays

Les gammes de fréquences utilisées dans divers pays sont données par le Tableau III. Comme on l'a déjà indiqué au sous-paragraphe 3.3.2, les fréquences utilisées par divers services radio comme les systèmes de navigation aérienne et maritime et les installations de radio-diffusion, peuvent devoir être complètement exclues ou leur usage restreint dans certaines zones géographiques pour les systèmes à courants porteurs.

Ceci est illustré par les discontinuités dans les gammes de fréquences utilisées par certains pays. Il importe de noter que pour les autres pays figurant au Tableau III, la bande de fréquence effectivement disponible pour les systèmes C.P.L. peut être réduite de la même façon, les chiffres donnés n'indiquant que les limites supérieures et inférieures de la bande de fréquence disponible. Les notes du tableau III donnent les conditions spéciales applicables pour certains pays.

4. ETUDE DES SYSTEMES A COURANTS PORTEURS SUR LIGNES D'ENERGIE

4.1 Propagation modale

La propagation de signaux sur une ligne à conducteurs multiples, telle qu'une ligne d'énergie, peut être analysée en se basant sur la propagation de plusieurs modes indépendants. Chaque mode est caractérisé par l'atténuation et la vitesse de propagation qui lui sont associées. Chaque mode comporte une répartition

It will be evident that the assignment of frequencies for power line carrier operation is a complex problem, and the difficulties are increased by the ever-changing configuration of most power networks, as they are developed and extended to meet growth of the power demand. Various approaches to P.L.C. frequency assignment have been made in different countries and the growing use (and geographical concentration) of P.L.C. systems, with negligible corresponding increase in available spectrum, emphasises the necessity for economic spectrum planning on a national (or even international) basis. The appendix shows, by way of an example, one approach to the logical assignment of power line carrier frequencies [16].

Table II : Extent of use of different communication media in countries included in Table I as at 1st January 1972.

Media	Number of Terminals	Telephone Circuits	Telecontrol Channels	Protection Channels
Power Line Carrier	25493	8697	11687	3248
Carrier on private cable or open wire line	3516	2955	610	121
Radio links	6230	8012	7347	984
Private cable or open wire line – in natural frequency position	-	24570	14105	5281
Circuits rented from PTT or other commercial telephone supplier	-	6180	2684	2387

Notes –

(1) Figures for U.S.S.R. are excluded as sufficient details are not available.

(2) Austria is not included in the figures for circuits rented from PTT, as details are not available.

3.3.3 Frequency ranges in use in various countries

The frequency ranges in use in various countries are set out in Table III. As already mentioned in section 3.3.2 frequencies which are utilised for various radio services such as aeronautical and maritime navigation systems and broadcasting services may have to be totally barred or restricted in certain geographic areas for power line carrier use.

This is illustrated by the gaps in the frequency ranges shown for certain countries. It should be noted that in the case of the other countries shown in Table III, the effective available band for P.L.C. may be similarly reduced, the figures given representing only the lower and upper limit of the available frequency band. The footnotes of Table III indicate the special conditions applicable in each country.

4. POWER LINE CARRIER SYSTEM PLANNING

4.1 Modal propagation

The propagation of signals in a multi-conductor line, such as a power line, can be analysed on the basis of the propagation of several independent modes. Each mode is characterised by its associated attenuation and velocity of propagation. Each mode comprises a unique voltage (or current) pattern related to

unique des tensions (ou des courants) se rapportant à chacun des conducteurs (y compris la terre) et qui reste inchangée sur toute la longueur de la ligne. La théorie de la propagation par modes a été appliquée avec succès aux problèmes de courants porteurs sur lignes d'énergie et un certain nombre d'articles ont été publiés [3 à 11 inclus].

4.1.1 Effet des pylones, transpositions, etc...

Aux fréquences les plus élevées, la distance entre pylônes peut approcher de la demi-longueur d'onde et ceci peut affecter les distributions modales, comme le font également les discontinuités et transpositions de la ligne.

4.1.2 Rayonnement

Un facteur limitatif dans l'affectation de fréquences aux liaisons C.P.L. peut se trouver dans la possibilité de perturbations réciproques avec d'autres systèmes. Ces autres systèmes comprennent les autres liaisons par courants porteurs sur lignes d'énergie, les émetteurs et récepteurs radio (y compris les balises maritimes et aéronautiques) et les systèmes de télécommunications à courants porteurs exploités sur fils aériens ou sur câbles [17].

Des explications détaillées sur les méthodes de calcul des champs résultant de l'emploi d'un système à courants porteurs sur lignes d'énergie sont données en référence [18, 19, 20, 21].

De même, les informations données dans ces articles permettent à l'utilisateur d'un système C.P.L. de déduire les tensions perturbatrices apparaissant sur le récepteur d'une telle liaison et dues au fait que la ligne est exposée à un champ perturbateur connu provenant d'une source extérieure déterminée [18].

Il a été montré que les champs magnétiques et électriques créés par les courants porteurs sur lignes d'énergie sont considérablement plus faibles pour une disposition horizontale des conducteurs que pour une disposition verticale. A une distance d'un kilomètre la réduction correspondante du champ magnétique s'élève à 20 dB environ. Pour une ligne à conducteurs disposés verticalement, le champ rayonné provient des extrémités de la ligne et est dirigé vers le haut. Pour une ligne à conducteurs disposés horizontalement, le champ rayonné est négligeable. Une autre source de rayonnement, pour les lignes à disposition verticale, est la différence de longueur entre les connexions de descente [19].

En dépit de ce qui précède, il faut souligner que, sauf cas particuliers, les perturbations causées et subies par les installations C.P.L. ont été peu fréquentes.

Le Tableau IV résume les principales caractéristiques du rayonnement.

4.2 Bruit sur les liaisons C.P.L.

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

- 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 couronne, aigrettes),
- des pointes brèves et des rafales de grande amplitude, engendrées par le fonctionnement des sectionneurs et des disjoncteurs, par la foudre, les amorçages et autres causes du même genre [15, 22, 23].

Le bruit dû à l'effet couronne n'est pas "blanc" puisque son amplitude tend à décroître lorsque la fréquence augmente. De plus, étant donné que ce bruit est engendré de façon dominante pendant les demi-périodes positives de la tension industrielle, il est constitué essentiellement de rafales de trains d'impulsions brèves ayant une fréquence fondamentale de répétition de 150 Hz (pour un réseau triphasé à 50 Hz).

Des niveaux globaux de la puissance de bruit, tels que mesurés couramment en valeur efficace au point de couplage à la ligne à haute tension sont donnés dans le Tableau V [24].

Les coups de foudre créent des impulsions de bruit dont la cadence de répétition est variable, le courant de choc atteignant en 1 μ s environ une valeur élevée et décroissant graduellement. La raideur de la variation du courant dans un coup de foudre fait qu'il se comporte comme une source de grande énergie, ayant un spectre de fréquence étendu, qui peut donc agir sur le matériel à courants porteurs.

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 + 10 dBm en valeur efficace, mesurés entre phase et terre dans une largeur de bande de 4 kHz*, et persistent pendant 5 à 20 ms. Il y a des pointes de 1 à 3 kV si l'on mesure à large bande. Lorsque l'arc est établi le bruit retombe à un niveau de - 10

all the individual conductors (and the earth) which remains unchanged along the length of the line. The mode propagation theory has been successfully applied to power line carrier problems and a number of papers have been published [3 – 11 inclusive].

4.1.1 The effect of towers, transpositions, etc.

At higher frequencies the distances between towers may approach a half wavelength and this can affect the modal distributions as also can line discontinuities and transpositions.

4.1.2 Radiation

A limiting factor in frequency assignment for P.L.C. systems can be the possibility of interference to and from other systems. Such other systems include other power line carriers, radio transmitters and receivers (including maritime and aeronautical beacons) and carrier communication systems operated over open wire lines and over cables [17].

Detailed explanations of the methods of calculating the fields resulting from the use of a power line carrier system are given in the literature [18, 19, 20, 21].

Similarly the information given in these papers allows the user of a P.L.C. system to derive the interfering voltage appearing at a power line carrier receiver due to the exposure of the line to some known interfering field from a known external source [18].

It has been shown that both the induction and radiation fields due to the power line carrier are considerably smaller for horizontally disposed conductors than for vertically disposed conductors. At 1 km distance the reduction of the induction field due to this cause amounts to about 20 dB. In a line having vertically disposed conductors the radiation field emanates from the line ends and is directed upwards. In a horizontally disposed line the radiation field is negligible. A further source of radiation in a vertically disposed line is caused by the excess length of one drowndropper over the other [19].

In spite of the above it must be emphasised that except in isolated cases interference both caused by and caused to P.L.C. installations has been infrequent.

Table IV summarises the main features of the radiation.

4.2 P.L.C. noise

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

- sustained white-noise-like voltages (random noise) caused by irregular electric discharges across insulators and conductors (corona, brush discharge) and
- short spikes and bursts of high amplitude, caused by operation of isolators and breakers, lightning, flashovers, and the like [15, 22, 23].

Corona noise is not "white" since its amplitude tends to decrease as frequency increases. In addition, since the noise is generated prevalingly during positive half-cycles of the main voltage, it is essentially constituted of bursts of trains of short pulses having a fundamental burst repetition frequency of 150 Hz (for a three-phase 50 Hz system).

Typical overall r.m.s. noise power levels, referred to the coupling point on the h.v. line itself, are shown in Table V [24].

Lightning strokes induce noise pulses with varying pulse repetition frequency, the stroke current rising in about 1 μ s to a high value and decaying gradually. The steep rates of change of current in the lightning stroke comprise a high energy source having a broad frequency spectrum which may thus influence carrier equipment.

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 ionised. 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 + 10 dBm r.m.s. measured phase-to-earth in a 4 kHz bandwidth and have a duration of about 5 to 20 ms. There are peaks of 1 to 3 kV, measured in a broadband. When the arc has become established the noise falls down to a lower level of about – 10 to – 5 dBm r.m.s.

à - 5 dBm efficaces. L'arc, et le niveau de bruit restent inchangés jusqu'à ce que le disjoncteur fonctionne, après un temps qui dépend des temps d'action des protections concernées. Au moment où le disjoncteur élimine le défaut, cependant, le niveau de bruit augmente de nouveau. Pendant le processus de coupure, l'action du disjoncteur produit des oscillations, principalement sous la forme de transitoires de rétablissement de tension ou de courant qui engendrent du bruit sur la ligne concernée et sur celles qui lui sont adjacentes. La durée de telles oscillations est de l'ordre de 1 à 3 ms et leur fréquence est située dans une gamme qui atteint au moins 50 kHz. L'amplitude du bruit produit de cette façon est couramment de l'ordre de - 10 à 0 dBm efficaces dans une largeur de bande de 4 kHz* et dure environ 10 ms avec des pointes atteignant 1 kV ou plus, mesurées à large bande.

Tableau III : Gammes des fréquences utilisées dans différents pays pour les systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie (1973)
(Les chiffres entre parenthèses renvoient aux notes)

Pays	Gamme des fréquences porteuses (20) - kHz -	Bande de base des fréquences porteuses (20)	Bande nominale aux fréquences porteuses (20)
Allemagne (Féd.)	15-450 470-490	2,5 5,0 (24)	2,5 15,0 (24)
Australie	150-200 (1) 405-450 460-480	4,0	4,0
Autriche	10-450 470-490	2,5	2,5 (2)
Belgique	50-300	4,0	4,0
Canada	30-200 415-490 (3)	4,0	4,0
Finlande	40-400 (4)	2,5 (5)	2,5 4,0 (5)
France	40-150 250-300 (6)	1,5 (7) 4,0 (8)	1,5 (7) 4,0 (8)
Grande Bretagne (9)	70-489 (10) 511-1 000 (11)	2,0 4,0 (12)	2,0 4,0 (13)
Irlande	40-500 (14)	4,0	4,0
Italie	50-392	4,0	4,0
Japon	10-450	2,5 (21) 3,0 (22)	2,5 (21) 18,0 (23)
Norvège	44-156 (15)	4,0	4,0
Portugal	30-440	4,0	4,0 (16)
Roumanie	40-124 130-142 164-250 (17) (18)	2,5 4,0	2,0
Suède	36-456	4,0	4,0
Suisse	40-160 284-300 416-452 472-492	4,0	4,0 (19)
Tchécoslovaquie	40-500	2,5 4,0 5,0	2,5 5 7,5 etc
U.R.S.S.	36-600 (27)	4,0	4,0 (26)
U.S.A.	30-300	4,0	4,0

Notes du Tableau III

(1) La bande 0-150 kHz est disponible pour les C.P.L. en fonctionnement continu pourvu qu'ils ne perturbent pas les circuits des P.T.T. australiens.

(2) Ou un multiple entier pour les systèmes C.P.L. à plusieurs voies.

(3) Certaines fréquences de la gamme 415-490 kHz sont interdites dans certaines zones géographiques (Voir 3.3.3.).

(4) Les valeurs indiquées ne sont pas approuvées officiellement par les P.T.T. finlandais car il n'existe pas de règlement précis en ce qui concerne les C.P.L.

The arc, and the noise level, remain unaffected until the circuit-breaker operates at a later time depending on the protection times involved. As the breakers clear the fault current, however, the noise level again increases. During the process of interruption, the action of the circuit-breaker produces oscillations, mainly in the form of recovery transients of voltage and current which generate noise on the circuit considered and on those adjacent to it. The duration of such oscillations are of the order of 1-3 ms and the frequencies lie in the range up to at least 50 kHz. The magnitude of noise produced in this manner is typically of the order of - 10 to 0 dBm r.m.s. in a 4 kHz bandwidth and has a duration of about 10 ms, with peaks of up to 1 kV or more, measured in a broadband.

Table III : Frequency ranges in use in various countries for power line carrier 1973
(Numbers in brackets refer to footnotes).

Country	Carrier frequency range, kHz (20)	Carrier frequency band kHz	
		Basic (20)	Nominal (20)
Austria	10-450 470-490	2.5	2.5 (2)
Australia	150-200 (1) 405-450 460-480	4.0	4.0
Belgium	50-300	4.0	4.0
Canada	30-200 415-490 (3)	4.0	4.0
Czechoslovakia	40-500	2.5, 4.0, 5.0	2.5, 5, 7.5 etc.
Finland	40-400 (4)	2.5 (5)	2.5, 4.0 (5)
France	40-150 250-300 (6)	1.5 (7), 4.0 (8)	1.5 (7), 4.0 (8)
Germany (F.E.D.)	15-450 470-490	2.5, 5.0 (24)	2.5, 15.0 (24)
Gt. Britain (9)	70-489 (10) 511-1000 (11)	2.0, 4.0 (12)	2.0, 4.0 (13)
Ireland	40-500 (14)	4.0	4.0
Italy	50-392	4.0	4.0
Japan	10-450	2.5 (21), 3.0 (22)	2.5 (21), 18.0 (23)
Norway	44-156 (15)	4.0	4.0
Portugal	30-440	4.0	4.0 (16)
Rumania	40-124 130-142 164-250 (17) (18)	2.5, 4.0	2.0
Sweden	36-456	4.0	4.0
Switzerland	40-160 284-300 416-452 472-492	4.0	4.0 (19)
U.S.A.	30-300	4.0	4.0
U.S.S.R.	36-600 (27)	4.0	4.0 (26)

Footnotes to Table III.

(1) Band 0-150 kHz is available for continuous P.L.C. provided that there is no interference with any Australian Post Office Circuit.

(2) Or an integral multiple thereof for multi-channel P.L.C. systems.

(3) Certain frequencies in the range 415-490 kHz are prohibited in certain geographical areas see Section 3.3.3.

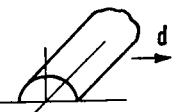
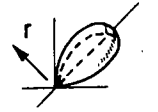
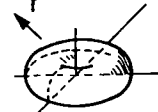
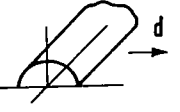

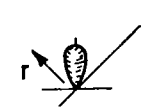
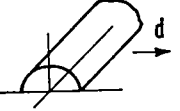

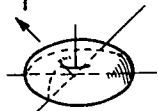
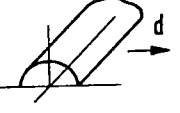
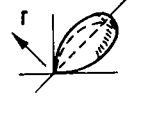
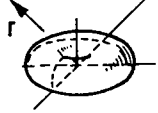
(4) The figures are not officially approved by PTT, Finland because there are no exact regulations regarding P.L.C.

(5) La Subdivision élémentaire de la gamme des fréquences porteuses est de 2,5 kHz. Elle est utilisée de diverses façons, par exemple :

- a) Une subdivision, 2,5 kHz pour une voie C.P.L. unilatérale de largeur de bande 2,5 kHz.
 - b) Deux subdivisions, 2 x 2,5 kHz (parole plus signaux) ou 5 kHz (deux canaux phonie de 300 - 2700 Hz).
 - c) Eventuellement trois subdivisions, 3 x 2,5 kHz pour une voie C.P.L. unilatérale de largeur de bande 7,5 kHz (dans des cas exceptionnels seulement).
 - d) Comme en (c) mais quatre subdivisions, 4 x 2,5 kHz (dans des cas exceptionnels seulement).
- (6) Bandes 40 – 150 kHz et 250 – 300 kHz autorisées. Bande 300 – 350 kHz autorisée sous certaines conditions. Des canaux peuvent être attribués dans la bande 150 – 250 kHz.
- (7) Pour la téléprotection.
- (8) Pour la téléphonie avec signaux supraphoniques.
- (9) Les chiffres indiqués comprennent les réseaux du C.E.G.B. et du North of Scotland Hydro-Electric Board.
- (10) L'emploi d'équipements en fonctionnement continu est restreint ou interdit dans certaines bandes de cette gamme.
- (11) Disponible seulement pour les équipements normalement au repos.
- (12) La largeur de bande de 2 kHz est utilisée pour des fonctions de téléprotection à simple déplacement de fréquence, la largeur de bande de 4 kHz étant utilisée pour :
- a) Le double déplacement de fréquence (2 x 2 kHz) pour des fonctions d'interdéclenchement.
 - b) Le système de protection à comparaison de phase, la même largeur de bande contenant les deux sens de transmission, et
 - c) du matériel à bande latérale unique pour la parole et la téléprotection.
- (13) Les largeurs de bande indiquées sont celles qui sont nécessaires pour le fonctionnement satisfaisant de l'équipement en l'absence de signaux perturbateurs provenant d'autres équipements. Lorsque deux équipements ou plus peuvent se perturber mutuellement, il faut normalement conserver un écartement minimal entre bandes adjacentes d'environ 4 % de la moyenne des fréquences centrales des deux bandes concernées.
- (14) Voir 3.3.3. du mémorandum.
- (15) Des fréquences extérieures à la bande 44-156 kHz sont utilisées dans des cas spéciaux.
- (16) Il existe quelques systèmes de bande nominale 8 kHz et 12 kHz
- (17) La bande de fréquences 125-130 kHz est utilisée pour d'autres usages tandis que la bande 124 – 164 kHz est utilisée pour la radiodiffusion.
- (18) Il y a quelques restrictions au choix des fréquences dans la bande 40-150 kHz lorsqu'il peut se produire un couplage avec des lignes de télécommunications en fils aériens, c'est-à-dire, avec :
- P : longueur du parallélisme, en mètres
- D : distance entre lignes parallèles, en mètres
- a) Si $P < 2000$ m, ou s'il n'existe qu'un croisement, il n'y a pas de restrictions.
 - b) Si $P < 10000$ m et $D > 200$ m, l'emploi des fréquences constituant les fréquences pilotes des systèmes à courants porteurs des P.T.T. est interdit pour les C.P.L.
 - c) Si $P > 10000$ m et $D > 200$ m, ou $P < 2000$ m et $D < 200$ m, l'attribution de fréquences aux C.P.L. dépend du résultat de mesures psophométriques de la tension induite par la liaison C.P.L. Celle-ci ne doit pas dépasser 1,77 mV au-dessus du niveau de bruit psophométrique de la ligne de télécommunications.
- (19) Il existe également quelques liaisons de largeur de bande nominale de 8 kHz.
- (20) Ces termes sont définis par la C.E.I., voir Chapitre 9 du mémorandum, référence [28].
- (21) Une voie.
- (22) Voie multiple.
- (23) Six voies.
- (24) La largeur de bande de 4 kHz est encore utilisée.
- (25) Aux paragraphes 3.2.6. et 4.5. les termes notés comme suit se réfèrent à :
- | | | |
|--|---|---|
| *Bande de base des fréquences porteuses | } | Telles que définies à la référence [28] du Chapitre 9 |
| + Bande des fréquences de parole effectivement transmise | | |
- (26) 3 x 4 kHz, 12 x 4 kHz.
- (27) Dans l'avenir, la gamme des fréquences porteuses s'étendrait jusqu'à 1 MHz.

- (5) The elementary subdivision of the carrier frequency range is 2.5 kHz. This is used in different ways, e.g.
- a) One subdivision, 2.5 kHz, for transmission of a one-way P.L.C. channel with a bandwidth of 2.5 kHz.
 - b) Two subdivisions, 2×2.5 kHz, for transmission of a one-way P.L.C. channel with a bandwidth of 4 kHz (speech plus) or 5 kHz (two voice channels 300-2700 Hz).
 - c) Possibly three subdivisions, 3×2.5 kHz, for transmission of a one-way P.L.C. channel with a bandwidth of 7.5 kHz in exceptional cases only).
 - d) As in (c) but four subdivisions, 4×2.5 kHz (in exceptional cases only).
- (6) Authorised 40-150 kHz and 250-300 kHz, authorised subject to certain conditions 300-350 kHz. Some channels may be assigned in the range 150-250 kHz.
- (7) For teleprotection.
- (8) For "telephony plus signals".
- (9) The given figures include both C.E.G.B. and North of Scotland Hydro-Electric Board systems.
- (10) There are restrictions or prohibitions on the use of certain frequency bands within this range by continuous-carrier equipments.
- (11) Available for normally-quiescent carrier equipment only.
- (12) The 2 kHz bandwidth is used for single-frequency-shift protection-signalling functions, the 4 kHz bandwidth being used for : –
- a) Double-frequency-shift (2×2 kHz) protection signalling for intertripping functions.
 - b) Phase-comparison system of protection, the same bandwidth accommodating both directions of transmission and,
 - c) Single-side-band equipment for speech and protection signalling functions.
- (13) The given bandwidths are those necessary for the satisfactory operation of the equipment in the absence of interfering signals from other equipment. Where two or more equipments may cause such mutual interference it is normally necessary to maintain a minimum separation between adjacent bands of approximately 4 % of the mean of the mid-band frequencies of the two bands concerned.
- (14) See Memorandum Section 3.3.3.
- (15) Frequencies outside the band 44-156 kHz are used in special cases.
- (16) A few systems exist with nominal frequency band 8 kHz and 12 kHz.
- (17) The 124-130 kHz frequency band is used for other purposes while the 124-164 kHz band is used for broadcasting.
- (18) There are some restrictions of frequency selection in the band 40-150 kHz where coupling to open wire telecommunication lines may occur where
- $$P = \text{route length of parallelism in metres}$$
- $$D = \text{distance between the parallel lines in metres}$$
- a) If $P < 2000$ m, or one crossing only exists, there is no restriction
 - b) If $P < 10,000$ m and $D > 200$ m, the use of the frequencies which constitute the pilot frequencies of the P.T.T. carrier systems are prohibited for P.L.C. systems.
 - c) If $P > 10,000$ m and $D > 200$ m, or $P < 2000$ m and $D < 200$ m, then the frequency allocation for P.L.C. systems depends on the results of measurements of psophometric voltage component induced from the P.L.C. link. This shall not exceed 1.77 mV over the psophometric noise level of the telecommunications channel.
- (19) A few links having a nominal carrier frequency band of 8 kHz also exist.
- (20) These terms are defined by I.E.C., see Memorandum Section 9 reference [28].
- (21) One channel.
- (22) Multiple channel.
- (23) Six channel.
- (24) 4 kHz bandwidth is still in use.
- (25) In Sections 3.2.6 – 4.5 the terms marked as follows refer to : –
- | | | |
|---|---|---|
| * Basic carrier frequency band | } | As defined in Reference [28] of Section 9 |
| + Effectively transmitted speech frequency band | | |
- (26) 3×4 kHz, 12×4 kHz.
- (27) In future the carrier frequency range would be extended to 1 MHz.

Tableau IV : Courants porteurs sur lignes d'énergie. — Résumé des diagrammes de champ.

Configuration de la ligne	Type de couplage	CHAMP INDUIT			CHAMP RAYONNE					
		Forme	Décroit en	Action d'un émetteur éloigné	Forme	Décroit en	Action d'un émetteur éloigné	Forme	Décroit en	Action d'un émetteur éloigné
Horizontale	Phase-terre		$1/d^2$	0		$1/r$	La même que sur une antenne (2)		$1/r$	La même que sur une antenne (2)
	Inter-phase (5)		$1/d^3$ (6)	0		$1/r$	La même que sur une antenne (1)		$1/r$	Faible
Verticale	Phase-terre		$1/d^2$	0		$1/r$	La même que sur une antenne (1)		$1/r$	La même que sur une antenne (2) (4)
	Inter-phase		$1/d^2$	0		$1/r$	La même que sur une antenne (1)		$1/r$	La même que sur une antenne (2) (3)

(1) Faible pour émetteurs terrestres éloignés. Importante pour émetteurs aéroportés convenablement situés.

(2) Dominante pour émetteurs terrestres éloignés

(3) Due à l'inégalité de longueur des descentes

(4) Due au déséquilibre des descentes

(5) Les transmissions entre conducteurs d'un faisceau ont des propriétés identiques mais les champs sont radicalement réduits en raison du faible écartement des conducteurs

(6) Initialement en $1/d^3$ puis en $1/d^2$ à plus grande distance pour les C.P.L. classiques. En $1/d^3$ à toutes distances pour les transmissions entre conducteurs d'un faisceau

Note — Lorsqu'on considère ici les perturbations causées aux C.P.L. par des émetteurs éloignés, les informations données dans ce tableau s'appliquent également au cas opposé des perturbations causées par les C.P.L. à des récepteurs éloignés.

Table IV : Power Line Carrier Summary of field patterns

Line Configuration	Coupling Scheme	INDUCTION FIELD			RADIATION FIELD					
		Shape	Falls off as	Effect from distant radio transmitter	Shape	Falls off as	Effect from distant radio transmitter			
Horizontal	Phase-ground		$1/d^2$	0		$1/r$	As per antenna (2)		$1/r$	As per antenna (2)
	Inter-phase (5)		$1/d^3$ (6)	0		$1/r$	As per antenna (1)		$1/r$	Small
Vertical	Phase-ground		$1/d^2$	0		$1/r$	As per antenna (1)		$1/r$	As per antenna (2) (4)
	Inter-phase		$1/d^2$	0		$1/r$	As per antenna (1)		$1/r$	As per antenna (2) (3)

(1) Small for distant ground transmitting stations. Large for airborne transmitters in appropriate location.

(2) Dominant effect from distant ground transmitting station

(3) Due to inequality of length of downdroppers

(4) Due to unbalanced downdroppers

(5) Intrabundle communication has identical properties but the fields are drastically reduced because of the close conductor spacing

(6) Initially at $1/d^3$ but a greater distance becomes $1/d^2$ for conventional P.L.C. at all distances for intrabundle communication.

Note – Where interference with P.L.C. from distant transmitters is considered the information given in this table applies equally to the opposite case of interference caused by P.L.C. to distant receivers.

Tableau V : Niveaux courants de puissance du bruit dû à l'effet couronne mesurés en valeur efficace et rapportés à une largeur de bande de 4 kHz pour différentes tensions de réseaux.

Tension du réseau, kV	Niveau de puissance du bruit
110	- 30 dBm
220	- 20 dBm
400	- 10 dBm

Note – Ces chiffres sont valables pour des conditions atmosphériques défavorables et s'appliquent aux couplages phase-terre et interphase. Des variations importantes peuvent apparaître en fonction de la construction et de l'âge de la ligne, de l'altitude etc...

Le fonctionnement des disjoncteurs pour enclencher ou déclencher une ligne produit un bruit d'amplitude variant de - 10 à + 25 dBm efficaces dans une bande de 4 kHz et qui dure environ 10 ms, avec des pointes pouvant dépasser 5 kV, mesurées à large bande à la sortie à basse impédance du groupe de couplage.

Des manoeuvres normales impliquant le fonctionnement de sectionneurs lents peuvent se produire fréquemment. Les perturbations ainsi engendrées sont caractérisées par une grande amplitude et une durée relativement longue, par exemple de 0,5 à 8 secondes 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 peuvent être couplées à de nombreux appareils du poste et aux 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 composantes à haute fréquence se situent couramment dans une bande pouvant atteindre plusieurs MHz. De tels courants constituent une source de bruit de haute énergie et à large bande qui entraîne un mauvais rapport signal/bruit dans les récepteurs à bande étroite. La dégradation du rapport signal/bruit dépend beaucoup de la nature du couplage et des caractéristiques de l'appareil.

Lorsqu'un sectionneur directement associé, dans le même poste, à un dispositif de couplage C.P.L. fonctionne, il produit des rafales de bruit récurrentes à la tête du câble coaxial atteignant + 20 dBm efficaces dans une bande de 4 kHz, avec des pointes de courte durée de 5 kV et plus mesurées à large bande.

Les rafales de bruit dues aux sectionneurs sont composées d'impulsions. Leur fréquence de répétition dépend principalement de la géométrie du réseau, du type et du comportement du sectionneur et dans une faible mesure seulement du type du dispositif de couplage à courants porteurs. La fréquence de répétition des impulsions peut varier entre 30 et 100 kHz. Le bruit dû aux sectionneurs n'est pas un bruit blanc mais après limitation de la bande, il se rapproche d'une distribution gaussienne ce qui fait qu'autour d'une fréquence centrale située dans la bande des C.P.L., la limitation de la bande du bruit d'un sectionneur à une largeur de 2 kHz le rend gaussien [22].

4.3 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 C.P.L. utilisés en d'autres endroits du réseau du fait de fuites ou de couplages se produisant au-delà des circuits-bouchons. Les exploitants d'un réseau d'énergie doivent tenir compte de ce fait lorsqu'ils font le projet d'une liaison C.P.L. et proposent 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 hectométriques (MF) et kilométriques (LF) peut être captée et agir sur les récepteurs à fréquence porteuse. Lorsqu'une installation risque d'être exposée à un champ électromagnétique défini, les informations données en [18] et dans le Tableau IV permettront d'en déduire les tensions perturbatrices.

4.4 Méthodes de modulation

A l'origine, les liaisons C.P.L. utilisaient la modulation d'amplitude à deux bandes latérales. C'était une solution économique qui offrait l'avantage de ne pas introduire de glissement sur la fréquence restituée, ce qui est essentiel pour les systèmes de télémessure par variation de fréquence.

Lors de l'application à des réseaux d'énergie de tension plus élevée, sur lesquels le bruit dû à l'effet couronne est plus élevé, le phénomène indésirable de la "modulation par effet couronne" [25] a conduit à adopter la modulation à bande latérale unique, avec porteuse réduite ou supprimée, qui est d'application universelle dans les systèmes modernes. Un autre avantage réside dans une meilleure utilisation du spectre

Table V : Typical RMS corona noise power levels,
referred to a 4 kHz bandwidth for
various system voltages

System voltage kV	Noise power level
110	- 30 dBm
220	- 20 dBm
400	- 10 dBm

Note : These figures are valid for adverse atmospheric conditions, and apply both for phase-earth and interphase coupling. Considerable variations are possible due to construction and age of the line, altitude etc.

The operations of circuit-breakers for energising and de-energising lines produce noise of magnitude variable from - 10 up to + 25 dBm r.m.s. in a 4 kHz bandwidth and having a duration of about 10 ms and with peaks of up to 5 kV or more, measured in a broadband at the low impedance output of the coupling device.

Normal switching operations involving slow speed isolators ("disconnects") may occur frequently. The interference so generated is characterised by high amplitude and relatively long duration, i.e. 0.5 to 8 seconds, depending on the isolator design. The weak ionisation 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 station. These oscillations can be coupled to many equipments in the station and to h.v. lines in various ways, for example, by direct coupling, by induction, by leakage or by the common earthing system.

The high frequency components lie typically in the range up to several MHz. Such currents constitute a high energy broadband noise source which gives rise to poor signal-to-noise ratios in narrow band receivers. The degradation in signal-to-noise ratio depends largely on the form of coupling and the characteristics of the equipment.

When an isolator directly associated and in the same station as a power line carrier coupler is operated, it produces recurrent noise bursts at the co-axial cable termination of up to + 20 dBm r.m.s. in a 4 kHz bandwidth, with short duration peaks of up to 5 kV or more, measured in a broadband.

Bursts of isolator noise consist of pulses. Their repetition frequency is mostly dependent on the geometrical layout of the network, the type and behaviour of the isolator, and only to some extent on the type of carrier coupling equipment. The p.r.f. can vary between 30 and 100 kHz. Isolator noise is non-white but after band limiting it approaches a gaussian distribution such that for a centre frequency lying in the P.L.C. band the restricting of the isolator noise to a bandwidth of 2 kHz renders it gaussian [22].

4.4 Interference from external sources

Power line carrier systems can suffer from interference, particularly from other power line carriers operating elsewhere on the power network, by virtue of leakage and coupling of energy past the line traps. This effect has to be taken into account by the power system operators in planning any P.L.C. 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. When an installation is subjected to exposure to a stated electromagnetic field the information given in [18] and Table IV will allow the interfering voltages to be derived.

4.4 Modulation methods

In the early days of P.L.C. double sideband amplitude modulation was used. It was economical, and offered the advantage of giving zero error in the reconstituted frequency, which is essential in frequency variation telemetering systems.

With the application to higher voltage power systems having higher corona noise the detrimental phenomenon of carrier "corona modulation" [25] led to a change to single sideband modulation with reduced or suppressed carrier, which, in modern systems, is universally applied. A further advantage lies in the improved frequency spectrum utilisation. The following paragraphs therefore deal with s.s.b. AM systems only.

de fréquence. Les paragraphes qui suivent traitent donc uniquement des systèmes à modulation d'amplitude à bande latérale unique.

4.5 Largeur de bande et espacement des canaux

La plupart des systèmes C.P.L. que l'on trouve actuellement sont conçus pour un espacement des canaux de 4 kHz dans la gamme des fréquences porteuses, bien que dans certains pays le choix se soit porté sur un espacement des canaux de 2,5 kHz.

Le Tableau suivant donne la liste des bandes de base effectivement transmises.

Tableau VI : Bande des fréquences effectivement transmises

Bande de base des fréquences porteuses	Utilisation	Bande des fréquences effectivement transmises
4 kHz	parole ou signaux	300 Hz – 2,4 kHz
	parole et signaux	300 Hz – 2,4 kHz plus 2,7 kHz – 3,42 kHz ou au-delà 300 Hz – 2,0 kHz plus 2,34 kHz – 3,42 kHz ou au-delà.
2,5 kHz	parole ou signaux	300 Hz – 2,4 kHz.

Il convient de noter que les équipements C.P.L. spéciaux, en particulier ceux destinés uniquement à la téléprotection, peuvent utiliser des bandes de fréquences porteuses plus étroites que celles citées ci-dessus.

4.6 Puissance d'émission

En se référant au projet de Recommandation de la C.E.I. sur les équipements à courants porteurs à bande latérale unique, on peut énoncer les définitions suivantes :

a) *La puissance nominale à fréquence porteuse* d'un équipement C.P.L. est la puissance en crête de modulation, compatible avec les prescriptions sur les émissions parasites, disponible à la sortie à fréquence porteuse sur une résistance de charge égale à l'impédance nominale, pour laquelle l'équipement a été conçu.

b) *La puissance moyenne à fréquence porteuse* d'un équipement C.P.L. est la moyenne de la puissance évaluée pendant un temps suffisamment long devant la période de la plus basse fréquence de modulation et pendant lequel la puissance moyenne est maximale.

Le rapport entre la puissance en crête de modulation et la puissance moyenne dépend de tous les facteurs qui influent sur le signal multiplex (niveau de la parole, présence ou absence d'un compresseur, [26] nombre, type et niveau des signaux etc...). A titre d'information, on peut considérer que ce rapport se situe entre 8,5 et 10 dB dans les conditions de service normales. Quand le canal de parole est attaqué par le signal d'essai, ce rapport peut être réduit à une valeur de 3,5 à 5 dB.

Pour limiter le risque de perturbation d'autres systèmes de télécommunications par les systèmes C.P.L. classiques, à couplage phase-terre ou interphase, certaines autorités nationales des télécommunications limitent la puissance maximale injectée en ligne. Une valeur courante du niveau au point de raccordement du dispositif de couplage à la ligne à haute tension est de + 40 dBm. Des niveaux plus élevés peuvent être utilisés pour des systèmes normalement au repos, et d'autres considérations s'appliquent également au couplage entre conducteurs d'un faisceau. Il faut noter que le niveau cité ci-dessus se rapporte à la puissance moyenne à fréquence porteuse telle que définie plus haut en (b). La puissance émise à la sortie de l'équipement est supérieure à cette valeur d'une quantité égale aux pertes dans le dispositif de couplage. (habituellement 5 dB).

Dans différents pays, des règlements particuliers s'appliquent aux systèmes de protection normalement au repos, ou aux systèmes C.P.L. à renforcement momentané des canaux de protection étant donné que ce fonctionnement ne se produit que quelques fois par an, pendant un temps de l'ordre de la seconde à chaque fois.

Si l'on considère comme caractéristique l'exemple d'un équipement C.P.L. à bande latérale unique, utilisant 4 kHz et de 10 W de puissance moyenne à fréquence porteuse (+ 40 dBm), équipé d'un compresseur et d'utilisation mixte, parole plus signaux, on peut le faire fonctionner dans les conditions suivantes :

4.5 System bandwidth and channel spacing

The majority of available P.L.C. systems are arranged for a 4 kHz channel spacing in the carrier frequency band, although in some countries an alternative channel spacing of 2.5 kHz has been adopted.

The following table lists the limits of the effectively transmitted baseband.

Table VI : Effectively transmitted frequency band.

Basic carrier frequency band	Use	Effectively transmitted frequency band
4 kHz	Speech or signals	300 Hz – 3.4 kHz
	Speech plus signals	300 Hz – 2.4 kHz plus 2.7 kHz – 3.42 kHz or more
		300 Hz – 2.0 kHz plus 2.34 kHz – 3.42 kHz or more
2.5 kHz	Speech or signals	300 Hz – 2.4 kHz

It should be noted that special P.L.C. equipment, especially of the protection-only type, may use narrower carrier frequency bands than the figures quoted above.

4.6 Transmit power

Taking into account the IEC draft recommendations on s.s.b. terminals, the following definitions can be given : –

a) The nominal carrier frequency power of a P.L.C. equipment is the peak envelope power compatible with the requirements for spurious emissions, available at the carrier frequency output in a resistive load equal to the nominal load impedance for which the equipment has been designed.

b) The mean carrier frequency power of a P.L.C. equipment is the power averaged over a time sufficiently long when compared with the cycle time of the lowest modulation frequency and during which the average power assumes a maximum value.

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 [26], number, type and level of signals etc.). For information purposes the ratio may be assumed to lie between 8.5 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 to 5 dB.

In order to minimise the danger of interference from conventional phase-earth and interphase P.L.C. systems to other communications systems certain national Telecommunications Authorities limit the maximum power injected. A typical level on the high voltage line side of the coupling device is + 40 dBm. Higher levels may be used for normally quiescent systems and different considerations also apply if intra-bundle coupling is used. It is to be noted that the above quoted level refers to the mean carrier frequency power as defined in (b) above. The transmit power at the equipment output will be higher than this by the amount of the loss of the coupling system (typically 5 dB).

Special regulations apply in different countries for normally quiescent P.L.C. protection systems, or for P.L.C. systems with temporary boosting of protection channels as this operation occurs only a few times per annum, the "on" time being of the order of seconds per operation.

Considering as a typical example the case of 4 kHz s.s.b. P.L.C. equipment of 10 W (+ 40 dBm) carrier frequency power, fitted with a compandor, and operated in the speech-plus-signals mode the following operating conditions might apply :

Bande de fréquences effectivement transmise : 300 ... 3720 Hz.

Un canal de parole 300 ... 2400 Hz	à + 30 dBr de niveau à fréquence porteuse		
Un canal de numérotation	à + 18 dBm	"	"
Porteuse réduite	à + 22 dBm	"	"
9 canaux de signaux 50 Bd, chacun	à + 18 dBm	"	"

La simulation du signal de parole par un bruit blanc d'un niveau absolu de -10 dBmO donnera un niveau de la puissance moyenne à fréquence porteuse de

+ 25 dBm (en tenant compte d'un accroissement de 5 dB de la puissance à fréquence porteuse dû à l'action du compresseur) [26],

et un facteur de crête $K_p = 10$ dB.

Le signal multiplex produit par les neuf canaux de signaux plus le canal de numérotation donnera une puissance moyenne à fréquence porteuse de :

et un facteur de crête de 10 dB. + 28 dBm

Ainsi le niveau moyen du signal multiplex sera la somme de :

+ 25, + 22 et + 28 dBm et vaudra environ + 30 dBm avec un facteur de crête de 10 dB.

Si, à titre d'exemple différent, le même équipement était utilisé uniquement pour la transmission de la parole, le réglage suivant des niveaux pourrait être utilisé :

Un canal de parole 300 ... 3400 Hz	à + 33 dBr (*) (avec compresseur)
	+ 38 dBr (*) (sans compresseur)
Un canal de numérotation	à + 18 dBm
Porteuse réduite	à + 22 dBm

qui donnerait alors une puissance moyenne à fréquence porteuse du signal multiplex égale encore une fois à + 30 dBm.

Il faut encore noter que la puissance moyenne à fréquence porteuse mesurée au point de couplage à la ligne à haute tension aura habituellement un niveau inférieur de 5 dB au chiffre cité en raison des pertes dans le dispositif de couplage.

4.7 Valeur visée pour le bruit de fond et niveau reçu

On considère à titre d'exemple le cas d'un système ne transmettant que la parole, avec une bande de fréquences effectivement transmise de 300 ... 3400 Hz, soit une largeur de bande de 3100 Hz.

En utilisant les chiffres les plus défavorables pour le bruit dû à l'effet couronne cités dans le tableau V et avec une valeur visée pour le bruit de fond de -25 dBmOp (chiffre qui peut être considéré comme réaliste pour une utilisation pratique), le niveau minimal de réception nécessaire, dans les conditions de signal d'essai, est indiqué au Tableau VII.

Tableau VII : Niveau de bruit et niveau de réception minimal nécessaire pour un système ne transmettant que la parole, rapportés au point de couplage.

Tension du réseau	Niveau de bruit		Niveau de réception minimal nécessaire p_r (d)	
	efficace (a)	Pondéré (b)	Sans compresseur – expandeur	avec compresseur – expandeur (c)
110 kV	- 30 dBm	- 32 dBmp	- 7 dBm	- 17 dBm
220 kV	- 20 dBm	- 22 dBmp	+ 3 dBm	- 7 dBm
400 kV	- 10 dBm	- 12 dBmp	+ 13 dBm	+ 3 dBm

(a) Niveau de puissance mesuré en valeur efficace, ramené à une bande de 4 kHz, voir Tableau V.

(b) Niveau pondéré, ramené à une bande de 3,1 kHz et affecté d'un facteur psychométrique de 1 dB.

(c) Le compresseur – expandeur est supposé apporter une amélioration subjective de 10 dB [26].

(d) Dans les conditions de signal d'essai.

(*) La différence de 5 dB tient compte, encore une fois, de l'action du compresseur.

Dans le cas sans compresseur-expandeur, les chiffres du Tableau VII correspondent à un rapport signal/bruit de 25 dB.

Lorsqu'un compresseur-expandeur est utilisé, en l'absence de parole l'expandeur diminue de moitié le niveau du bruit apparaissant à la sortie du récepteur. Ceci signifie que pendant les pauses dans la conversation l'utilisateur est subjectivement conscient d'une amélioration dans la qualité du circuit. Cet effet de masque, combiné avec l'effet de relèvement du niveau de parole émis dû à l'action du compresseur, réhausse subjectivement le rapport signal/bruit d'une quantité globale d'environ 10 dB. C'est la réduction qui est appliquée au niveau de réception minimal lorsqu'on utilise un compresseur-expandeur.

4.8 Affaiblissement admissible en ligne

En partant des chiffres du paragraphe 4.7, l'affaiblissement admissible en ligne A_m (cas le plus défavorable) est donné par :

avec

$$A_m = p_t - A_c - p_r \text{ min}$$

p_t = niveau du signal émis par l'équipement

A_c = pertes dans le dispositif de couplage

$p_r \text{ min}$ = niveau de réception minimal (voir Tableau VII).

Sur un réseau à 400 kV, avec transmission de la parole seulement et un niveau relatif de parole de 38 dBr, sans compresseur-expandeur, un affaiblissement en ligne de :

$A_m = + 38 - 5 - 13 = 20 \text{ dB}$ serait admissible si l'on s'accorde 5 dB pour les pertes dans le dispositif de couplage, alors que dans un cas avec compresseur-expandeur, le niveau relatif de parole serait de + 33 dBr et

$$A_m = + 33 - 5 - 3 = 25 \text{ dB.}$$

Il faut noter que la marge nécessaire pour tenir compte du givrage de la ligne et de mauvaises conditions atmosphériques est déjà incluse dans le cas le plus défavorable. Ainsi, sur les 10 dB d'amélioration globale, on ne peut bénéficier que de la moitié seulement (soit 5 dB) comme latitude supplémentaire sur l'affaiblissement admissible en ligne.

Des considérations semblables s'appliquent au cas des canaux de signaux. Le Tableau VIII qui s'applique à un fonctionnement mixte parole plus signaux, comme indiqué au paragraphe 4.6, permet un calcul facile en supposant de façon générale qu'un niveau de réception p_r de x dBm est nécessaire pour le canal de parole et qu'un niveau de bruit efficace de y dBm (rapporté à une bande de 4 kHz) est présent.

Tableau VIII

Type de l'information	Niveau de réception (dBm)	Largeur de bande	Bruit dans la bande	S/B (dB)
Parole	x (d)	~ 2,1 kHz (300 Hz . . 2,4 kHz)	(y - 3,6) dBmp (a)	(x - y) + 3,6
Canal de numérotation	x - 12	~ 80 Hz	(y - 17) (b)	(x - y) + 5
Canal de signaux	x - 12	~ 80 Hz	(y - 17) dBm (b)	(x - y) + 5
Porteuse	x - 8	~ 200 Hz	(y - 13) dBm (c)	(x - y) + 5

(a) Le chiffre de 3,6 dB résulte d'une réduction de 2,8 dB due à la réduction de largeur de bande de 4 kHz à 2,1 kHz, plus 0,8 dB supplémentaires dus à la pondération psophométrique.

(b) Le chiffre de 17 dB résulte de la réduction de largeur de bande de 4 kHz à 80 Hz

(c) Le chiffre de 13 dB résulte de la réduction de largeur de bande de 4 kHz à 200 Hz.

(d) Dans les conditions de signal d'essai.

In the "no compandor" case the figures of Table VII correspond to a signal-to-noise ratio of 25 dB.

With a compandor in use, and in the absence of speech then the expander will halve the noise level appearing at the receiver output. This means that during pauses in the speech the user is subjectively aware of an improvement in the circuit performance. This masking factor, combined with the effect of the compressor action in raising the transmitted speech level, gives an overall subjective enhancement equivalent to about 10 dB improvement in signal-to-noise ratio. This is the reduction applied to the minimum receive level when a compandor is used.

4.8 Permissible line loss

Departing from the figures of Section 4.7 the permissible (worst-case) line loss A_m is given by

$$A_m = p_t - A_c - p_r \text{ min}$$

with

p_t = denoting the transmit signal level at the equipment

A_c = the coupling loss

p_r = min the minimum receive level as per Table VII.

On a 400 kV system used for speech-only transmission with 38 dBr relative speech level, less compandor, a permissible line loss of :

$A_m + 38 - 5 - 13 = 20$ dB would apply, if 5 dB is allowed for the coupling loss whereas, in the case with a compandor the relative speech level would be + 33 dBr and

$$A_m = + 33 - 5 - 3 = 25 \text{ dB}$$

It should be noted that any margin required for line icing and bad atmospheric conditions is already included in this worst case value. Thus of the 10 dB overall improvement only about half (namely 5 dB) can be realised as an advantage in allowing a higher line loss to be tolerated.

Similar considerations apply to the case of signalling channels. Table VIII which applies to a speech-plus-signal operation as stated in Section 4.6, allows an easy computation on the general assumption that a receive level p_r of x dBm is required for the speech channel, and an RMS noise level of y dBm (referred to a 4 kHz band) is present.

Table VIII

Type of information	Receive Level (dBm)	Bandwidth	Inband Noise	S/N (dB)
Speech	x (d)	$\sim 2,1$ kHz (300 Hz . . 2,4 kHz)	$(y - 3,6)$ dBmp (a)	$(x - y) + 3,6$
Telephone Signalling Channel	$x - 12$	~ 80 Hz	$(y - 17)$ (b)	$(x - y) + 5$
Signalling Channel	$x - 12$	~ 80 Hz	$(y - 17)$ dBm (b)	$(x - y) + 5$
Carrier	$x - 8$	~ 200 Hz	$(y - 13)$ dBm (c)	$(x - y) + 5$

(a) The 3.6 dB figure results from a 2.8 dB reduction due to the reduction in bandwidth from 4 kHz to 2.1 kHz, plus a further 0.8 dB due to psophometric weighting.

(b) The 17 dB figure results from a reduction in bandwidth from 4 kHz to 80 Hz.

(c) The 13 dB figure results from a reduction in bandwidth from 4 kHz to 200 Hz.

(d) Under test tone conditions.

D'après le Tableau VIII ci-dessus, on peut voir que la puissance nominale à fréquence porteuse de l'émetteur a été partagée de façon à attribuer à peu près le même rapport signal/bruit à tous les types d'information.

4.9 Possibilité de perturbations mutuelles

En principe, un système C.P.L. peut être une cause de perturbations pour d'autres systèmes (qui jouissent fréquemment d'un certain degré de protection) et de la même façon un système C.P.L. peut subir des perturbations provenant de causes extérieures. Dans ce dernier cas, les systèmes C.P.L. ne se sont vus et ne se voient actuellement accorder que peu ou pas de protection.

La mesure dans laquelle un système C.P.L. quelconque peut être impliqué dans des problèmes de perturbations dépend de la méthode de couplage adoptée. Il est évident que les systèmes où apparaît un mode mettant en jeu la terre y sont le plus sensibles, c'est-à-dire ceux utilisant le couplage phase-terre ou un fil de terre isolé unique. Les systèmes à courants porteurs entre phases utilisant des conducteurs disposés verticalement sont moins sensibles. Ceux où la disposition des conducteurs est horizontale le sont encore moins. Le système le moins sensible de tous est celui à couplage entre conducteurs d'un faisceau dont le principe est maintenant largement connu [13, 18].

Dans ce qui suit, on examine en détail les principaux systèmes susceptibles d'être perturbés, par les systèmes C.P.L. ou de les perturber.

4.9.1 Systèmes radio

Les systèmes radio qui pourraient être impliqués dans des perturbations mutuelles comprennent les systèmes maritimes et aéronautiques les services de radiodiffusion et certains systèmes aux fréquences kilométriques et hectométriques. Une catégorie importante est celle des aides à la navigation telles que les systèmes de guidage, Omega, Decca, Consol etc. Certains services doivent bénéficier d'une protection vis-à-vis de signaux très faibles, en particulier lorsque des vies humaines sont en jeu. Dans de nombreux cas, les marges de protection nécessaires sont fixées par le CCIR dans le but de protéger les services radio. Aucune protection comparable n'est actuellement accordée aux installations C.P.L. bien que là aussi des vies humaines puissent être mises en danger.

Pour illustrer la protection accordée dans un certain pays aux systèmes radio, on exige qu'à la limite de la zone d'utilisation normale des balises aéronautiques (en général de 30 à 160 km) le signal reçu de la balise soit à un niveau supérieur à + 37 dB par rapport à $1 \mu\text{V/m}$ et qu'il y ait une marge de 15 dB entre le signal de la balise et tout signal perturbateur à la même fréquence. Dans un autre pays, le champ ne doit pas dépasser 54 dB par rapport à $1 \mu\text{V/m}$ à un point situé à $\lambda/2\pi$ de la ligne d'énergie.

Il y a dans la littérature un bon nombre d'articles sur les champs mesurés venant des installations C.P.L. et une sélection de ces articles est donnée dans la bibliographie chapitre 10. De telles mesures sont souvent difficiles en raison de l'influence locale des fils voisins, des lignes de chemin de fer, des canalisations souterraines, des câbles, de l'eau etc.

4.9.2 Systèmes à courants porteurs sur fils aériens

Dans un grand nombre de pays à faible densité de population les autorités des télécommunications utilisent des systèmes à courants porteurs à 12 voies au plus sur des paires équilibrées en fils nus montées sur poteaux.

De tels systèmes ont récemment été normalisés par le CCITT (Livre Blanc. Vol III).

Les niveaux normalisés pour un canal sont : émission + 17 dBr, réception - 17 dBr.

Ils utilisent des répéteurs à régulation de gain par le pilote et il est recommandé de prévoir, pour une section entre répéteurs, un affaiblissement de :

43 dB max (en conditions normales)

64 dB max (si la ligne est sujette au givre).

Ces systèmes fonctionnent sur deux fils avec des fréquences différentes, le sens A - B utilisant le spectre en-dessous de 100 kHz et le sens B - A le spectre au-dessus de 100 kHz.

En raison d'une part des fréquences qui leur sont allouées, et d'autre part des niveaux relativement élevés émis et reçus et des caractéristiques de la ligne, les systèmes à courants porteurs sur fils aériens sont en grande partie exempts de perturbations provenant des services de télécommunications par radio et des installations C.P.L., et vice versa. (Commission Mixte Internationale, Mars 1959).

From the above Table VIII it can be seen that the subdivision of the nominal carrier frequency power of the transmitter has been effected in such a way as to give about equal signal-to-noise ratios for all types of information.

4.9 Possible mutual interference

In principle a P.L.C. system can give rise to interference with other systems (which are frequently offered some degree of protection) and similarly a P.L.C. system may suffer from interference from external causes. In the latter case the P.L.C. systems have in the past been and are at present afforded little or no protection.

The degree to which any P.L.C. system is likely to be involved in interference depends on the coupling method adopted. Clearly those in which the earth mode is found are the most susceptible i.e. those using phase-earth coupling or a single insulated earth wire. Interphase carrier systems using vertically disposed conductors are less susceptible. Those with horizontally disposed conductors have a yet lower effect. The least susceptible is the intrabundle system currently proposed. [13, 18].

In this section the main possible systems which could either be interfered with or could interfere with P.L.C. are examined in more detail.

4.9.1 Radio systems

Radio systems which could be involved in mutual interference include maritime and aeronautical systems, broadcasting services and certain L.F. and M.F. systems. An important category is that of navigational aids such as direction finding, Omega, Decca, Consol etc. In some services protection has to be afforded to very weak signals particularly where safety of life is involved. In many cases the necessary protection margins are laid down by C.C.I.R. with a view to protecting radio services. No comparable protection is at present afforded to P.L.C. installations even though safety of life may also be involved.

As an example of the protection afforded to radio systems in one country it is required that at the limit of the normal operating range of aeronautical beacons (typically 30 – 160 km), the received beacon signal be at a level of not less than + 37 dB relative to 1 μ V/m and that there be a margin of 15 dB between the beacon signal and any interfering signal on the same frequency. In another country the field must not exceed 54 dB relative to 1 μ V/m at a point $\lambda/2 \pi$ from the transmission line.

The literature contains a number of papers on the measured field from P.L.C. installations and a selection of papers are listed in the bibliography Section 10. Such measurements are often difficult because of local influences such as neighbouring wires, railway lines, underground pipes, cables, water etc.

4.9.2 Open wire carrier systems

In a number of sparsely populated countries Telecommunication Authorities use carrier systems of up to 12 channels on pole-supported balanced open wire lines.

Such systems have lately been standardised by CCITT (White Book Vol. III).

Standard channel levels are : transmit + 17 dBr, receive – 17 dBr.

Pilot-regulated repeaters are used and a typical repeater section is recommended to be planned for an attenuation of :

43 dB max (under normal conditions)

64 dB max (when icing of the line can be present)

These systems are operated in the two-wire frequency diversity mode, the A-B way using the spectrum below 100 kHz, the B-A way above 100 kHz.

Owing to the frequency assignment on one hand, the relatively high transmit and receive levels and the line properties on the other hand, open wire carrier systems are largely free from interference from radio communication services and P.L.C. installations and vice versa. (Commission Mixte Internationale, March 1959).

4.9.3 Systèmes C.P.L.

L'exploitation d'un système C.P.L. exige que certaines valeurs minimales de rapport signal/bruit soient obtenues.

Le niveau du signal est déterminé par la puissance émise et la valeur de l'affaiblissement total (ligne plus couplage) alors que la valeur du bruit a deux origines complètement différentes, à savoir les sources intrinsèques au réseau (effet couronne, foudre, manoeuvres sur le réseau électrique, telles que les coupures) et les sources extérieures (signaux perturbateurs à la même fréquence provenant de C.P.L. ou d'autres systèmes tels que des émetteurs radio).

On dispose, pour faire le projet d'une liaison C.P.L., de toutes les données nécessaires [27, 28, 29, 30], excepté celles concernant les perturbations possibles qui, bien qu'elles puissent être prédéterminées théoriquement, demandent souvent une confirmation expérimentale.

Pour une ligne d'énergie donnée, les valeurs maximales du bruit dû à des causes électriques liées au réseau sont connues (voir paragraphes 4.2 et 4.3). Une recherche plus approfondie sur les réseaux voisins et sur les liaisons C.P.L. existantes indique s'il y a ou non un risque de perturbation à la fréquence choisie pour la liaison, en ayant présentes à l'esprit les considérations suivantes suggérées par l'expérience.

Avec des équipements à faible puissance, on ne constate pas normalement de perturbations appréciables si la même fréquence est réutilisée pour deux liaisons C.P.L. établies sur des lignes appartenant au même réseau mais séparées par au moins deux tronçons de ligne avec postes intermédiaires. Si les deux liaisons C.P.L. utilisant la même fréquence sont installées sur des lignes de niveaux de tension différents, il n'y aura sans doute pas de perturbation mutuelle même si ces lignes aboutissent dans le même poste, en raison de l'affaiblissement apporté par les transformateurs de puissance, à moins qu'il n'y ait entre les lignes un parallélisme appréciable.

Une fois que la fréquence du canal à utiliser pour la liaison projetée a été déterminée d'une façon telle qu'une source extérieure, quelle qu'elle soit, à la même fréquence, ne produise pas un bruit supérieur à celui dû à l'effet couronne, il est facile de calculer la puissance à émettre en tenant compte de l'affaiblissement global estimé dans les plus mauvaises conditions météorologiques (par exemple le cas de glace sur les conducteurs) et en incorporant les pertes dues aux dispositifs de couplage aux deux extrémités.

La protection d'une liaison C.P.L. vis-à-vis des autres voies C.P.L. utilisant la même fréquence serait facilitée par l'existence d'un recueil national des liaisons C.P.L., tenu à jour par un organisme national chargé d'allouer les fréquences aux différents utilisateurs.

Un tel organisme, qui doit être familiarisé avec les réseaux d'énergie et la conception des systèmes C.P.L., doit être en liaison avec les autorités en ce qui concerne les autres usages de ces fréquences. Bien plus, la nécessité de préserver le spectre disponible rend indispensable d'affecter les mêmes fréquences dans des lieux suffisamment distants géographiquement pour minimiser les perturbations mutuelles tout en faisant le meilleur usage des canaux.

L'affaiblissement des signaux perturbateurs dépend de nombreux facteurs tels que la présence et les propriétés des circuits-bouchons sur certaines ou toutes les phases, la capacité présentée par les postes électriques intermédiaires ou d'extrémité, la présence de transformateurs de puissance, l'affaiblissement des lignes, la ou les phases attaquées sur les liaisons perturbées et perturbatrices, et d'autres encore, facteurs à partir desquels la possibilité de réutiliser les fréquences peut être déterminée. Des valeurs précises, se rapportant à des équipements de puissance différente, ou à des valeurs différentes du rapport signal/bruit, peuvent exiger des mesures directes car la distribution modale et le couplage à d'autres conducteurs, lignes téléphoniques, clôtures, voies de chemin de fer, etc., ne peuvent pas être définis quantitativement dans tous les cas.

Dans quelques rares cas, il faut garder à l'esprit la possibilité de résonances série indésirables entre circuits-bouchons et dispositifs de couplage à une fréquence située dans la bande transmise ; l'effet de blocage est alors réduit à cette fréquence et le rapport signal/bruit dégradé.

5. CONCLUSIONS

L'expérience acquise au cours de nombreuses années a montré qu'il n'y avait eu que peu de cas de perturbations causées par les systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie. En sens inverse, peu de cas ont été relevés où les systèmes à courants porteurs ont été perturbés par des sources extérieures. Il n'en reste pas moins que de tels cas, qui auraient pu avoir de sérieuses conséquences, auraient souvent pu être évités dès le stade de l'étude par une liaison adéquate entre les organismes intéressés.

4.9.3 P.L.C. Systems

Operation of a P.L.C. system requires that certain minimum values of signal-to-noise ratio be achieved.

The signal level is determined by transmitter power and by total attenuation values (line plus coupling system), while the noise value is due to two completely different origins, namely those intrinsic to the system (i.e. corona noise, lightning, operations on the electrical network such as switching) and external reasons (i.e. interference signals at the same frequencies coming from P.L.C. and other systems such as radio transmitters).

The designer of a P.L.C. link has available all the data necessary [27, 28, 29, 30] except the value of any interference which, though it may be predicted theoretically, often needs an experimental confirmation.

Given a certain power line, the maximum noise values due to power system electrical reasons are known (see Clauses 4.2 and 4.3). A deeper investigation into nearby electrical networks and on existing P.L.C. links indicates whether or not there will be a risk of interference at the frequency selected for the link, bearing in mind the following considerations suggested by experience.

With low power terminals there is normally no experienced appreciable interference if the same frequency is re-used for two different P.L.C. systems working on lines forming a common system in which the two are separated by at least two line lengths with intermediate stations. If the two P.L.C. systems having the same frequency are used on power lines working at different voltages, there will probably be no mutual interference, even if these lines end at the same station, owing to the attenuation of the power transformers, unless appreciable parallelism of the lines exists.

Once the channel frequency to use for the designed link has been determined, such that any external source at the same frequency produces a noise at a level lower than that of the corona noise, the transmitter power is easily determined, taking into account the total attenuation calculated in the worst weather conditions (for instance ice on conductors) and allowing for the coupling system losses at the two terminals.

The protection of a P.L.C. link from other P.L.C. channels using the same frequency would be facilitated by the existence of a national register of P.L.C. links maintained by a National Board which assigns frequencies to the various users.

Such an organisation, which has to be familiar with the power networks and P.L.C. system design, has to liaise with the authorities in respect of other uses of the frequencies. Furthermore, the necessity to conserve the available spectrum necessitates the assignment of the same frequencies in geographic locations sufficiently separated to minimise mutual interferences whilst making the best use of the channels.

Interference signal attenuation depends on many causes such as the presence and properties of line traps on some or all line phases, capacity of intermediate and terminal electrical stations, presence of power transformers, attenuation of lines, coupling phase or phases of disturbed and interfering systems and so on, from which the criteria on the repeatability of frequencies is determined. Precise values, relating to terminals of different powers or to different values of signal-to-noise ratio, may necessitate direct measurements since the mode distribution and couplings to other wires, telephone lines, fences, railway lines, etc. may not be quantitatively defined in all cases.

In some rare cases it is necessary to bear in mind the possibility of undesired series resonances in line traps and coupling equipment at a frequency within the transmission band ; at that frequency then the blocking effect of the trap is reduced and the signal-to-noise ratio worsens.

5. CONCLUSIONS

Experience over many years has shown that there have only been a few cases of interference caused by power line carrier systems. Correspondingly there have been few cases of interference with power line carrier systems from external sources. Nevertheless such cases, which could have serious consequences, could often have been prevented at the planning stages by adequate liaison between the organisations concerned.

Il est clair que les problèmes de perturbations tels que ceux qui se présentent entre liaisons C.P.L. peuvent être aisément résolus si la répartition détaillée des fréquences à l'intérieur d'un pays est organisée par un organisme unique représentant les entreprises électriques, et si cet organisme national assure la liaison avec les autorités nationales chargées de l'attribution des fréquences de façon à tenir compte d'autres perturbations que pourraient éventuellement provoquer ou subir les systèmes C.P.L.

Le choix de la fréquence exacte ne peut être fait que par les autorités représentant les entreprises électriques. C'est le principe qui est maintenant retenu dans de nombreux pays où le choix final de la fréquence d'une liaison C.P.L. est effectué par ces autorités à l'intérieur d'une gamme officiellement reconnue, puis est entériné par l'administration nationale.

Il faut noter que les allocations de fréquences aux émetteurs radio sont consignées dans la Nomenclature Internationale des fréquences, mais qu'aucune disposition n'existe qui accorde une protection comparable aux fréquences allouées aux systèmes à courants porteurs sur lignes d'énergie.

Dans certains pays, de sévères restrictions ont été apportées à la mise à disposition de fréquences pour les courants porteurs sur lignes d'énergie. Il n'y a aucune raison de croire que dans d'autres pays où ces restrictions sont beaucoup moins graves, il y ait eu un accroissement quelconque des problèmes de perturbations mutuelles.

Il faut noter encore qu'alors que les systèmes radio jouissent souvent de dispositions prises en vue de les protéger contre les perturbations, les utilisateurs de courants porteurs sur lignes d'énergie ne se voient accorder, dans la plupart des pays, aucune protection. Cela signifie qu'un système en exploitation peut ne plus être autorisé à fonctionner à la suite de la mise en service d'un nouveau système radio (même situé dans un pays voisin). Même si les entreprises électriques font un usage croissant d'autres systèmes (tels que les câbles ou la radio), les courants porteurs sur lignes d'énergie continueront à être largement utilisés et il faudra trouver des moyens pour améliorer l'utilisation du spectre.

6. RECOMMANDATIONS

Il est d'un intérêt évident, aussi bien pour les ingénieurs des réseaux d'énergie que pour les autorités chargées de l'attribution des fréquences dans tous les pays, qu'ils collaborent à l'utilisation la meilleure possible du spectre de fréquences disponible et s'efforcent d'éviter les perturbations ainsi que les frais que nécessiterait leur élimination.

Pour oeuvrer dans ce sens, il est demandé à la CIGRE et aux Comités Nationaux de la CIGRE d'apporter toute leur attention au présent mémorandum et de le mettre à la disposition des organismes internationaux concernés ainsi que de chaque Administration nationale, à titre d'information.

En outre, eu égard à l'importance croissante dans tous les pays des télécommunications indispensables aux réseaux d'énergie, il est demandé au C.C.I.R. d'apporter son concours en encourageant la collaboration entre les administrations et les autorités représentant les entreprises électriques de façon à parvenir à l'utilisation la plus complète du spectre ainsi qu'à la protection de tous les utilisateurs contre les perturbations.

7. COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

R.E. MARTIN	(GB)	Chef de file
J.K. CARROTHERS	(IRL)	
R.J. RITTER	(CH)	
M. AIMINIO	(I)	
C. STARACE	(I)	

8. REMERCIEMENTS

Les membres du Groupe de Travail remercient pour leur assistance ceux de leurs collègues qui ont collaboré à la rédaction de ce rapport ainsi que leurs organismes respectifs pour l'aide qu'ils ont fournie dans les domaines du secrétariat, des réunions et de la publication de ce mémorandum.

M. F.D. Pullen (GB) est remercié ici pour son travail de préparation du Tableau IV, qui est publié avec l'aimable autorisation du Central Electricity Generating Board.

La figure A 1 est publiée avec l'autorisation de l'Electricity Council (UK).

Clearly interference problems as between one P.L.C. system and another are more easily prevented if the detailed frequency planning within a country is organised by a single body representing the power authorities and if this national board effects the liaison with the national frequency assignment authority to take account of other potential interferences both caused by and caused to the P.L.C. systems.

The precise choice of frequency can be made only by the power authorities. This has become the accepted principle in many countries where the final choice of frequency for a P.L.C. system is determined by the power authorities within an officially recognised band and is then agreed by the national administration.

It should be noted that assignments of frequencies for radio transmitters are registered in the Master International Frequency Register, but no arrangements exist whereby similar protection is afforded to frequencies assigned to power line carrier systems.

In certain countries severe restrictions have been placed on the availability of frequencies for power line carrier. There is no reason to believe that in other countries where much less onerous restrictions apply, there has been any increase in problems of mutual interference.

It should be noted that while radio systems often enjoy measures applied in the interests of affording them protection from interference the users of power line carrier are in most countries afforded no protection. This means that a working system can be put out of commission by a newly established radio system (even one in an adjoining country). Even with the growing use of other systems (such as line and radio) by power authorities power line carrier will continue to be widely used, and means will need to be found to improve the spectrum utilisation.

6. RECOMMENDATIONS

It is clearly in the interests both of power engineers and the frequency assignment authorities in every country to collaborate in making the best use of the available spectrum, in avoiding interference and consequent expense in correcting it.

To assist in this context it is requested that CIGRE and the National Committees of CIGRE should note this memorandum and should make it available to relevant International Organisations and to each National Administration for information.

Furthermore, having regard to the increasing importance of the vital power system telecommunications in all countries the C.C.I.R. are asked to assist by encouraging collaboration between the administrations and the power authorities so as to achieve the maximum spectrum utilisation coupled with protection of all users from interference.

7. MEMBERSHIP OF WORKING GROUP

R.E. MARTIN	(GB)	Convener
J.K. CARROTHERS	(IRL)	
R.J. RITTER	(CH)	
M. AIMINIO	(I)	
C. STARACE	(I)	

8. ACKNOWLEDGEMENTS

The members of the Working Group acknowledge the assistance of their colleagues who contributed to the report and that of their respective organisations for providing the secretarial, meeting and printing facilities.

The work of Mr. F.D. Pullen (GB) in preparing Table IV, which is published by permission of the Central Electricity Generating Board, is gratefully acknowledged.

Figure A.1 is published by permission of the Electricity Council (UK).

9. BIBLIOGRAPHIE – REFERENCES

- [1] Sir Harold Hartley C.H., F.R.S. – The future of World Energy (*New Scientist*, 13 November 1969).
- [2] Sir Harold Hartley C.H., F.R.S. – The World's Needs for Fuel and Power – Past, Present and Future. *Advancement of Science*, September 1965).
- [3] Perz M.C. – “Natural Modes of PLC on horizontal three-phase lines”. (*IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, 83, July 1964, pp. 679-686).
- [4] Perz M.C. – “A method of analysis of PLC problems on three-phase lines”. (*IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, 83, July 1964, pp. 586-692).
- [5] Wedepohl L.M. – “Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems”. (*Proc. I.E.E.*, 110, No. 12, December 1963).
- [6] Wedepohl L.M. – “Electrical characteristics of polyphase transmission systems with special reference to boundary value calculations at power line carrier frequencies”. (*Proc. I.E.E.*, 112, No. 11, November 1965).
- [7] Wedepohl L.M. and Wasley R.G. – “Wave propagation in multiconductor overhead lines”. (*Proc. I.E.E.*, 113, No. 4, April 1966).
- [8] Wedepohl L.M. and Wasley R.G. – “Wave propagation in polyphase transmission systems”. (*Proc. I.E.E.*, 112, No. 11, November 1965).
- [9] Wedepohl L.M. and Wasley R.G. – “Some problems in power line carrier transmission on overhead line and overhead line/cable circuits”. (*I.E.E. Colloquium Digest* No. 1968/19, pp. 374-381).
- [10] Pélissier R. – “Propagation des Ondes électromagnétique guidées par une ligne multi-filaire”. (*Revue Générale de l'Electricité* – avril, mai – April May 1969 t. 78 No. 4, 5, R.G.E. 16 Rue Franklin, Paris 16e).
- [11] Ushirozawa M. – “HF propagation on non-transposed power lines”. (*IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, 84, November 1964, pp. 1137-1142).
- [12] Combs E.E. – “Power Line Carrier Coupling”. (*Trans. IEEE* Vol. PAS-87, No. 2, February 1968).
- [13] Hasler E.F., Martin R.E., Pullen, F.D. – “Communication Systems using Bundle Conductor Overhead Power Lines”, paper T74418-0 presented at IEEE PES Summer meeting & Energy Resources Conference, Anaheim, California, July 1974. (To be published in *IEEE PES Trans.*).
- [14] Swoboda G. – “Telecontrol”. Van Nostrand Reinhold 1971 en anglais (*in English*). Die Planung von Fernwirkanlagen, Oldenbourg 1961 en allemand (*in German*).
- [15] “Teleprotection”. – CIGRE, 112 Boulevard Haussmann, Paris (édition bilingue français-anglais. Bilingual version English/French).
- [16] A recommended procedure for the selection of power-line-carrier frequencies. (U.K. Electricity Council. *A.C.E. Report* No. 30 (1972).
- [17] (a) CCITT Circular No. 1488 of 31 January 1967.
(b) Questions 18/V, 19/V, 20/V and 23/V. CCITT Blue Book, Vol. IX, pp. 25.
- [18] Pullen F.D. – “The Calculated Electromagnetic Fields surrounding Carrier-bearing Power-Line Conductors”, paper T74 419-8 presented at IEEE PES Summer Meeting & Conference, Anaheim, California, July 1974. (To be published in *IEEE PES Trans.*).
- [19] Hooper J. – “Radiation from the Drowdroppers of a Power-Line Carrier Installation” paper C74 371-1 presented at IEEE PES Summer meeting & Energy Resources Conference, Anaheim, California, July 1974.
- [20] Gronlie L. – “High frequency transmission along power lines”. *ETT* Vol. 96 pp. 201-208 15 June 1956. Traduction en anglais par CE Trans. n° 1280. *English translation CE Trans. No. 1280*.
- [21] Von Kurt Kolbaek Jensen. – “Felder von Traegerfrequenzverbindungen ueber Hochspannungsleitungen”. (*ETZ – A*. Bd 93 (1972) H4 p. 197-201).
- [22] Pullen F.D., Terry B.J. – “The effects of isolator noise on power line carrier intertripping equipment”. (*IEE Colloquium publication* 1968/19) “Some present-day protection problems”.
- [23] Sakic, B. – “Spectral properties of isolator noise”. (*Brown Boveri Review*, No. 4/5 1968).
- [24] Aiminio, M., Galli, F. – “Telefonia, telecontrollo e teleprotezione su collegamenti a onde convogliate aventi per supporto elettrodotti ad alta ed altissima tensione”. (*Elettrotecnica* No. 5 Vol. LV1 1969).

- [25] Podszcek H-K. – “Carrier Communication over Power Lines”. (*Springer Verlag*, Berlin 1972).
- [26] Ritter, R., Starace, C. – L’emploi des compresseurs-extenseurs dans les réseaux de téléphonie. “*The use of compandors in telephone networks*”. (CIGRE paper 35-02, 1972).
- [27] I.E.C. – Recommendations for Line Traps. (*I.E.C. Publication 353*).
- [28] I.E.C. – Recommended values for characteristic input and output quantities of single sideband power line carrier terminals. (*I.E.C. to be published*).
- [29] I.E.C. – Coupling devices for Power Line Carrier systems. (*Publication 481. 1st edition, 1974*).
- [30] I.E.C. – Application guide for power line carrier systems. (*I.E.C. to be published*).

10. BIBLIOGRAPHIE – REFERENCES

Une bibliographie des rapports choisis est donnée dans ce chapitre qui est divisé en deux parties, la partie 10.1 concernant la propagation d’ondes et la théorie du couplage et la partie 10.2 concernant les systèmes à courants porteurs, les mesures de bruit et de rayonnement et l’attribution de fréquences.

A bibliography of selected papers is given in this section which is divided into two parts, 10.1 dealing with wave propagation and coupling theory and 10.2 dealing with P.L.C. systems, noise and radiation measurement and with frequency assignment.

10.1 Propagation d’ondes, théorie du couplage

10.1 Wave Propagation, Coupling Theory

- ADAMS C.E. – “Wave propagation along unbalanced high-voltage transmission lines”. (*AIEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, 78, Aug. 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. – Experimentation en service des transmissions électriques à fréquences porteuses au moyen de câbles de terre. “Operational Experience with Carrier Frequency Transmissions via Insulated Earth Wires”. (CIGRE Paper No. 320 1962).
- BARTHOLD L.O. – “RF propagation on polyphase lines”. (*IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, 83, July 1964, pp. 665-671).
- BARTHOLD, L.O. et CLADE, J. – La propagation des hautes fréquences sur les lignes aériennes. – *HF propagation on overhead lines* (CIGRE 1964 Report No. 420).
- BOZOKI, B., & JONES, D.E. – “PLC Coupling Investigations on a 500 kV Line”. (*IEEE Trans. on Power Apparatus & 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 J.*, New York, 6, 1927, pp. 495-545).
- CHEVALLIER A. – “Propagation of high-frequency waves along a symmetrical three-phase line”. (*Revue Générale d’Electricité*, Paris, 54, Jan. 1945, pp. 25-42).
- CLADE J. et GARY, C. – Les perturbations radioélectriques engendrées par les lignes de transport d’énergie. (*Rev. gen. Elect.*, mai 1966, t. 75, pp. 659-681).
- COMBS E.E. – “Power line carrier coupling”. (*Trans. IEEE Vol. PAS – 87 No. 2, Feb. 1968*). High frequency communication channels on the shield wires of 750 kV lines. (*Elekt. Stanstii* (USSR), 1966, No. 11, 64-8 (Nov.), en russe *In Russian*).
- FARMER G.E. – Tennessee Valley Authority “Use of Intermediate Ground Wires on a Transmission Line for Communication Channels”.
- FLEISCHHAUER W. PODSZECK H-K., and VOGL W. – Siemens and Halske A.G., 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. I.E.E.*, 111, No. 12, Dec. 1964, pp. 2051-2059).
- HEDMAN D.E. – “Propagation on Overhead Transmission Lines”. Part I Theory of Modal Analysis IEEE 31 TP 65-101. Part II Earth Conduction Effects and Practical Results IEEE 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*, 1st Quarter 1967 pp. 21-25).
- JONES D.E. – “Parallel wire coupler 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 TP 65-183).
- 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”. (CIGRE No. 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 (CIGRE 1970 Paper 35-03). Recherches sur des caractéristiques en haute fréquence de lignes à 750 kV à fils de terres isolés.
- PELLISSIER R. – La propagation des ondes transitoires et périodiques le long des lignes électriques. (*Rev. gen. Elect.* septembre, octobre, novembre 1950, pages 379-399, 437-454, 502-512).
- PERZ M.C. – Method of evaluating corona noise generation from measurements on short test line (*I.E.E.E. Trans. power Apparatus Syst.* december 1963, No. 69, pp. 833-844).
- PERZ M.C. – “Natural Modes of PLC on horizontal three-phase lines”. (*IEEE Trans. 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 Trans. on Power Apparatus and Systems*, 83, July 1964, pp. 686-692).
- POLLACZEK F. tradvir par POMEY, J.B. – Sur le champ produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif. (*Rev. gen. Elect.* 30 Mai 1931 T. 29 pp. 851-867).
- SCHELKUNOFF S.A., “Electromagnetic Waves” (Van Nostrand, New York 1943)
- 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 Trans. on Power Apparatus and Systems*, 84, Nov. 1964, pp. 1137-1142).
- WEDEPOHL L.M. – “Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems” (*Proc. I.E.E.*, 110, No. 12, Dec. 1963).
- WEDEPOHL L.M. and WASLEY R.G. – Wave propagation in polyphase transmission systems. Resonance effects due to discretely bonded earth wires. (*Proc. I.E.E.* 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. I.E.E.* 112, No. 11 Nov. 1965).
- WEDEPOHL L.M. and WASLEY R.G. – “Wave propagation in multiconductor overhead lines”. (*Proc. I.E.E.*, 113, No. 4 April 1966).
- WEDEPOHL L.M. and WASLEY R.G. – “Wave propagation in polyphase transmission systems”. (*Proc. I.E.E.*, 112, No. 11, Nov. 1965).

WEDEPOHL L.M. and WASLEY R.G. – “Some problems in power line carrier transmission on overhead line and overhead line/cable circuits”. (*I.E.E. Colloquium Digest* No. 1968/19, pp. 374-381).

10.2 Systèmes à courants porteurs, Mesures de bruit et de rayonnement, Attribution de fréquences.

10.2 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. A.E.I. 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. XL11 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 communications systems and information on the determination of line characteristics”. (Report presented on behalf of Committee No. 14 : Teletransmission). – “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 No. 14 : Télétransmissions). (CIGRE No. 319, 1962).

BOZOKI B. – “Improved tuned coupler for power line carrier”. (*Ontario Hydro Research Quarterly*, Vol. 20, No. 1, 1st quarter 1968, pp. 20).

BOZOKI B. – “Effects of noise on transfer trip carrier relaying”. (*AIEE Paper* 31 pp. 67-28, 1967).

BRAINE M.R. – “The siting of earths for telecommunication installations”. (*Point to Point Telecommunications*, Vol. 13, No. 1, Jan. 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, pp. 399-404, Dec. 1965).

BARTSCH R. and BERGMANN G. – “Transmission of line protection signals over power line carrier circuits”. (*Siemens Rev.* (Germany), 28, No. 7, pp. 231-6, July 1961).

BYKHOVSKII Y.I. et al. – “Characteristics of carrier current channels”. – “Caractéristiques des voies de liaison par courant porteur sur ligne de transport d'énergie”. (CIGRE No. 312, 1962).

CIGRE Study Committee No. 14 – Comité d'Etudes No. 14 de la CIGRE. Standardisation of coupling elements (not directly connected to H.V. conductors).

CIGRE Study Committee No. 14, July 1967. – Comité d'Etudes No. 14 de la CIGRE, Juillet 1967. Recommended Values for Characteristic Data of Power Line Carrier Current Equipment.

COMBS E.E. – “Power line carrier coupling”. (*Trans. I.E.E.E.* Vol. PAS-87, No. 2, Feb. 1968).

ELTRINGHAM G.C. – “Some measurements of radio frequency noise radiated from extra high tension power transmission lines”. (*G.P.O. Memorandum* W.I. 3/3 No. 884, Jan. 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”. (*G.P.O. 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”. (*G.P.O. 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-current systems on A.C. overhead power lines”. (*G.P.O. 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”. (*G.P.O. Memorandum* W.I. 3/3 No. 895, June 1965). (Obtainable from Post Office Engineering Dept., W.I. 3/3 2-12 Gresham Street, London, E.C.2).

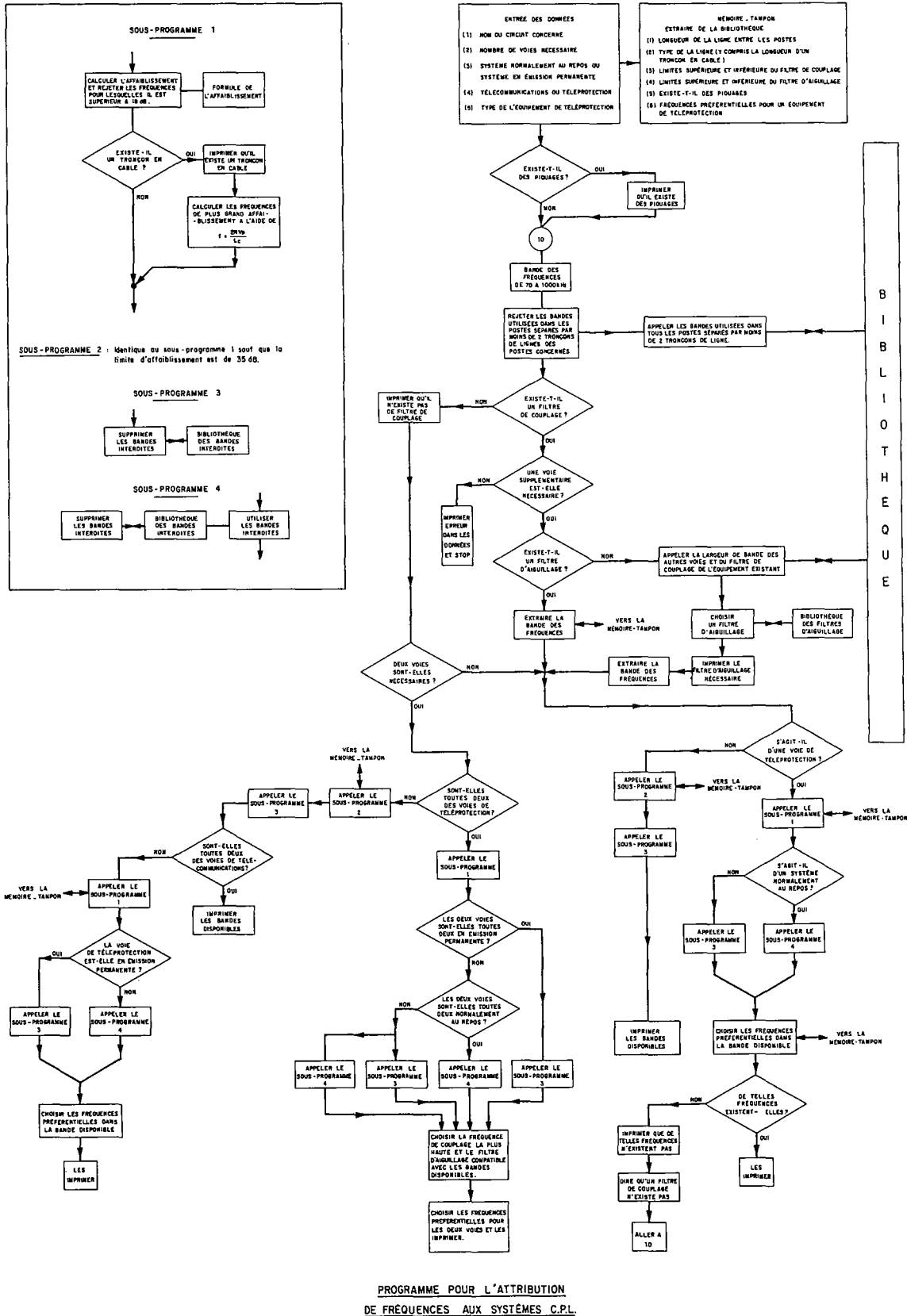
- Evaluation of Transfer-Trip Relaying using PLC. (*AIEE Committee Report, Transactions on Power Apparatus and Systems*, 81, Aug. 1962, pp. 250-55).
- Evaluation of transfer-trip relaying using power-line carrier. *Trans. (A.I.E.E., III, 81, 250-9, (1962), Power Apparatus Syst., No. 61, August 1962).*
- FEIL R. and GUTWILL K. – “Transistorized s.s.b. power line carrier equipments for telephony and telemetry”. (*Siemens-Z (Germany)*, 36, No. 4, 305-8 (April 1962). (In German).
- FOULDS D., HILL A.S., HOWLE S. and WEDEPOHL L.M. – “Capacitor voltage transformer and carrier coupling equipment”. (*I.E.E. Conf. Publ. (GB)*, 1965, No. 15, pp. 209-15).
- HAHN C. – “Power system communications using power lines or radio”. (*Brown Boveri Review* – 46 No. 11/12, Nov/Dec. 1959, pp. 704-716).
- HASLER E.F. – “The design and predicted performance of intrabundle insulation” paper T74 364-6 presented at IEEE PES Summer meeting & Energy resources Conference, Anaheim, California, July 1974. (To be published in IEEE PES Trans.).
- HAUGH 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 F., Discussion – (*IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, No. 6, June 1965, pp. 492-494).
- HOOPER J.H. – Radiation from the Down-droppers of a Power Line Carrier Installation”. (*Trans. IEEE*). (Submitted for publication).
- I.E.C. Committee No. 57, Recommendations for line traps. Comité No. 57 de la CEI. Recommandations pour les circuits-bouchons.
- I.E.C. Committee No. 33. Coupling Capacitors. Comité No. 39 de la CEI. Condensateurs de couplage.
- 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 (USA)*, 85, No. 5, 1-11 (May 1965).
- IMAIDE S., KONGURE 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-Sept. 1960).
- JONES D.E. – “Operation of a PLC system during sustained line faults”. (*AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 79, Aug. 1960, pp. 556-60).
- JONES D.E. and LESLIE J.R. – “Amplification of power line carrier signals at intermediate stations”. (*Ontario Hydro Research News*, Feb. 1962).
- JONES D.E. and LESLIE J.R. – “Amplification of PLC at intermediate stations”. (*AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 82, Oct. 1963, pp. 683-686).
- JONES D.E. and BOZOKI B. – “Experimental evaluation of PLC propagation on a 500 kV line”. (*IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 83, Jan. 1964, pp. 16-23).
- JONES D.E. – “Staged faults with PLC transferred-trip relaying for line protection”. (*AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 78, Aug. 1959, pp. 588-95).
- JONES D.E. – “Parallel-wire couplers for power line carrier”. (*Ontario Hydro Research Quarterly*, 1st Quarter 1969, 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”. (CIGRE No. 309, 1948, 1950 and 312, 1952).

- LINDING K. – “Transistorised carrier system Z 1 H for transmission of telephone and telecontrol channels on HT power and communication lines”. (*SEL Nachr.* (Germany), 8, No. 4, pp. 198-202 (In German) (en allemand).
- LOERCHER O. and LUCHT H. – “Power supply to all transistor equipment for carrier systems”. (*SEL Nachr.* (Germany), 8 No. 4, pp. 191-8, 1960 (In German) (en allemand).
- 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 (UK).
- 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”.
- PULLEN F.D. – “Signal-coupling system for intrabundle communication on high voltage lines”, (*Electronics Letters* 9, 5 8 March 1973).
- PULLEN F.D. – “Wide bandwidth capabilities of intrabundle communication on high voltage lines”. paper T74 420-6 presented at IEEE PES Summer meeting & Energy Resources Conference Anaheim, California, July 1974. (To be published in IEEE PES Trans.).
- PULLEN F.D. – “The calculated electromagnetic fields surrounding carrier-bearing power line conductors” paper T74 419-8 presented at IEEE PES Summer meeting & Energy Resources Conference, Anaheim, California, July 1974. (To be published in IEEE PES Trans.).
- “Radiation from Carrier Telephone Systems on High-Tension Power Transmission Lines”. Commonwealth of Australia PMG’s Department. Research Report No. 3800 July 1954.
- REICHMAN J. – “Insulated overhead ground wires – protective carrier relaying investigations”. (*Trans. IEEE* Vol. PAS-87, No. 4, Jan. 1968).
- Report of Methods of Measurements for the Application of PLC. (*AIEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 81, Feb. 1962, pp. 1046-52).
- SAILER E. and SERGE G. – “Results of tests on a telecommunication network servicing power production and transmission.” – “Relevés effectués dans un réseau de télétransmissions au service de la production et du transport d’énergie”. (CIGRE No. 321, 1958).
- SAKIC B. – “Spectral properties of isolator noise”. (*Brown Boveri Review*, No. 4/5, 1968).
- SAKIC B. and BITRAN M. – Error Distribution in Digital Data transmitted along Power Line Carrier Systems. (*Brown Boveri Review*, 6/7-70 pp. 289-296).
- SEEN W. and FRIEDMANN W. – “New carrier-frequency equipment for communication over power lines”. (*Brown Boveri Review*, No. 5, 1964).
- SEEN 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 (Sept.) (In Russian).
- WAGNER C.L. et al. – “Evaluation of power line carrier transfer trip relaying”. (*AIEE*, Feb. 1962).
- WASLEY R.G. – “Intrabundle and Power Line Carrier Loss Characteristics including the effects of Ice”. (*Proc. IEE*) (submitted for publication).
- 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, p. 374-381).
- WOHLGEMUTH D.G., GILLIES D.A. and DIETRICH R.E. – “Transfer-trip relaying field tests and operating experience”. (*AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 81, Aug. 1962, pp. 225-233).
- WOHLGEMUTH D.G., GILLIES D.A. and DIETRICH R.E. – “Fields tests and operation experience with carrier transfer trip relaying through line faults”. – “Essais a pied d’oeuvre et expérience d’exploitation avec un système de relais de transfert de déclenchement à courant porteur à travers les défauts de la ligne”. (CIGRE No. 304, 1962).

ANNEXE

Affectation logique des fréquences CPL

Le schéma suivant, Figure A1, illustre à titre d'exemple une séquence logique des étapes suivies pour l'affectation des fréquences CPL (voir section 9, référence 16).



APPENDIX

Logical assignment of P.L.C. frequencies

The following drawing, Figure A1, illustrates, by way of an example, a logical sequence of steps used in the assignment of P.L.C. frequencies (see Section 9 ref. 16).

CENTRAL ELECTRICITY RESEARCH LABORATORIES

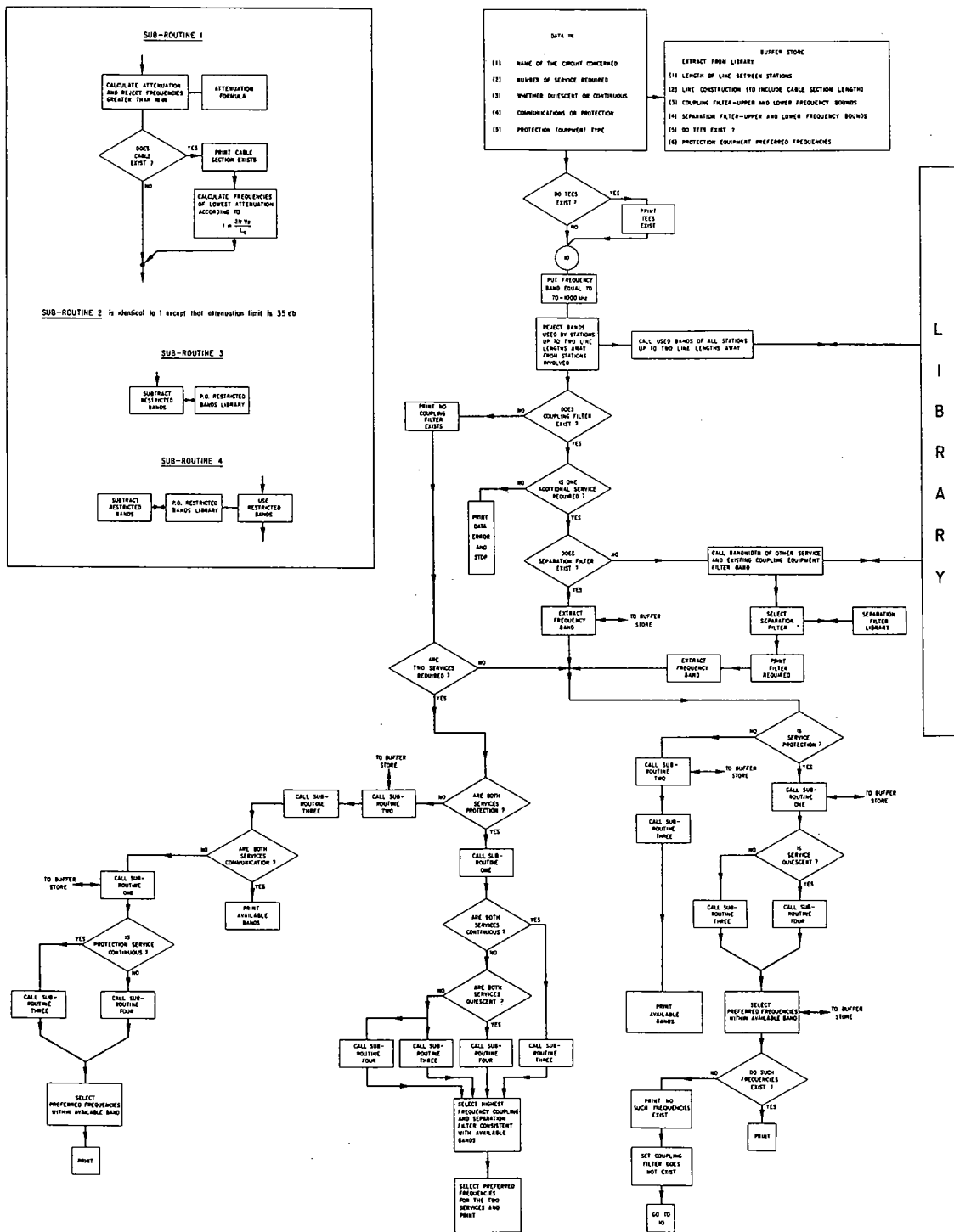


FIG. A1 P.L.C. FREQUENCY ALLOCATION FLOW CHART

© CIGRE



3-5 rue de Metz - F-75010 PARIS