

RAPPORT 923-1

**ÉLABORATION DES PLANS DE FRÉQUENCES POUR L'ÉMISSION PAR SATELLITE
DE PORTEUSES DE PLUSIEURS NIVEAUX AVEC UNE SEULE VOIE PAR PORTEUSE
AU MOYEN D'UN RÉPÉTEUR NON LINÉAIRE**

(Programme d'études 17A/8)

(1982-1986)

1. Introduction

Dans les systèmes de communication par satellite, plusieurs porteuses, avec une seule voie par porteuse, sont émises par l'intermédiaire d'un seul répéteur de satellite. Pour une utilisation efficace de la puissance du satellite, le répéteur serait exploité dans la région de non-linéarité, auquel cas un bruit d'intermodulation affecte la qualité du signal.

On pourrait réduire les produits d'intermodulation qui tombent dans les intervalles de fréquences des voies occupées en disposant les voies d'une manière appropriée dans la largeur de bande disponible. L'espacement du type Babcock [Babcock, 1953] constitue un exemple typique de cette méthode, qui permet d'obtenir des voies entièrement exemptes de bruits d'intermodulation du troisième ordre. Cependant, ce plan de fréquences exempt de produits d'intermodulation ne serait pas nécessairement le meilleur car il n'utiliserait pas de la manière la plus efficace la largeur de bande disponible, notamment dans le cas où il faudrait y loger un grand nombre de voies. Ainsi, pour loger 20 voies, la largeur de bande serait 10 fois plus grande qu'avec le plan utilisant des intervalles de fréquences adjacents [Hirata et Yasuda, 1976]. Il faut donc élaborer des plans de fréquences utilisant efficacement la largeur de bande disponible. On peut y parvenir en faisant tomber certains produits d'intermodulation dans les voies utilisées, mais uniquement à la condition de maintenir la dégradation de la qualité du signal dans les limites acceptables.

Une méthode logique et efficace consisterait à réduire au minimum le nombre de produits d'intermodulation du troisième ordre tombant dans la plus défavorable des voies utilisées [Hirata, 1978]. Par voie la plus défavorable utilisée, on entend ici une voie spécifique, dans laquelle tombent le plus grand nombre de produits d'intermodulation du troisième ordre. Le présent Rapport traite de l'assignation de fréquence selon cette méthode, appelée ci-après assignation de fréquence avec un minimum de produits d'intermodulation.

2. Porteuses avec une seule voie par porteuse à égalité de niveau

2.1 *Relation entre la largeur de bande assignée et les produits d'intermodulation*

Il est difficile d'obtenir par des calculs théoriques des plans de fréquences avec un minimum de produits d'intermodulation. Toutefois, on peut évaluer le nombre minimal possible de produits d'intermodulation tombant dans la voie la plus défavorable utilisée en se fondant sur la limite inférieure, théorique.

La Fig. 1 montre les limites inférieures théoriques du nombre de produits d'intermodulation du troisième ordre de type $(f_1 + f_2 - f_3)$ tombant dans la voie la plus défavorable utilisée, en fonction de la largeur de bande assignée, le paramètre étant le nombre de voies à loger. Dans cette figure, on a adopté pour le nombre de produits d'intermodulation, qui est proportionnel à la puissance du bruit d'intermodulation, un nombre normalisé qui est celui des produits tombant dans la voie la plus défavorable utilisée d'un plan utilisant des intervalles de fréquences adjacents. Ce nombre est donc exprimé en dB. Pour des raisons de commodité, ce dernier plan est appelé ci-après plan avec espacement égal minimal. De plus, on a adopté comme largeur de bande assignée la largeur nécessaire dans le cadre du plan avec espacement égal minimal. Cette valeur permet de réduire les produits d'intermodulation tombant dans la voie utilisée la plus défavorable à la moitié environ de ce qu'ils seraient dans le cas d'un plan avec espacement égal minimal, dans lequel la bande de fréquences assignée est plus large de 50%.

2.2 *Plan de fréquences permettant de réduire au minimum les produits d'intermodulation*

On a calculé sur ordinateur, pour des applications pratiques, des plans de fréquences avec un minimum de produits d'intermodulation. Pour un petit nombre de voies, on peut trouver la solution optimale en examinant toutes les combinaisons possibles. Le Tableau I montre les résultats obtenus lorsque le nombre de voies utilisées K est de 10.

Pour un grand nombre de voies, on peut obtenir une solution quasi optimale, qui n'est peut-être pas la meilleure mais peut être considérée comme très proche de celle-ci, par une méthode itérative [Okinaka et autres, 1982]. Le Tableau II donne les résultats obtenus lorsque K est égal à 20, sous II-a) et à 40, sous II-b).

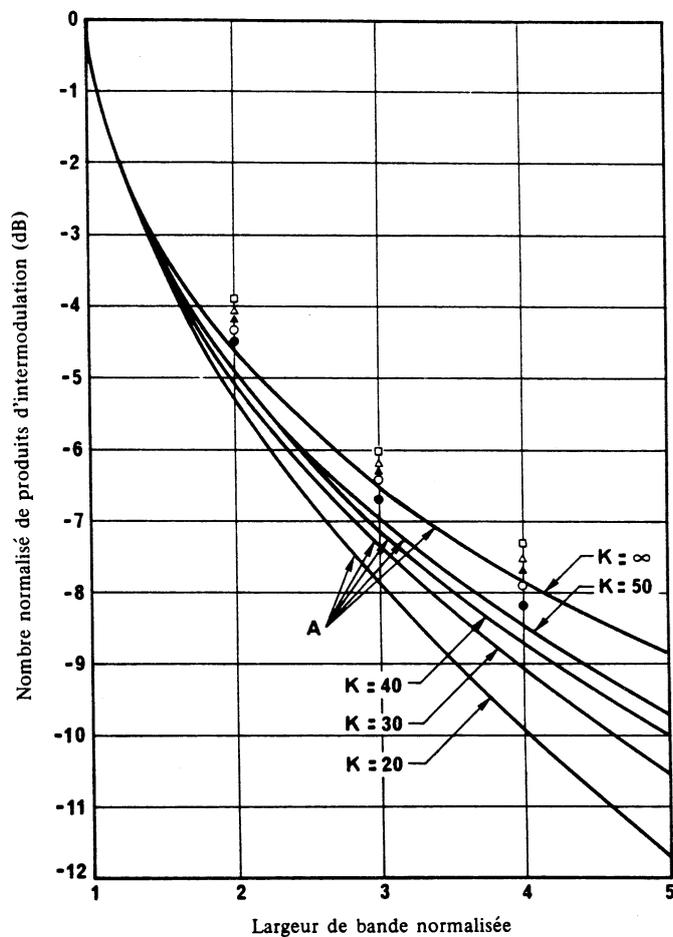


FIGURE 1 – Relation entre le nombre de produits d'intermodulation tombant dans la voie la plus défavorable utilisée et la largeur de bande assignée

Résultats obtenus :

- : $K = 20$
- : $K = 30$
- ▲ : $K = 40$
- △ : $K = 50$
- : $K = 100$

A : limites inférieures

K : nombre de voies utilisées

TABLEAU I — Plans de fréquences optimaux avec un nombre minimum de produits d'intermodulation (le nombre de voies utilisées. $K = 10$)

Nombre d'intervalles de fréquence	Largeur de bande normalisée	Nombre normalisé de produits d'intermodulation (dB)	Intervalles entre fréquences assignées
11	1,1	-1,0	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11
12	1,2	-1,7	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12
13	1,3	-2,4	1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13
14	1,4	-3,0	1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 12, 13, 14
15	1,5	-3,5	1, 2, 3, 4, 7, 8, 11, 13, 14, 15
16	1,6	-3,9	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 15, 16
17	1,7	-4,3	1, 2, 3, 4, 7, 10, 12, 14, 16, 17
18	1,8	-4,7	1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 17, 18
19	1,9	-5,2	1, 2, 3, 5, 9, 12, 14, 17, 18, 19
20	2,0	-5,4	1, 2, 3, 6, 8, 12, 15, 18, 19, 20
21	2,1	-5,7	1, 2, 3, 5, 10, 14, 15, 18, 20, 21

Les nombres normalisés de produits d'intermodulation indiqués dans les Tableaux I et II sont représentés dans la Fig. 1 par des courbes. Si on les compare avec leurs limites inférieures, on observe que le nombre de produits d'intermodulation tombant dans la voie la plus défavorable utilisée des plans de fréquences avec un minimum de produits d'intermodulation, peut effectivement être évalué en utilisant la courbe de la limite inférieure pour $K = \infty$ de la Fig. 1.

3. Porteuses de plusieurs niveaux avec une seule voie par porteuse

Pour les futurs systèmes à satellites, il sera peut-être souhaitable d'utiliser des stations terriennes mobiles correspondant à diverses normes et dont le rapport G/T aurait des valeurs différentes. Une solution consisterait à prévoir pour la p.i.r.e. des signaux destinés aux stations terriennes mobiles des niveaux différents selon la norme de ces stations. Même dans les systèmes fonctionnant avec des stations terriennes mobiles de norme unique, on peut prévoir, pour la porteuse du satellite, des niveaux de puissance différents selon les services.

Toutefois, loger un grand nombre de porteuses de puissances différentes dans un même répéteur de satellite non linéaire en plaçant les porteuses dans des voies arbitrairement choisies peut conduire à des situations dans lesquelles le bruit d'intermodulation dû à certaines voies à puissance relativement élevée rend inutilisables plusieurs voies à puissance relativement faible.

Un plan de fréquences minutieusement élaboré, grâce auquel le bruit d'intermodulation serait réparti entre les voies proportionnellement à la puissance de chaque voie, pourrait permettre d'éviter une telle situation.

Ce paragraphe décrit brièvement plusieurs plans de fréquences pour porteuses à plusieurs niveaux.

3.1 Plans de fréquences à niveaux mixtes

Un type de plan de fréquences permettant de disposer facilement des porteuses de puissances différentes affecte, en utilisant l'espacement de Babcock, ces porteuses à des voies choisies dans une série de voies à espacement uniforme [Babcock, 1953; Edwards et autres, 1969]. Les voies ainsi réparties sont totalement exemptes de produits d'intermodulation du troisième ordre et sont donc utilisables pour des porteuses d'un niveau de puissance quelconque. Toutefois, sauf s'il s'agit d'un petit nombre d'assignations, les plans de Babcock sont difficiles à mettre en pratique en raison du peu d'efficacité avec laquelle ces plans utilisent la largeur de bande disponible.

TABLEAU II – Plans de fréquences quasi-optimaux avec un minimum de produits d'intermodulation

a) $K = 20$

Nombre d'intervalles de fréquence	Largeur de bande normalisée	Nombre normalisé de produits d'intermodulation (dB)	Intervalles entre fréquences assignées
40	2	-4,5	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 16, 17, 19, 24, 26, 27, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 40
60	3	-6,7	1, 2, 3, 6, 9, 12, 13, 19, 22, 27, 32, 41, 43, 47, 54, 55, 56, 58, 59, 60
80	4	-8,2	1, 2, 3, 4, 8, 11, 16, 28, 30, 41, 45, 52, 57, 61, 62, 70, 73, 76, 79, 80
100	5	-9,5	1, 2, 3, 5, 10, 17, 29, 31, 42, 45, 48, 65, 67, 80, 85, 89, 90, 96, 98, 100

b) $K = 40$

Nombre d'intervalles de fréquence	Largeur de bande normalisée	Nombre normalisé de produits d'intermodulation (dB)	Intervalles entre fréquences assignées
80	2	-4,2	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 16, 18, 22, 24, 25, 27, 28, 32, 35, 39, 43, 45, 46, 48, 52, 61, 62, 64, 65, 66, 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80
120	3	-6,3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 15, 17, 22, 31, 32, 34, 39, 45, 55, 57, 65, 67, 70, 77, 78, 82, 88, 91, 96, 97, 100, 105, 109, 111, 112, 113, 116, 117, 118, 119, 120
160	4	-7,6	1, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 13, 20, 21, 25, 30, 31, 37, 40, 45, 56, 58, 66, 70, 71, 72, 79, 92, 104, 108, 115, 117, 126, 132, 136, 145, 148, 151, 152, 154, 156, 158, 159, 160
200	5	-8,7	1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 13, 20, 26, 32, 38, 45, 54, 58, 71, 75, 83, 85, 86, 104, 106, 117, 128, 132, 144, 146, 161, 164, 175, 176, 184, 185, 190, 192, 194, 195, 198, 199, 200

Au prix d'une augmentation des produits d'intermodulation du troisième ordre tombant dans les voies assignées, on peut atteindre une plus grande efficacité en appliquant la méthode des plans «en Babcock multiple». Dans le cas des porteuses à deux niveaux, par exemple, ces plans sont formés en plaçant côte à côte deux plans de Babcock identiques, dont les fréquences sont les mêmes, mais dont les uns sont décalées par rapport aux autres de quantités approximativement égales à la largeur de bande de l'un de ces plans, qui sont désignés ci-après plans «en double Babcock». On peut montrer que, dans un plan à « n » porteuses, exactement $(n/2) - 1$ produits du troisième ordre tombent dans chacune des voies lorsque toutes les porteuses sont en service. Puisqu'un tel plan permet une nouvelle et substantielle diminution du nombre des produits du troisième ordre dans chaque voie assignée, par rapport à la réduction possible avec des espacements des voies uniformes ou aléatoires, la qualité de la transmission, du point de vue des produits d'intermodulation, peut être suffisamment bonne pour permettre l'utilisation de porteuses de plusieurs niveaux.

Au besoin, on peut encore améliorer dans une voie assignée choisie, la performance du plan «en double Babcock», en supprimant la voie assignée «jumelle» dans la moitié opposée du plan. Ainsi, la voie choisie devient totalement exempte de produits d'intermodulation du troisième ordre. En conséquence, ces voies améliorées peuvent être utilisées pour des porteuses plus puissantes ou plus faibles que les porteuses des autres voies du plan. Bien que représentant une amélioration par rapport au plan de Babcock simple, le plan en double Babcock utilise encore de façon très inefficace la largeur de bande et n'est utile que si l'on n'a besoin que d'un nombre restreint de voies.

De meilleurs résultats peuvent être obtenus moyennant l'augmentation des niveaux de bruit d'intermodulation tombant dans les voies des porteuses. Deux méthodes, la «méthode de la zone spécialisée» et la «méthode d'entrelacement», permettant d'atteindre une amélioration significative de l'efficacité d'utilisation de la largeur de bande tout en fournissant simultanément une puissance de bruit d'intermodulation de faible niveau dans les voies des porteuses, ont été proposées par [Okinaka et autres, 1982].

Dans le cas de la «méthode de la zone spécialisée», une bande de fréquences spéciale est fournie à l'intérieur de la largeur de bande disponible pour les porteuses de chaque niveau de puissance, et les porteuses sont placées à l'intérieur de la bande de fréquences spécialisée qui leur est exclusivement réservée. Si les bandes de fréquences spécialisées sont correctement placées à l'intérieur de l'ensemble de la largeur de la bande, la bande pour les porteuses de faible niveau pourrait être exempte de produits d'intermodulation engendrés par les porteuses de niveau élevé. S'il est possible de séparer les deux bandes spécialisées par une bande non assignée, la possibilité que les produits d'intermodulation causés par les porteuses de niveau plus élevé tombent dans la bande de fréquences réservée aux porteuses de faible niveau pourrait encore être diminuée.

Dans le cas de la «méthode d'entrelacement», la porteuse de niveau i est placée uniquement sur les intervalles de fréquence numérotés (M_{j+i}) , où M représente le nombre de niveaux de porteuses, i est un nombre entier entre un et M , j est un nombre entier entre zéro et $(B/M - 1)$, et B est le nombre total d'intervalles de fréquence pouvant être assignés. Dans cette méthode, les produits d'intermodulation engendrés par les trois porteuses d'un niveau de puissance donné tombent nécessairement dans les intervalles de fréquence pour les porteuses du même niveau de puissance; ainsi, les produits d'intermodulation engendrés par les porteuses de niveau élevé ne tomberaient pas dans les intervalles de fréquence pour porteuses de faible niveau. Dans le cas du système à double niveau, par exemple, la «méthode d'entrelacement» mène à un plan «pair/impair», où les porteuses de forte puissance sont placées sur les intervalles pairs et les porteuses de faible puissance sur les intervalles impairs.

Dans le cas d'un système à double niveau, les produits du troisième ordre qui sont engendrés peuvent être classés dans l'une des 8 catégories représentées dans le Tableau III. Le tableau présente également les puissances relatives approximatives de chaque type de produit en supposant que le rapport des porteuses de faible puissance aux porteuses de puissance élevée est égal à « r ». L'avantage obtenu avec des plans basés sur la «méthode de la zone spécialisée» et la «méthode d'entrelacement» réside dans le fait que les produits d'intermodulation puissants de la catégorie 1 ne tombent pas dans les intervalles de fréquence où se trouvent les porteuses de faible puissance. Dans de nombreux cas, la «méthode de la zone spécialisée» peut fournir une réduction plus importante du nombre de produits d'intermodulation tombant dans les voies des porteuses de faible niveau que ne le permet la «méthode d'entrelacement».

Dans la réalité, les plans de fréquences peuvent être obtenus par la procédure suivante. Tout d'abord, les positions des porteuses du niveau le plus faible sont déterminées dans les intervalles de fréquence qui leur sont assignés en utilisant l'approche itérative [Okinaka et autres, 1982]. Ensuite, les positions des porteuses de faible niveau qui suivent sont déterminées dans les intervalles de fréquence qui leur sont assignés par la méthode itérative, où le rapport porteuse/puissance de bruit d'intermodulation (C/IM) le plus défavorable parmi toutes les porteuses déjà en place est porté au maximum. Cette procédure est répétée sur une base niveau-à-niveau jusqu'à ce que les positions des porteuses de tous les niveaux aient été déterminées.

TABLEAU III – Catégories et puissances relatives des produits d'intermodulation du troisième ordre et voies dans lesquelles peuvent tomber les produits dans un plan de fréquences à deux niveaux

Catégorie du produit	Type de produit	Puissance relative	Voies dans lesquelles peuvent tomber les produits	
			Méthode de zone spécialisée	Méthode d'entrelacement
1	$f_h + f_h - f_h$	1	porteuses HP	porteuses HP
2	$f_h + f_h - f_f$ $f_h + f_f - f_h$	r	porteuses FP	porteuses FP
3	$f_h + f_f - f_f$ $f_f + f_f - f_h$	r^2	porteuses HP & FP	porteuses HP
4	$f_f + f_f - f_f$	r^3	porteuses HP & FP	porteuses FP
5	$2f_h - f_h$	$1/4$	porteuses HP & FP	porteuses HP
6	$2f_h - f_f$	$r/4$	intervalles non utilisés	porteuses FP
7	$2f_f - f_h$	$r^2/4$	porteuses HP & FP	porteuses HP
8	$2f_f - f_f$	$r^3/4$	porteuses HP & FP	porteuses FP

Note 1. – f_h indique un intervalle de fréquences pour une porteuse à haute puissance et f_f représente un intervalle de fréquences pour une porteuse de faible puissance.

Note 2. – r est le rapport des puissances des porteuses de faible puissance à celles de haute puissance.

Note 3. – La porteuse HP représente une porteuse à haute puissance et la porteuse FP une porteuse à faible puissance.

3.2 Performance caractéristique d'un plan à double niveau

En vue de comparer les deux méthodes d'assignation pour les systèmes à niveaux multiples, l'amélioration du rapport porteuse/puissance de bruit d'intermodulation (C/IM) a été calculée pour des exemples types de systèmes à deux et à trois niveaux. L'amélioration du rapport C/IM signifie que l'importance de l'amélioration dans le cas du rapport C/IM le plus défavorable comparé à celui du plan d'assignation de fréquences où les porteuses du niveau le plus faible sont également espacées, et où le nombre de porteuses est choisi de manière à obtenir la même puissance de sortie dans le répéteur de satellite. Pour les systèmes à deux niveaux, on suppose que dix porteuses d'un niveau donné et dix porteuses d'un niveau de 10 dB plus élevé partagent un répéteur. Dans le cas du système à trois niveaux, on suppose que dix porteuses d'un niveau donné (L), dix porteuses d'un niveau de 7 dB plus élevé et dix porteuses d'un niveau de 10 dB plus élevé que L partagent un répéteur. Par ailleurs, dans les deux cas, on suppose une largeur de bande normalisée pour les trois niveaux.

Le Tableau IV résume les performances des plans de fréquences obtenus. Il apparaît dans ce tableau que la «méthode de la zone spécialisée» pourrait fournir un rapport C/IM plus avantageux dans les voies des porteuses de faible puissance que ne le peut la «méthode d'entrelacement».

4. Conclusions

Nous avons montré qu'il est possible de réduire sensiblement le nombre de produits d'intermodulation du troisième ordre tombant dans un intervalle de voie, en recourant à un plan d'assignation de fréquences porteuses utilisant une largeur de bande supérieure à celle utilisée pour le plan avec espacement égal minimal. Nous avons également montré à la Fig. 1 que le nombre normalisé de produits d'intermodulation dépend à la fois du nombre de porteuses et de la largeur de bande normalisée assignée; nous avons également montré que l'efficacité d'utilisation du spectre diminue à mesure qu'augmente le nombre de porteuses.

TABLEAU IV – Comparaison des performances des plans de fréquences à niveaux multiples basés sur la «méthode de la zone spécialisée» et sur la «méthode d'entrelacement»

Nombre de niveaux des porteuses	Niveau des porteuses (dB)	Amélioration du rapport C/IM (dB)	
		Méthode de la zone spécialisée	Méthode d'entrelacement
2	0	5,2	3,2
	10	5,2	5,3
3	0	3,2	2,8
	7	3,4	2,8
	10	6,2	5,1

Note. – L'amélioration du rapport C/IM signifie l'importance de l'amélioration du rapport C/IM le plus défavorable comparé à celui du plan d'assignation de fréquences où les porteuses du plus faible niveau sont également espacées, et où le nombre de porteuses est choisi de manière à maintenir la même puissance de sortie dans le répéteur du satellite.

Au cas où il est nécessaire d'émettre des porteuses avec plusieurs niveaux de puissance, on peut améliorer le rapport porteuse/puissance de bruit d'intermodulation pour les porteuses de faible puissance en utilisant la «méthode de la zone spécialisée». En choisissant bien les assignations de voies, au moyen d'une procédure telle que la procédure suggérée dans le présent document, on arrive à une augmentation substantielle du rapport porteuse/bruit d'intermodulation pour des porteuses de faible puissance au prix d'une légère dégradation de ce rapport pour les porteuses de puissance élevée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BABCOCK, W. C. [janvier 1953] Intermodulation interference in radio systems. *BSTJ*, Vol. XXXII, 1, 63-73.
- EDWARDS, R., DURKIN, J. et GREEN, D. H. [août 1969] Selection of intermodulation free frequencies for multiple-channel mobile radio systems. *Proc. IEE*, Vol. 116, 8, 1311-1318.
- HIRATA, Y. [printemps 1978] A bound on the relationship between intermodulation noise and carrier frequency assignment. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 8, 1, 141-154.
- HIRATA, Y. et YASUDA, Y. [décembre 1976] Intermodulation free channel allocation. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japan*, Vol. 59-B, 12, 592-593.
- OKINAKA, H., YASUDA, Y. et HIRATA, Y. [13-17 juin 1982] Optimum frequency assignment for satellite SCPC systems. IEEE International Conference on Communications (ICC'82), Philadelphie, Etats-Unis d'Amérique. Conf. Record., Vol. 1, 2E.3.1-2E.3.6.