RAPPORT 1049-1*

RÉDUCTION DES PRODUITS D'INTERMODULATION PASSIVE

(Question 86/8)

(1986-1990)

1. Introduction

Le présent Rapport traite de l'intermodulation passive et met l'accent sur l'importance d'une étude approfondie des mécanismes qui s'y rapportent et qui sont applicables à la conception des satellites et à l'exploitation des systèmes qui provoquent ces effets d'intermodulation.

2. Historique

Les produits d'intermodulation passive (PIP) ont été observés à l'origine dans les stations radioélectriques à B.dam (HF) dont les signaux émis de niveau élevé produisaient une intermodulation qui provoquait des brouillages dans les récepteurs de radiocommunication. On s'est aperçu que l'intermodulation était causée par l'oxydation des boulons ferreux utilisés pour fixer l'assemblage des antennes d'émission (effet du boulon rouillé). Plus tard, on a observé l'apparition du phénomène dans des satellites maritimes fonctionnant dans la bande des 1,5 GHz où se rencontraient des conditions électriques semblables à celles des stations radioélectriques à B.dam, c'est-à-dire des signaux émis à niveau élevé et des signaux reçus à niveau très faible.

Il semble qu'une condition nécessaire pour la production de produits d'intermodulation passive soit qu'il existe une différence de l'ordre de 130 dB entre le niveau des signaux émis et celui des signaux reçus. Ces conditions se retrouvent dans les alimentations des antennes du service maritime par satellite, aussi bien dans les satellites que dans les stations côtières. Toutefois, on a remarqué que l'intermodulation passive ne se produisait que dans les satellites et l'observation attentive des différences de réalisation entre ces deux secteurs peut permettre de tirer des conclusions au sujet de la cause fondamentale de l'intermodulation passive.

3. Généralités

L'intermodulation est un phénomène qui apparaît dans les dispositifs non linéaires. Si deux signaux ou plus sont émis par l'intermédiaire de tels dispositifs, d'autres signaux se produisent dont les fréquences et les niveaux sont fonction des fréquences et des niveaux des signaux utiles à l'entrée du dispositif.

Les produits d'intermodulation provoquent généralement des brouillages dans le canal adjacent et dans le cas de système à porteuses multiples, des brouillages dans toute la largeur de la bande du canal radioélectrique.

Le niveau des produits d'intermodulation se trouve déterminé non seulement par la caractéristique de transfert en tension du dispositif, mais aussi par la largeur de bande de sa réponse. Ainsi, dans le cas de dispositifs actifs pour lesquels la largeur de bande est limitée, le niveau des produits d'intermodulation dont les fréquences sont situées hors de la largeur de bande du dispositif est généralement négligeable. Dans le cas de dispositifs passifs (par exemple, guide d'ondes) la limitation de la largeur de bande est beaucoup moins importante et les produits peuvent également prendre naissance après transmission des signaux utiles par l'intermédiaire de filtres destinés à supprimer les produits d'intermodulation et/ou à réduire les rayonnements non essentiels ou la puissance de bruit aux fréquences de réception. Dans le cas des systèmes ayant des gains supérieurs à 150 dB environ, il est possible que prennent naissance, à la sortie, des produits d'intermodulation passive qui aient un niveau suffisant pour rendre le système inutilisable en raison du brouillage causé au signal d'entrée du système.

---

* Le présent Rapport doit être porté à l'attention des Commissions d'études 1 et 4.

4. Production de produits d'intermodulation passive (PIP)

On pense que les mécanismes prédominants dans la production PIP sont les suivants:

- effets semi-conducteurs des couches d'oxyde superficielles,
- microdécharges causées par des défauts métalliques,
- non-linéarités associées à la carbonisation et à l'oxydation des surfaces métalliques, à la déposition d'autres agents de contamination, et à des connexions desserrées ou souillées.
- non-linéarité de matériaux ferro-magnétiques, y compris l'acier inoxydable, les revêtements de nickel et tous les composants en ferrite.

Il apparaît également beaucoup plus probable que les PIP se produisent dans des milieux où règne le vide que dans des conditions de pression ambiante.

En pratique, la non-linéarité des dispositifs passifs qui provoque la production de PIP résulte de l'addition d'un grand nombre de microcourants différents. Microscopiquement, toutes les surfaces sont très irrégulières, bien plus, elles sont revêtues d'une couche d'oxyde de plusieurs angströms d'épaisseur. Là où des contacts se produisent entre surfaces, la couche d'oxyde modifie l'impédance au point de contact. Les régions oxydées et non oxydées sous vide donnent naissance à un courant de déplacement et l'intensité relative de ce courant par rapport au courant de conduction détermine la non-linéarité de la jonction.

Un mémoire de Hoebar, Pollard et Nicholas [1986] contient une étude complète de la production des PIP dans les satellites de télécommunications à grande puissance. S'agissant des satellites du service mobile maritime, cette étude traite des fondements de la conception, des causes des PIP et des mesures à prendre pour les atténuer.

5. Etudes expérimentales

5.1 *Etudes effectuées par Nuding*

E. Nuding de AEG-Telefunken a effectué [Nuding, 1974] une étude expérimentale de PIP produits dans les guides d'ondes utilisant des puissances RF allant jusqu'à 1000 W dans la bande des 2 GHz. Pour des puissances comprises dans la gamme 0-500 W, on note que les amplitudes des produits d'intermodulation du 3e ordre varient comme la 3e puissance de la puissance RF appliquée, c'est-à-dire:

$$Nk = \alpha N^3 \qquad (1)$$

où:

Nk : amplitude d'un produit d'intermodulation du 3e ordre

N : puissance du signal RF (même niveau pour les deux signaux d'essai)

α : constante qui dépend du degré de non-linéarité du dispositif

Les résultats expérimentaux de Nuding indiquent que pour deux porteuses RF, N_1 et N_2, de puissance égale allant jusqu'à 500 W, les niveaux de puissance des signaux PIP suivent la loi de l'expression (1) c'est-à-dire: αN^3. Les PIP des troisième, cinquième et septième ordres, ($k3$, $k5$ et $k7$) varient en amplitude de la même manière par rapport à la puissance de la porteuse. Egalement, pour un niveau de porteuse RF fixé, la différence d'amplitude entre le 3e et le 5e ordre est approximativement égale à la différence entre le 5e ordre et le 7e ordre, c'est-à-dire $\alpha = \beta$ (voir la Fig. 1).

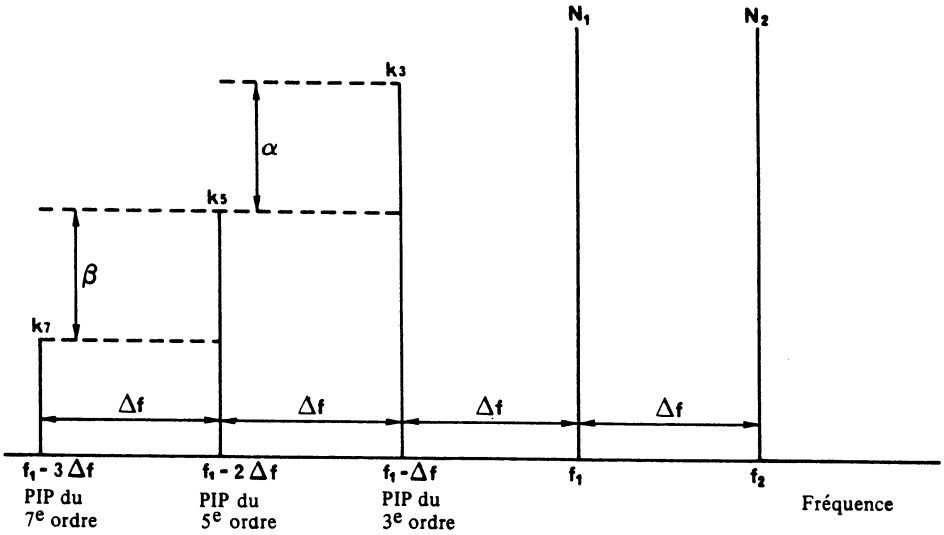

FIGURE 1 – *Niveaux des produits d'intermodulation passive*

Le Tableau I donne quelques valeurs relevées dans l'article de Nuding ou bien extrapolées à partir de ses résultats.

TABLEAU I

Puissance de porteuse *N* (W)	Variation moyenne de puissance par ordre (dB)	Niveau de puissance PIP (dBm)		
		3e ordre	5e ordre	7e ordre
200	34 (1)	−60	−94	−128 (1)
250	33 (1)	−56	−90	−122 (1)
1000	20	−45	−66	−86

(1) Valeurs obtenues par extrapolation.

5.2 *Etudes effectuées par Cox*

Des travaux expérimentaux effectués antérieurement par Cox [1970] utilisent une puissance de 1 W et des fréquences de l'ordre de 6,0 GHz. Toutefois, en raison de la faible puissance employée, les résultats peuvent ne pas être directement transposables à ce qu'il devrait se produire à des puissances plus élevées. A titre d'exemple, on a trouvé qu'une bride mal ajustée de guide d'ondes pouvait donner naissance, pour une puissance de porteuse de 1 W, à des PIP du 3e ordre aussi élevés que −25 dBm et à des PIP du 5e ordre aussi élevés que −50 dBm. Des guides d'ondes souples donnent naissance à des produits du 3e ordre dans la gamme de −55 à −110 dBm.

Une des conclusions de l'article de Cox est que la production de PIP est essentiellement indépendante des modifications de l'espacement des fréquences de l'émetteur. En s'appuyant sur cette base, il est probable qu'on puisse extrapoler ces résultats aux autres bandes de fréquences.

Une autre observation de Cox indiquait que des surfaces métal/métal mal ajustées, exposées à des champs RF, telles que des raccords de guide d'ondes ou des vis de réglage produisaient des niveaux de PIP fort élevés, mais sujets à des variations erratiques. Par exemple, pour un circulateur, la mesure du PIP du 3e ordre donnait une valeur de −65 dBm avec des variations allant jusqu'à 20 dBm. Le serrage des vis qui fixaient le circulateur à l'ensemble réduisait le même niveau de PIP à un palier de −90 dBm, soit une réduction de 25 dB.

5.3 *Etudes effectuées par Chapman et autres*

Chapman et ses collègues [Chapman et autres, 1976] ont mesuré un PIP du 3e ordre à −80 dBm avec deux signaux d'essai de puissance égale et de fréquences 7,9 et 8,05 GHz, la puissance totale étant de 5 kW. Ils ont conclu que le PIP du 3e ordre variait d'environ 3 dB pour chaque variation de 1 dB de la puissance totale. Tenant compte des PIP d'ordres plus élevés, ils ont constaté que le niveau diminuait de 10 à 20 dB par ordre, pour un ensemble d'alimentation type de 1000 W de puissance totale appliquée. Ils ont recommandé d'éliminer les vis de réglage pour supprimer la cause la plus importante de production de PIP.

6. Variation des PIP suivant leur ordre croissant

Les conclusions de Nuding au sujet de la variation des niveaux de PIP avec l'augmentation de leur ordre donnent des résultats extrêmement faibles pour le 13e ordre et les ordres au-dessus. Nuding était parvenu à la conclusion que la diminution de la puissance PIP par ordre impair était de −34 dBm; cependant, d'autres auteurs ont cité des valeurs plus faibles; par exemple Roorsey donne une valeur de −8 dB par ordre impair [Roorsey et autres, 1973] et d'autres donnent une valeur de −10 dB environ par ordre impair. En outre, le niveau de puissance du 3e ordre obtenu par d'autres chercheurs est nettement inférieur à celui obtenu par Nuding. Le Tableau II donne une comparaison entre différentes valeurs de niveau PIP du 3e ordre et le taux de diminution par ordre impair.

Il est probable qu'entre le 3e ordre et le 5e ordre et qu'entre le 5e ordre et le 7e ordre le niveau de puissance de PIP diminue d'environ 34 dB mais que, pour des ordres supérieurs, la variation soit moins importante car intervient alors l'effet de différents mécanismes. Les résultats de Nuding montrent que la variation est plus faible lorsque la puissance de la porteuse croît.

TABLEAU II

	Auteurs		
	Nuding [1974]	Roorsey et autres [1973]	Chapman et autres [1976]
Niveau de puissance PIP du 3e ordre (dBm)	−60	−85	−82
Variation par accroissement du numéro d'ordre impair (dB)	−34	−8	−10

7. Minimalisation des produits d'intermodulation passive (PIP)

La minimalisation des PIP devra faire partie des principes généraux de conception de satellite, et tout d'abord il conviendra de choisir avec soin les matériaux utilisés pour les guides d'ondes et les filtres, les connecteurs, les câbles, etc., afin de réduire les PIP à un niveau acceptable. Ceux qui mettent au point les composants et les systèmes ainsi que le personnel de montage et le personnel chargé des essais devraient également faire un effort concerté pour résoudre ce problème.

Il existe un certain nombre de lignes directrices générales pour la conception, qui, si elles étaient convenablement employées, pourraient aider à minimiser le problème. Ces lignes directrices sont les suivantes:

- on devra choisir, si possible, les fréquences de la liaison montante de façon à s'assurer que les PIP provenant de l'émetteur du satellite soient situés à l'extérieur des bandes des porteuses du récepteur du satellite;
- on devra optimiser la conception du satellite de façon à réduire les sources d'intermodulation passive (dispositifs passifs non linéaires) à un minimum. Par exemple, pour les signaux émis et les signaux reçus on devrait utiliser, si possible, des trajets entièrement différents, des composants électroniques séparés et des antennes d'émission et de réception séparées;
- on devra réduire à un minimum l'utilisation de circuits résonants à facteur de qualité Q élevé. Par exemple, on pourrait utiliser des réalisations de filtres hybrides comme filtre coupe-bande au lieu de filtres passe-bande;
- on devra minimiser l'utilisation de contacts mécaniques. En particulier, les connecteurs ne devront pas comporter de contacts métalliques et on évitera l'utilisation de contacts glissants;
- dans la mesure du possible on évitera l'emploi de matériaux ferromagnétiques dans le système ou dans son voisinage. Si ces matériaux sont utilisés, ils devront être revêtus de métaux très conducteurs (or ou cuivre);
- on devra réduire à un minimum la densité de courant RF dans les lignes de transmission et les résonateurs par exemple, en augmentant les dimensions des lignes de transmission et des résonateurs. Pour les câbles à paires coaxiales, on donnera la préférence aux enveloppes pleines. Si des câbles tressés sont utilisés, le tressage devra être serré;
- on devra prendre soin de la réalisation des composants mécaniques; éviter les arêtes vives;
- on devra respecter avec soin les processus de fabrication et de nettoyage pour éviter toute contamination aux jonctions critiques;
- on devra éviter l'emploi de métaux qui s'oxydent facilement comme l'aluminium;
- on devra assurer une bonne conductivité électrique en utilisant, pour les brides, des contacts à pression élevée et des surfaces lisses;
- les gammes de températures de fonctionnement devront être aussi petites que possible, afin de limiter les transformations physiques correspondantes.

L'expérience a montré que les jonctions métalliques sont les sources les plus probables de non-linéarités des systèmes. Ceci ne veut pas dire qu'il ne puisse y avoir de systèmes à PIP de faible niveau acceptable si ce n'est sans jonctions, mais que les jonctions ne peuvent être linéaires que si elles sont bien serrées, lisses, planes et propres. Ces qualités sont, bien entendu, relatives et sont quelque peu interdépendantes en ce sens que des surfaces qui ne sont pas lisses peuvent être rendues lisses au moyen d'une pression suffisante. En général, il est de bonne pratique, soit de rendre les surfaces de contact lisses et de bien les serrer jusqu'à ce qu'on obtienne un contact satisfaisant, soit de braser les jonctions en employant des méthodes très perfectionnées et des matériaux de qualité supérieure.

8. Conclusions

Les produits d'intermodulation passive (PIP) ne donnent lieu à des problèmes que lorsqu'il existe un trajet commun pour les signaux émis et reçus ayant une différence de niveau de l'ordre de 130 dB. Une condition nécessaire pour leur production est que les éléments du trajet de transmission présentent des propriétés non linéaires.

La limitation des PIP à un niveau acceptable est un problème extrêmement difficile. L'expérience a montré, cependant, qu'en procédant avec le plus grand soin et en se conformant scrupuleusement aux lignes directrices énoncées au § 7, il est possible de concevoir et de construire des systèmes dans lesquels les PIP sont ramenés à un niveau suffisamment bas.

Les PIP posent un problème beaucoup plus sérieux dans les satellites que dans les stations au sol., Cela s'explique par le fait que les stations au sol ne sont pas assujetties à des contraintes de masse, de sorte qu'on n'est pas obligé d'utiliser dans ces stations des matériaux légers comme l'aluminium, dont les oxydes se caractérisent par des propriétés de non-linéarités. En outre, dans les stations au sol on dispose de meilleurs raccords à brides de guide d'ondes en utilisant des pressions plus fortes pour les brides, etc.

En raison de l'importance du sujet et du fait qu'il y ait des problèmes causés par cet effet dans les satellites maritimes actuellement en service, on incite les administrations et les autres participants à présenter des contributions contenant davantage de renseignements sur ce sujet, particulièrement en ce qui concerne la réalisation de satellites maritimes et l'exploitation de systèmes à satellites maritimes. On sollicite des renseignements pertinents relatifs aux satellites actuellement en service.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPMAN, R. C. et autres [avril 1976] Hidden thread-multicarrier passive component IM generation, AIAA/CASI, 6th Communications Satellite Systems Conference, Montréal, Canada.

COX, R. D. [février 1970] Measurement of waveguide components and joint mixing products in 6 GHz frequency diversity systems, *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-18, 33-37.

HOEBAR, C.F., POLLARD, D.L. et NICHOLAS, R.R., [mars 1986] Passive intermodulation product generation in high power communication satellites. AIAA 11th Communications Satellite Systems Conference, San Diego, Californie, Etats-Unis d'Amérique.

NUDING, E. [1974] Non-linearities of flange connections in transmission lines carrying high RF power. Proc. European Microwave Conf., 613.

ROORSEY, J. V. et autres [août 1973] Intermodulation study, Philco-Ford Corporation.