

RAPPORT 902-1

**SYSTEMES A LIGNES D'ALIMENTATION A FUIITE
DANS LE SERVICE MOBILE TERRESTRE**

(Question 36/8)

(1982-1990)

1. Introduction

On appelle parfois "câbles rayonnants" les lignes d'alimentation à fuite, mais c'est une appellation imprécise qui est à proscrire. On peut aussi parler de "câble à fuite" lorsqu'il s'agit vraiment des lignes d'alimentation elles-mêmes plutôt que du système, ce qui est le cas le plus général, et quand la ligne d'alimentation est en fait constituée d'un câble et non d'une ligne de transmission en fil aérien.

Un câble à fuite est une sorte de ligne de transmission qui permet, par son champ de fuite, d'établir dans son voisinage des communications radioélectriques avec ou entre des postes mobiles, alors que sa portée linéaire dépend de ses propriétés de propagation interne [Delogne, 1982; Martin, 1982].

Ces systèmes servent dans des espaces confinés, comme les tunnels, les mines ou les grands immeubles où la propagation naturelle est inexploitable. Ils peuvent être complètement autonomes ou consister en des extensions des systèmes de surface classiques à rayonnement libre. Dans ce dernier cas, l'alimentation en vue de la couverture souterraine peut provenir d'une réception directe ou de la station de base de l'antenne de surface. Réciproquement un système essentiellement souterrain peut être relié à une antenne de surface et assurer un service local, par exemple sur l'emprise d'une mine.

Les câbles à fuite peuvent aussi être utilisés pour limiter la zone de couverture d'un système radioélectrique et améliorer ainsi l'efficacité d'utilisation du spectre.

L'expression "câble à fuite" peut aussi désigner un câble sans fuite équipé d'antennes périodiques discrètes ou de convertisseurs de mode [Delogne et Liégeois, 1971].

2. Classification des câbles à fuite

On utilise couramment des câbles à fuite des types suivants:

- a) lignes symétriques,
- b) câbles à paires coaxiales à fuite continue,
- c) câbles à paires coaxiales avec ouvertures périodiques,
- d) câbles avec convertisseur de mode.

Les types a) et b) sont intrinsèquement non rayonnants, en ce sens qu'un câble de longueur infinie tendu en espace libre ne peut transporter que des ondes guidées par la structure. Toutefois, toute discontinuité le long de celle-ci donne lieu à une conversion de mode ainsi qu'à un rayonnement.

Dans le type c), les ouvertures périodiques sont des discontinuités rayonnantes qui agissent en tant qu'éléments d'un réseau d'antennes. Le rayonnement maximal est obtenu dans des directions obliques déterminées, principalement par le rapport de la longueur de l'intervalle à la longueur d'onde.

Dans les câbles du dernier type d), les convertisseurs de mode ou éléments rayonnants sont des discontinuités ponctuelles agissant isolément.

2.1 Paramètres fondamentaux de fonctionnement

Le fonctionnement d'un câble à fuite peut être caractérisé par deux grandeurs:

- l'affaiblissement longitudinal;
- la perte par couplage.

L'affaiblissement longitudinal dépend principalement des facteurs relatifs aux lignes de transmission normales tels que leur structure, les dimensions des conducteurs et la nature du diélectrique. Pour une petite partie, il est imputable aussi aux fuites (ou au convertisseur de mode).

Selon une définition générale, la perte par couplage représente la perte de puissance entre le câble et l'antenne mobile dans leur voisinage. Pour les types courants de coaxiaux des câbles à fuite, elle dépend de l'efficacité du blindage qui entre dans la constitution du câble, de la disposition de l'élément de blindage ou des conducteurs et de la permittivité du diélectrique. On notera que la perte par couplage, pour un câble donné, dépend aussi des facteurs suivants:

- milieu dans lequel le câble est installé;
- position de montage du câble;
- caractéristiques, position et orientation de l'antenne mobile;
- fréquence de fonctionnement.

L'affaiblissement longitudinal d'un câble conçu pour que la perte par couplage soit petite risque d'augmenter très sensiblement si l'on monte le câble près d'une paroi ou d'un ouvrage reposant sur d'autres câbles, ou si la surface du câble est polluée, sauf si le câble est conçu de manière à réduire cet effet à un minimum comme le câble

triaxial (tri-coaxial) et des câbles essentiellement sans fuite munis de convertisseurs de mode. D'ordinaire, de même que l'affaiblissement augmente, la perte par couplage diminue généralement (c'est-à-dire que le signal reçu augmente localement).

Pour une perte par couplage donnée, les divers types de câbles ne sont pas forcément sujets aux mêmes accroissements de l'affaiblissement en raison des effets de proximité et des pollutions. Les lignes bifilaires sont de loin les plus sensibles, suivies du câble à fente longitudinale et enfin des divers types de câbles à nombreuses petites ouvertures. Certains câbles tressés sont si peu sensibles aux effets de proximité que, posés sur des supports ordinaires, ils peuvent suivre les lignes électriques et téléphoniques et les câbles analogues sans que leur fonctionnement dans la bande métrique s'en ressente notamment.

2.2 Lignes bifilaires

Les lignes bifilaires (normalement équilibrées) donnent lieu à de faibles pertes par couplage et à un affaiblissement longitudinal réduit pour un conducteur de diamètre donné, comparé aux câbles à paires coaxiales. C'est pourquoi, ces câbles sont généralement, de tous les câbles à fuite, les plus avantageux du point de vue du coût. Cependant ils peuvent être sensibles à la position de montage et à la pollution de la surface lorsqu'il s'agit de transmissions sur ondes métriques et plus particulièrement sur ondes décimétriques.

Si un câble bifilaire est torsadé de façon serrée (par exemple plusieurs tours par longueur d'onde) l'équilibrage résiste en principe mieux aux effets de proximité, ce qui améliore la propagation longitudinale mais en même temps l'affaiblissement de couplage risque d'atteindre 15 dB de plus [Martin, 1975].

2.3 Câbles coaxiaux

2.3.1 Câbles à paires coaxiales à fuite continue

Ce type (à deux ou trois conducteurs coaxiaux) comprend les câbles à tressage lâche, les câbles à fente continue et les câbles à ouvertures ou à fentes déterminées espacées à des distances beaucoup plus petites que la longueur d'onde.

Ces câbles à paires coaxiales ayant un conducteur extérieur imparfait, une partie de l'énergie de la ligne de transmission se propage à l'extérieur du câble comme un champ de fuite [Delogne et Safak, 1975; Fernandes, 1979].

Les propriétés fondamentales du câble qui, avec les conditions extérieures, déterminent la perte par couplage sont a) la vitesse de propagation interne et b) l'impédance de transfert de surface du conducteur extérieur. Il vaut mieux définir les câbles en indiquant ces grandeurs, qu'on peut mesurer en laboratoire, plutôt qu'une perte par couplage à définition arbitraire et artificielle. La vitesse de propagation est définie par la constante diélectrique interne et l'impédance de transfert de surface par la structure du conducteur extérieur; elle augmente lorsque, par exemple, on accroît la dimension ou le nombre des ouvertures.

L'accroissement de l'impédance de transfert de surface s'accompagne d'une augmentation proportionnelle du signal couplé et va normalement de pair, en fonction de la structure précise du câble, avec un plus grand affaiblissement longitudinal. L'affaiblissement longitudinal varie aussi davantage avec le mode de montage mais il est évident que cela dépend plus de la dimension des trous que de l'impédance de transfert de surface elle-même et par conséquent il vaut mieux un grand nombre de petits trous qu'un petit nombre de grands trous.

L'énergie totale du champ de fuite varie comme la vitesse interne du câble (en fonction par exemple de la constante diélectrique interne), mais ce n'est pas de façon linéaire et d'autres paramètres entrent en jeu. En fait, au voisinage du câble, le champ est réduit mais sa dispersion est accrue. Le rayon de confinement, en deçà duquel se concentre l'essentiel de la puissance du champ de fuite en mode coaxial, est de l'ordre de 60 cm à 100 MHz et varie en raison inverse de la constante diélectrique de l'isolant interne du câble. Il est aussi directement proportionnel à la longueur d'onde.

Le mécanisme par lequel une antenne mobile en dehors du rayon de confinement est couplée au mode coaxial est la diffraction des champs de fuite en mode coaxial par les non homogénéités en deçà du rayon de confinement; il s'agit des non homogénéités et des irrégularités dans l'environnement, dans la construction du câble aux crochets de suspension et par des obstacles de toute sorte. Cette diffraction est de nature aléatoire; en outre dans les tunnels, la perte par couplage résultante ne dépend pas nettement de la distance entre antenne et câble, car les champs diffractés sont guidés selon un grand nombre de modes.

2.3.2 Câbles à paires coaxiales avec ouvertures périodiques

Les câbles à paires coaxiales à ouvertures discrètes de dimensions et/ou de périodicité comparables à la longueur d'onde sont une source de rayonnement.

Un câble coaxial muni d'un réseau de fentes en zigzag peut être traité comme un rideau d'antenne [Nakahara et Kurouchi, 1968] et l'énergie transmise dans le câble est peu affectée par le rayonnement des fentes. Le champ rayonné se propage sous la forme d'une onde cylindrique.

Lorsque les fentes en zigzag sont placées à des emplacements appropriés dans les câbles à paires coaxiales, le rayonnement est amélioré dans le sens transversal et il est possible de fabriquer des câbles avec des pertes par couplage différentes permettant d'obtenir des pertes de couplage variant par paliers (§ 3.2.1).

2.4 Câbles avec convertisseur de mode, ensembles rayonnants ou antennes

Il s'agit de lignes bifilaires ou coaxiales ordinaires, dans lesquelles on insère, avec un espacement régulier ou non, à des emplacements déterminés par les conditions de propagation prépondérantes dans le milieu extérieur, des dispositifs convertissant une partie de l'énergie transportée par la ligne, en modes guidés se propageant à l'extérieur de celle-ci ou en ondes sphériques rayonnées [Deryck, 1972; Delogne, 1973 et 1976].

Un dispositif rayonnant pour câbles coaxiaux peut prendre la forme d'une fente annulaire constituant une interruption complète du conducteur extérieur et à laquelle on ajoute des éléments de circuit, de manière à ne rayonner qu'une fraction de la puissance transportée par le câble [Delogne et Liégeois, 1971].

L'espacement des convertisseurs de mode ou des éléments rayonnants peut varier de 100 m à 1 km selon la puissance d'entrée du système, la position du câble dans le tunnel et l'affaiblissement en mode à fil unique ou mode tunnel, selon celui qui prédomine dans chaque cas. Le taux de conversion peut être adapté par un choix judicieux des éléments de circuit. Le taux de conversion courant est 10%, donnant lieu à un affaiblissement d'insertion d'environ 0,5 dB par convertisseur [Delogne, 1982].

Pour établir des systèmes à convertisseur de mode, on utilise un tronçon de câbles à fuite continue qu'on insère dans le câble classique «sans fuite». Ce tronçon agit comme un réseau continu de fentes annulaires.

3. Examen des systèmes

3.1 Système de base

Le système de câble à fuite de base destiné aux communications bidirectionnelles comprend un émetteur et un récepteur de station de base, reliés à un câble à fuite qui assure les communications avec les stations mobiles classiques, comme le montre la Fig. 1. En plaçant la station de base au milieu d'un câble, on peut doubler la couverture longitudinale du câble par rapport à celle d'un système alimenté en extrémité.

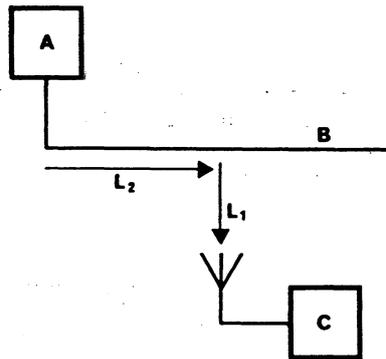


FIGURE 1 - Système de base à ligne d'alimentation à fuite

A: station de base	L_1 : perte par couplage
B: câble à fuite	L_2 : affaiblissement d'insertion du câble
C: unité mobile	

3.1.1 Portée des communications

L'équation fondamentale qui lie les paramètres (en dB) d'un système à câble à fuite s'écrit:

$$\text{AFFAIBLISSEMENT DU SYSTEME} = \text{PERTE EN LIGNE} + \text{PERTE PAR COUPLAGE}$$

où

L'AFFAIBLISSEMENT DU SYSTEME est le rapport de la puissance de sortie de l'émetteur à la puissance aux bornes d'entrée du récepteur.

LA PERTE EN LIGNE est l'affaiblissement longitudinal de la ligne entre la station de base et le point de la ligne le plus proche du récepteur mobile.

LA PERTE PAR COUPLAGE est le rapport de la puissance en ligne au point le plus proche du récepteur mobile à la puissance aux bornes de l'antenne du récepteur mobile.

Dans le cas de systèmes à alimentation centrale, il faut d'abord soustraire de l'affaiblissement du système l'affaiblissement de division égal à 3 dB.

Cette équation permet de prévoir la portée approximative d'un système de câble à fuite simple si on connaît les caractéristiques fondamentales du câble, des récepteurs et le voisinage. On obtient couramment des portées d'un à deux km.

Dans des conditions favorables, par exemple sur des lignes bifilaires mal équilibrées, on a relevé des affaiblissements de couplage aussi bas que 30 dB mais ils se situent plus couramment de 60 à 90 dB. Dans les tunnels et les mines les trajets multiples provoquent souvent des variations de 20 dB sur de faibles distances, conformément à une distribution de Rayleigh. Compte tenu de cela on recommande de considérer un affaiblissement de couplage d'au moins 90 dB pour les systèmes dont le câble n'est pas trop affecté par les dispositifs de fixation.

Dans le cas d'éléments rayonnants discrets ou d'antennes écartés les uns des autres remplaçant un câble à fuite continue il faut, d'un élément rayonnant à l'autre, considérer la propagation naturelle dans le tunnel. Au-dessous de la fréquence de coupure du tunnel on est en présence d'un mécanisme différent et il faut alors considérer la propagation en mode monofilaire de la ligne.

3.2 Systèmes plus complexes

3.2.1 Câble à pertes variant par paliers

On peut accroître la portée initiale d'une station de base unique en faisant varier par paliers les pertes tout au long du câble afin que l'affaiblissement de couplage diminue avec la distance de la station de base, au prix d'un affaiblissement longitudinal accru ou d'effets de proximité; cette technique a été largement employée au Japon [Okada et autres, 1975].

3.2.2 Stations de base multiples

On peut augmenter, si besoin est, la portée du système de base en ajoutant des stations de base qui peuvent recevoir des commandes distinctes ou communes. L'absence de synchronisation entre émetteurs de bases successives peut provoquer des effets de recouvrement gênants qu'on peut atténuer en laissant un intervalle entre les extrémités des lignes dans les régions affectées. Pour réduire ces effets de recouvrement, on peut synchroniser les émetteurs en modulant une fréquence commune pilotée par quartz et en transmettant le signal résultant sur le câble vers les autres stations de base.

Si les stations de base doivent transmettre des informations distinctes, on tirera profit de l'effet de capture classique des récepteurs qui réduira à quelques dizaines de mètres le domaine où il y a brouillage entre sections, pourvu qu'on laisse un intervalle suffisant entre les extrémités des câbles.

3.2.3 Utilisation de répéteurs

On peut insérer des amplificateurs ou des répéteurs en ligne à des intervalles fréquents pour compenser les affaiblissements en ligne dans le câble à fuite comme le montre la Figure 2. Il est possible d'éviter certains des problèmes et des difficultés de conception des répéteurs pour communications bilatérales en séparant l'émetteur et le récepteur de la base de la manière indiquée dans la Figure 3. En utilisant ces techniques, la puissance rayonnée par le mobile ou fournie au câble peut en général être inférieure à 100 mW par canal [Martin et Haining, 1979].

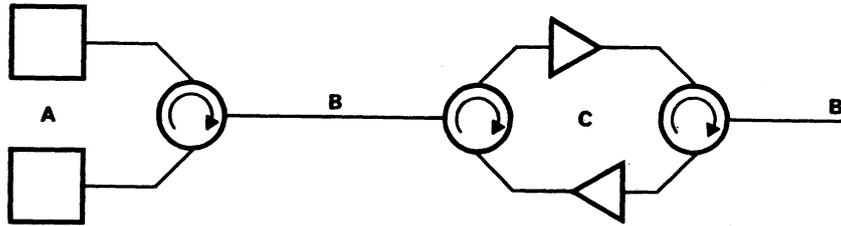


FIGURE 2 - Système élargi utilisant des répéteurs bidirectionnels

- A: émetteur et récepteur de la station de base
- B: câble à fuite
- C: répéteurs bidirectionnels

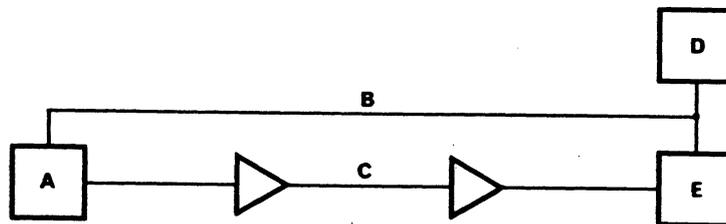


FIGURE 3 - Système en chaîne avec répéteurs unidirectionnels

- A: émetteur de la station de base
- B: ligne à fréquences vocales
- C: câble à fuite avec répéteurs unidirectionnels
- D: poste de commande
- E: récepteur de la station de base

La disposition simple à répéteurs unilatéraux en chaîne de la Figure 3 présente le même inconvénient que les systèmes simples à multiples stations de base car tous deux exigent une ligne téléphonique de liaison séparée. Il y a aussi des inconvénients à choisir une forme très ramifiée. On peut s'affranchir de ces deux difficultés en introduisant aux extrémités du système de petits convertisseurs de fréquence alimentés par la ligne et en acheminant sur le même câble un signal de liaison à fréquence basse ce qui permet de concentrer les fonctions des stations de base au même emplacement [Martin, 1982].

Il existe de nombreuses façons d'utiliser les répéteurs [Martin, 1982]. Les systèmes se signalent en général par une remarquable constance du niveau du signal et de la qualité dans tout le système. Dans les systèmes très étendus il faudra peut-être, dans la transmission mobile vers base, tenir compte du bruit produit par les répéteurs.

En exploitation multivoie, les systèmes à répéteurs sont particulièrement économiques car toutes les voies peuvent passer par le même répéteur pourvu qu'on prenne les précautions nécessaires contre l'intermodulation. Lorsqu'il y a plus de six voies, il vaut généralement mieux doubler les câbles et avoir des chaînes de répéteurs distinctes pour les deux directions. Cela assure une redondance intéressante car en cas de panne d'une chaîne de répéteurs le système peut revenir en exploitation à chaîne simple avec moins de canaux ou une exploitation restreinte.

3.3 *Applications dans les mines et les tunnels*

3.3.1 *Liaisons par conducteur monofilaire*

Un type très rudimentaire de câble à fuite est un conducteur monofilaire isolé ou éloigné de la paroi du tunnel. Sa présence dans un tunnel modifie profondément la propagation, puisqu'il donne lieu à un mode de propagation quasi-TEM. Celui-ci est dépourvu de fréquence de coupure et peut donc être utilisé aux fréquences basses.

L'affaiblissement du mode monofilaire dépend d'une manière complexe de la forme et des dimensions du tunnel, des paramètres électriques de la paroi, et surtout de la distance du câble à la paroi et de la fréquence. Des affaiblissements acceptables sont obtenus en dessous d'environ 30 MHz. Ces systèmes sont restreints aux utilisations exclusivement souterraines [Delogne, 1982].

3.3.2 Ligne bifilaire

Ce type de câble à fuite a été utilisé de longue date dans les installations enterrées, mais il faut le mettre en oeuvre très soigneusement, notamment pour sa mise en place et les risques de voir sa surface encrassée ou humide. Son affaiblissement longitudinal et de couplage est généralement très instable. Toutefois ces câbles peuvent se révéler très utiles pour des installations d'urgence ou de secours.

3.3.3 *Câbles à paires coaxiales*

Tous les types de câble à paires coaxiales à fuite continue ont été utilisés avec succès dans les installations souterraines; néanmoins, en cas de forte humidité ou dans des conditions de montage difficiles, les meilleurs résultats ont été obtenus avec des câbles à tresse lâche.

Les câbles à paires coaxiales avec ouvertures périodiques ont été utilisés avec succès dans les tunnels ferroviaires et routiers [Suzuki et autres, 1980].

3.3.4 Câbles avec convertisseurs de mode ou éléments rayonnants

On a réalisé de nombreuses installations souterraines qui ne requièrent pas de dispositions de pose spéciales, sauf sur quelques mètres de part et d'autre des dispositifs rayonnants ou des convertisseurs de mode. Ailleurs on peut utiliser n'importe quel mode de pose du câble.

3.3.5 Variation transversale du champ dans un tunnel

Comme plusieurs modes sont présents dans un tunnel quand on utilise des câbles à fuite à des fréquences supérieures à la fréquence de coupure du tunnel, il apparaît une configuration de trajets multiples. La valeur moyenne du champ est à peu près constante dans le tunnel et la distribution statistique du champ obéit à la loi de Rayleigh. Avec des câbles à paires bifilaires torsadées ou des systèmes à convertisseurs de mode, la variation du champ est moindre.

3.4 Applications dans les voies ferroviaires et les routes

Les systèmes de radiocommunication utilisés dans les trains utilisent la fréquence de 400 MHz et des câbles à paires coaxiales avec ouvertures périodiques installés le long de la voie de chemin de fer [Okada et autres, 1975].

Les mesures latérales du champ rayonné en rase campagne le long d'une voie où est exploitée ce type de câble ont montré que la perte par couplage augmente d'environ 3 dB quand la distance double. Pour d'autres types de câbles à fuite posés dans des conditions analogues, on a mesuré des pertes par couplage qui augmentaient d'environ 6 dB quand la distance doublait [Cree et Giles, 1975].

3.5 Applications dans les immeubles

On a installé des câbles à fuite dans des immeubles pour y assurer la propagation radioélectrique. Dans certains cas la station de base qui alimente le câble à fuite est aussi reliée à une antenne rayonnante ordinaire pour assurer aussi une couverture à l'extérieur. Dans d'autres cas on a remplacé la station locale de base par une antenne bien dégagée qui capte le signal d'une station de base distante et alimente le système à câble à fuite.

Les principes décrits pour les tunnels sont applicables aux espaces confinés, comme les couloirs, les cages d'escalier ou d'ascenseurs, les aires de stationnement, etc. Mais ces locaux ont des dimensions et des formes si variées que la conception du système est délicate et que plus souvent que dans le cas de tunnels il faut rechercher des solutions empiriques.

4. Bandes de fréquences préférées

Les systèmes à câbles à fuite ont été utilisés avec succès pour une large gamme de fréquences, dont la plus basse est 3 MHz [Delogne, 1982] et la plus élevée 800 MHz [Suzuki et autres, 1980].

D'une manière générale, ce sont les facteurs économiques qui favorisent l'utilisation de la partie inférieure de la gamme des ondes métriques mais d'autres facteurs peuvent influencer le choix, à savoir:

- la disponibilité des voies pour une configuration particulière (notamment s'il y a couverture de surface),
- les dimensions et la configuration d'un tunnel ou d'un bâtiment,
- si le système est destiné à être une extension d'un système radioélectrique mobile classique,
- la portée linéaire souhaitée (de bout en bout),
 - tout service que le câble doit assurer dans un tunnel annexe non équipé lui-même de câble,
- la disponibilité de récepteurs radioélectriques appropriés,
- la dimension des antennes des récepteurs du public.

Pour les câbles à fuite le mode de fixation et la pollution de surface sont plus critiques aux fréquences élevées. A cet égard les câbles bifilaires sont les plus sensibles.

Avec les fréquences élevées on tire plus facilement parti, en des emplacements convenables, de la propagation en tunnel pour étendre la couverture assurée par le câble. Toutefois cette extension implique que le tunnel ne soit pas obstrué par des véhicules.

Dans certains cas on peut se passer complètement des câbles à fuite grâce à la propagation naturelle au-dessus de la fréquence de coupure du tunnel [Emslie et autres, 1975; Delogne, 1982]. Mais là aussi l'obstruction du tunnel, entre la station de base et les antennes mobiles, peut gêner les communications, selon les dimensions du tunnel et des véhicules.

5. Partage d'une bande de fréquences avec d'autres services

L'environnement d'un système à câbles à fuite dont l'installation est entièrement souterraine constitue un écran très efficace. On peut donc exploiter ce système, sans risque de brouillages mutuels, dans des bandes de fréquences attribuées à d'autres services.

Si un système à câbles à fuite est destiné à être installé en surface, on peut le réaliser avec un petit affaiblissement global de trajet, par exemple, en l'équipant de répéteurs en ligne rapprochés [Martin et Haining, 1979]. On peut ainsi employer des puissances d'émission réduites au minimum, et désensibiliser les récepteurs, ce qui diminue le risque de brouillage dans une même voie et facilite donc le partage d'une même bande de fréquences avec d'autres services.

Pour évaluer le risque de brouillage avec les câbles à fuite, il convient d'observer ce qui suit: c'est principalement dans la station de base et dans les répéteurs que sont concentrées les sources de brouillage (et les organes sensibles au brouillage), ainsi qu'aux discontinuités, comme les extrémités du système et les coudes brusques.

Lorsqu'on exploite une voie à deux fréquences à portée de brouillage d'un système classique, il peut être avantageux de transposer les fréquences, c'est-à-dire d'utiliser la fréquence d'émission de la base pour l'émission mobile et vice versa. En effet, dans un système à câble à fuite c'est généralement le mobile qui cause le plus de brouillages et qui leur est le plus sensible alors que dans un système classique, c'est la station de base.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CREE, D. J. et GILES, L. J. [mai 1975] Practical performance of radiating cables. *Radio and Electronic Engr.*, Vol. 45, 5.
- DELOGNE, P. [avril 1973] Les liaisons par radio dans les tunnels. *Rev. HF, Belgique*, Vol. IX, 2, 18-26.
- DELOGNE, P. [avril 1976] Basic mechanisms of tunnel propagation. *Radio Sci.*, Vol. 11, 4, 295-303.
- DELOGNE, P. [1982] *Leaky Feeders and Subsurface Radio Communication*, Peter Peregrinus (for IEE), 283 p.
- DELOGNE, P. et LIÉGEOIS, R. [mars-avril 1971] Le rayonnement d'une interruption du conducteur extérieur d'un câble coaxial. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 26, 3-4, 85-100.
- DELOGNE, P. et SAFAK, M. [mai 1975] Electromagnetic theory of the leaky coaxial cable, *Radio and Electron, Engr*, Vol. 49, 5, 233-240.
- DERYCK, L. [10 février 1972] Radiocommunication in tunnels. *Electron. and Lett.*, Vol. 8, 3, 71-72.
- EMSLIE, A. G., LAGACE, R. L. et STRONG, P. F. [mars 1975] Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-23, 2, 192-205.
- FERNANDES, A. S. de C. [mai 1979] Propagation characteristics of a loose braid coaxial cable in free space. *Radio and Electronic Engr.*, Vol. 49, 5, 255-260.
- MARTIN, D. J. R. [mai 1975] A general study of the leaky feeder principle. *Radio and Electronic Engr.*, Vol. 45, 5.
- MARTIN, D. J. R. [juin et juillet 1982] Leaky feeder communication in tunnels, *Wireless World*, Vol. 88, 1557, 70-75, et Vol. 88, 1558, 33-37.
- MARTIN, D. J. R. et HAINING, R. W. [septembre 1979] Leaky feeder radio techniques for mines and tunnels. *IERE Conf. Proc.* N° 44.
- NAKAHARA, T. et KUROUCHI, N. [juin 1968] Various types of open wave-guides for future train control. *ICC of IEEE*, 185.
- OKADA, S., KISHIMOTO, T., AKAGAWA, K., NAKAHARA, Y., MIKOSHIBA, K., HORIGUCHI, F. et OKAMOTO, K. [mai 1975] Leaky coaxial cable for communication in high speed railway transportation. *Radio and Electronic Engr.*, Vol. 45, 5, 224-228.
- SUZUKI, T., HANAZAWA, T. et KOZONO, S. [août 1980] Design of tunnel relay system with leaky coaxial cable in an 800 MHz band land mobile telephone system. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. 29, 3.
-