

**Zeitschrift:** Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

**Herausgeber:** Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

**Band:** 55 (1977)

**Heft:** 7

**Artikel:** Influence des irrégularités d'impédance des paires coaxiales sur la transmission numérique

**Autor:** Käser, André

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-874141>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 25.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Influence des irrégularités d'impédance des paires coaxiales sur la transmission numérique

André KÄSER, Berne

621.315.212.011.21:621.317.34:621.376.56:621.391.31.037.37

## Einfluss der Impedanz-Unregelmäßigkeiten der Koaxialtuben auf die digitale Übertragung

**Zusammenfassung.** Die Impedanz-Unregelmäßigkeiten einer zur Übertragung digitaler Signale benützten Koaxialtube verursachen durch mehrfache Reflexionen eine rauschähnliche Spannung, die sich dem Nutzsignal überlagert. Die numerische Auswertung des Einflusses der Impedanz-Unregelmäßigkeiten, zum grössten Teil aus früheren Studien übernommen, wurde aufgrund ausgewählter Parameter bei verschiedenen Kabeltypen angewendet. Die grafische Darstellung der Ergebnisse, die besonders erläutert ist, soll eine sehr einfache und schnelle Beurteilung des Störausmasses ermöglichen.

**Résumé.** Les irrégularités d'impédance d'une paire coaxiale, utilisée pour la transmission de signaux numériques, engendrent par des réflexions multiples une tension au caractère de bruit qui se superpose au signal utile. L'évaluation numérique de l'influence des irrégularités d'impédance, reprise en grande partie d'études antérieures, a été appliquée en fonction de paramètres choisis à différents types de câble. La représentation graphique des résultats, qui est spécialement développée, doit permettre une estimation très simple et très rapide de l'importance des perturbations.

## Influenza delle variazioni d'impedenza delle coppie coassiali sulla trasmissione numerica

**Riassunto.** Le variazioni d'impedenza di una coppia coassiale, utilizzata per la trasmissione di segnali numerici, generano, mediante riflessioni multiple, una tensione con caratteristica di rumore che si sovrappone al segnale utile. La valutazione numerica dell'influenza delle variazioni d'impedenza, ripresa in maggior parte da studi antecedenti, è stata applicata in funzione di parametri scelti per differenti tipi di cavi. La rappresentazione grafica dei risultati, che è particolarmente sviluppata, deve permettere una valutazione molto semplice e veloce dell'importanza delle perturbazioni.

## 1 Introduction

Un intérêt croissant pour l'étude des systèmes de transmission numérique à débit élevé sur câble coaxial a rendu indispensable la connaissance des caractéristiques électriques de ces câbles dans le domaine des très hautes fréquences.

Les paramètres importants à déterminer sont l'atténuation et son écart par rapport à la loi  $\sqrt{f}$ , ainsi que la phase et son écart par rapport à la loi linéaire. Leur connaissance permet un dimensionnement optimal de l'égalisation des régénérateurs. Il est cependant nécessaire de connaître aussi les conditions de régularité d'impédance qui doivent être satisfaites pour ce mode d'exploitation.

Sans doute ces conditions peuvent être généralement plus larges que pour les systèmes analogiques, cependant il est utile de définir clairement les objectifs de fabrication strictement nécessaires pour les nouveaux câbles et de déterminer dans quelle mesure les anciens câbles déjà installés pourront être utilisés.

## 2 Caractéristiques des irrégularités d'impédance

### 21 Classification

L'on distingue en général trois catégories d'irrégularités d'impédance pour le câble coaxial:

- 1 Les changements discrets et importants d'impédance dus, par exemple, aux épissures, aux impédances de fermeture ou encore à une détérioration mécanique locale du câble
- 2 Les changements d'impédance d'amplitude aléatoire répartis de façon indépendante tout au long du câble, causant des réflexions qui ne s'additionnent pas en phase
- 3 Les changements d'impédance répétitifs (périodiques) de faible amplitude, causant des réflexions qui s'additionnent en phase dans certaines bandes de fréquences (résonances)

Des mesures distinctes permettent de déterminer l'importance de chaque type d'irrégularité.

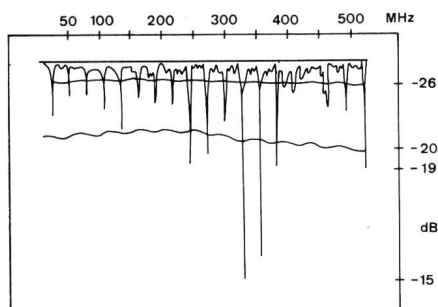
### 22 Méthodes de mesure et définitions

Le plus simple serait évidemment de déterminer par une mesure directe l'influence des irrégularités d'impédance sur la fonction de transfert du câble; différents essais ont été tentés dans cette direction. Cependant jusqu'à aujourd'hui, seules des mesures de réflexions réalisées aux extrémités des câbles permettent de connaître avec précision l'importance des défauts d'homogénéité de ces derniers [1].

Les irrégularités d'impédance de la première catégorie, définie en 21, se laissent, en particulier, déterminer aisément à l'aide d'une mesure d'écho dans le domaine du temps. Pour ce faire, on utilise des impulsions dont la durée correspond approximativement à la durée des impulsions du système numérique envisagé. Il ne faut cependant pas négliger le fait qu'une impulsion de durée plus courte permet une meilleure résolution mais limite, en revanche, la longueur mesurable du câble. Chaque écho permet de calculer un coefficient de réflexion  $|r|$  (valeur corrigée) qui sera admis indépendant de la fréquence, du moins dans le domaine compris entre zéro et la fréquence de répétition des symboles du système numérique.

Les irrégularités des deuxième et troisième catégories sont, prises séparément, trop petites pour être discernées à l'échomètre; cependant, du fait qu'elles sont présentes tout au long du câble, leur effet cumulatif ne peut pas être négligé et leur présence sera détectée à l'aide d'une mesure de réflexion en régime permanent (en anglais «SRL-measurement»). La figure 1 donne un exemple de résultat de mesure pour la paire coaxiale de petit diamètre (1,2/4,4 mm) (valeur typique). Les pointes très élevées sont la preuve de la présence d'irrégularités périodiques; elles sont définies par la valeur maximale des coefficients de réflexion  $|g|_{\max}$  et par leur fréquence respective  $f_p$ .

«Le bruit de fond» de la même figure renseigne sur l'importance des irrégularités aléatoires. Ces dernières sont déterminées par la valeur moyenne du coefficient de réflexion mesuré en régime permanent (en faisant abs-



**Fig. 1**  
**Résultat de mesure de réflexion en régime permanent de la**  
**paire coaxiale à petit diamètre**

traction des pointes dues aux irrégularités périodiques) dans la bande de fréquences comprise entre zéro et la fréquence de répétition des symboles du système numérique envisagé. Cette valeur  $|\overline{g_r}|$  est cependant souvent difficile à évaluer; toutefois, on obtient une bonne approximation en ajoutant 6 dB à la valeur maximale du «bruit de fond» observé dans la bande de fréquences considérée.

### 3 Description des systèmes de transmission numérique

#### 31 Généralités

Il faut distinguer deux types principaux de systèmes de transmission numérique:

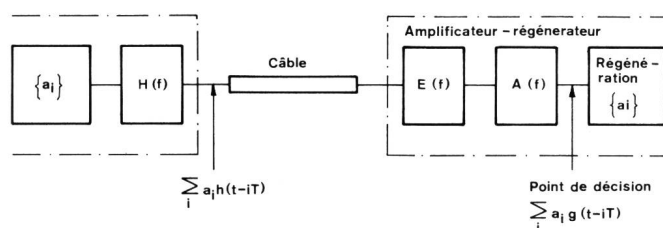
- Les systèmes entièrement numériques où tous les amplificateurs intermédiaires sont du type régénératif
- Les systèmes hybrides où plusieurs amplificateurs linéaires sont insérés entre deux régénérateurs

Tous les résultats obtenus s'appliquent aux systèmes du premier type; une généralisation permettrait de les étendre aux systèmes de second type.

#### 32 Description d'une section d'amplification

Un modèle simplifié d'une section de régénération est représenté à la *figure 2*. Le signal transmis est supposé être formé d'une suite d'impulsions de somme analogique bornée dont les amplitudes peuvent prendre  $m$  valeurs sensiblement équiprobables, régulièrement étagées. La séquence régénérée représentée par la suite  $\{a_i\}$  est transformée par le filtre de sortie en train d'impulsions  $\sum a_i h(t-iT)$  qui est transmis sur le câble. Ici  $h(t)$  décrit la forme d'impulsion utilisée à la sortie du régénérateur et  $T$  l'inverse de la fréquence de répétition des symboles.

Après le passage du câble, les impulsions sont atténuées de façon dépendante de la fréquence; le signal doit donc être amplifié et égalisé avant de parvenir à la partie numérique du régénérateur.



**Fig. 2**  
**Modèle simplifié d'une section de régénération**

L'égalisateur, défini par sa fonction de transfert  $E(f)$ , compense l'atténuation nominale du câble.

L'amplificateur  $A(f)$  élève l'amplitude du signal à un niveau compatible avec la partie numérique du régénérateur et limite la bande passante de la transmission, dans le but d'atténuer au maximum les influences perturbatrices du bruit thermique, sans toutefois créer des interférences intolérables entre symboles. Les caractéristiques de cet amplificateur influent grandement sur la qualité du système de transmission.

Au point de décision du régénérateur, le signal idéal est défini par  $\sum a_i g(t-iT)$  où  $g(t)$  représente la forme d'impulsion utilisée en ce point. Sa valeur efficace est la suivante:

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi(f)|^2 \Theta(fT) df$$

$\Phi(f)$  est la transformée de Fourier de  $g(t)$

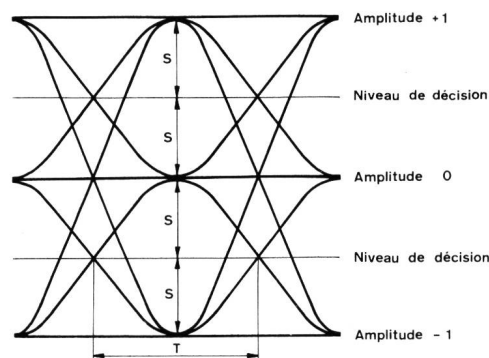
$\Theta(fT)$  dépend des propriétés d'autocorrélation du signal

Ce signal parvient ensuite aux circuits logiques où il est régénéré à nouveau. Au signal idéal sont superposés différents signaux perturbateurs qui sont, par exemple, le bruit du préamplificateur ou des tensions introduites par diaphonie. Pour permettre une décision en amplitude exempte d'erreur, il doit exister une certaine atténuation des tensions perturbatrices comparées au signal utile. Un rapport peut alors être défini entre la *valeur efficace des signaux perturbateurs*  $D$  et l'*amplitude du signal*  $s$  caractérisée comme la distance entre le niveau idéal du signal et le niveau de décision le plus proche. La *figure 3* donne un exemple dans le cas d'un code à 3 niveaux.

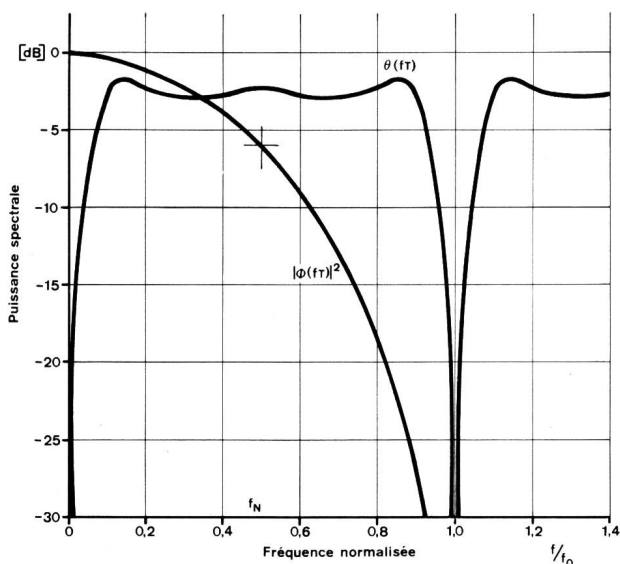
#### 33 Codes et formes d'impulsion

##### 331 Codes

L'on pourrait fort bien imaginer l'utilisation d'un code sans redondance pour la transmission; cela représente en effet l'utilisation la plus efficace et la plus homogène de la bande de fréquences disponible. Cependant, afin de pouvoir téléalimenter les amplificateurs intermédiaires, il est nécessaire de prévoir l'emploi d'un code sans contenu d'information près de la fréquence zéro. De plus, si un code avec une dizaine de niveaux est théoriquement opti-



**Fig. 3**  
**Diagramme de l'œil d'un code à 3 niveaux (4B-3T)**



**Fig. 4**  
**Spectres normalisés de l'impulsion en  $\sin^2 |\Phi(fT)|^2$  et du code 4B-3T  $\Theta(fT)$**

mal, les réalisations les plus usuelles font usage de codes à 2 ou 3 niveaux. Le plus utilisé est le code bipolaire avec sa version modifiée le HDB3. Pour des systèmes de transmission à débits plus élevés, une utilisation plus efficace de la bande de fréquences, donc une réduction de la redondance, s'impose. Différents codes de la famille 4B-3T (4 éléments binaires codés en 3 symboles ternaires) ou 6B-4T (6 éléments binaires codés en 4 symboles ternaires) semblent devoir s'imposer pour la transmission des débits supérieurs à 8 Mbit/s. La figure 4 représente le spectre normalisé  $\Theta(fT)$  du code 4B-3T, dont il n'existe aucune représentation mathématique simple. Pour des raisons de simplification dans les calculs, ce spectre sera admis constant et égal à 0,8.

### 332 Forme d'impulsion

Si les régénérateurs émettent des impulsions carrées de durée 50% (RZ), seule importe pour la détermination du rapport signal à bruit la forme d'impulsion régnant au point de décision; celle-ci est déterminée par le compromis entre la bande passante du bruit et les interférences entre symboles. Si l'on parle souvent d'impulsion gaussienne, la forme la plus utilisée est celle en  $\sin^2$ ; elle est définie de la façon suivante:

$$p(t) = \begin{cases} P_0 \cdot \sin^2 [\pi (t-T)/2T] & -T < t < T \\ 0 & |t| > T \end{cases}$$

La transformée de Fourier normalisée aura la forme suivante:

$$\frac{P(f)}{T \cdot P_0} = \frac{\sin 2\pi fT}{2\pi fT [1 - (2fT)^2]} = \Phi(fT)$$

**Tableau II. Systèmes de transmission numérique avec leur code, fréquence de répétition des symboles  $f_0$ , distance entre régénérateurs  $L$  et atténuation de la section de régénération  $A_c$ .**

Débit binaire	8 Mbit/s	34 Mbit/s	140 Mbit/s	565 Mbit/s	850 Mbit/s
Code	HDB 3	4B-3T	4B-3T	4B-3T	6B-4T
$f_0$ [Mbit/s]	8,448	25,776	104,448	212,0	282,7
$L$ (mini coaxial)	4 km	2 km	1 km	—	—
$L$ (petit coaxial)	—	4 km	2 km	1 km	—
$L$ (normal coaxial)	—	—	4,5 km	1,5 km	1,5 km
$A_c$ [dB]	80	70 ÷ 75	70 ÷ 75	50 ÷ 75	60

**Tableau I. Dimensions et constantes de propagation des paires coaxiales prévues pour la transmission numérique**

Paire	Minicoaxiale	Petit diamètre	Normale
Dimension [mm]	0,65/2,8	1,2/4,4	2,6/9,5
a. [N · MHz <sup>-1/2</sup> · km <sup>-1</sup> ]	1,10	0,596	0,265
b. [rad · MHz <sup>-1</sup> · km <sup>-1</sup> ]	25,7	22,7	21,6

Elle est représentée à la figure 4. Ce type d'impulsion sera utilisé pour tous les calculs et surtout les applications qui seront traitées dans cet article.

### 34 Rappel des principales caractéristiques des systèmes de transmission numériques normalisés ou envisagés

Trois types de câbles sont prévus pour la transmission numérique: la paire minicoaxiale, la paire coaxiale à petit diamètre et la paire coaxiale normale. Leurs dimensions et coefficients de propagation figurent dans le tableau I. Le tableau II résume les caractéristiques des différents systèmes numériques ainsi que leur implantation en fonction des différents câbles cités au tableau I.

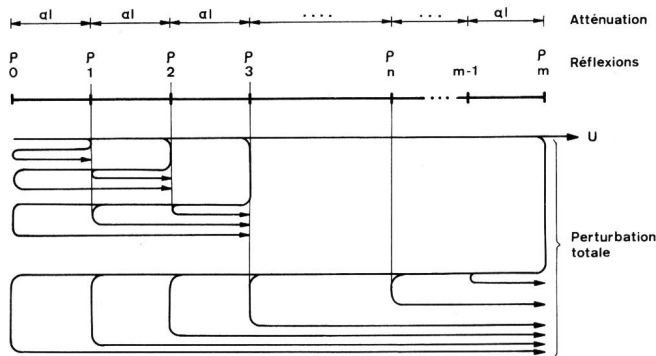
### 4 Calcul de l'influence des irrégularités d'impédance

#### 41 Modèle du système

Les irrégularités d'impédance du câble causent des réflexions internes (fig. 5) et, dès lors, changent la fonction de transfert de ce dernier. Cependant, comme ni la valeur ni la fréquence de ces irrégularités ne peuvent être définies de façon précise, ces défauts ne peuvent être compensés par l'égalisation du régénérateur. Le signal perturbateur dû aux irrégularités d'impédance qui est superposé au signal utile est supposé être du bruit à répartition gaussienne, qui, combiné avec le bruit thermique créé dans le préamplificateur, deviendra le bruit équivalent du système. L'hypothèse du bruit gaussien est réaliste du fait que la tension perturbatrice est créée par un grand nombre de petites irrégularités d'impédance réparties tout au long du câble, c'est-à-dire que l'interférence dépend d'un grand nombre d'éléments du signal.

#### 42 Méthode de calcul

Le câble homogène possède le coefficient de propagation  $\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$  où  $\alpha(f)$  et  $\beta(f)$  sont des fonctions réelles déterminant l'atténuation et la phase nominale du câble considéré.



**Fig. 5**  
**Réflexions dans un câble causées par des irrégularités d'impédance**

Le coefficient de réflexion d'un élément de câble de longueur  $dx$  est appelé  $\varrho(x)dx$  avec la définition suivante:

$$\varrho(x) dx = \frac{Z(x+dx) - Z(x)}{Z(x+dx) + Z(x)}$$

où  $Z(x)$  est l'impédance caractéristique au point  $x$ .

Pour un câble de longueur  $L$ , la fonction de réflexion  $G(f)$ , mesurable à l'extrémité, est la suivante:

$$G = \int_0^L \varrho(x) e^{-2\gamma x} dx$$

La fonction de transfert  $H$ , qui lui est associée, est:

$$H = e^{-\gamma L} \left[ 1 + \int_0^L \varrho(x) dx + \int \int_{x>y} \varrho(x) \cdot \varrho(y) e^{-2\gamma(x-y)} dx dy + f(\varrho^3) \right]$$

Le premier terme représente la fonction idéale de transfert et le deuxième terme représente une atténuation supplémentaire due aux irrégularités qu'il est possible d'égaliser dans les régénérateurs.

Le terme suivant,

$$\Delta H = \int \int_{x>y} \varrho(x) \varrho(y) e^{-2\gamma(x-y)} dx dy$$

est le plus intéressant puisqu'il dépend fortement de la fréquence et qu'il ne peut pas être compensé; il représente les réflexions entre deux irrégularités du câble.

Le dernier terme qui comprend les réflexions triples et d'ordre supérieur sera négligé du fait que seules des irrégularités de faible amplitude sont considérées.

Le pas suivant consiste en la mise en relation mathématique des fonctions  $G$  et  $\Delta H$ ; une relation universelle n'existe pas, elle peut cependant être définie en fonction

du type des irrégularités. Les résultats se trouvent dans la littérature [2].

La valeur efficace de la tension perturbatrice moyenne  $D$  superposée au signal utile est donnée par l'équation suivante décrite en référence [3]:

$$D^2 = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi(f)|^2 \cdot \Theta(fT) \cdot |\Delta H(f)|^2 \cdot df$$

La variation totale  $\Delta H$  est composée de variations élémentaires  $\Delta H_\mu$  dues à chaque type d'irrégularité. Par là même l'on peut calculer les tensions perturbatrices dues à chaque type d'irrégularité  $d_\mu$  où la relation suivante est valable:

$$D^2 \leq \sum_{\mu, \nu} d_\mu \cdot d_\nu$$

En d'autres termes, la puissance perturbatrice totale est inférieure ou égale à la somme des puissances perturbatrices dues à chaque type d'irrégularité et à leurs interactions.

La dernière opération consiste à mettre en relation la valeur efficace des tensions perturbatrices avec l'amplitude du signal utile  $S$  définie en 32, pour obtenir le rapport signal à bruit au point de décision des régénérateurs.

### 43 Influence des irrégularités aléatoires d'impédance

Selon l'article cité en référence [2] le rapport signal à bruit est le suivant:

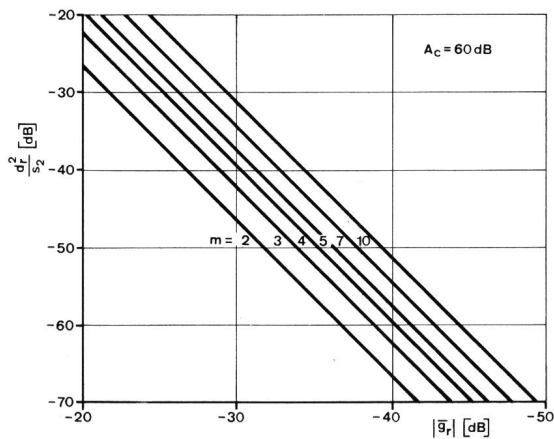
$$\frac{d_r^2}{S^2} = \frac{16}{\pi^2} T \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) |\Phi(fT)|^2 (4\alpha L - 1) |\overline{g_r}|^4 df$$

ou

$$\frac{d_r^2}{S^2} = \frac{16}{\pi^2} \frac{m^2 - 1}{3} |\overline{g_r}|^4 (2^{5/2} \cdot A \cdot I_1 - I_2)$$

où

- $T$  durée d'un symbole, inverse de la fréquence de répétition des symboles  $f_0$
- $\alpha$  partie réelle du coefficient de propagation du câble
- $L$  distance entre régénérateurs
- $m$  nombre de niveaux du code
- $|\overline{g_r}|$  valeur moyenne du coefficient de réflexion dû aux irrégularités aléatoires dans la bande de fréquences comprise entre 0 et  $f_0$
- $A$  atténuation de la section de régénération à la demi-fréquence de répétition des symboles ( $f_0/2$ ) exprimée en népers
- $I_1, I_2$  coefficients dépendant de la forme d'impulsion et du code utilisé. Avec les paramètres définis à la figure 4, ils deviennent  $I_1 = 0,38$  et  $I_2 = 0,60$



**Fig. 6**  
Perturbations dues aux irrégularités aléatoires dans le cas d'une section de régénération de  $A_c = 60$  dB en fonction du nombre  $m$  de niveaux du code (impulsions en  $\sin^2$ )

Les paramètres du système influençant le résultat sont l'atténuation de la section de régénération et le nombre de niveaux du code; par contre, la loi exacte de codage ainsi que la forme d'impulsion n'ont qu'un effet peu important.

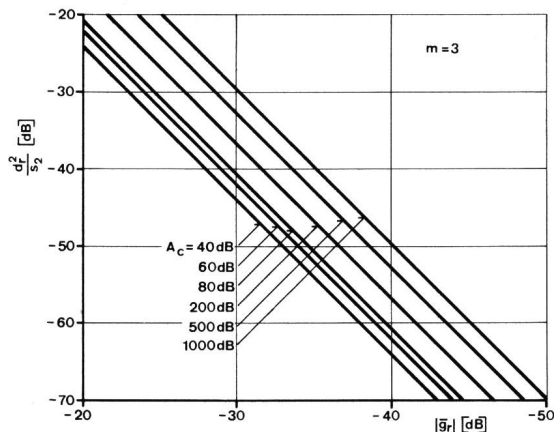
La figure 6 illustre l'équation ci-dessus pour une atténuation de la section de régénération de 60 dB en fonction du nombre de niveaux du code utilisé.

La figure 7 représente cette même équation dans le cas du code 4B-3T pour différentes atténuations  $A_c$  de la section de régénération. Les valeurs de  $A_c$  supérieures à 80 dB illustrent le cas de systèmes hybrides.

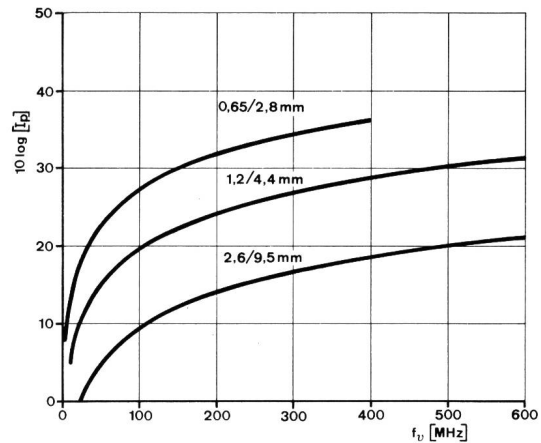
#### 44 Influence des irrégularités périodiques d'impédance

Selon la référence [2], le rapport signal à bruit est:

$$\frac{d_p^2}{S^2} = T \sum_v \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) |\Phi(fT)|^2 |g_v(f)|^4 \cdot |2\gamma L - j2\pi \frac{L}{a} v - 1|^2 df$$



**Fig. 7**  
Perturbations dues aux irrégularités aléatoires dans le cas du code 4B-3T et impulsions en  $\sin^2$  en fonction de l'atténuation de la section de régénération  $A_c$



**Fig. 8**  
Fonction  $I_p(f_v, L = 1 \text{ km})$

ou, du fait que la fonction  $g_v$  n'est définie que dans une bande de fréquences très petite proche de  $f_v$ ,

$$\frac{d_p^2}{S^2} = T \cdot \sum_v \Theta(f_v T) |\Phi(f_v T)|^2 \cdot |g_v|_{\max}^4 \cdot I_p(f_v; L)$$

où

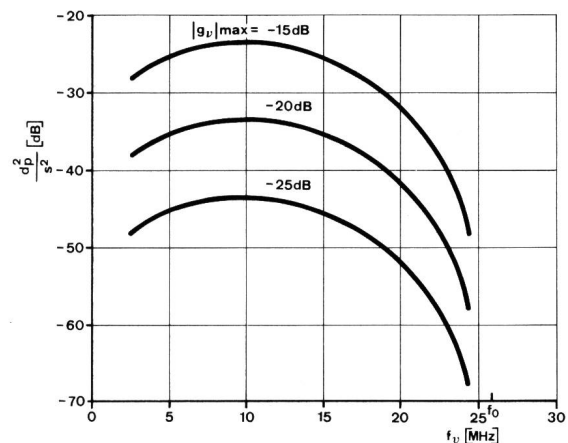
$g_v(f)$  fonction de réflexion mesurée en régime continu définie dans une bande de fréquences proche de  $f_v$

$a$  distance entre deux irrégularités périodiques

$|g_v|_{\max}$  valeur maximale du coefficient de réflexion mesuré à la fréquence  $f_v$

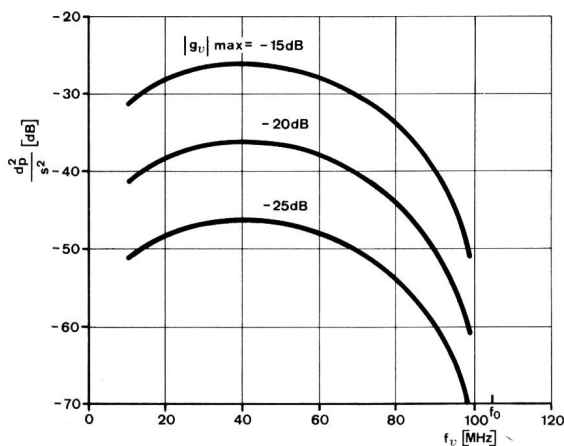
$I_p$  fonction dépendant du coefficient de propagation du câble, de la fréquence  $f$  et de la distance entre régénérateurs. Cette fonction est représentée graphiquement à la figure 8 pour les trois types de câble coaxial et pour une longueur  $L$  de 1 km. La valeur de la fonction  $I_p$  est, en outre, en première approximation, proportionnelle au carré de la longueur  $L$ .

Les figures 9 à 16 illustrent graphiquement l'influence d'une seule pointe de la fonction de réflexion sur la transmission des différents systèmes définis au tableau II sur

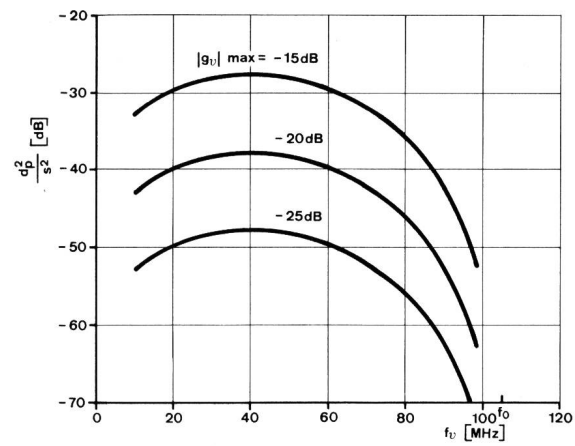


**Fig. 9**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 0,65/2,8 mm; Débit 34 Mbit/s; Code 4B-3T





**Fig. 10**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 0,65/2,8 mm; Débit 140 Mbit/s; Code 4B-3T



**Fig. 12**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 1,2/4,4 mm; Débit 140 Mbit/s; Code 4B-3T

les paires coaxiales présentées au tableau I. Lors de la présence de plusieurs pointes, les puissances respectives de chaque perturbation s'additionnent. Le seul paramètre commun à toutes les figures est la forme d'impulsion en  $\sin^2$  dont le spectre est représenté à la figure 4.

#### 45 Influence des irrégularités d'impédance des épissures et terminaisons

Selon l'article cité en référence [2], le rapport signal à bruit est le suivant:

$$\frac{d_c^2}{S^2} \leq T \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) |\Phi(fT)|^2 \cdot \left[ |r_o|^2 e^{-2\alpha L} + 2|r_o r_1| e^{-2\alpha l} + |r_1|^2 \left(\frac{L}{l} - 1\right) e^{-2\alpha l} \right]^2 df$$

où

$r_o$  coefficient de réflexion des terminaisons (régénérateurs)

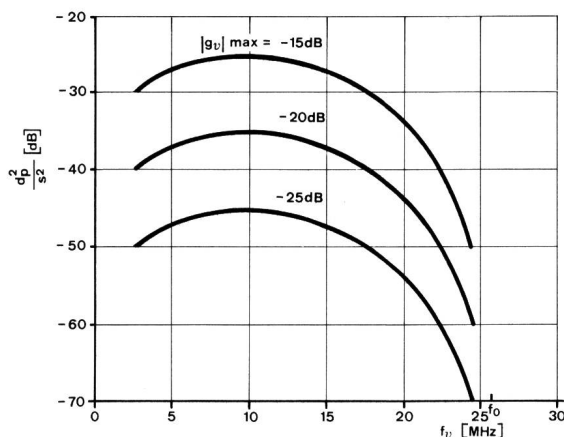
$r_1$  coefficient de réflexion des épissures (valeur corrigée)  
 $l$  longueur de fabrication du câble (distance entre épissures)

Cette fonction est représentée graphiquement aux figures 17, 18, 19 dans trois cas différents. Les paramètres communs aux trois cas sont le code (4B-3T), la forme d'impulsion ( $\sin^2$ ), la longueur de fabrication du câble ( $l = 250$  m) et l'atténuation de la section de régénération à la demi-fréquence de répétition des symboles  $f_{o/2}$  ( $A_c = 80$  dB). Le seul paramètre indépendant est la distance séparant deux régénérateurs soit 4 km pour la figure 17, 2 km pour la figure 18 et 1 km pour la figure 19.

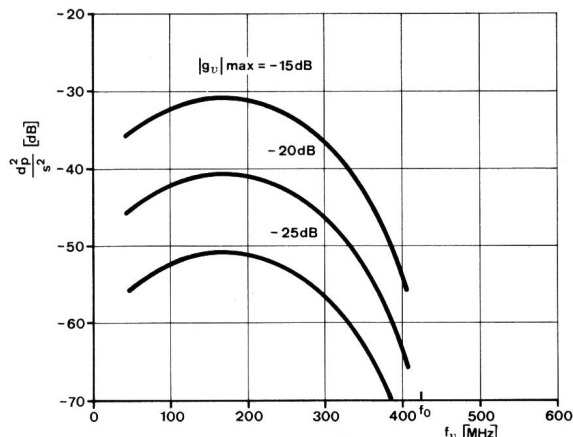
#### 46 Influence de l'interaction de deux types d'irrégularités

##### 461 Influence de l'interaction entre irrégularités périodiques et aléatoires

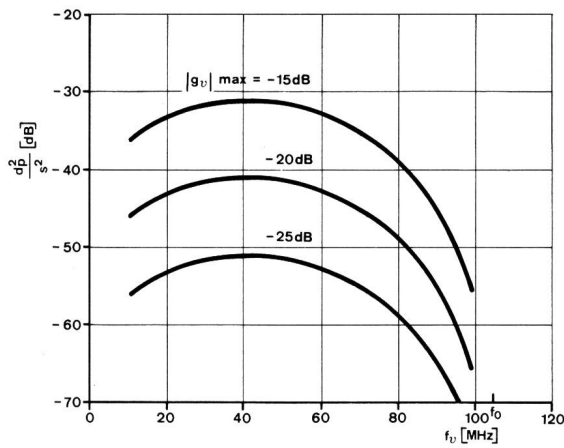
Les deux types d'irrégularité ne sont pas définis pour des fréquences identiques, leur influence peut donc être négligée.



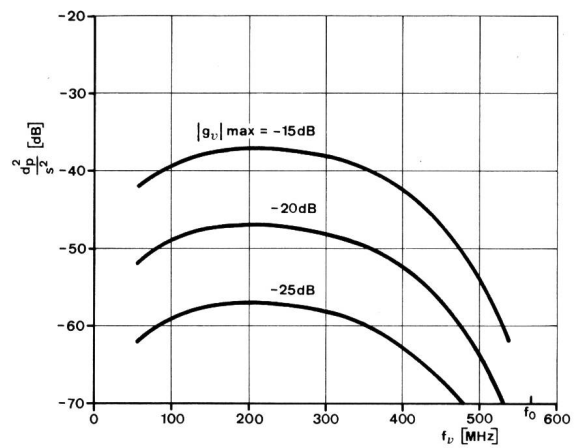
**Fig. 11**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 1,2/4,4 mm; Débit 34 Mbit/s; Code 4B-3T



**Fig. 13**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 1,2/4,4 mm; Débit 565 Mbit/s; Code 4B-3T



**Fig. 14**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 2,6/9,5 mm; Débit 140 Mbit/s; Code 4B-3T



**Fig. 16**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 2,6/9,5 mm; Débit 850 Mbit/s; Code 6B-4T

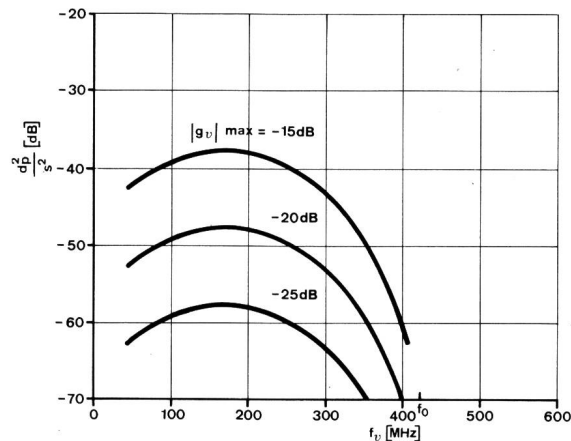
#### 462 Influence de l'interaction entre les irrégularités aléatoires et les épissures et terminaisons

Le rapport signal à bruit causé par ce type d'irrégularité est [2]:

$$\frac{d^2_{rc}}{S^2} = \frac{8}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) |\Phi(fT)|^2 \cdot |\overline{g_r}|^2 \left[ |r_o|^2 + \left(\frac{L}{l} - 1\right) \cdot |r_1|^2 \right] d(fT)$$

Cette fonction indépendante de la fréquence de répétition des symboles est représentée à la figure 20 pour le cas du code 4B-3T et de l'impulsion en  $\sin^2$ , avec comme paramètre

$$|r_o|^2 + \left(\frac{L}{l} - 1\right) |r_1|^2$$



**Fig. 15**  
Perturbations dues aux irrégularités périodiques dans le cas d'une pointe de la fonction de réflexion de valeur maximale  $|g_v|_{\max}$  à la fréquence  $f_v$   
Câble 2,6/9,5 mm; Débit 565 Mbit/s; Code 4B-3T

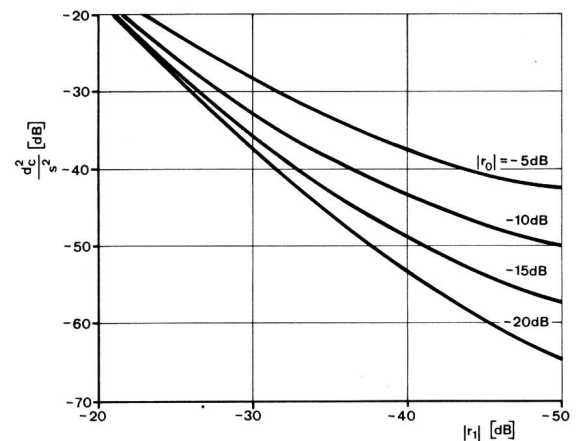
#### 463 Influence de l'interaction entre les irrégularités périodiques et les épissures et terminaisons

Le rapport signal à bruit causé par ce type d'irrégularité est [2]:

$$\frac{d^2_{pc}}{S^2} = 4T \cdot \left[ |r_o| + \left(\frac{L}{l} - 1\right) |r_1| \right]^2 \sum_v \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) |\Phi(fT)|^2 |g_v(f)|^2 df$$

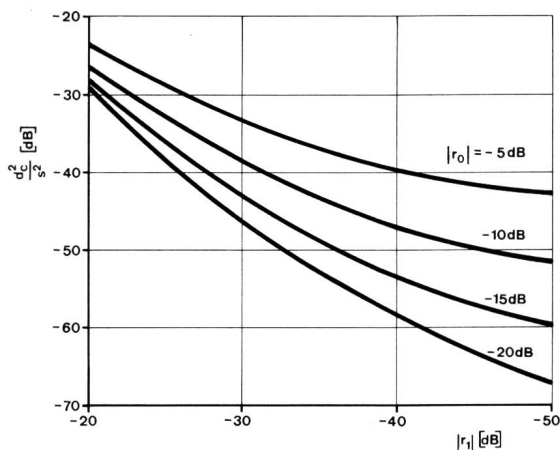
ou

$$\frac{d^2_{pc}}{S^2} = 8T \left[ |r_o| + \left(\frac{L}{l} - 1\right) |r_1| \right]^2 \sum_v \Theta(f_v T) |\Phi(f_v T)|^2 \cdot |g_v|_{\max}^2 \cdot J(f_v)$$



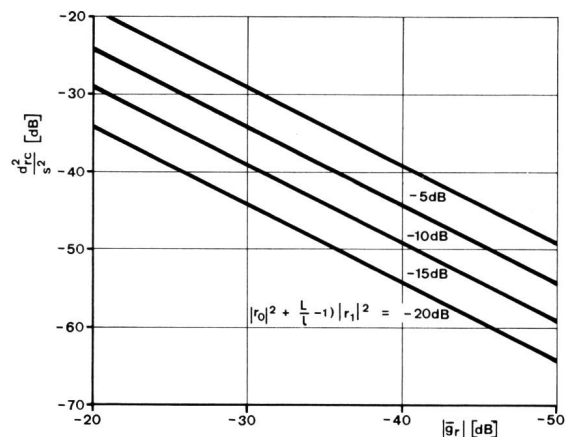
**Fig. 17**  
Perturbations dues aux irrégularités d'impédance des épissures ( $r_1$ ) et des terminaisons ( $r_o$ )  
Code 4B-3T; Impulsion  $\sin^2$ ;  $L = 4$  km;  $l = 250$  m;  $A_c = 80$  dB





**Fig. 18**  
Perturbations dues aux irrégularités d'impédance des épissures et terminaisons

Code 4B-3T; Impulsion  $\sin^2$ ;  $L = 2$  km;  $l = 250$  m;  $A_c = 80$  dB



**Fig. 20**  
Perturbations dues à l'interaction entre les irrégularités aléatoires  $|g_r|$  et les épissures  $r_1$  et terminaisons  $r_0$

Code 4B-3T; Impulsion  $\sin^2$

où

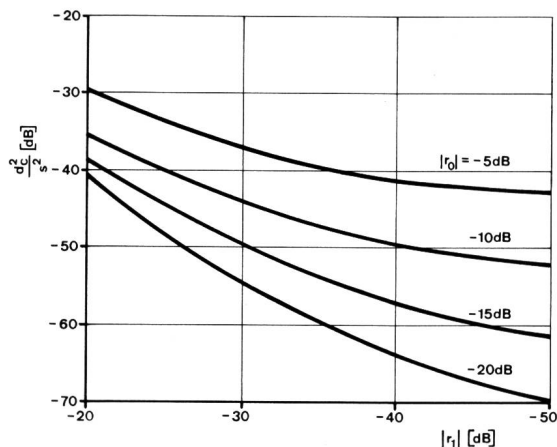
$J(f_v)$  est une fonction dépendant de la fréquence et du type de câble; elle est représentée numériquement à la figure 21.

Les figures 22, 23 et 24 représentent chacune une application pour les trois types de câble considérés, dans le cas d'une seule pointe de la fonction de réflexion  $|g_v|$ ; le terme  $\left[ |r_0| + \left( \frac{L}{l} - 1 \right) |r_1| \right]$  a été choisi constant et égal à  $-10$  dB; la formule ci-dessus indique clairement comment modifier les résultats si ce terme devait prendre une autre valeur.

#### 47 Influence d'une importante irrégularité discrète

Une seule irrégularité discrète ne peut produire un écho se propageant dans le sens de la transmission que par interaction avec une autre irrégularité. Tirés de la référence [2], les rapports signal à bruit causés par les trois types d'interactions possibles sont respectivement:

$$\frac{d^2_{dr}}{S^2} = \frac{8}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) \cdot |\Phi(fT)|^2 \cdot |\bar{g}_r|^2 \cdot |r_d|^2 \cdot d(fT)$$



**Fig. 19**  
Perturbations dues aux irrégularités d'impédance des épissures et terminaisons

Code 4B-3T; Impulsion  $\sin^2$ ;  $L = 1$  km;  $l = 250$  m;  $A_c = 80$  dB

$$\frac{d^2_{dp}}{S^2} = 8T |r_d|^2 \sum_v \Theta(f_v T) \cdot |\Phi(f_v T)|^2 \cdot |g_v|_{\max}^2 \cdot J(f_v)$$

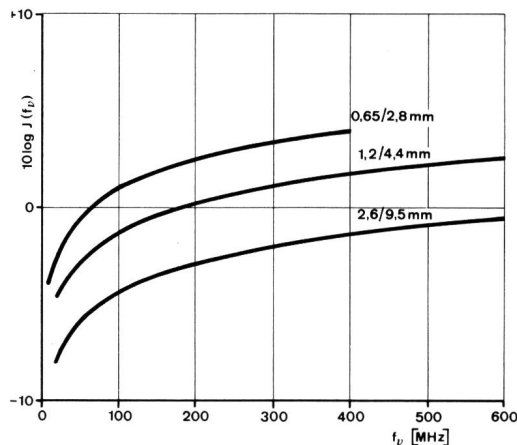
$$\frac{d^2_{dc}}{S^2} = T \int_{-\infty}^{+\infty} \Theta(fT) \cdot |\Phi(fT)|^2 \cdot |r_d \cdot r_\mu|^2 \cdot e^{-4\alpha \Delta l} df$$

où

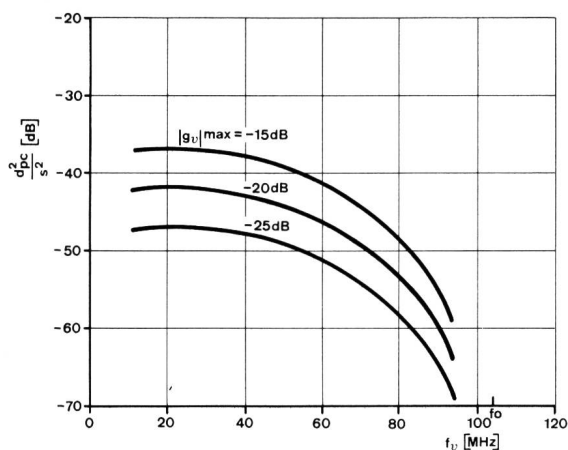
- $d_{dr}$  distorsion de l'interaction entre une irrégularité discrète et les irrégularités aléatoires
- $d_{dp}$  distorsion de l'interaction entre une irrégularité discrète et les irrégularités périodiques
- $d_{dc}$  distorsion de l'interaction entre deux irrégularités discrètes
- $r_d$  coefficient de réflexion de l'irrégularité discrète
- $r_\mu$  coefficient de réflexion de l'irrégularité discrète la plus proche de  $r_d$
- $\Delta l$  longueur de câble séparant  $r_d$  de  $r_\mu$

La première formule est identique à la formule du paragraphe 462 si l'on admet la relation suivante:

$$|r_d|^2 = |r_0|^2 + \left( \frac{L}{l} - 1 \right) \cdot |r_1|^2$$



**Fig. 21**  
Fonction  $J(f_v)$  pour les différents types de câble



**Fig. 22**  
Perturbations dues à l'interaction entre les irrégularités périodiques (dans le cas d'une seule pointe  $|g_v|_{\max}$ ) et les épissures et terminaisons

Câble 0,65/2,8 mm; Débit 140 Mbit/s; Code 4B-3T Impulsion  $\sin^2$

Dès lors, les résultats de la figure 20 peuvent être appliqués aisément pour déterminer la valeur de cette perturbation.

La deuxième formule est identique à la formule du paragraphe 463 si l'on admet la relation suivante:

$$|r_d|^2 = \left[ |r_o| + \left( \frac{L}{l} - 1 \right) |r_1| \right]^2$$

Dès lors, les figures 22, 23, et 24 fournissent les informations attendues.

La figure 25 illustre graphiquement la troisième équation pour le code 4B-3T, la forme d'impulsion en  $\sin^2$  et une longueur nulle séparant les deux irrégularités, ce qui représente le cas le plus défavorable.

## 5 Application des résultats à quelques exemples

Quelques exemples devraient permettre, d'une part, d'illustrer l'utilisation des différentes figures du paragraphe 4 et, d'autre part, de situer la qualité des câbles en fonction d'une utilisation future pour la transmission de signaux numériques.

Le tableau III indique les valeurs minimales de régularité d'impédance mesurées sur différents câbles en voie d'installation. La notion d'irrégularité discrète se rapporte au saut d'impédance situé à l'épissure entre le câble souterrain et le câble de raccord utilisé pour la liaison avec les régénérateurs.

**Tableau III. Valeurs typiques des irrégularités d'impédance des paires coaxiales**

Irrégularités d'impédance			0,65/ 2,8 mm	1,2/ 4,4 mm	2,6 9,5 mm
Aléatoires	$g_r$	[dB]	-32	-35	-40
	$g_1$	[dB]	-20	-20	-20
Périodiques	$f_1$	[MHz]	100	27,5	150
	$g_2$	[dB]		-20	-20
	$f_2$	[MHz]		55	300
	$g_3$	[dB]		-20	-20
	$f_3$	[MHz]		82,5	450
	$g_4$	[dB]			-20
Epissures	$r_1$	[dB]	-35	-40	-40
Terminaisons	$r_o$	[dB]	-12	-12	-12
Discrètes	$r_d$	[dB]	-30	-35	-37

**Tableau IV. Quelques exemples de rapports signal à bruit au point de décision des régénérateurs causés par les irrégularités d'impédance**

Câble	0,65/2,8 mm	1,2/4,4 mm	2,6/9,5 mm
Débit	34 Mbit/s	140 Mbit/s	850 Mbit/s
Code			
$d_r/S$ [dB]	-45,5	-51,5	-62
$d_p/S$ [dB]	-	-35,5	-44,5
$d_c/S$ [dB]	-45,5	-49,5	-51
$d_{re}/S$ [dB]	-38	-41	-46
$d_{pc}/S$ [dB]	-	-43	-50,5
$d_{dr}/S$ [dB]	-56	-64	-71
$d_{dp}/S$ [dB]	-	-66	-75,5
$d_{dc}/S$ [dB]	-36	-41	-43
$D/S \leq$	-33,3	-33,0	-38,9

Le tableau IV résume les valeurs des différentes perturbations calculées pour quelques systèmes choisis en fonction de leur grande probabilité de réalisation.

Dans le cas de la paire minicoaxiale, la perturbation la plus importante est produite par les épissures, les impédances de terminaison et par la mauvaise adaptation d'impédance du câble de liaison à celle du câble souterrain.

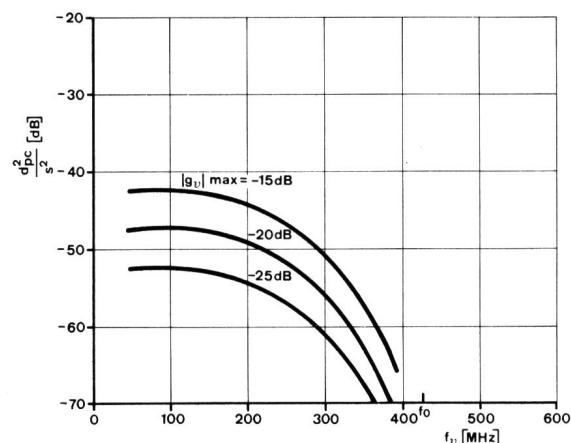
La perturbation déterminante de la paire coaxiale à petit diamètre est produite par les irrégularités périodiques d'impédance situées en fréquence aux multiples de 27 MHz (effet de 5 mètres de certains câbles fabriqués en Suisse).

Pour la paire coaxiale normale, les perturbations principales sont dues au câble de liaison et aux irrégularités périodiques du câble souterrain.

## 6 Perturbations maximales admissibles

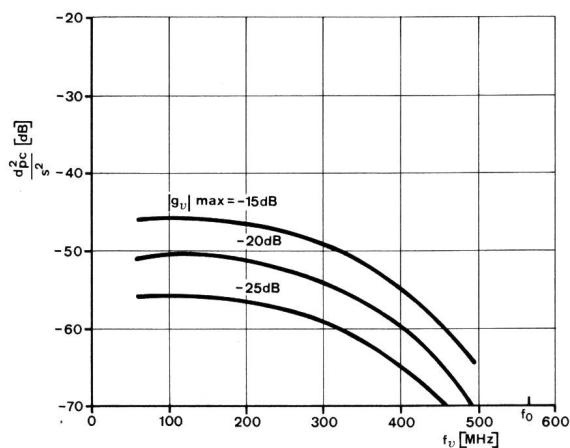
Avec les hypothèses émises, la répartition en amplitude de la tension de trainage a un caractère quasi gaussien. Dans des conditions normales d'exploitation, le bruit des irrégularités d'impédance du câble doit être inférieur au bruit thermique, ce qui permet une certaine dispersion.

Les systèmes discutés sont planifiés pour des taux d'erreur de l'ordre de grandeur de  $10^{-10}$ ... $10^{-12}$  par section de régénération. Cela présuppose un rapport signal à bruit tel qu'il a été défini dans cet article supérieur à



**Fig. 23**  
Perturbations dues à l'interaction entre les irrégularités périodiques (dans le cas d'une seule pointe) et les épissures et terminaisons

Câble 1,2/4,4 mm; Débit 565 Mbit/s; Code 4B-3T Impulsion  $\sin^2$



**Fig. 24**  
Perturbations dues à l'interaction entre les irrégularités périodiques (dans le cas d'une seule pointe) et les épissures et terminaisons

Câble 2,6/9,5 mm; Débit 850 Mbit/s; Code 6B-4T Impulsion  $\sin^2$

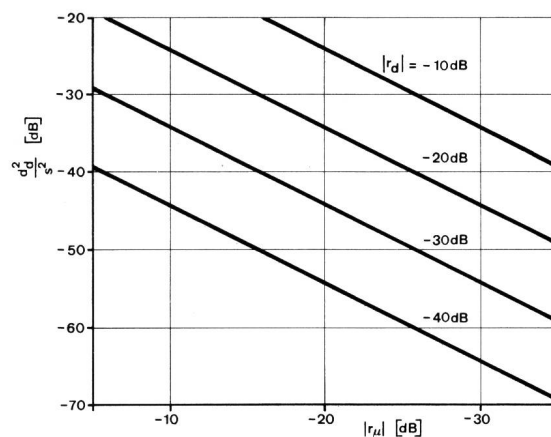
17 dB. Pour tenir compte de toutes les imprécisions et imperfections dans la réalisation des régénérateurs, tant dans la partie analogique que numérique, l'expérience a prouvé qu'une réserve de 4 dB environ devait être ajoutée à la valeur théorique pour des régénérateurs à 2 Mbit/s; cette réserve doit être portée à 6 dB pour les régénérateurs à 8 Mbit/s; elle doit être plus importante encore pour les débits supérieurs; il semble qu'une valeur de 10 dB pour les débits moyens (34 et 140 Mbit/s) et de 15 dB pour les débits élevés (565 et 850 Mbit/s) représente un minimum absolu. Cela suppose que la somme du bruit thermique du régénérateur et du bruit des irrégularités d'impédance soit inférieure de 27...32 dB au signal utile (voir [4]).

Le bruit du régénérateur doit en principe être l'élément perturbateur dominant; il y a donc lieu de prévoir que la puissance du bruit du câble soit, au minimum, 6 dB inférieure à celle de la somme résultante.

En conclusion, il apparaît que le rapport du bruit des irrégularités d'impédance du câble au signal utile tel qu'il a été défini doit être dans tous les cas inférieur à -33 dB pour les débits binaires moyens et à -38 dB pour les débits binaires élevés.

Les résultats présentés au tableau IV indiquent donc clairement que les irrégularités périodiques d'impédance des paires coaxiales à petit diamètre et des paires coaxiales normales provoquent des perturbations proches de la limite requise pour un fonctionnement correct des systèmes numériques envisagés.

D'autre part, l'impédance du câble de raccord utilisé avec les paires coaxiales doit être maintenue dans une tolérance relativement faible.



**Fig. 25**  
Perturbations dues à deux irrégularités d'impédance discrètes et proches  
Code 4B-3T; Impulsion  $\sin^2$   $\Delta l \approx 0$

## 7 Conclusion

L'évaluation de l'influence des irrégularités d'impédance sur la transmission numérique, reprise en grande partie d'études antérieures, a été appliquée pour des paramètres choisis tels que le code, la forme d'impulsion et le débit binaire, aux différents types de câbles coaxiaux utilisés par l'Entreprise des PTT suisses. Elle est complétée par une importante représentation graphique des résultats qui permet une estimation très rapide de la valeur des tensions perturbatrices causées par chaque type d'irrégularité d'impédance.

Les expériences faites avec des systèmes numériques à faible débit et l'étude de systèmes à haut débit ont permis de déterminer l'immunité au bruit des amplificateurs régénérateurs.

Les exigences de régularité d'impédance qui en résultent sont relativement larges dans le cas de systèmes entièrement régénératifs qui n'utilisent que des codes à 2 ou 3 niveaux; ces résultats qui confirment les valeurs proposées dans le cadre des études du CCITT appellent cependant encore une vérification expérimentale.

## Bibliographie

- [1] Still L.H., Stephens W.J.B. and Bundy R.C.H. The 60 MHz FDM Transmission System: Cable Testing. The Post Office Electrical Engineers Journal, October 1973.
- [2] Johansson U. Reflexion Phenomena in Coaxial Digital Line Links. Ericsson Technics (1974) No. 3.
- [3] Peltier Y. et Boulvin J. Influence des irrégularités d'impédance sur la transmission par câble des systèmes numériques. Câbles et Transmission, janvier 1974, no 1.
- [4] Chan D. The Effects of Cable Impedance Irregularities on Baseband Digital Coaxial Systems. IEEE Transactions on Communications, October 1974, No. 10.