

ASPECTS GÉNÉRAUX DES SYSTÈMES CELLULAIRES

(Question 37/8)

(1978-1982-1986)

1. Introduction

On utilise dans le service mobile terrestre des systèmes qui assurent une bien meilleure utilisation du spectre des fréquences que les systèmes classiques [Schulte et Cornell, 1960; Frenkiel, 1970; Staras et Schiff, 1970]. Ces systèmes sont tous fondés sur le même principe, à savoir la division de la zone de couverture souhaitée en un certain nombre de sous-zones (cellules), avec une ou plusieurs stations de base assurant la couverture de chaque cellule.

Une planification appropriée des fréquences permet leur réutilisation à plusieurs reprises dans une même zone de couverture. La technique cellulaire peut également être combinée avec la notion de partage des canaux (voir le Rapport 741), ce qui contribue également à améliorer l'efficacité d'utilisation du spectre.

2. Caractéristiques générales des systèmes

Lorsqu'une station mobile émet ou doit recevoir un appel, il faut d'abord choisir la cellule qui peut desservir la station dans les meilleures conditions (par exemple, au moyen d'un algorithme se trouvant dans la logique de la station mobile) après quoi la communication est établie par l'intermédiaire d'une station de base qui dessert cette cellule. Si les cellules utilisant le même canal sont séparées par une distance suffisante, chaque fréquence peut être utilisée simultanément dans plusieurs cellules de la zone de couverture, ce qui augmente la capacité par rapport aux systèmes classiques.

* Ce Rapport doit être porté à l'attention de la Commission d'études 1.

Les caractéristiques générales d'un système cellulaire sont les suivantes:

- utilisation de plusieurs stations de base dans une zone de service et élargissement de cette zone au-delà des limites de la couverture assurée par un site unique;
- transfert de la responsabilité de la couverture radioélectrique d'un équipement mobile ou portatif d'un site à un autre, au moyen de la commutation d'une fréquence radioélectrique à une autre;
- réutilisation simultanée d'une même assignation de fréquence radioélectrique par plusieurs stations de base et pour plus d'un message; cette caractéristique est la clé d'une *utilisation efficace du spectre* par les systèmes cellulaires;
- croissance: cela implique qu'un système comportant au début de son exploitation un petit nombre de cellules étendues doit pouvoir se développer progressivement par la création de nombreuses petites cellules aux points où la densité du trafic est la plus forte.

Ces caractéristiques sont essentielles pour assurer l'établissement d'un système cellulaire complet. Toutefois, on peut créer des systèmes compatibles avec des systèmes cellulaires, c'est-à-dire des systèmes capables d'interfonctionnement avec des systèmes cellulaires, même s'ils n'en possèdent pas toutes les caractéristiques, grâce à un aménagement particulier des équipements. Cependant, pour des raisons d'économie, l'équipement des stations de base utilisées dans une petite ville peut ne pas être adapté à la coexistence de cellules ayant deux tailles différentes, alors qu'un équipement plus perfectionné du type utilisé dans les grandes villes où une capacité maximale est requise sera parfaitement adéquat; les mêmes stations mobiles pourront alors être exploitées dans les deux genres de zone.

3. Considération sur la réutilisation des canaux

3.1 Généralités

La suppression du brouillage dans le même canal dépend exclusivement du rapport porteuse/brouillage (C/I) et non pas de l'amplitude absolue des signaux. Etant donné que les valeurs médianes de C et I sont inversement proportionnelles à une certaine puissance de la distance de la source, l'espacement (D) requis entre les cellules utilisant le même canal peut être exprimé par un multiple du rayon (R) de la cellule selon le rapport C/I médian souhaité.

Dans une première approximation suffisante:

$$C = k/R^n, \quad I = k/D^n$$

donc

$$C/I = \left(\frac{D}{R}\right)^n \quad \text{ou} \quad D = R \left(\frac{C}{I}\right)^{1/n}$$

La réduction proportionnelle de D et de R permettrait de réutiliser chaque fréquence simultanément dans un plus grand nombre de cellules d'une zone de service donnée. En revanche, cela peut aussi augmenter le brouillage mutuel entre stations fonctionnant sur le même canal, à moins qu'on ait recours à d'autres techniques, telles que la réception en diversité [Lundquist et Peritsky, 1971] et la régulation de puissance [US Advisory Committee, 1967]. La distance de réutilisation doit être suffisamment grande pour donner une probabilité de niveau de brouillage dans le même canal suffisamment faible, dans les conditions de propagation suivantes [Okumura, 1968]: évanouissements par trajets multiples (avec une fonction de densité de Rayleigh) et loi d'effet de masque log-normale (évanouissements lents), que l'on trouve dans le service mobile terrestre.

Le rapport de réutilisation D/R est lié au nombre des jeux de canaux n par la formule:

$$D/R = \sqrt[3]{3n}$$

Une valeur typique de D/R est 4,6/1, qui correspond à $n = 7$. Pour un réseau régulier de stations de base organisé selon une structure hexagonale, seules certaines valeurs de n sont possibles: 3, 4, 7, 9, 12, 13, etc. qui sont données par:

$$n = i^2 + j^2 + ij$$

i et j étant des entiers non négatifs.

Le concepteur de système doit décider la qualité téléphonique et choisir l'objectif pour le rapport C/I . Par exemple, l'expérience avec des simulations, des essais subjectifs, des essais sur le terrain et les premiers systèmes mis en exploitation à 850 MHz montrent qu'avec un 90^e percentile correspondant à une valeur moyenne du C/I égale ou supérieure à 17 dB en propagation urbaine, on obtient l'appréciation «bon» ou une appréciation supérieure de la part de la majorité des usagers [voir le Rapport 319, § 3.1.1 et 3.1.2]; s'agissant des systèmes de type «dispatching» ou destinés à l'usage privé, on peut se satisfaire d'appréciations moins bonnes. Durant les phases de développement initial, alors que les cellules sont relativement grandes et que l'horizon a pour effet de limiter le brouillage, un schéma de réutilisation comportant un jeu de 7 canaux est habituellement adéquat, avec l'emploi d'antennes omnidirectionnelles classiques. Cela suppose qu'il n'y ait pas plus d'un ou deux sites brouilleurs pouvant rayonner des signaux d'une puissance supérieure au seuil prévu, en tout lieu de la zone de couverture de la station de base.

Au fur et à mesure de l'évolution vers un système plus dense, on peut être amené à mettre en œuvre un plan de réutilisation des canaux plus important (comportant, par exemple, un jeu de 12 canaux) ou à prévoir l'emploi d'antennes directives pour l'émission et/ou pour la réception avec mise en œuvre d'un plan d'assignation «sectoriel» des canaux. Des arrangements ont été conçus avec secteurs de 60° et de 120°. Pour une valeur donnée de n , l'utilisation d'un plan d'assignation sectoriel avec des antennes directives augmente le rapport C/I d'un maximum de 5 dB (secteur de 120°) ou de 8 dB (secteur de 60°). En tout cas, le planificateur doit avoir la certitude que l'objectif *a priori* est dépassé à la fois dans le sens de transmission station mobile vers station de base et station de base vers station mobile. Le sens de transmission station mobile vers station de base pose des problèmes plus complexes, en raison de la position aléatoire des brouilleurs possibles, en raison de la présence d'appareils sur véhicule et d'appareils portatifs avec des puissances différentes et de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments qui peut affecter les appareils portatifs.

Pour tenir compte des différences de densité des stations d'utilisateurs dans une même zone de service, le plan des cellules doit permettre la coexistence de cellules de taille différente, à un même stade de développement. Cela implique généralement un doublement du nombre des jeux de canaux entre lesquels les attributions de fréquences doivent être réparties. Ceci doit être pris en compte par les administrations afin de permettre la subdivision des cellules pour faire face à l'accroissement de la population dans les plus grandes villes ou les zones les plus peuplées.

Si, dans le plan d'attribution des canaux d'un système cellulaire, on a évité l'emploi des canaux adjacents aux stations de base, il est possible d'augmenter l'excursion de fréquence pour permettre une distance de réutilisation plus faible, ce qui permet d'améliorer le rapport de protection.

Les systèmes privés du type «dispatching» qui peuvent acheminer le trafic à l'aide du système de mise en file d'attente des appels bloqués peuvent être efficaces avec une moindre attribution de canaux que dans les systèmes téléphoniques mobiles.

3.2 Brouillage dans le même canal subi par des unités à l'arrêt

A la différence des stations mobiles, les unités à l'arrêt ne seront pas sujettes à des évanouissements par trajets multiples, produisant une diminution de la qualité vocale, due à un déplacement rapide à travers le diagramme d'évanouissements; pour ces unités, il y aura un grand nombre de points où le signal utile subit un évanouissement et où le canal est inutilisable en raison du brouillage dans le même canal. En outre, l'effet de masque se produira dans les zones où ce problème est plus grave en raison d'une diminution du niveau du signal local moyen.

On a calculé [French, 1979] la probabilité de brouillage dans le même canal, $P(s_1 \leq ps_2)$ dans le cas d'évanouissement et d'effet de masque simultanés, avec un signal utile non corrélé et une seule source de brouillage, comme l'indique la Fig. 1.

Les rapports de réutilisation calculés à l'aide de la Fig. 1 et d'une loi de propagation inverse de la puissance 4^e de la distance pour obtenir des valeurs données de la probabilité de brouillage à la limite de la cellule sont indiqués sur le Tableau I, pour des rapports de protection (P) de, par exemple, 8 et 12 dB et des écarts types d'effet de masque (σ) de 6 et 12 dB. Il a été tenu compte, dans le calcul, à la fois des évanouissements et de l'effet de masque.

D'autres valeurs du rapport de protection susceptibles de se présenter dans certains systèmes peuvent être utilisées avec la Fig. 1 et la même loi de propagation pour trouver les rapports de réutilisation correspondants. A noter que les techniques de transfert peuvent assurer, contre les évanouissements, une certaine diversité qui réduirait le risque de coupure des communications.

3.3 Autres commentaires

3.3.1 Il convient de noter que, lorsqu'il s'agit de transmettre un message unique à un grand nombre de véhicules répartis entre plusieurs cellules, l'efficacité de l'utilisation des fréquences se trouve affectée pendant la durée de transmission de ce message. Il y a lieu de poursuivre l'étude pour déterminer l'influence de la combinaison de systèmes privés et publics sur l'efficacité d'utilisation du spectre.

3.3.2 Les méthodes suivies pour l'échange de signaux de gestion (assignation des canaux, numérotation, etc.) sont les suivantes:

- échange de signaux de gestion au moyen de canaux qui peuvent également être utilisés comme canaux de trafic;
- établissement de canaux «spécialisés», soit pour la gestion, soit pour le trafic, mais pas pour les deux.

Ces deux méthodes diminuent la capacité de trafic du système. Le choix entre ces deux méthodes dépend essentiellement du volume du trafic de signalisation. Dans les systèmes de grande capacité, les canaux peuvent être utilisés plus efficacement si les canaux de gestion sont spécialisés et sont susceptibles d'être subdivisés en canaux d'appel unilatéral et canaux d'accès.

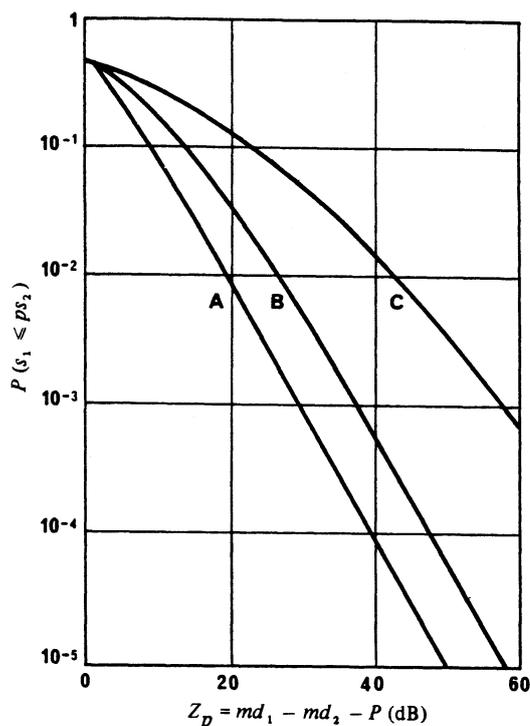


FIGURE 1 – Probabilité de brouillage dans la même voie (avec évanouissement de Rayleigh et loi d'effet de masque log-normale)

Courbes A: $\sigma = 0$ dB

B: $\sigma = 6$ dB

C: $\sigma = 12$ dB

- s_1 : niveau du signal utile (V)
- s_2 : signal brouilleur (V)
- p : rapport de protection du système de modulation
- $P = 20 \log p$
- md_1 : niveau moyen dans la zone du signal utile (dB)
- md_2 : niveau moyen dans la zone du signal brouilleur (dB)
- σ : écart type de l'effet de masque
- $Z_p = md_1 - md_2 - P$

TABLEAU I .- Rapport de réutilisation (D/R)

$P(s_1 \leq ps_2)$	$\sigma = 6$ dB		$\sigma = 12$ dB	
	$P = 8$ dB	$P = 12$ dB	$P = 8$ dB	$P = 12$ dB
0,5	2,6	3	2,6	3
0,1	4,7	5,6	7,3	8,9
0,03	6,6	8	13	16

3.3.3 Si l'on applique la méthode qui consiste à affecter des canaux uniquement à la gestion, l'assignation de fréquence aux canaux de gestion peut s'effectuer indépendamment de la dimension des cellules.

Les deux méthodes d'assignation de fréquence aux canaux de gestion sont les suivantes:

- assignation d'un canal de gestion à chaque cellule;
- assignation d'un seul canal de gestion couvrant un groupe de cellules adjacentes.

Le choix entre les deux méthodes dépendra de la fiabilité du traitement des appels et du trafic de gestion dans chaque système.

3.3.4 Dans les canaux de gestion, les contraintes imposées au rapport C/I sont à peu près les mêmes que dans les canaux de trafic. Afin d'éviter que l'efficacité d'un système soit limitée par sa capacité de signalisation, le concepteur du système doit réserver un nombre suffisant de canaux pour la signalisation (gestion). Ce nombre de canaux doit, de préférence, être dynamiquement modifiable en même temps que le système se développe.

4. Diversité

Pour remédier aux effets de masque et aux effets d'évanouissements dus aux trajets multiples, on peut recourir à un ou plusieurs modes de réception en diversité mais ces techniques ne sont pas indispensables. La réception en diversité a pour effet d'améliorer sensiblement l'utilisation du spectre [Lundquist et Peritsky, 1971]. Les incidences financières de l'emploi de ces techniques n'ont pas encore été déterminées. Bien que la réception en diversité dans la station de base ne soit pas obligatoire dans un système de type classique ou à cellules, elle peut être utile pour:

- équilibrer les rapports porteuse/brouillage (C/I) et porteuse/bruit (C/N) dans les sens de transmission station mobile vers station de base et station de base vers station mobile et
- améliorer le rapport signal/bruit (S/N) dans la bande de base pour une valeur donnée du rapport porteuse/brouillage (C/I) ou porteuse/bruit (C/N). Ces facteurs sont particulièrement importants dans le cas de stations portatives.

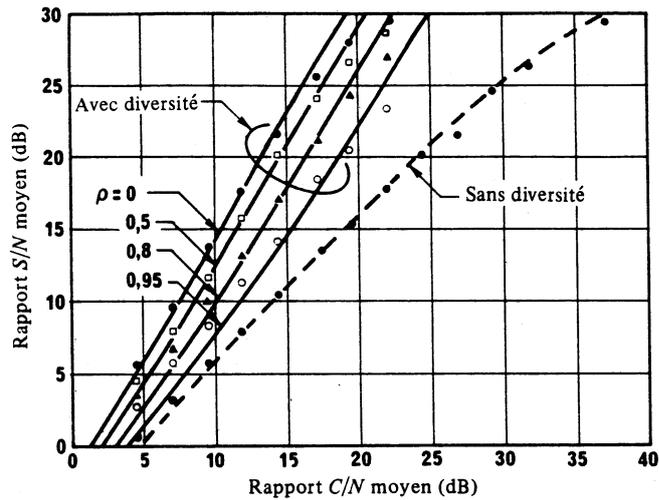
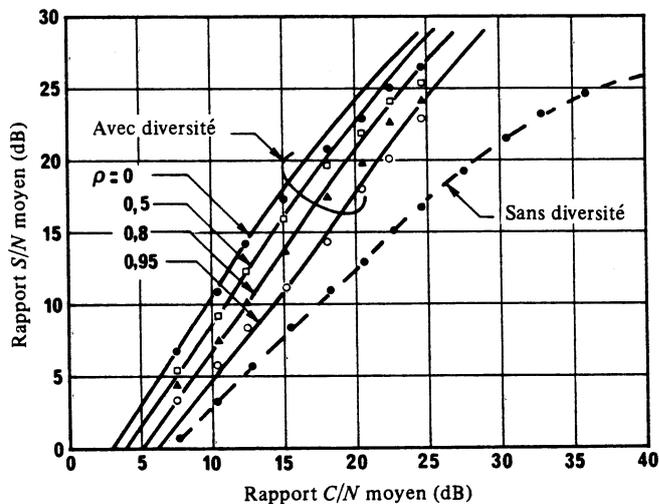
Actuellement, on préfère utiliser la diversité d'espace car les systèmes aujourd'hui réalisables en diversité de fréquence et en diversité dans le temps ne sont pas efficaces du point de vue de l'utilisation du spectre, mais les recherches se poursuivent en ce qui concerne des techniques telles que l'étalement de spectre ou la retransmission par répartition dans le temps. Les méthodes de combinaison cohérente (combinaison à rapport maximal et combinaison à égalité de gain) donnent le meilleur résultat par rapport aux autres méthodes. Toutefois, la structure des équipements est complexe, car on doit prévoir une fonction de commande pour mettre les signaux reçus en phase. En outre, les coûts sont élevés. Par ailleurs, la méthode à commutation d'antenne a l'avantage d'une structure simple mais la qualité du signal vocal est dégradée par le bruit et le retard introduit par la commutation. Une méthode à combinaison par sélection utilisant la diversité à deux voies est plus pratique que la combinaison cohérente à deux voies, bien qu'elle lui soit un peu inférieure du point de vue de la transmission téléphonique et de la transmission de données. En utilisant la combinaison par sélection après détection, si l'on choisit un niveau de sortie démodulé dans la bande de base de la voie de diversité présentant un niveau de réception maximal, le bruit de commutation produit lors du choix d'une voie ayant le niveau de signal le plus élevé est réduit; d'autre part, la qualité du signal vocal est améliorée.

4.1 Amélioration des caractéristiques en ce qui concerne le bruit thermique

La Fig. 2 donne un exemple des résultats expérimentaux [Suwa et autres, 1984] concernant la réduction du bruit thermique d'un signal vocal à l'aide de la combinaison par sélection après détection. Le rapport C/N relatif est défini comme la différence entre le rapport C/N moyen nécessaire pour obtenir un rapport S/N de 8 dB dans la bande de base en utilisant la diversité et le rapport C/N moyen nécessaire pour obtenir ce même rapport S/N sans diversité. Le rapport C/N relatif est supérieur à 6 dB pour un coefficient de corrélation d'enveloppe $\rho = 0$ et supérieur à 5 dB pour $\rho = 0,5$.

4.2 Amélioration des caractéristiques en ce qui concerne le brouillage dans le même canal

La Fig. 3 donne un exemple des résultats expérimentaux [Suwa et Hattori, 1985] concernant la réduction du brouillage dans le même canal pour un signal vocal, en utilisant la combinaison par sélection après détection. Le rapport C/I relatif est défini comme la différence entre le rapport C/I moyen nécessaire pour obtenir un rapport S/I de 14 dB dans la bande de base en utilisant la diversité et le rapport C/I moyen nécessaire pour obtenir ce même rapport S/I sans diversité. Le rapport C/I relatif est supérieur à 6 dB pour un coefficient de corrélation d'enveloppe $\rho = 0$ et supérieur à 5 dB pour $\rho = 0,5$.

a) $B = 16$ kHzb) $B = 8$ kHzFIGURE 2 – Caractéristiques de C/N en fonction de S/N

Conditions: – fréquence porteuse: bande des 900 MHz
 – largeur de bande B du filtre FI: 16 et 8 kHz
 – fréquence des évanouissements: 34 Hz
 – niveau de modulation type: $3,5/\sqrt{2}$ rad efficaces – $B = 16$ kHz
 $1,75/\sqrt{2}$ rad efficaces – $B = 8$ kHz

Le niveau de référence du compresseur est réglé à une valeur égale au niveau de modulation type.

Le rapport C/N est mesuré dans une largeur de bande du filtre FI de 16 kHz et de 8 kHz.

Le rapport S/N est mesuré dans une largeur de bande du filtre de la bande de base de 0,3-3 kHz.

Un compresseur-extenseur syllabique 2:1 est utilisé.

5. Déplacements des véhicules

Dans tout système cellulaire, il importe d'assurer la détection, la localisation et l'enregistrement de la position des stations mobiles ainsi que la commutation entre les cellules lors de chaque franchissement de frontière d'une station mobile d'une cellule à une autre, et cela aux fins suivantes:

- limitation du trafic de commutation des canaux,
- maintien d'une qualité de transmission satisfaisante,
- protection contre l'accroissement du brouillage dans le même canal,
- réduction de la dégradation de qualité due à la commutation entre canaux.

Un dispositif approprié peut servir à informer le centre de gestion chaque fois que le signal d'une station mobile en communication devient inadéquat, afin que le transfert (hand off) puisse s'effectuer entre la station de base initiale et une autre mieux située. Inversement, on peut imaginer une autre solution dans laquelle le centre de gestion localiserait simplement le véhicule et lui assignerait une station de base au début de la communication, cette assignation étant maintenue pour toute la durée de la communication. Si le véhicule est autorisé à continuer d'utiliser sa station de base initiale après avoir quitté la cellule desservie par cette station, le signal qu'il recevra accusera des variations plus importantes et aura un niveau moyen plus faible. D'autre part, comme le véhicule pourra alors se rapprocher des stations de base qui desservent d'autres stations mobiles sur la même fréquence, le brouillage subi et causé par ce véhicule augmentera. Ainsi, pour une qualité de transmission donnée, les stations de base travaillant dans le même canal devraient, en règle générale, être plus espacées les unes des autres, si on ne recourt pas au transfert; toutefois, cette solution a une influence défavorable sur l'efficacité d'utilisation du spectre des fréquences. C'est la raison pour laquelle le transfert est considéré comme une caractéristique essentielle de tous les systèmes cellulaires. Un des paramètres à utiliser pour identifier la cellule du système à partir de laquelle un véhicule en mouvement peut être desservi dans les meilleures conditions est le niveau du champ de la porteuse reçue de la station mobile.

L'expérience pratique montre que la qualité téléphonique d'un système cellulaire ne peut être supérieure à celle qui est autorisée par l'algorithme de transfert du système. Une régulation trop stricte du niveau des signaux exige un nombre de transferts plus élevé que nécessaire. Cette situation est, d'une part,

- incompatible avec la capacité du contrôleur et, d'autre part,
- peut provoquer beaucoup de confusion chez les usagers.

En revanche, une régulation trop lâche a souvent pour conséquence le maintien des statistiques des signaux à des niveaux inutilement bas pendant des périodes prolongées, ce qui peut entraîner des probabilités élevées de perte des communications et la dégradation des communications transmises dans le même canal.

Il peut être préférable d'enregistrer la position de la station mobile dans la mémoire du central d'origine. Chaque station de base diffuse son code d'identification spécifique par l'intermédiaire du canal de gestion. Les stations mobiles présentes dans la zone conservent ce code en mémoire. Lorsqu'une station mobile reçoit un nouveau code d'identification, elle peut spontanément communiquer son identité au nouveau centre de zone qui la dessert par l'intermédiaire d'une station de base de cette zone. Cette information peut être communiquée au central d'origine (voir la Recommandation 624).

6. Brouillages dus aux produits d'intermodulation

Dans un système radiotéléphonique mobile cellulaire de grande capacité, il importe d'éliminer aussi complètement que possible les brouillages dus aux produits d'intermodulation. Toutefois, en raison de l'organisation spatiale ordonnée et de la capacité de transfert des systèmes cellulaires, et compte tenu des progrès techniques réalisés en matière de couplage émetteur/antenne et de combinaison des dispositions mis en œuvre dans les systèmes cellulaires, on estime que les brouillages dus aux produits d'intermodulation à l'intérieur des systèmes peuvent être limités.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- FRENCH, R. C. [août 1979] The effect of fading and shadowing on channel re-use in mobile radio. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. VT-28, 3.
- FRENKIEL, R. H. [mai 1970] A high capacity mobile radiotelephone system model using a coordinated small zone approach. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. VT-19, 2.
- LUNDQUIST, L. et PERITSKY, M. M. [août 1971] Co-channel interference rejection in a mobile radio space diversity system. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. VT-20, 3.
- OKUMURA, Y. [septembre-octobre 1968] Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Rev. Elec. Comm. Lab.*, NTT, Vol. 16, 9 et 10.
- SCHULTE, H. J., Jr. et CORNELL, W. A. [mai 1960] Multi-area mobile telephone system. *IRE Trans. Vehic. Comm.*, Vol. VC-9, 49-53.
- STARAS, H. et SCHIFF, L. [mai 1970] A dynamic space division multiplex mobile radio system. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. VT-19, 2.

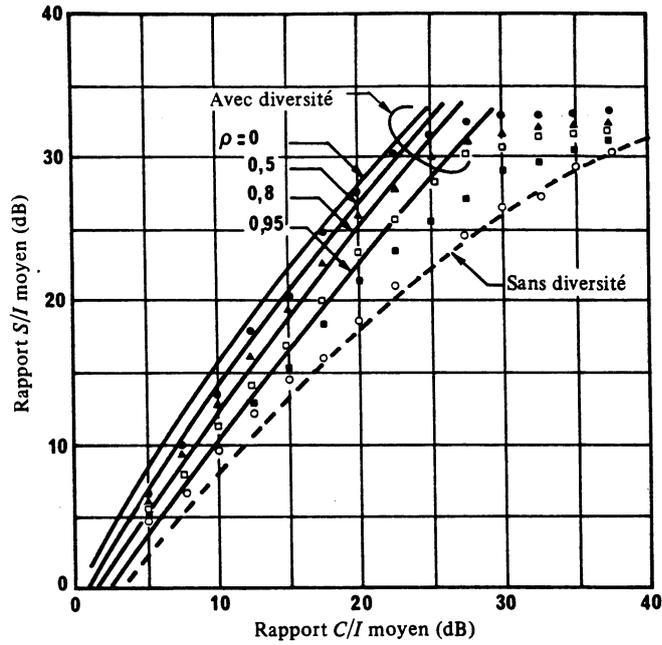
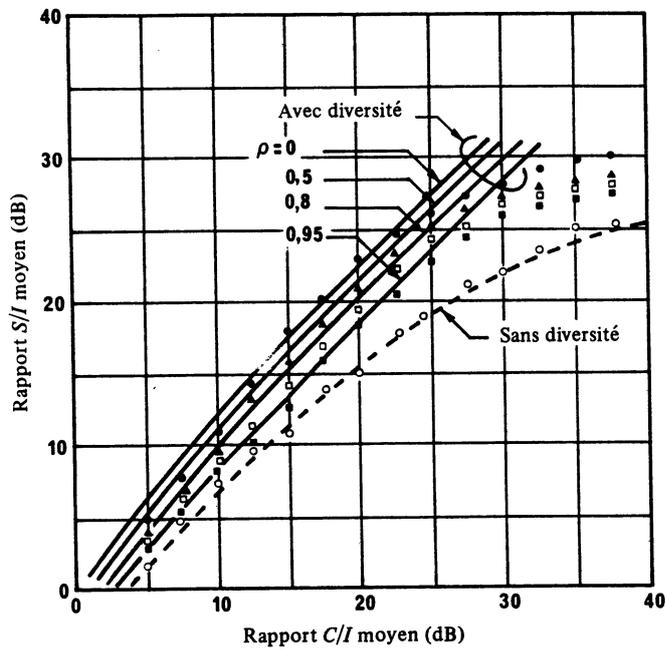
a) $B = 16$ kHzb) $B = 8$ kHz

FIGURE 3 – Caractéristiques de C/I en fonction de S/I

Conditions: – fréquence porteuse: bande des 900 MHz
 – largeur de bande B du filtre FI: 16 et 8 kHz
 – fréquence des évanouissements: 34 Hz
 – niveau de modulation type: $3,5/\sqrt{2}$ rad efficaces – $B = 16$ kHz
 $1,75/\sqrt{2}$ rad efficaces – $B = 8$ kHz

Le niveau de référence du compresseur est réglé à une valeur égale au niveau de modulation type.

Le rapport C/I est mesuré dans une largeur de bande du filtre FI de 16 kHz et de 8 kHz.

Le rapport S/I est mesuré dans une largeur de bande du filtre de la bande de base de 0,3-3 kHz.

Un compresseur-extenseur syllabique 2:1 est utilisé.



- SUWA, K. et HATTORI, T. [février 1985] A study on selection diversity for land mobile radio – baseband SIR improvement in co-channel interference, *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs of Japan*, Vol. J67-B, 2.
- SUWA, K., SHIMIZU, I. et HATTORI, T. [juillet 1984] Diversity improvement of voice signal transmission using postdetection selection combining in land mobile radio, *IEEE J. Selec. Areas in Comm.*, Vol. SAC-2, 4.
- US ADVISORY COMMITTEE [1967] Report of the Advisory Committee for the land mobile radio services. United States Printing Office, Washington, DC, États-Unis d'Amérique.

BIBLIOGRAPHIE

- FCC [20 décembre 1971; 20 juillet 1972; avril 1973] Motorola response. Docket 18262, Federal Communications Commission.
- FCC [20 décembre 1971; 20 juillet 1972] AT&T response. Docket 18262, Federal Communications Commission.
- JAKES, W. C., Jr. (Ed.) [1974] *Microwave Mobile Communications*. John Wiley, New York, NY., États-Unis d'Amérique.
- SCHIFF, L. [février 1970] Traffic capacity of three types of common user mobile radio communication systems. *IEEE Trans. Comm. Tech.*, Vol. COM-18, 1.
-