

Génie Electrical
Electrique Engineering

ETUDE DE METHODES DE LA GESTION
DU SPECTRE DES FREQUENCES POUR LES
SYSTEMES DE COMMUNICATIONS MOBILES: *rapport*

PHASE III

PAR

Dr. NICOLAS D. GEORGANAS
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
UNIVERSITE D'OTTAWA



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

Queen
P
91
C655
U67
1981

ETUDE DE METHODES DE LA GESTION
DU SPECTRE DES FREQUENCES POUR LES
SYSTEMES DE COMMUNICATIONS MOBILES: *rapport final*

PHASE III

PAR

Dr. NICOLAS D. GEORGANAS
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
UNIVERSITE D'OTTAWA

POUR

MINISTERE DES COMMUNICATIONS
IMMEUBLE JOURNAL NORD
300 RUE SLATER
OTTAWA, ONTARIO
K1A 0C8

Industry Canada
Library. Queen
JUL 23 1998
Industrie Canada
Bibliothèque Queen

COMMUNICATIONS CANADA
JUL 3 1981
LIBRARY - BIBLIOTHEQUE

P
91
C655
467
1981

DD 6378117
DL 6379215



TITRE DU PROJET

ETUDE DE METHODES DE LA GESTION DU
SPECTRE DES FREQUENCES POUR LES
SYSTEMES DE COMMUNICATIONS MOBILES:

PHASE III

POUR

MINISTERE DES COMMUNICATIONS

IMMEUBLE JOURNAL NORD

300 RUE SLATER

OTTAWA, ONTARIO

K1A 0C8

No. du dossier MAS : 20SU. 36100-0-2406

No. de Série du Contrat: OSU80-00155

REDIGE PAR

Professeur N.D. Georganas

Département de Génie Electrique

Université d'Ottawa.

Ottawa, Ontario

K1N 6N5

Période: 21 août 1980 au 31 mars 1981

COMMUNICATIONS CANADA

JULY 3 1981

LIBRARY - BIBLIOTHÈQUE

PERSONNEL PRINCIPAL DU PROJET

CHERCHEUR PRINCIPAL : Dr. Nicolas D. Georganas

ETUDIANTS DU 2e CYCLE: George Nehme
Michel McDonnell

ETUDIANT DU 1er CYCLE: Marc Pytura

RESUME

Ce rapport se concentre sur les systèmes cellulaires pour la communication terrestre-mobile. Premièrement, on considère un système cellulaire avec une distribution spatiale de trafic nonuniforme et service Erlang-B. Un modèle de simulation GPSS est développé et étudié. On considère différents nombres de canaux dans le système, différentes attributions de canaux (fixe, dynamique, hybride) et différentes distributions spatiales de trafic. On obtient des conclusions sur la meilleure méthode d'attribution de canaux par rapport au trafic max. par cellule, et aussi sur l'efficacité spectrale de cette attribution. Deuxièmement, on considère un système cellulaire avec une distribution de trafic uniforme, service Erlang B, mais avec canaux d'accès. On étudie par simulation GPSS un protocole de signalisation et on obtient des conclusions sur le nombre de canaux d'accès nécessaires. Troisièmement, on présente une étude sur l'utilisation des satellites pour la communication terrestre-mobile.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
SOMMAIRE	(i)
I. CONCEPTS DE BASE	1.1
1.1. Introduction	1.1
1.2. Disciplines de service des appels	1.3
1.2.1 Erlang-B	1.4
1.2.2 Erlang-C	1.5
1.2.3 Hybrid Erlang-B/Erlang-C	1.6
II. SYSTEMES CELLULAIRES	2.1
2.1. Introduction	2.1
2.2. Taille des cellules	2.11
2.3. Schémas d'attribution des canaux	2.12
2.3.1 Système Fixe	2.14
2.3.2 Système Dynamique	2.17
2.3.3 Système Hybride	2.21
2.4. Références	2.25
III. SIMULATION D'UN SYSTEME CELLULAIRE AVEC TRAFIC NONUNIFORME	3.1
3.1. Description du système simulé	3.1
3.1.1 Modèle de simulation	3.1
3.1.2 Diagramme de simulation	3.3
3.2. Résultats de simulation	3.7
3.2.1 Performance du système avec 30 canaux dans l'aire simulé	3.9
3.2.2 Efficacité spectrale dans C1 et toute Cj avec le même nombre de canaux dans toute cellule	3.17
3.2.2.1 Probabilité de blocage dans la cellule centrale	3.18
3.2.2.2 Efficacité spectrale: Hybride vs fixe dans C1	3.18
3.2.2.3 Nombre de canaux nécessaires dans toute cellule Cj	3.19
3.2.2.4 Efficacité spectrale: Hybride vs fixe dans Cj	3.19
3.2.2.5 Discussions	3.19

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
3.2.3 Efficacité spectrale avec différent nombre de canaux dans C1 et toute Cj	3.34
3.2.3.1 Probabilité de blocage dans la cellule centrale	3.34
3.2.3.2 Nombre minimum de canaux dans C1	3.35
3.2.3.3 Probabilité de blocage dans toute cellule Cj	3.41
3.2.3.4 Efficacité spectrale: Hybride vs fixe dans chaque Cj	3.41
3.2.3.5 Conclusions	3.42
3.2.4 Résultats de simulation avec trafic fixe et variable	3.42
3.2.4.1 Performance du système avec 30 canaux par cellule initialement	3.49
3.2.4.2 Performance du système avec 30 canaux attri- bués dans chaque cellule	3.49
3.2.4.3 Performance du système avec 20 canaux dans C1 et 10 canaux dans chaque Cj	3.51
3.2.4.4 Performance du système avec 30 canaux dans C1 et 20 dans chaque Cj	3.52
3.3. Conclusions	3.64
3.4. Références	3.66
 IV. SIMULATION D'UN PROTOCOLE DE SIGNALISATION POUR LES SYSTEMES CELLULAIRES	 4.1
4.1. Introduction	4.1
4.2. Plan des canaux d'établissement de contacts	4.4
4.3. Logique et architecture de contrôle	4.7
4.3.1 Travail d'initialisation	4.7
4.3.2 Séquence d'origine d'appel	4.10

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
4.4. Description du système simulé	4.18
4.5. Nomenclature	4.20
4.6. Modèle de simulation	4.22
4.7. Limitation du modèle des canaux de signalisation	4.24
4.8. Résultats de simulation	4.27
4.9. Conclusions	4.33
4.10. Références	4.49
V. SATELLITES DANS LA COMMUNICATION MOBILE	5.1
5.1. Introduction	5.1
5.1.1 Systèmes de communications mobiles	5.1
5.1.2 Systèmes cellulaires	5.2
5.1.3 L'utilisation de satellites	5.4
5.1.4 Expériences auprès d'utilisateurs éventuels d'un service par satellite	5.5
5.1.4.1 Aspect relatif aux services médicaux d'urgence	5.6
5.1.4.2 Aspect relatif à l'application des lois	5.7
5.1.4.3 Aspect relatif au camionnage entre états	5.7
5.1.4.4 Aspect relatif à la communication en situation d'urgence	5.7
5.2. Système Terre-Mobile-Satellite (T/LMSS)	5.8
5.2.1 Description Générale	5.10
5.2.2 Antenne à faisceaux multiples	
5.2.3 Choix de canal et réutilisation des fréquences	5.11
5.2.4 Transmission des appels	5.12
5.2.5 Raccordement des appels avec le réseau de téléphone	5.13

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
5.2.5.1	Absence de commutation 5.14
5.2.5.2	Commutation des faisceaux du satellite 5.15
5.2.5.2.1	Appel d'un abonné mobile destiné à un appareil fixe 5.15
5.2.5.2.2	Appel d'un appareil mobile à un autre 5.16
5.2.5.3	Transmission d'un appel 5.17
5.2.5.4	Transmission d'appels en cours lorsque le véhicule change de cellule 5.18
5.2.5.5	L'installation de gestion des communications 5.18
5.3.	Systèmes T/LMSS proposés 5.19
5.4.	Attribution des fréquences 5.21
5.5.	Système de mesure de l'utilisation du spectre 5.23
5.5.1	Système traditionnel, grande région - Système cellulaire, petite région 5.24
5.5.2	Satellite desservant une grande région 5.24
5.5.3	Facteurs qui influencent l'utilisation du spectre 5.26
5.6.	Délimitation de positions - par satellite 5.28
5.6.1	La délimitation de positions au moyen de dispositifs de mesure de la position 5.28
5.6.2	Délimitation de positions par la méthode des codes de tonalité 5.31
5.6.3	Délimitation de positions au moyen d'un satellite à répéteur actif 5.34
5.6.4	Expériences sur la délimitation de positions par la méthode des codes de tonalité 5.35

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
5.7. Composants du système	5.37
5.7.1 L'émetteur-récepteur mobile et la station terrestre	5.38
5.7.2 Antenne multifaisceaux du satellite	5.39
5.7.3 Réutilisation des fréquences	5.43
5.7.4 Traitement de la voix et des signaux	5.44
5.8. Marché-Coûts	5.46
5.8.1 Marché possible pour les satellites	5.47
5.8.2 Répartition et proportion de la population desservie par satellite	5.48
5.8.3 Coûts du système	5.50
5.8.3.1 Analyse Générale	5.50
5.8.3.2 Autres estimations	5.54
5.9 Conclusions	5.55

(i)

SOMMAIRE

Dans la première phase du contrat (novembre 23, 1978 - mars 31, 1979) (voir Rapport final soumis au Département des Communications, mars 1979) nous avons débuté l'étude d'une méthode de gestion du spectre des fréquences pour la communication radio-mobile, c'est-à-dire les systèmes cellulaires. En particulier, nous avons étudié un système cellulaire, avec trafic uniformément distribué, ayant un schéma hybride d'attribution des canaux et la discipline de service Erlang-C. Des conclusions étaient atteintes au sujet de la meilleure répartition des canaux entre fixes et dynamiques, par rapport à la probabilité de blocage du système. Cette étude était faite par simulation GPSS d'ordinateur.

Dans la deuxième phase du contrat (novembre 30, 1979 - mars 31, 1980) (voir Rapport final soumis au Département des Communications, mars 1980), nous avons étudié, par simulation GPSS un système cellulaire avec trafic uniforme, un schéma hybride et la discipline de service Erlang-B. L'attribution hybride était comparée avec l'attribution fixe et dynamique par rapport au trafic maximum par cellule que chaque méthode d'attribution peut supporter, pour une qualité de service donnée (blocage 2%). Pour ce même système cellulaire uniforme, on a déterminé le nombre minimum de canaux par cellule nécessaires pour fournir une qualité de service donnée, pour des taux différents de trafic offert. On a aussi obtenu l'efficacité spectrale (15%) du système hybride par rapport au système fixe.

(ii)

Dans ce rapport, nous présentons des résultats de recherches de la troisième phase du contrat (août 21, 1980 - mars 31, 1981).

Le premier chapitre fournit des concepts de trafic de base. Les trois disciplines de service d'appels (i) Erlang-B (appels-bloqués-éliminés); (ii) Erlang-C (appels-bloqués-retardés) et (iii) Hybride Erlang-B/Erlang-C (appels-bloqués-retenus) sont présentées.

Au deuxième chapitre, nous présentons des concepts de base des systèmes cellulaires et des attributions de fréquences.

Le troisième chapitre présente des résultats de simulation GPSS d'un système cellulaire avec distribution de trafic non-uniforme et discipline de service Erlang-B. On considère que la cellule centrale du système a un niveau de trafic plus élevé de X % que les autres cellules, qui ont la même densité de trafic. Pour différentes valeurs de X % et différents nombres de canaux par cellule ou dans le système, on obtient des résultats sur les meilleures attributions de fréquences par rapport au trafic supporté et par rapport à leur efficacité spectrale.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons des résultats de simulation d'un protocole de signalisation pour les systèmes cellulaires, celui utilisé au système AMPS de AT&T à Chicago. Ici, nous considérons un système cellulaire avec un nombre limité de canaux d'accès et service Erlang-B pour les

(iii)

canaux de voix. On obtient des conclusions importantes sur le nombre de canaux d'accès nécessaires et sur le nombre de tentatives pour obtenir un canal d'accès.

Finalement, au cinquième chapitre, on présente une étude préliminaire sur l'utilisation de satellites dans la communication mobile.

I. CONCEPTS DE BASE

1.1. Introduction

Le trafic est un aspect important qu'on doit considérer lors de l'étude des systèmes de communication. Nous allons utiliser le terme 'trafic', à travers cette étude, comme il est compris dans le contexte téléphonique, où il est relié au nombre d'appels par heure.

Le nombre d'appels téléphoniques varie beaucoup durant une journée, pour cela la densité des lignes (ou canaux-radio) requise doit être suffisante pour satisfaire la demande aux heures de pointes.

Les facteurs de base impliqués dans l'implantation des facilités sont: le taux des appels, la durée des appels et la qualité de service requise. Le produit des deux premiers facteurs est le 'trafic offert'. Ceci indique le montant du temps quand un nombre d'utilisateurs utilise le système. L'unité Erlang est la quantité des appels qu'un canal utilise complètement. Un (1) Erlang est le montant de trafic qu'un canal peut supporter durant une (1) heure, s'il est constamment occupé; en d'autres mots 3600 appels-secondes de trafic.

On a établi que la probabilité de blocage des appels peut être utilisée pour dériver une relation entre le trafic offert par cellule, la qualité du service et le nombre moyen des canaux disponibles assignés par cellule. Des formules ont été développées pour construire des tables de capacité du système. Ces formules tiennent compte des caractéristiques des appels téléphoniques.

Parmi les caractéristiques des appels, nous mentionnons: la distribution des appels dans le temps, le taux d'appels par utilisateur, la variation de la durée des appels et le comportement des utilisateurs ou de l'équipement lorsque toutes les facilités sont occupées. Les réseaux de téléphones terrestres montrent que la durée des appels suit une distribution exponentielle négative. Les durées des appels entre les mobiles varient à peu près de la même façon [1].

Chaque mobile devrait avoir accès à tous les canaux disponibles, mais les considérations physiques et économiques dans la création de l'équipement, prouvent que ceci n'est pas toujours vrai. Cette limitation dépend de la qualité de service, c'est-à-dire de la probabilité que tous les canaux soient occupés, ou par le délai moyen subi par les appels avant d'avoir la communication.

L'assertation qu'un client utilise le système de façon aléatoire et indépendamment des autres, n'est pas suffisamment valide du fait que lorsque deux utilisateurs occupent une ligne leurs possibilités d'effectuer d'autres appels indépendamment l'un de l'autre est restreinte. La restriction peut être négligée pour un grand nombre d'utilisateurs ayant chacun une petite probabilité de faire un appel. Il est présumé que, durant une longue période de temps, un client produit le même nombre d'Erlangs de charge que tout autre client.

Evidemment, le taux d'appels varie beaucoup, suivant l'utilisation des lignes par chaque individu, mais le nombre moyen des appels est utilisé pour dériver les relations et ceci sera expliqué en plus de détail dans le chapitre 3.

1.2. Disciplines de service des appels

Il existe deux disciplines extrêmes pour résoudre le problème des appels bloqués:

1. premièrement, les appels qui ne trouvent pas de canaux libres, disparaissent du système pour revenir plus tard. Cette hypothèse (appels bloqués éliminés), est à la base d'une formule pour obtenir la probabilité de blocage, appelée la formule Erlang-B.
2. quelques appels qui ne trouvent pas de canaux immédiatement, attendent dans une queue jusqu'à ce qu'il y en ait un qui se libère. Cette hypothèse (appels bloqués retardés) est à la base d'une formule, Erlang-C.
3. entre ces deux extrêmes, il existe une autre discipline qui est un mélange des deux, c'est-à-dire, un utilisateur qui n'obtient pas de canaux libres attend pendant un temps déterminé, puis son appel disparaît du système si aucun canal n'est disponible à ce temps. Cette discipline est appelée "appels bloqués retenus".

1.2.1. Appels bloqués éliminés (Erlang-B)

Cette discipline de service est très importante lors de l'implantation des systèmes de communication mobile. Le système, appels bloqués éliminés (ABE), emploie un nombre fini de canaux, C , et les appels arrivent d'après le processus de Poisson avec l'intensité λ . Les appels qui entrent dans le système lorsqu'un canal est disponible dans une cellule particulière seront servis immédiatement. Par contre, les appels qui entrent dans le système lorsque tous les canaux sont occupés seront rejetés immédiatement. La durée d'un appel est considéré comme indépendante et suit une distribution exponentielle négative avec une moyenne $\frac{1}{\mu}$.

Le nombre de Erlang reçu est donné par:

d'appels par hr. x le temps moyen par appel (secs.)

3600

La probabilité de blocage, c'est-à-dire que tous les canaux soient occupés est donnée par la formule Erlang-B:

$$B(C, a) = \frac{\frac{\rho^C}{C!}}{\sum_{n=0}^C \frac{\rho^n}{n!}}, \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Puisqu'aucune queue est permise dans la discipline Erlang-B, le temps d'attente moyen est nul. Cette discipline est représentée par le modèle M/M/m/m de queues (Figure 1.1) dans lequel il y a m canaux identiques, ayant chacun une distribution du temps de service identique (durée d'appel).

1.2.2. Appels bloqués retardés (Erlang-C)

Le modèle Erlang-C est utilisé lorsque les appels bloqués demeurent dans le système et attendent qu'un canal soit libéré. Cette discipline est représentée par le modèle $M/M/m/\infty$ de queues (Figure 1.2). Ce dernier est formé de m canaux ayant un temps de service qui suit la distribution exponentielle négative avec une moyenne de $\frac{1}{\mu}$ sec., et d'arrivées d'appel suivent le processus de Poisson, dont la moyenne est de λ appels/hr. De plus, les appels qui trouvent un canal libre reçoivent le service immédiatement. Ceux qui arrivent lorsque tous les canaux sont occupés, font la queue et seront servis en ordre (premier-arrivé-premier servi FIFO). La queue dans ce cas n'a pas de limite finie.

Deux cas présentant le modèle ABR sont symbolisés dans les Figures 1.2(a) et 1.2(b).

La Figure 1.2(a) représente la situation où les appels n'ont pas de canaux indiqués, c'est-à-dire qu'ils seront servis par le premier canal libéré.

La Figure 1.2(b) représente le modèle où les appels seront servis par un canal prédéterminé. Le temps d'attente dans la queue de ce dernier modèle est plus grand que celui du premier cas.

La probabilité qu'un appel soit bloqué est donnée par

la formule de Erlang-C comme suit:

$$P_C = \frac{1 - \frac{\sum_{K=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^K}{K!}}{\sum_{K=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^K}{K!}}}{1 - \rho \frac{\sum_{K=0}^{m-1} \frac{(m\rho)^K}{K!}}{\sum_{K=0}^m \frac{(m\rho)^K}{K!}}}$$

1.2.3. Appels bloqués retenus (Hybride Erlang-B/Erlang-C)

Ce modèle est un hybride Erlang-B/Erlang-C. Si un appel entre dans le système lorsque tous les canaux sont occupés, il reste dans le système pour un temps donné pour être rejeté ensuite. Les hypothèses sont les mêmes que dans le modèle Erlang-B. La seule différence est le montant de temps pendant lequel l'appel bloqué est retenu.

La probabilité qu'un appel soit bloqué est donnée par la formule :

$$P_H = \sum_{K=m}^{\infty} \frac{(m\rho)^K}{K!} e^{-m\rho} ; \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

où m est le nombre de canaux et ρ est le facteur d'utilisation de chaque canal.

La façon pour laquelle les appels bloqués sont traités influence la probabilité que tous les canaux soient occupés.

Dans le premier modèle (ABE), les appels bloqués n'occupent pas de canal, par conséquent la probabilité que tous les canaux soient occupés est plus faible que celle des deux autres disciplines. Le service actuel de téléphones mobiles est décrit par le modèle Erlang-B. Noter que le Comité Consultatif International pour les Téléphones et les Télégraphes (CCITT) a recommandé l'utilisation de Erlang-B .

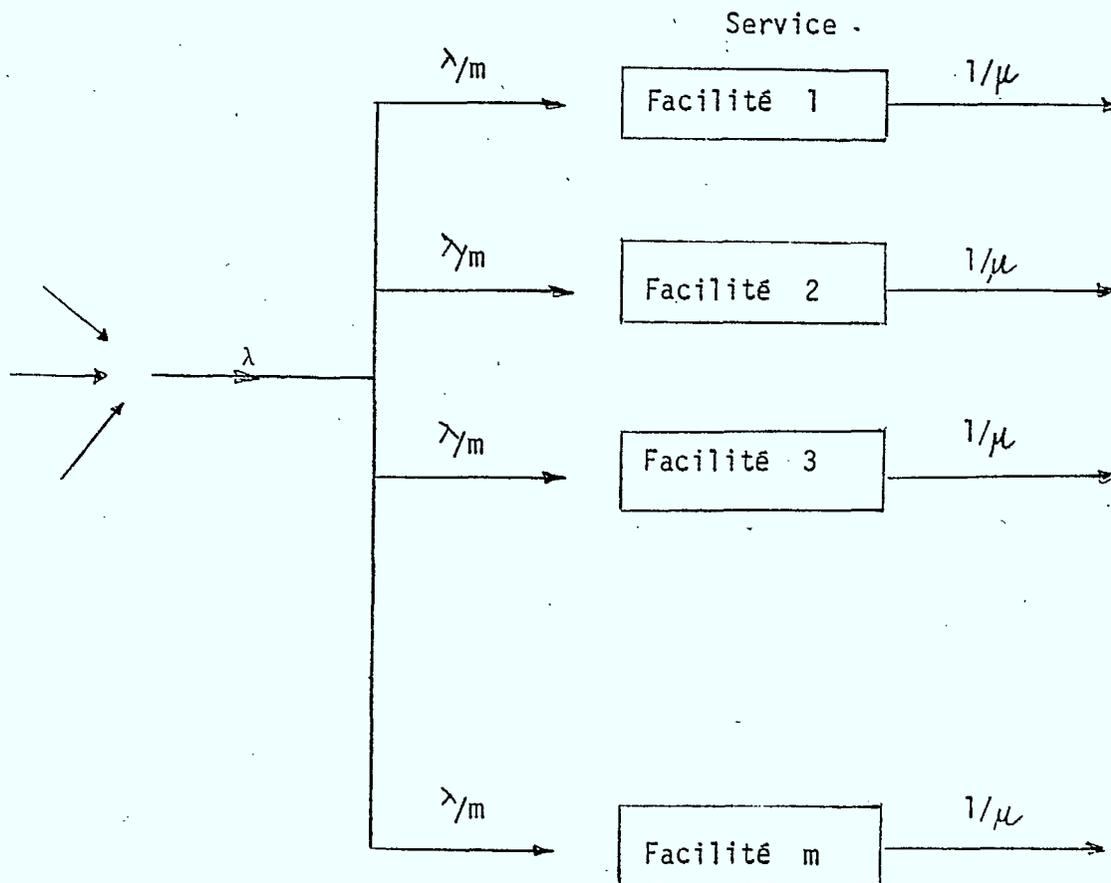


Fig. 1.1 - Un modèle de Queues pour la discipline ABE.

1.9

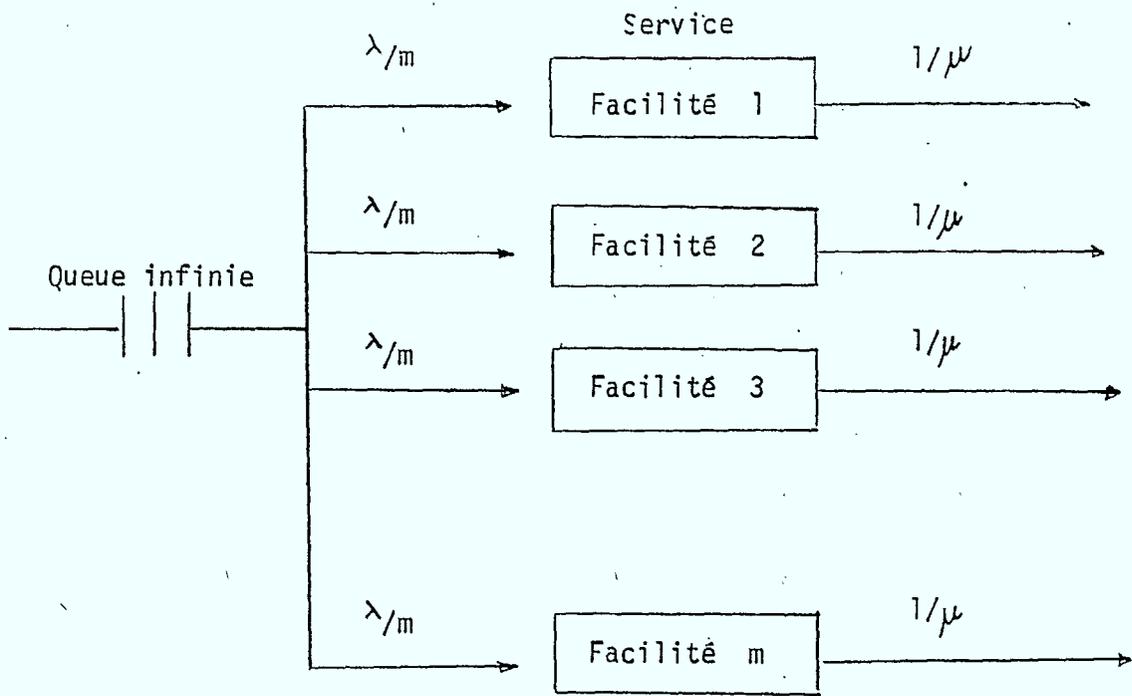


Fig. 1.2 (a) - Une queue à serveurs-multiples avec m serveurs.

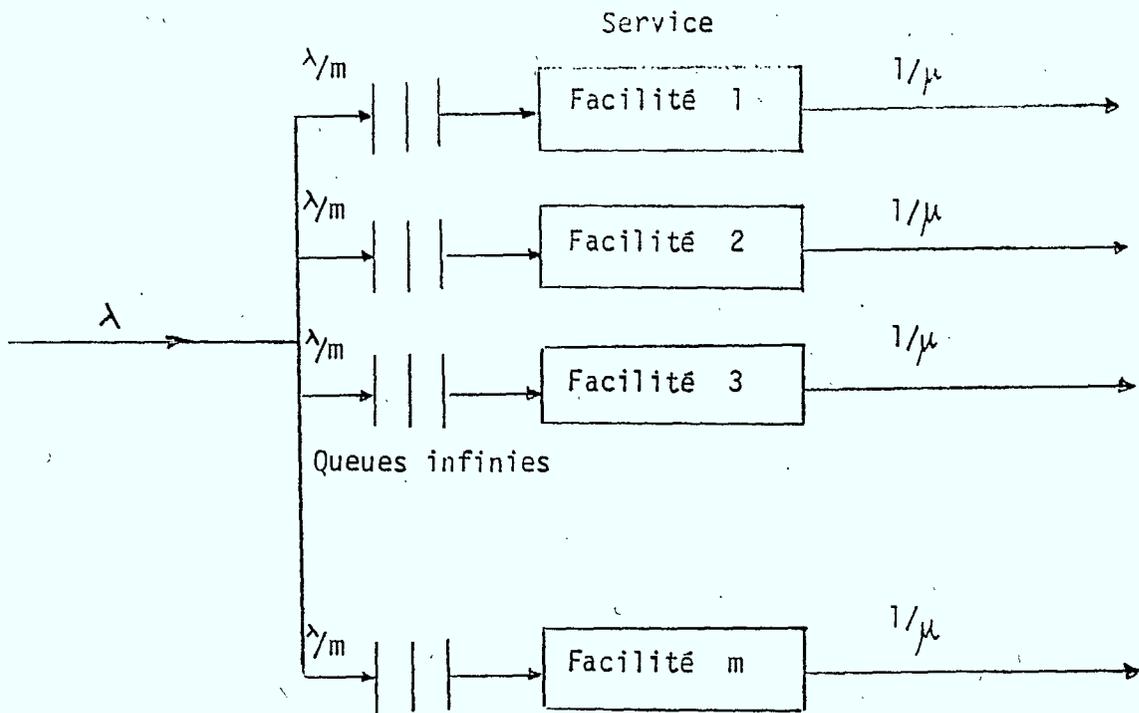


Fig. 1.2 (b) - m Queues à serveur-unique en parallèle.

II. SYSTEMES CELLULAIRES

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, on démontre comment un système cellulaire fonctionne à l'intérieur d'un spectre de fréquences limité. Comment il peut satisfaire les objectifs d'un service de téléphone mobile de grande envergure et comment il est désigné afin de limiter les dépenses.

Depuis les années 40, les ingénieurs ont élaboré différents systèmes de communications mobiles, qui peuvent être désignés pour satisfaire tous les objectifs suivants:

1. un très grand nombre d'abonnés;
2. un usage efficace du spectre;
3. une compatibilité nationale;
4. une disponibilité très étendue;
5. une adaptation à la densité du trafic;
6. un service téléphonique régulier et des services spéciaux, incluant un service de messagerie;
7. une qualité de service téléphonique;
8. un coût abordable.

Les premiers systèmes de communication mobile radio furent conçus selon le concept de recouvrement global. Les ingénieurs de système mobile radio ont recherché les plus hautes montagnes ou édifices dans l'aire de service pour ériger leurs antennes de haute puissance dans le but de couvrir la plus grande région possible. Des récepteurs additionnels ont dû éventuellement

être distribué dans l'aire de service de façon à obtenir le lien base-mobile requis pour les régions de signal faible, puisqu'il n'était pas pratique de transmettre la même puissance à partir des unités mobiles. Dans ces systèmes utilisant une seule station de base, plusieurs obstacles produisent des distortions dans l'aire de service (voir Fig. 2.1). Les ingénieurs ont essayé, en installant d'autres émetteurs et antennes, d'éviter ces distortions, mais cette solution a causé plusieurs problèmes, par exemple de l'interférence était créée lorsque les deux signaux, celui provenant de l'antenne primaire et celui provenant de l'antenne secondaire, n'étaient pas en phase.

Le besoin d'opération et d'expansion utilisant des centaines de canaux a été le facteur primaire dans l'évolution du concept cellulaire. Dans un système cellulaire, l'aire de service est divisée en zones ou cellules qui n'emboîtent pas les unes les autres. Une antenne à haute puissance n'est pas nécessaire, puisque les stations centrales équipées chacune d'une antenne omnidirectionnelle, sont responsables du trafic dans leurs cellules seulement. Les stations centrales sont reliées à un bureau de commutation pour la télécommunication mobile (MTSO) qui est lui-même relié au réseau téléphonique. Le (MTSO) est équipé d'un système électronique de commutation avec des terminaux, des mémoires et des programmes spécialisés de façon à obtenir la coordination précise nécessaire et le contrôle pour administrer l'attribution des bases, l'attribution des canaux, et l'interconnection des mobiles l'un avec l'autre ou avec le réseau téléphonique.

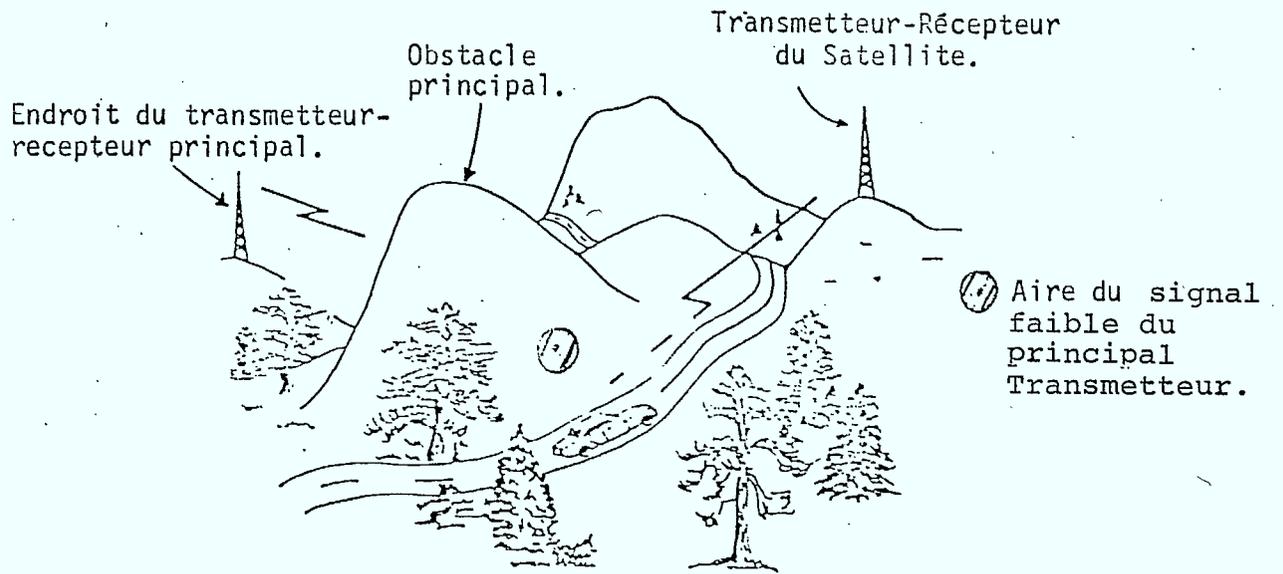


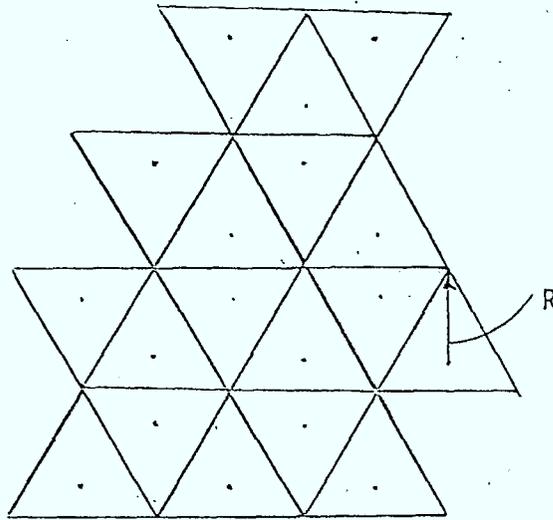
Fig. 2.1 Principaux obstacles et utilités d'une station de base d'un satellite en vue de combler une aire de faible réception.

Pour mieux comprendre cette méthode d'implantation de système cellulaire, considérons une région plane qui peut être divisée en cellules identiques, triangulaires, carrées ou hexagonales. La Figure 2.2 nous montre ces différentes divisions.

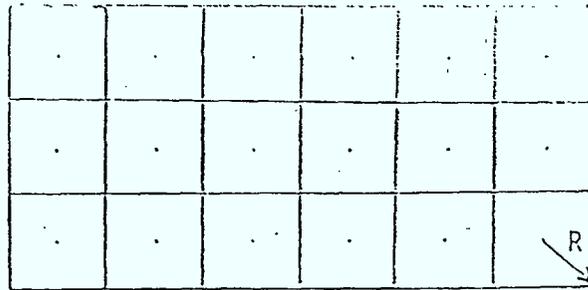
Pour comparer les trois configurations de cellules, on utilise les paramètres N et D/R . N est le nombre minimum des ensembles de canaux requis pour couvrir la surface complètement. D est la distance géographique entre le centre de deux cellules qui utilise le même canal simultanément. R est la distance maximum entre le centre et le bord d'une cellule.

1. les systèmes cellulaires utilisant des cellules carrées ont été étudiés, car ces coordonnées cartésiennes simplifient les calculs. Pour un système carré, la relation entre N et D/R est $N = 1/2 (D/R)^2$ avec $N = 2, 4, 5, 8, 9, \dots$ et cette valeur est donnée par la relation $N = K^2 + L^2$, avec K et L ayant des valeurs positives entières.
2. les systèmes hexagonaux ont reçu beaucoup d'attention parce qu'un hexagone se rapproche plus du cercle. Pour un système hexagonal, la relation est $N = 1/3 (D/R)^2$ avec $N = 3, 4, 7, 9, 12, 13, \dots$ donné d'après $N = (K+L)^2 - K.L.$

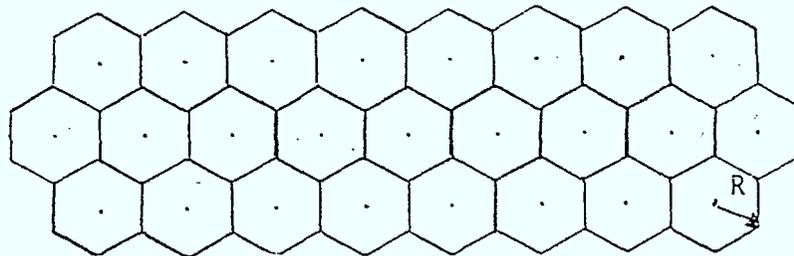
Le rapport D/R est déterminé d'après le rapport signal sur interférence (S/I) et les caractéristiques du système.



(a) Division d'une région en triangles



(b) Division d'une région en carrés



(c) Division d'une région en hexagones.

Fig. 2.2 Trois types de divisions (a), (b) et (c).

Les dimensions des cellules, D et R , sont déterminées d'après les paramètres suivants:

1. la densité de trafic;
2. le nombre de canaux disponibles; et
3. la méthode d'attribution des canaux utilisée.

En général, la densité de trafic est toujours supérieure au centre des villes par rapport aux banlieux. Si la densité de trafic était uniforme sur l'aire totale, les cellules auraient toutes la même forme. Aussi les bases coûtent très chères, donc leurs positions doivent être spécifiées avec précision. Par conséquent, pour diminuer le coût du système, des cellules plus grosses sont utilisées dans les banlieux. Par contre, dans ce genre de division, le rapport D/R n'est pas constant pour l'ensemble des cellules.

Un exemple pour la réutilisation de canaux est démontré dans la Figure 2.3. Dans cette Figure $M-N$ indique le nombre de canaux disponibles à chaque station de base pour un système de 20 canaux dont l'interval de réutilisation est à toute quatrième station de base.

Considérons encore deux stations de base A et B , séparées par une distance D comme dans la Figure 2.4.

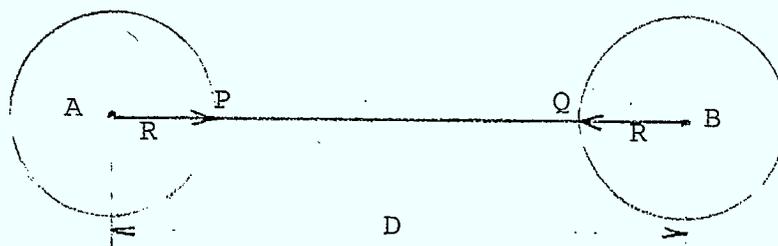


Fig. 2.4. Réutilisation des fréquences pour deux stations de base séparées par la distance D .

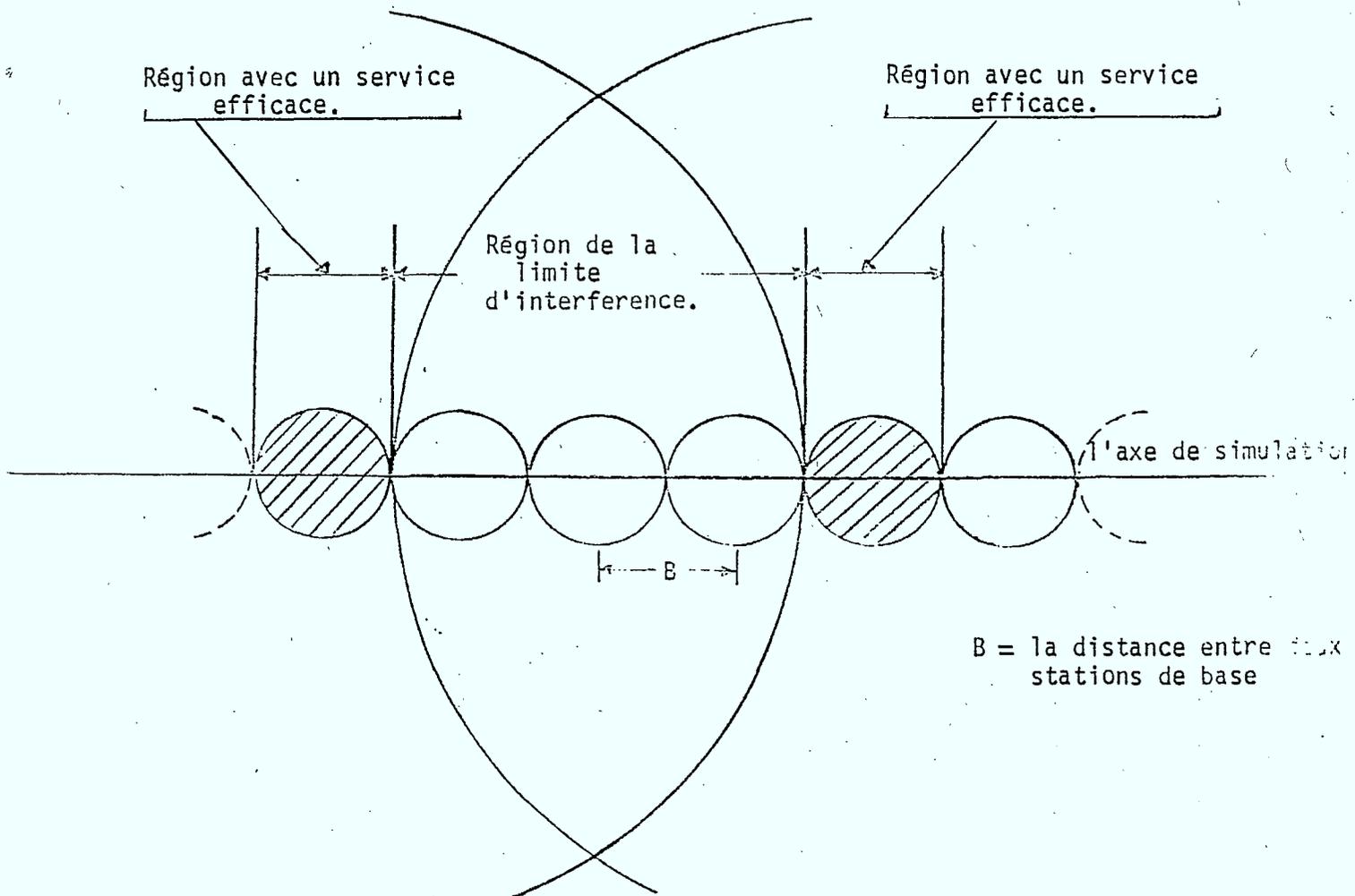


Fig. 2.3 (a) - Réutilisation des fréquences

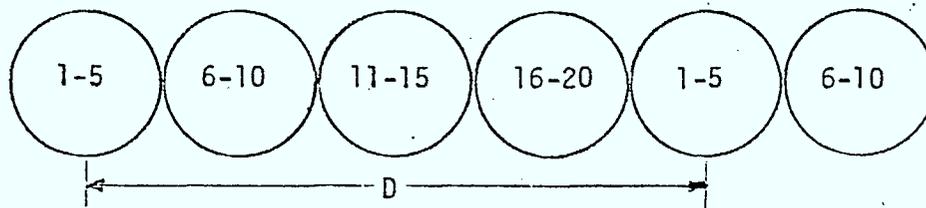


Fig. 2.3 (b) - Réutilisation des fréquences par deux stations de base séparées par la distance D.

La puissance moyenne du signal reçu au point P, de A, est proportionnelle à R^{-n} , où R est la distance entre A et P, et n est une constante de propagation des ondes, situé entre 2 et 4. Si on suppose que P est situé sur la ligne reliant A et B, alors la puissance moyenne reçue de B sera $(D-R)^{-n}$. Par contre, dans un système réel, la puissance reçue à P est la somme des différents signaux provenant de toutes les bases. Si A et B transmettent sur la même fréquence, alors le rapport signal sur interférence, S/I est:

$$\frac{S}{I} = \left[\frac{(D-R)}{R} \right]^n$$

d'après cette relation, le rayon des cellules R comparé avec la séparation D est déterminé pour un système donné, lorsque le rapport S/I et la quantité n sont connus.

Si on considère les autres stations de base situées à une autre distance D' de A, utilisant la même fréquence, on obtient en général:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{M} \left[\frac{(D-R)}{R} \right]^n$$

où M est le nombre total de stations de base situées à une distance D. En général:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{R^n \sum_{i=1}^n \frac{1}{(R_i)^n}}$$

où R_i est la distance du point P à la i ème station de base. Cette analyse suppose que le signal obtenu au point P de A, offre un rapport signal sur bruit suffisant [1]. La qualité de transmission pour AMPS a quantifié que le rapport signal sur bruit (S/N) est de 18 dB pour un canal-radio excellent [2].

Une distribution cellulaire du système de communication terrestre mobile est représentée dans la Figure 2.5. Des cellules hexagonales sont préférées par rapport aux autres formes géométriques, puisqu'elles ont le moins de cellules voisines, donc moins de signaux qui peuvent causer de l'interférence.

Puisque les stations de base ont été attribuées pour répondre aux appels, les différents canaux sont ensuite assignés dans les bases. L'attribution des canaux dans d'autres cellules est possible, fournissant ainsi plusieurs communications avec la même fréquence, en considérant la séparation géographique entre les cellules. C'est-à-dire, deux cellules peuvent employer le même canal, si la séparation géographique entre les cellules est assez grande sans produire d'interférence. Par contre, il existe une distance minimum à l'intérieur de laquelle un canal ne peut être réutilisé. Cette séparation minimum est appelée la distance minimum de réutilisation ou distance γ et elle est donnée par:

$$\gamma = D/R$$

Frontière des limites d'interférence
du groupe des cellules par rapport à
la cellule centrale.

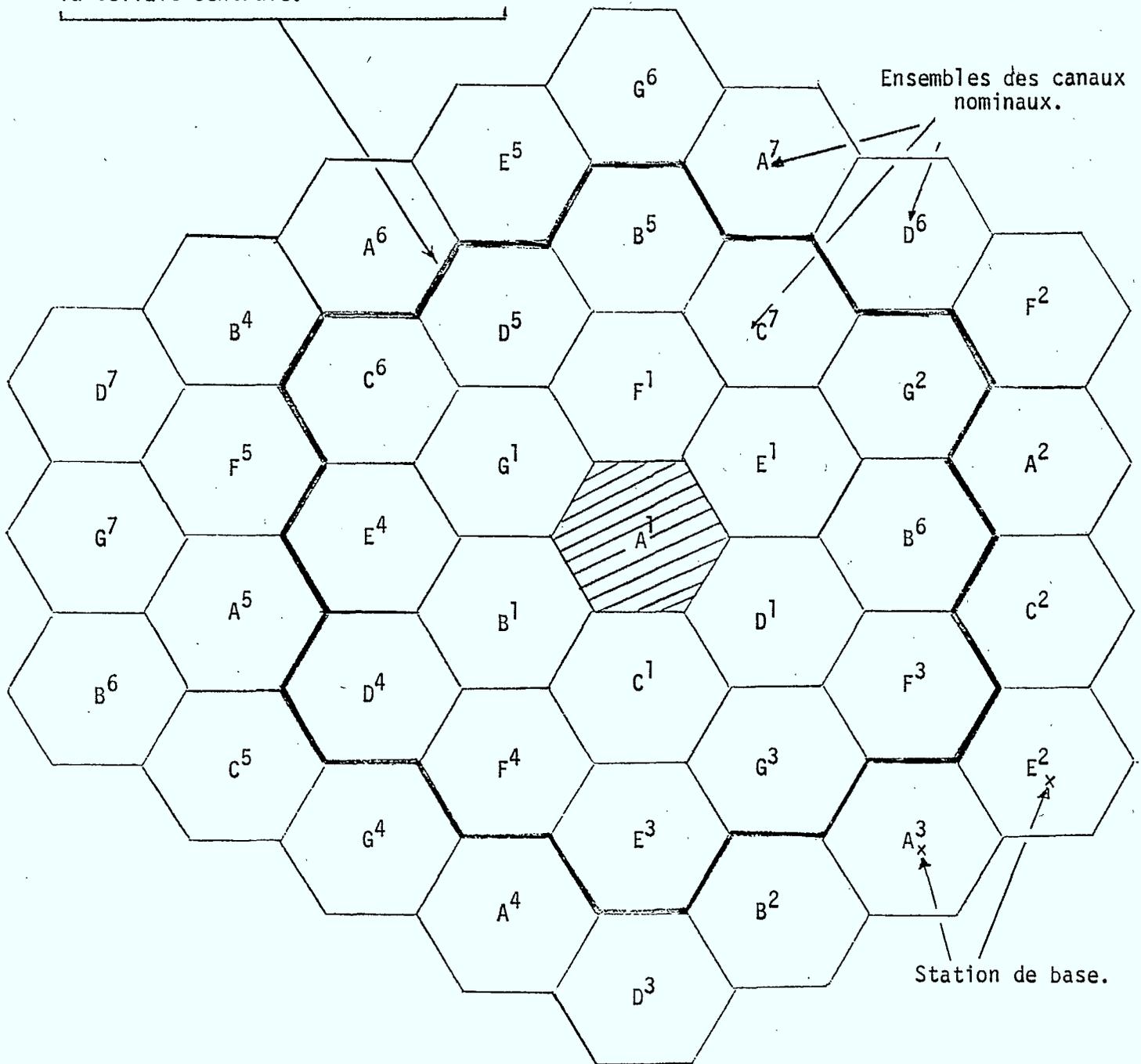


Fig. 2.5 Schéma du système fixe avec un ensemble de canaux attribués

Pour une valeur γ donnée, il existe un groupe d'interférence associé à chaque cellule. L'attribution d'un canal ne peut se faire à un autre endroit dans le groupe d'interférence, si le canal est déjà utilisé dans une cellule du groupe. En plus, le groupe d'interférence peut être considéré comme le bloc de base, puisque chaque cellule du groupe doit obtenir un ensemble de fréquence différent. Donc, ce bloc de base peut être répété jusqu'à ce que l'aire soit recouverte. Un groupe d'interférence est représenté pour la cellule hachurée de la Figure 2.5 par la courbe grasse. Il y a 19 membres dans ce groupe. Les lettres majuscules indiquent le groupe de fréquence utilisé dans chaque cellule. On peut remarquer, qu'une réutilisation du groupe de fréquence est interdit à l'intérieur du groupe d'interférence.

2.2. Taille des cellules

En général, le système cellulaire le plus économique, utilise des cellules qui sont assez petites pour fournir le service au trafic le plus élevé en utilisant tous les canaux. Ceci minimise le nombre de stations de base et attribue les fréquences radio disponibles dans le plus gros groupe, puisque d'après la théorie, un groupe très grand de canaux est plus efficace qu'un petit groupe.

Pour n'importe quelle capacité, la densité du nombre d'utilisateurs varie du centre d'une ville au contour de celle-ci. En plus, la capacité du système varie en fonction du temps. Ces faits suggèrent un système dont la taille des cellules varieraient

continuellement avec le temps et la position, mais un tel système est économiquement irréalisable. Un système qui réduit la grandeur des cellules en étapes discrètes, en additionnant de nouvelles stations de base à mi-chemin avec celles déjà existantes, est représenté dans la Figure 2.6.

Des cellules de rayon d'environ un mille sont présentement possibles et un rayon beaucoup plus petit sera possible dans le futur à cause de la technologie des micro-processeurs. La taille maximale sur la grandeur des cellules dépend de la puissance de l'émetteur du mobile et de la base de la largeur de bande des canaux, des récepteurs, de la grandeur de l'antenne et de son gain, du rapport signal sur bruit (S/N) minimum requis et dépend aussi de la diversité, si elle est employée ou non. Des cellules d'un rayon de 20 milles sont possibles aujourd'hui.

2.3. Schemas d'attribution des canaux dans un système cellulaire

Dans les systèmes radio cellulaires, les stations de base (SB) ont été attribuées pour répondre aux appels; les différents canaux sont ensuite assignés dans les bases. Alors les canaux assignés à une cellule peuvent être réutilisés par d'autres cellules, selon certaines contraintes. Il reste à savoir de quelle façon les canaux seront attribués à la cellule centrale et aux autres, dans un système de radio-mobile cellulaire à grande capacité, de tel sorte qu'un canal soit utilisé au maximum.

- SITE ORIGINAL
- NOUVEAU SITE

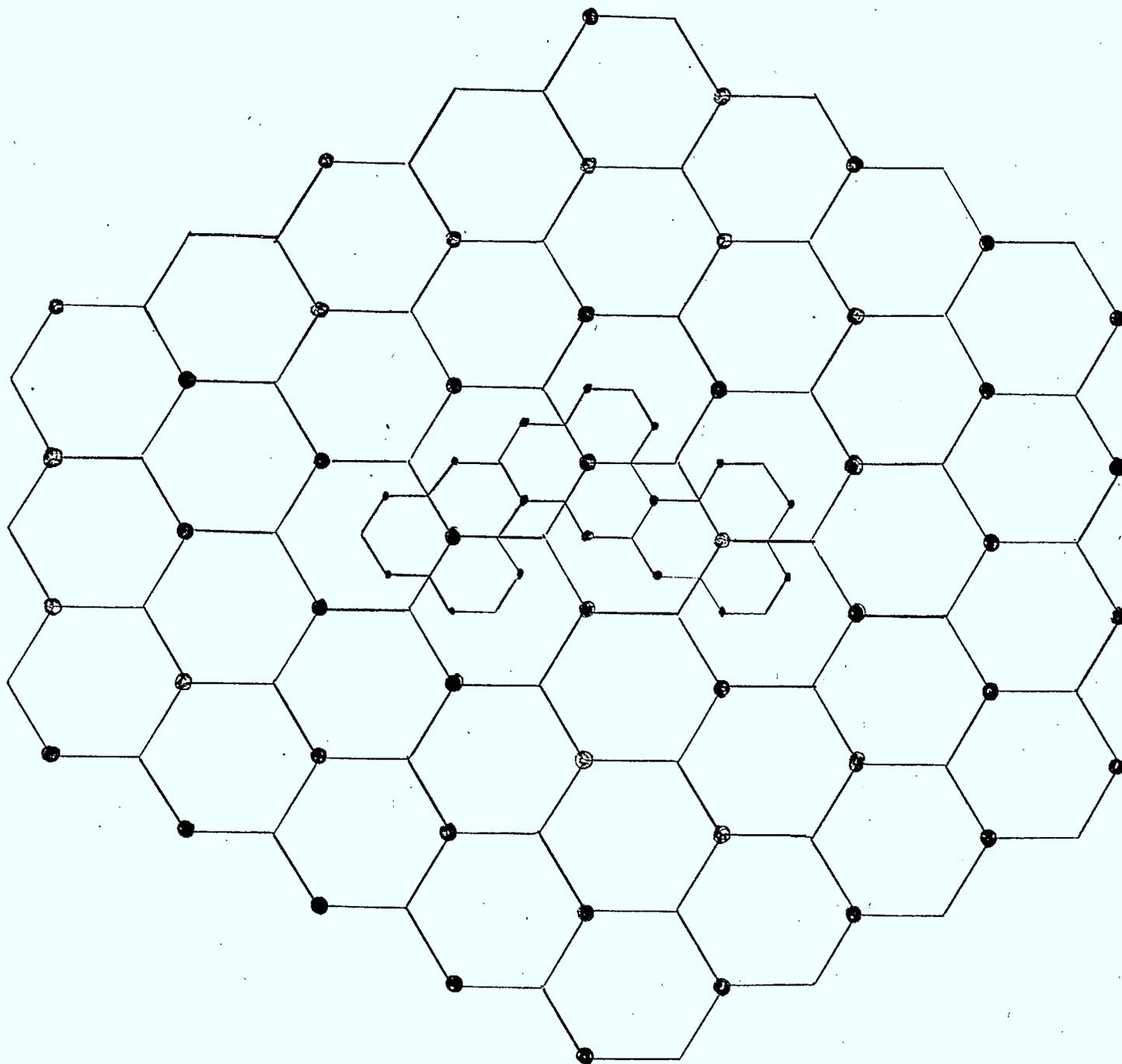


Fig. 2.6 - Réduction de la taille des cellules.

(utilisation plus efficace du spectre de fréquence) sans, pour autant, dépasser les limites acceptables de l'interférence entre les canaux.

2.3.1. Canaux attribués en permanence, système fixe

Dans ce système, les canaux sont attribués en permanence dans les bases. Les canaux sont réutilisés lorsque la séparation géographique le permet. Seulement les canaux assignés à la base peuvent être utilisés pour servir un appel. Si tous les canaux sont attribués dans une base, aucun service ne pourra être fourni à un autre client même s'il existe des canaux libres dans les autres bases.

La recherche d'un canal pour desservir un mobile nécessite seulement de regarder dans l'ensemble des canaux disponibles pour cette base. Donc les groupes de canaux sont indépendants. Le nombre total (T) de canaux de communications est premièrement divisé en N ensembles, où N est relié à l'équation suivante: [3,4]

$$N = 1/3 (D/R)^2 \text{ (pour les cellules hexagonales)}$$

où N peut prendre seulement les valeurs entières 3, 4, 7, 9, ... etc.

N est généralement représenté par la série:

$$(i+j)^2 - i.j, \text{ } i \text{ et } j \text{ sont des nombres entiers}$$

Chaque cellule du système obtient un des N ensembles, en observant la distance de réutilisation. Figure 2.7 est un exemple où la distance $D = 5R$. La lettre majuscule dans chaque cellule représente le canal nominal, et la description avec chaque lettre indique combien de fois ce canal a été réutilisé dans le système. Si on suppose qu'aucun véhicule traverse la frontière d'une cellule, alors le trafic offert à un ensemble de canaux est le produit du taux d'appel, λ , et la durée moyenne d'un appel, H .

Un véhicule qui traverse une frontière entre deux cellules produit les effets suivants:

1. La durée moyenne des appels est diminuée car un mobile doit changer de canal prématurément.
2. Le taux d'appels augmente, car un appel qui entre dans une cellule reçoit la même considération qu'un nouvel appel.
3. quelques appels doivent être terminés prématurément lorsqu'il n'y a pas de canaux disponibles dans la nouvelle cellule. Ceci réduit la durée des appels.

Les points 1 et 2 n'affectent pas le trafic offert $H\lambda$.

L'effet de 3 peut être minimisé en donnant priorité au mobile qui traverse une frontière, sur les nouveaux appels. Si les mobiles qui traversent une frontière n'ont pas priorité, le

Frontière des limites d'interférence
du groupe des cellules par rapport à
la cellule centrale.

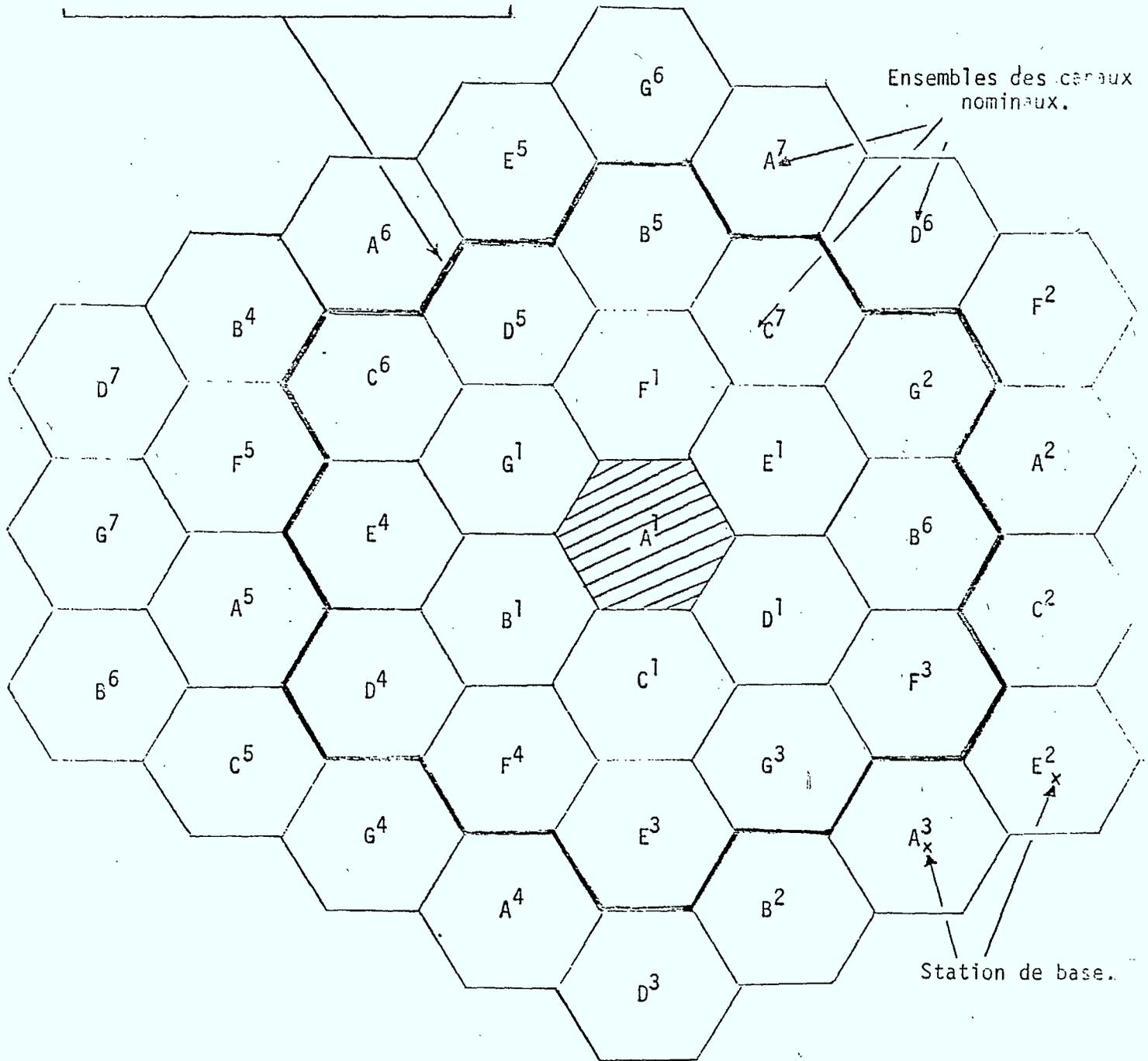


Fig. 2.7 Schéma du système fixe avec un ensemble des canaux attribués

pourcentage de ces appels bloqués à cause du manque de canaux est égal au pourcentage de nouveaux appels bloqués.

Dans la plupart des cas, le trafic offert par cellule ne sera pas uniforme pour toute l'aire, mais sera plus grand dans le centre des villes. Si T , le nombre total de canaux disponibles pour le système de communication mobile, est assez grand de façon à offrir le service nécessaire dans toute l'aire, alors le nombre de canaux nécessaires dans les banlieux serait plus petit que T/N , où N est le nombre de sous-ensemble de canaux nécessaires pour couvrir toute la surface sans interférence (rapport D/R suffisant). Par contre, dans le centre des villes, le nombre de canaux nécessaires serait plus grand que T/N , donc quelques canaux ne servant pas en banlieu pourraient être déposés dans les cellules où le trafic est plus grand.

2.3.2. Système dynamique

La forme la plus générale du système dynamique suppose que les canaux peuvent être utilisés dans n'importe quelle cellule. Les canaux sont attribués de façon à fournir le meilleur rendement en tenant compte des lois d'interférence. La recherche d'un canal à être assigné dans une cellule à temps donné, doit être faite dans tout l'ensemble des canaux. Une cellule peut utiliser n'importe quels canaux qui permettent un rapport D/R suffisant. Si aucun canal n'est trouvé qui remplisse ces conditions, le service ne peut être donné au mobile.

La recherche d'un canal peut être faite de façon ordonnée où tout à fait au hasard. Si plus d'un canal est disponible, la sélection doit être faite de façon à maximiser l'efficacité du système. Les stratégies employées pour maximiser l'efficacité sont basées sur la distance entre les cellules utilisant le même canal, le nombre de fois qu'un canal est utilisé à l'intervalle D/R minimum et sur la méthode de recherche des canaux.

Le contrôle d'un système dynamique nécessite l'emploi d'ordinateur à haute capacité. L'état de chaque canal doit être emmagasiné de façon qu'il puisse être changé rapidement. Le contrôleur de la base doit identifier la fin d'une conversation, les nouveaux appels et les mobiles qui traversent les frontières de façon à pouvoir prendre des actions rapides.

L'identité des véhicules doit être connue afin de déterminer l'état du mobile (en conversation ou non), et pour les questions financières. L'équipement utilisé doit être capable de fonctionner pour plusieurs différentes fréquences. Ceci augmente en général le prix de cet équipement. Dans un système dynamique, plus de canaux sont utilisés lors d'un trafic faible que pour le système fixe.

L'interaction entre les cellules et le nombre considérable de possibilités d'attribution des canaux rendent le système dynamique très difficile à étudier. Présentement, la seule façon

d'étudier ce système avec assez de précision, est en utilisant la simulation par ordinateur.

2.3.2.1. Stratégies utilisées dans l'attribution des canaux

En cherchant pour un canal dans l'ensemble des canaux dynamiques, il y a en général plus d'un canal qui satisferait la distance minimum de réutilisation. Une décision doit être prise sur le choix du canal. Les stratégies suivantes pour l'attribution des canaux ont été beaucoup étudiées [5,6,7].

1. Le premier disponible

Le premier canal trouvé dans l'ensemble, qui satisfait les règles de l'interférence, c'est-à-dire, un canal qui n'est pas utilisé dans aucune cellule appartenant au groupe d'interférence, est choisi pour répondre à l'appel.

2. plus près voisin (NN, 'nearest neighbour')

Cette stratégie choisit le canal qui est utilisé dans la cellule la plus près, mais qui est quand même à une distance D (où $R \cdot \gamma = D$). Cette stratégie minimise la distance L entre la première cellule qui utilise le canal et la cellule dans laquelle le canal sera attribué. S'il y a plus d'un canal disponible, le premier obtenu sera utilisé.

3. plus près voisin + K (NN + K)

Cette stratégie est semblable à la NN sauf qu'elle minimise la distance $D < \gamma R + K$ où $K = 1, 2, 3, \dots$

Cette stratégie tend à permettre à plus d'appels de conserver leur canal lors de la traversée d'une frontière. Si aucun canal n'est trouvé qui satisfait à ces exigences, le canal avec $D = \gamma R$ est utilisé.

4. Usage maximum

Cette stratégie trouve un canal qui est utilisé le plus souvent à une distance $\gamma \times R(D)$ de la cellule nécessitant le canal. C'est-à-dire, un canal qui est présentement en usage dans le plus de cellules près du cercle d'interférence de la cellule en question, est choisi pour être attribué. S'il y a plus d'un canal disponible, le premier obtenu sera attribué.

5. MSQ ("mean square")

Dans cette stratégie, l'expression:

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j^2; \gamma \leq D_j \leq 2\gamma$$

est minimisée. D_j est la distance entre la cellule demandant un canal et la cellule utilisant le même canal dans l'intervalle $[\gamma, 2\gamma]$, qui est choisi parce que le canal utilisé à une distance de plus

de 2γ de la cellule demandant le canal permettrait la réutilisation de ce canal pour servir un autre appel dans cette distance. Si $n = 0$, pour un canal en particulier, il n'est donc pas utilisé dans aucune cellule dans l'intervalle; le premier canal répondant à ces exigences est utilisé.

Il a été découvert que la stratégie NN donne la meilleure performance. La performance du premier disponible, par contre, ne dévie pas trop des autres stratégies, mais est la plus simple et plus économique à implanter. Aussi elle nécessite moins de transformation des données impliquées dans l'attribution des canaux. Nous choisissons la stratégie du premier disponible dans le système hybride étudié.

2.3.3. Système hybride

Les sections précédentes ont démontré les avantages et les désavantages des systèmes d'attribution des canaux, fixes et dynamiques. Par exemple, plusieurs études ont démontré que le système dynamique était plus efficace lors de faible trafic uniforme dans chaque cellule, tandis que le système fixe était supérieur lorsque le trafic offert était élevé. On remarque qu'un système qui utiliserait les propriétés de ces deux systèmes pourrait être très efficace dans les deux cas de trafic non-uniforme, soit faible et fort. La différence entre la performance de ces deux systèmes d'attribution des canaux, éclaire

le concept du système hybride, lequel utilise un mélange du système fixe et du système dynamique [8,9].

Dans le système hybride, concerné dans ce travail, le nombre total (T) de canaux de communication est premièrement divisé en N ensembles, où N est relié à l'équation suivante:

$$N = 1/3 (D/R)^2$$

Chaque cellule du système obtient un des N ensembles, en observant la distance de réutilisation. Si la distribution du trafic offert est uniforme, le nombre moyen de canaux par cellule sera donné par:

$$M = T/N$$

Mais le nombre de canaux par cellule peut être distribué inégalement de façon à répondre au trafic offert, si celui-ci n'est pas uniforme dans toutes les cellules. Cette situation particulière est considérée dans la simulation avec un trafic non-uniforme dans la cellule centrale et les autres.

Après la première division des canaux, chacun des N ensembles est divisé en un nombre de canaux fixes (f) et un nombre de canaux dynamiques (d), tel que

$$f + d = M$$

considérons le cas où le trafic est non-uniforme. Le premier ensemble des canaux fixes est assigné dans la cellule centrale,

et est divisé en un nombre de canaux fixes (f_1) et un nombre de canaux dynamiques (d_1). L'attribution de canaux pour les deux autres ensembles N_2 et N_3 , est égale. L'attribution des canaux fixes et dynamiques se fait de cette manière: (f_2) canaux fixes et (d_2) canaux dynamiques pour chaque groupe. Les canaux fixes demeurent dans leurs cellules respectives, (f_1) dans la cellule centrale, (f_2) dans chaque cellule tout autour de la cellule centrale. Il y a N_{d1} et N_{d2} canaux dynamiques qui peuvent être empruntés temporairement par la cellule centrale et par les autres cellules, respectivement, pour servir un client dans n'importe quelle cellule, à condition que la séparation géographique soit suffisante, de façon à limiter l'interférence. Dans le cas mentionné ci-haut, il y a ($N_{d1} + 2N_{d2}$) canaux dynamiques dans le système pour servir n'importe quel utilisateur se trouvant dans n'importe quelle cellule.

En général, la division des ensembles des canaux procure un nombre moyen de canaux par cellule [8,9] donné par l'équation:

$$M = f + \frac{Nd_j}{IC}$$

où IC est le nombre de cellules dans le groupe d'interférence et j est le nombre de fois qu'un canal dynamique peut réutilisé à l'intérieur du groupe d'interférence. En général, le nombre d'ensemble de canaux nécessaires est plus petit que le nombre de cellules dans le groupe d'interférence (i.e. $N < IC$). Donc le nombre moyen de

canaux par cellule après la division (entre fixe et dynamiques), est généralement plus petit que celui obtenu avant la division. En d'autres mots, dans le système hybride, chaque cellule utilise, en moyenne, moins de canaux que dans le système fixe.

Les appels provenant d'une cellule particulière donneront préférence aux canaux fixes, s'il y a des canaux disponibles au moment de la requête. Si non, la cellule empruntera les canaux dynamiques éligibles des facilités communes du système afin d'asservir les appels. Si aucun des canaux fixes nominaux ou des canaux dynamiques est disponible au moment où l'appel est initié dans la cellule, l'appel sera traité en concordance avec la discipline de service préconçue pour cette situation.

Puisque les appels sont faits au hasard, les canaux dynamiques vont être attribués pour répondre aux appels de façon aléatoire. La conséquence de ceci est démontrée dans les appels provenant des cellules séparées par une distance plus grande que l'intervalle minimum (γ). Donc, les canaux ne sont pas toujours utilisés le maximum de fois possibles [10,11]. Par contre, les canaux fixes sont attribués à des cellules observant la distance de réutilisation. Pour maximiser l'occupation des canaux, les appels utilisant les canaux dynamiques devraient être transférés, le plus tôt possible, sur un canal fixe.

Pour tenir compte de ceci, une technique de réattribution des canaux est incorporée dans le système hybride, afin d'utiliser le maximum de canaux.

2.4. Références

1. "Technical Report of the American Telegraph & Telephone Company on High Capacity Mobile Radio Communications Systems", Dec. 1971.
2. "Advanced Mobile Phone Service", BSTJ, Vol. 58, No.1, January 1979.
3. William C. Jakes Jr., Microwave Mobile Communications, John Wiley & Sons, New York, 1974.
4. Richard H. Frenkiel, "A High-Capacity Mobile Radiotelephone System Model Using a Coordinated Small-Zone Approach", IEEE Trans. on Veh. Tech., vol. VT-19, May 1970, pp. 173-177.
5. D.C. Cox and D.O. Reudink, "Dynamic Channel Assignment in Two-Dimensional Large-Scale Mobile Radio Systems", BSTJ, vol. 51, No. 7, 1972, pp. 1611-1629.
6. D.C. Cox and D.O. Reudink, "Effects of Some Nonuniform Spatial Demand Profiles on Mobile Radio System Performance", IEEE Trans. on Veh. Tech., Vol. VT-21, No. 2, May 1972, pp. 62-67.
7. D.C. Cox and D.O. Reudink, "A Comparison of Some Channel Assignment Strategies in Large-Scale Mobile Communications Systems", IEEE Trans. Comm., vol. COM-20, No. 2, April 1972.
8. T.J. Kahwa and N.D. Georganas, "A Hybrid Channel Assignment Scheme in Large-Scale Cellular-Structured Mobile Communication Systems", IEEE Trans. Comm. Vol. COM-26, No. 4, April 1978, pp. 432-438.
9. J.K.S. Sin and N.D. Georganas, "A Simulation Study of a Hybrid Channel Assignment Scheme for Cellular Land Mobile Radio Systems with Erlang-C Service", IEEE Trans. Comm. vol. COM-29, No. 2, February 1981, pp. 143-147.
10. D.C. Cox and R.O. Reudink, "Increasing Channel Occupancy in Large-Scale Mobile Radio Systems: Dynamic Channel Reassignment", IEEE Trans. Veh. Tech., Vol. VY-22, No. 4, Nov. 73.
11. Robert W. Donaldson, "Analysis and Design of Mobile Radio Cellular Systems with Fixed Channel Assignments", Report for the Dept. of Communications, Ottawa, Canada, Jan. 78.

III. SIMULATION D'UN SYSTEME CELLULAIRE AVEC TRAFIC NON-UNIFORME ET SERVICE ERLANG-B

3.1. Description du Système Simulé

Ce chapitre se concentre sur un modèle de simulation d'un système cellulaire uniforme, ayant l'attribution des canaux hybride et la discipline Erlang-B avec un trafic non-uniforme. On considère ici qu'on a pas de limites sur les nombres de canaux d'accès disponibles.

3.1.1. Modèle de Simulation

Dans le développement du modèle, on a considéré un système cellulaire dans lequel:

1. Les appels sont faits d'après la loi de Poisson avec un nombre d'appels moyen de λ_1 appels/heure dans la cellule centrale C1, qui est différent de λ_j appels/heure dans chaque cellule Cj (j = 2, 3, 4, ..., 40) autre que C1.
2. La durée des appels est distribuée exponentiellement avec une moyenne de 120 sec. Donc le chargement est égal à

$$\lambda \times \frac{120}{3600} = \frac{\lambda}{30} \text{ (Erlangs).}$$
3. La stratégie du premier canal disponible est adoptée, du fait qu'elle a été prouvée économique et facile à implementer, et permet d'avoir une performance acceptable. La condition de la distance $D = \gamma.R$ devrait être satisfaite.
4. Le trafic offert est non-uniformément distribué sur le système.

Aussi nous considérons les hypothèses suivantes:

1. Tous les mobiles sont identifiables et peuvent communiquer sur n'importe quelle fréquence provenant des stations de base.
2. Toutes les stations de base peuvent transmettre avec n'importe quelle fréquence à tout moment stipulé par le contrôleur de système (MTSO).
3. Le niveau de puissance, provenant des antennes des stations de base, est suffisant pour donner un rapport signal sur bruit adéquat, à la frontière de la cellule. Donc, la limitation de l'aire est due seulement à l'interférence entre les canaux.
4. Les appels, qui sont attribués aux canaux éligibles, restent en service pour la durée de l'appel spécifié par la distribution exponentielle.
5. Il n'y a pas de changement de cellule lorsqu'un appel est en cours.

Avec une distance minimum de réutilisation de 3 fois le rayon d'une cellule hexagonale, le nombre (N) des ensembles des canaux nécessaires, donné par l'équation $N = 1/3 (D/R)^2$, est égal à trois, tandis que le nombre (IC) de cellules dans un groupe d'interférence est égal à sept, et le nombre moyen (m) de canaux par cellule, après la division, est donné par:

$$m = fi + \frac{3di}{7} \cdot j$$

Les données nécessaires pour faire partir la simulation sont les taux moyens d'arrivée des appels, λ_j , et le rapport des divisions des canaux f: d.

Le système simulé est exposé dans la Figure 3.1. Un système de quarante cellules a été choisi, à cause de la limitation due au langage GPSS/360 [7,8].

3.1.2. Diagramme de Simulation

Le modèle de simulation peut être expliqué le plus facilement en utilisant le diagramme représenté dans la Figure 3.2.

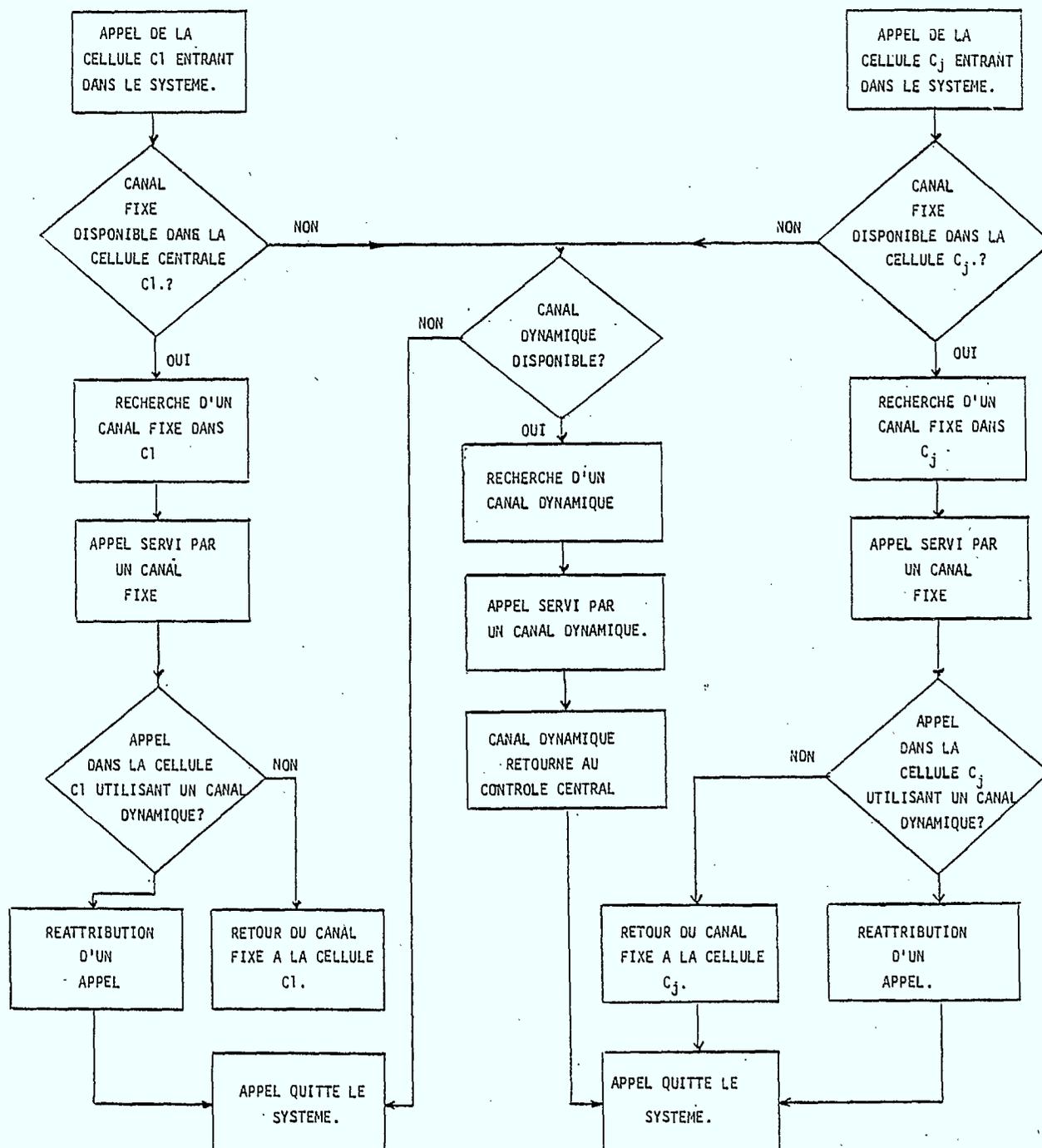
Un appel quelconque (disons l'appel X) de la cellule centrale C1 dès son entrée dans le système suivra un chemin indiqué à gauche dans le diagramme. Ceci dépendant des résultats des tests sur les activités des canaux fixes et dynamiques de la cellule C1. Si l'appel X passe le test de disponibilité des canaux fixes de la cellule C1, il prendra le premier canal fixe disponible dans cette cellule et sera servi par ce même canal. Si tous les canaux fixes de la cellule C1 sont occupés, l'appel X sera acheminé vers le deuxième test, déterminant si la cellule peut emprunter un canal dynamique du contrôle central pour servir l'appel à cet instant. Les canaux dynamiques qui sont disponibles au contrôle central peuvent être empruntés par n'importe quelle cellule qui demande du service. En passant le test, l'appel X sera dirigé vers le premier canal dynamique disponible qui satisfait les règles de l'interférence, et recevra le service de ce canal. Si l'appel X ne trouve pas de canal (ni fixe, ni dynamique)

à l'instant d'entrée dans le système, il repart immédiatement.

Après l'achèvement du service par un canal fixe, l'appel X libère ce canal. Mais avant de faire retourner le canal à la cellule C1, l'appel X vérifie si d'autres appels dans la même cellule C1 sont présentement servis par un canal dynamique. Si un appel est servi par un canal dynamique, la réattribution des canaux est instituée. Dans le processus de réattribution des canaux, le premier appel entré dans le système reçoit le canal fixe, libérant le canal dynamique qui était précédemment occupé. Cet appel sera maintenant servi par ce canal fixe pour le reste de la durée de l'appel. L'appel X, après terminer la mission de réattribution des canaux, quitte le système. Le canal dynamique retournera au contrôle central du système pour être réattribué.

Si on regarde le diagramme de la simulation, on trouve le même processus pour un appel quelconque entrant dans la cellule Cj, ($j = 2, 3, 4, \dots, 40$) comme on l'a déjà expliqué pour C1.

Fig. 3.2 DIAGRAMME D'OPERATION POUR LE SYSTEME D'ATTRIBUTION HYBRIDE DES CANAUX AVEC UN SERVICE ERLANG-B ET TRAFIC NON-UNIFORME.



3.2. Résultats de Simulation

Dans le développement du modèle simulé, on a considéré un système cellulaire dans lequel:

De manière à étudier la performance de la division entre les canaux dynamiques et les canaux fixes, un nombre infini de cellules devrait être utilisé. La raison pour utiliser un nombre infini de cellules est que pour un système de dimension finie, les cellules près des limites du système ont moins de voisin qui provoquent de l'interférence. A cause de cela, les appels provenant des cellules près des limites auraient une chance plus grande de se faire servir par un canal disponible que les appels provenant des cellules centrales. Ceci amènerait une augmentation de la probabilité que tous les canaux soient utilisés dans les cellules centrales. Des statistiques sont obtenues des 20 cellules centrales. La première est de la cellule centrale (C1), ayant un trafic plus élevé que celui dans toute autre cellule. La deuxième statistique est obtenue des 19 cellules qui entourent la cellule centrale.

Toutes les abréviations adoptées et utilisées dans toutes les sections suivantes sont:

C1 = la cellule centrale

Cj = les cellules qui entourent C1 ($2 \leq j \leq 40$).

λ_1 = nombre moyen/heure d'appels originés dans C1

λ_j = nombre moyen/heure d'appels originés dans
chaque C_j .

$\lambda_1 = \lambda_j$ si le trafic est uniformément distribué dans
chaque cellule.

$f:d$ = rapport de la division moyenne pour les canaux
dans chaque groupe.

f = nombre de canaux fixes.

d = nombre de canaux dynamiques.

P_b = $\frac{\text{nombre d'appels qui n'arrivent pas à obtenir de service}}{\text{somme d'appels qui arrivent/n'arrivent pas à obtenir de service}}$

3.2.1. Performance du Système avec 30 Canaux dans l'Aire Simulé

TABLEAU 3.1

nombre moyen des canaux dans C1	nombre moyen des canaux dans chaque Cj	charge de base en Erlang pour C1	charge de base en Erlang pour chaque Cj et une P_b 2%
10	10	5.53	5
10	10	6.22	5
10	10	7.00	5

Les figures 3.3 - 3.6 représentent la performance du système avec 10 canaux fixes attribués à chaque cellule. Le trafic offert dans C1 (la cellule centrale) est toujours supérieur à celui des autres cellules Cj ($2 \leq j \leq 40$).

Performance dans C1

La figure 3.3 montre la performance où le trafic est non-uniforme (le trafic dans C1 est 9.6% supérieur à celui dans Cj). Cette figure montre que le système hybride 8:2 est plus efficace pour des augmentations de trafic au-dessus de la charge de base [5.53 Erlang] avec une probabilité de blocage de 2% au maximum.

Les résultats du système simulé (10 canaux par cellule) où le trafic dans C1 est 20% supérieur à celui dans Cj, sont représentés dans la figure 3.4. Dans cette figure, on

observe que la division des canaux 5:5 donne le meilleur résultat pour une augmentation de trafic d'à peu près 30% au-dessus de la charge de base. Au delà de 30%, la division de canaux 8:2 est la plus efficace. Encore une fois, le système 5:5 est le meilleur avec une probabilité de blocage de 2% au maximum.

La figure 3.5 représente la performance du système avec 10 canaux initialement par cellule. Le trafic dans C1 est 29% plus dense que celui dans Cj. Dans cette figure, on montre une fois de plus que la division des canaux 5:5 est plus efficace et donne une probabilité de blocage moins élevée que celui de la division 8:2 avec un trafic maximum d'à peu près 45% au-dessus de la charge de base [7 Erlang]. En augmentant le trafic, le système 8:2 donne le meilleur rendement au-delà de 45%.

Performance dans Cj

La figure 3.6 représente la performance du système avec 10 canaux par cellule. Le pourcentage moyen pour la probabilité de blocage est calculé seulement à partir de 19 cellules de la région qui entoure la cellule centrale. Dans cette figure, on montre que la division 5:5 donne le meilleur rendement (le trafic est 9.6% moins élevé que celui dans C1) pour une augmentation de trafic jusqu'à 23% au-dessus de la charge de base [5 Erlang]. Au-delà de 23% le système 8:2 commence à donner le meilleur résultat.

Pour un trafic 20% moins élevé que celui dans C1, la division 8:2 est la plus efficace avec une probabilité de blocage de 2% et le trafic maximum est de 6.4 Erlang.

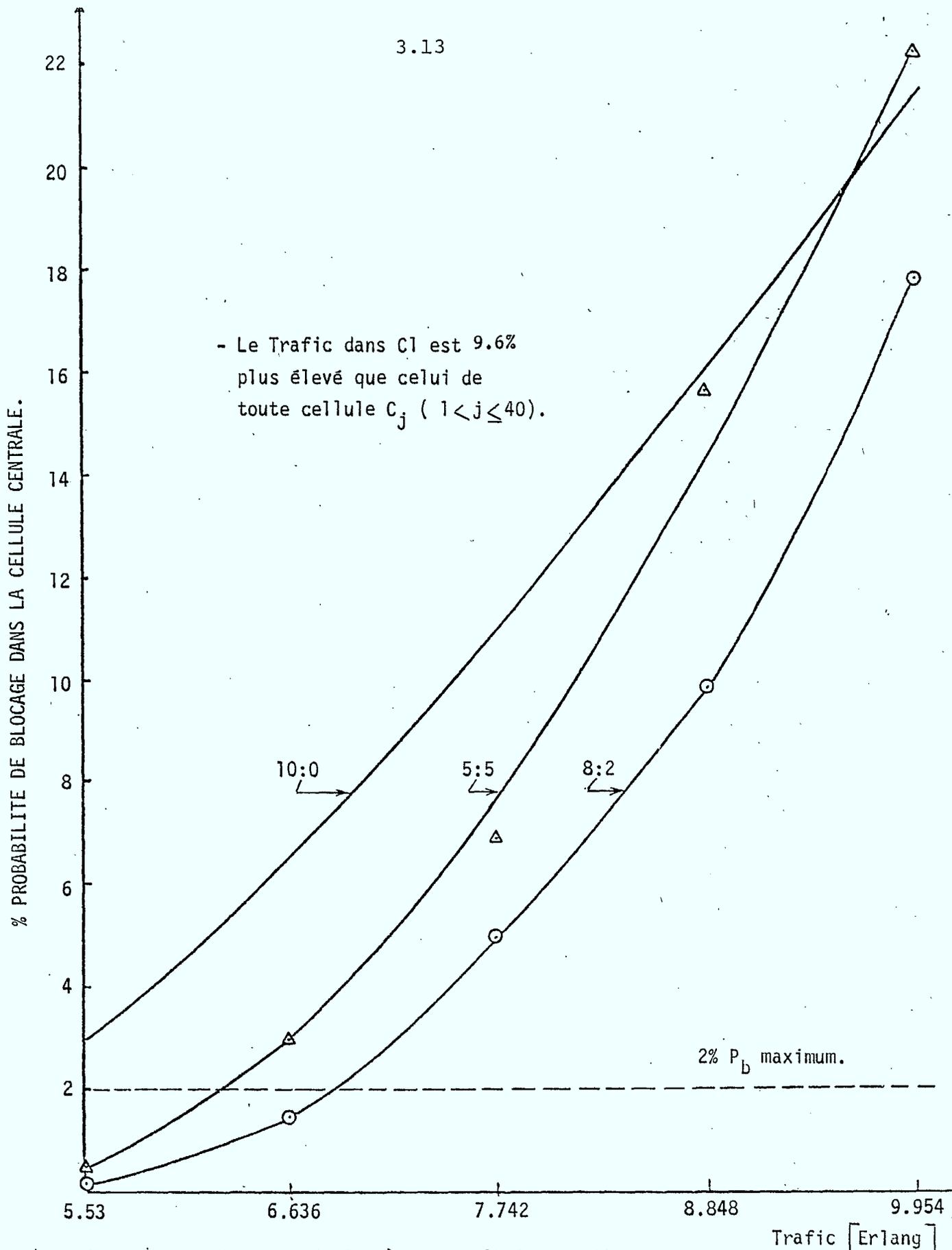
Discussions

Les résultats représentés ci-dessus montrent une nouvelle approche pour la performance des différentes configurations du système en considérant le trafic non-uniforme et les 10 canaux utilisés par cellule.

La première approche montre que si la différence de trafic entre C1 et le reste est 9.6%, le système avec plus de canaux fixes dans C1 est plus efficace là où la probabilité de blocage est de 2% au maximum. Inversement, si la différence de trafic est 20%, le système avec plus de canaux dynamiques est le plus efficace dans C1 avec une P_b de 2% au maximum. L'efficacité du système avec plus de canaux dynamiques donne le meilleur rendement dans C1 quand la différence de trafic augmente. Dans ce cas on voit que le système fixe reste le meilleur dans toute Cj avec une P_b 2% au maximum.

En général, nous avons obtenu que, si le trafic est minimum (et la différence de trafic est 9.6%), le système avec plus de canaux fixes est le meilleur dans C1. Le système avec plus de canaux dynamiques donne la meilleure performance dans chaque Cj. Quand la différence de trafic augmente le système avec plus de canaux dynamiques est le meilleur dans C1. Le

systeme avec plus de canaux fixes est le meilleur dans Cj. En augmentant le trafic au-delà de la charge de base, c'est le système avec plus de canaux fixes qui donne la meilleure performance dans C1 et Cj en même temps [avec un trafic très élevé].



- Le Trafic dans C1 est 9.6% plus élevé que celui de toute cellule C_j (1 < j ≤ 40).

Fig. 3.3 Performance du Système avec 10 Canaux Fixes par Cellule initialement et Trafic non-uniforme. (30 canaux fixes dans l'aire simulée en total)

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE.

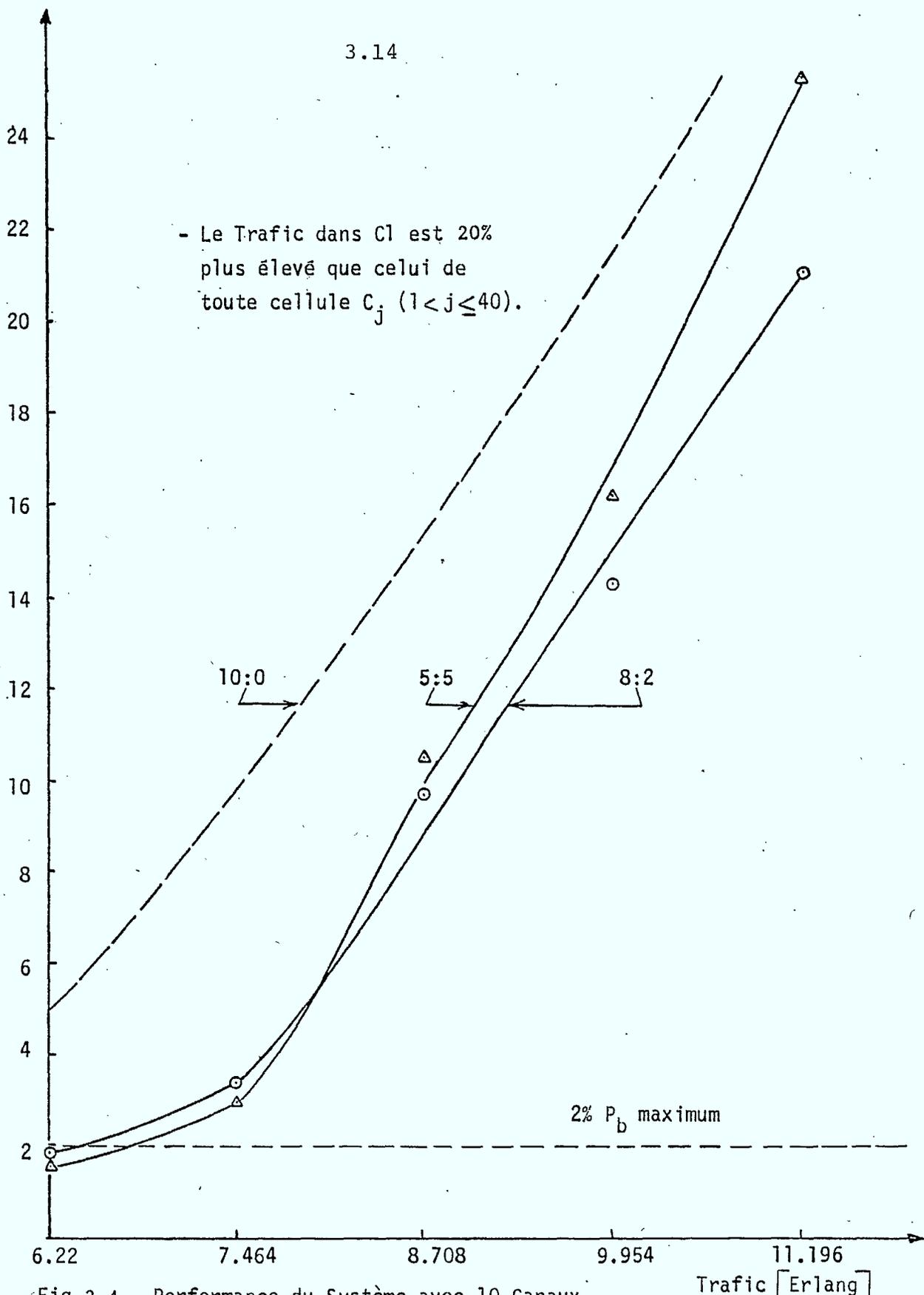


Fig.3.4 Performance du Système avec 10 Canaux Fixes par Cellule initialement et Trafic non-uniforme. (30 canaux fixes dans l'aire simulée en total).

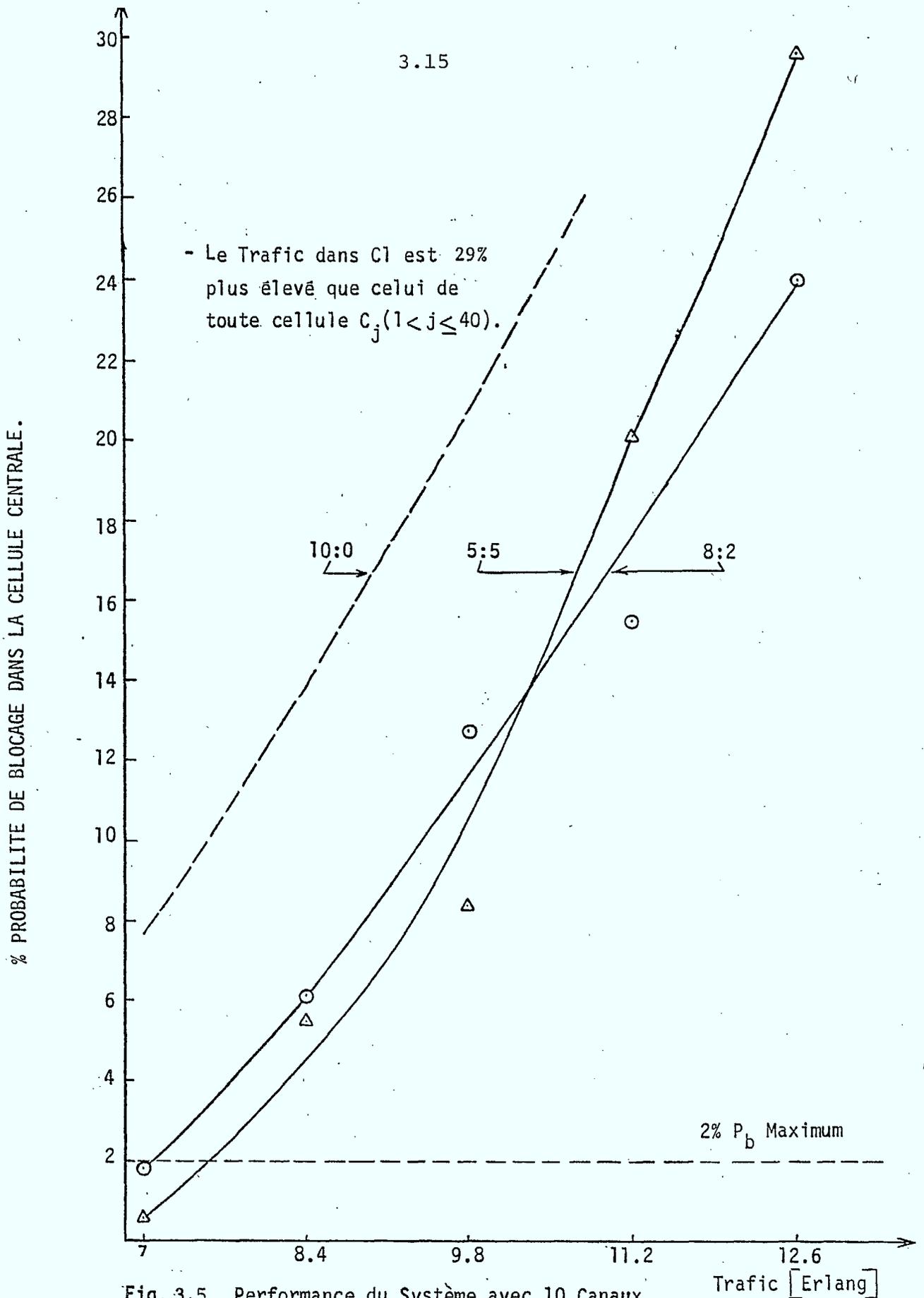


Fig. 3.5 Performance du Système avec 10 Canaux Fixes par Cellule initialement et Trafic non-uniforme. (30 canaux fixes dans l'aire simulée en total)

% (MOYENNE) POUR LA PROBABILITE DE BLOCAGE DANS
 TOUTE CELLULE C_j ($j=2, 3, 4, \dots, 19$).

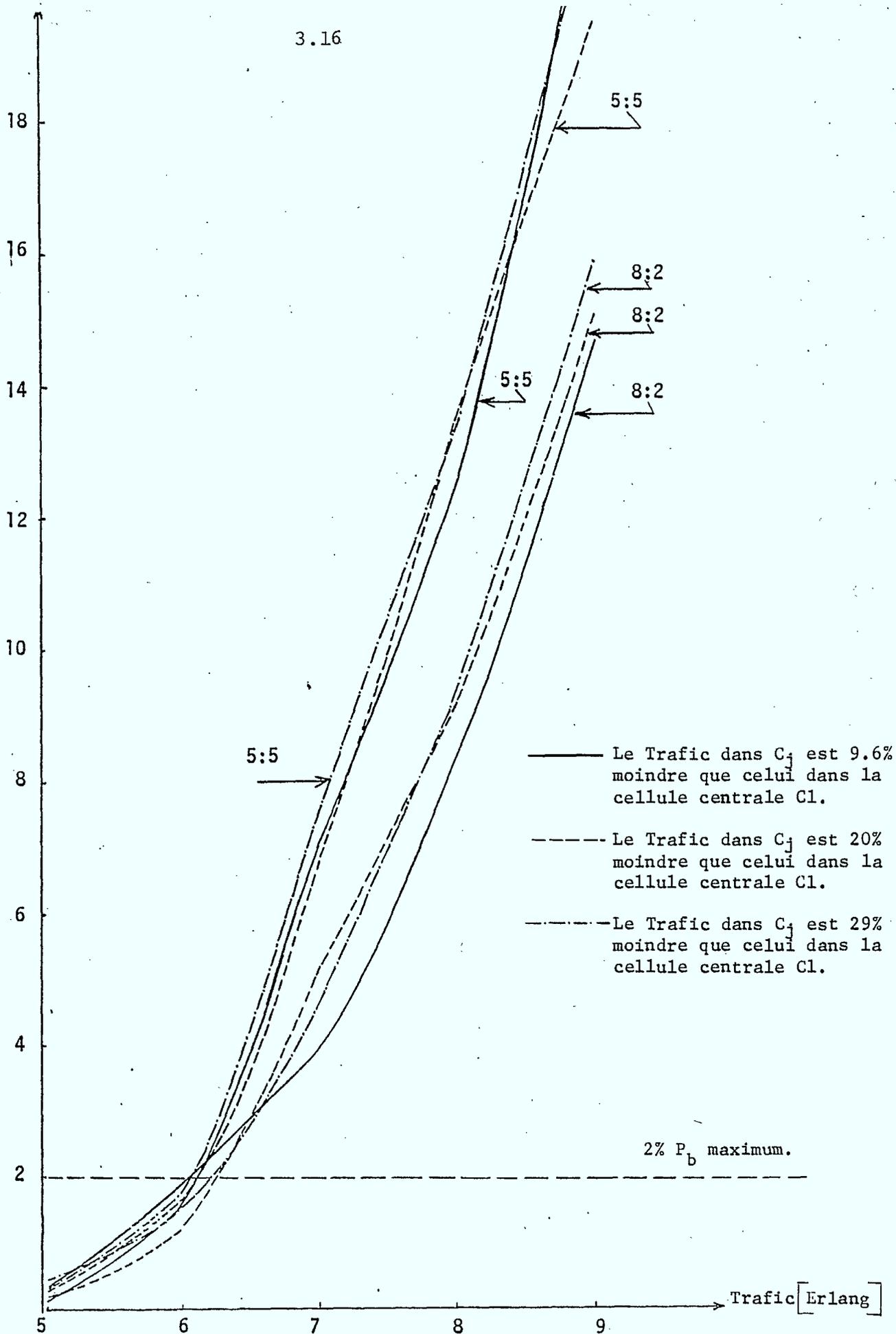


Fig. 3.6 - Performance du Système avec 30 canaux Fixes dans
 l'aire simulée et trafic non-uniforme.

3.2.2. Efficacité spectrale dans C1 et toute Cj
avec le même nombre de canaux dans toute
cellule.

TABLEAU 3.2

Nombre des canaux dans l'aire simulée	Nombre des canaux dans C1	% des canaux dans C1	nombre des canaux dans toute Cj	% des canaux dans toute Cj
30	10	33.3%	10	33.3%
45	15	33.3%	15	33.3%
54	18	33.3%	18	33.3%
63	21	33.3%	21	33.3%
75	25	33.3%	25	33.3%
84	28	33.3%	28	33.3%
96	32	33.3%	32	33.3%
105	35	33.3%	35	33.3%

Les données du tableau 3.2 qu'on vient de présenter ci-haut indiquent les différentes configurations des systèmes à analyser.

Il est à noter que:

1. Le système cellulaire a le même nombre de canaux fixes attribués à chaque cellule (i.e. 33.3% des canaux dans chaque cellule).
2. Dans C1, le trafic est toujours 20% plus élevé que celui de toute cellule Cj.

3.2.2.1. Probabilité de blocage dans la cellule centrale.

Les Figures 3.7 à 3.10 représentent la probabilité de blocage d'une attribution hybride avec 10, 15, 18, 21, 25, 28, 32 et 35 canaux assignés par cellule initialement. Le trafic dans C1 est toujours considéré 20% plus élevé que celui dans toute Cj. La probabilité est calculée d'après les statistiques obtenues de la simulation, en calculant le pourcentage du nombre d'appels bloqués par rapport au nombre total dans C1.

La Figure 3.11 représente les résultats obtenus de la probabilité de blocage du système d'attribution fixe en fonction de trafic, en Erlang, étant donné que 33.3% des canaux fixes sont toujours dans chaque cellule.

3.2.2.2. Efficacité spectrale: Hybride vs Fixe dans C1

Les résultats obtenus, de la probabilité de blocage de 2% au maximum dans C1, sont comparés les uns et les autres comme c'est indiqué dans la Figure 3.12: une comparaison entre les systèmes hybrides et les systèmes fixes par rapport au nombre de fréquences requises dans C1. Ces résultats, nous permet de dire que le système hybride offre un meilleur service, si comparé avec celui du système fixe.

De la figure 3.13 on peut tirer le pourcentage de l'efficacité spectrale du système hybride par rapport au système fixe dans C1 seulement. Celui-ci est de 16.4% en moyenne.

3.2.2.3 Nombre de canaux nécessaires dans toute cellule Cj

Les figures 3.14 à 3.17 représentent le pourcentage de la probabilité de blocage dans toutes les Cj. Cette probabilité est calculée dans les 19 cellules centrales (# 2--- > #19). A l'aide de ces graphiques, on peut obtenir facilement la distribution (f:d) donnant la meilleure qualité de service avec le plus petit nombre de canaux dans toute Cj. La qualité de service considérée est une P_b de 2% au maximum.

3.2.2.4 Efficacité spectrale:Hybride Vs Fixe dans toute Cj

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 3.18. Encore une fois, on peut conclure que la distribution hybride donne le meilleur service par comparaison avec le système fixe pour le même taux de trafic offert dans toute Cj.

Finalement, la Figure 3.19 représente le pourcentage de l'efficacité spectrale du système hybride par rapport au système fixe. On peut donc dire que le pourcentage de cette efficacité est de 6.5% en moyenne.

3.2.2.5 Discussions

Dans les deux dernières sections, nous avons considéré un système cellulaire avec la même distribution de canaux dans chaque cellule. Le trafic dans C1 était 20% plus élevé

3.20

Le Trafic dans C1 est 20% plus élevé
que celui dans toute C_j.

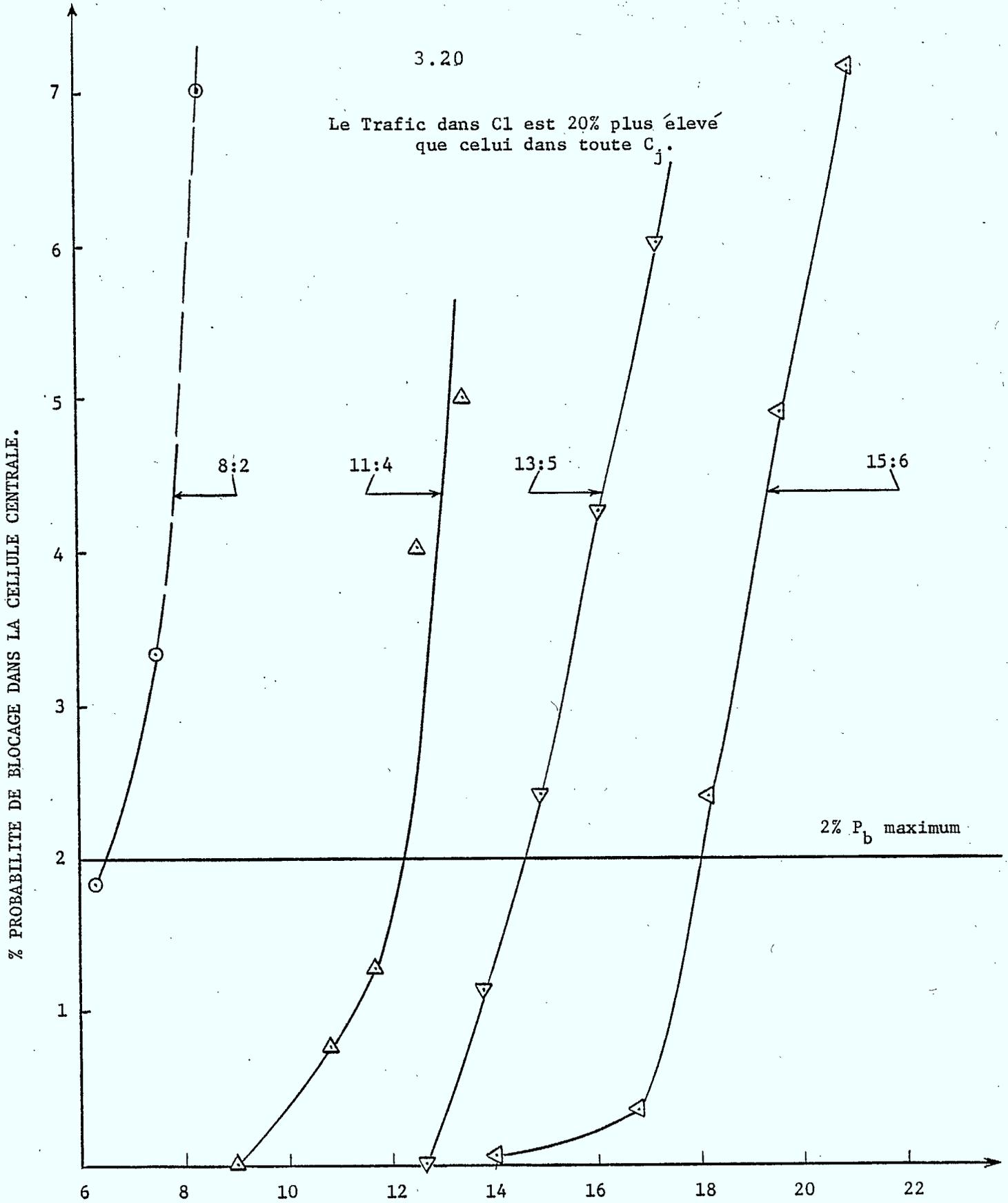


Fig. 3.7. Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 10, 15, 18, et 21 Canaux, et trafic non-uniforme.

Trafic [Erlang.]

% PROBABILITE DE BLOCCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE.

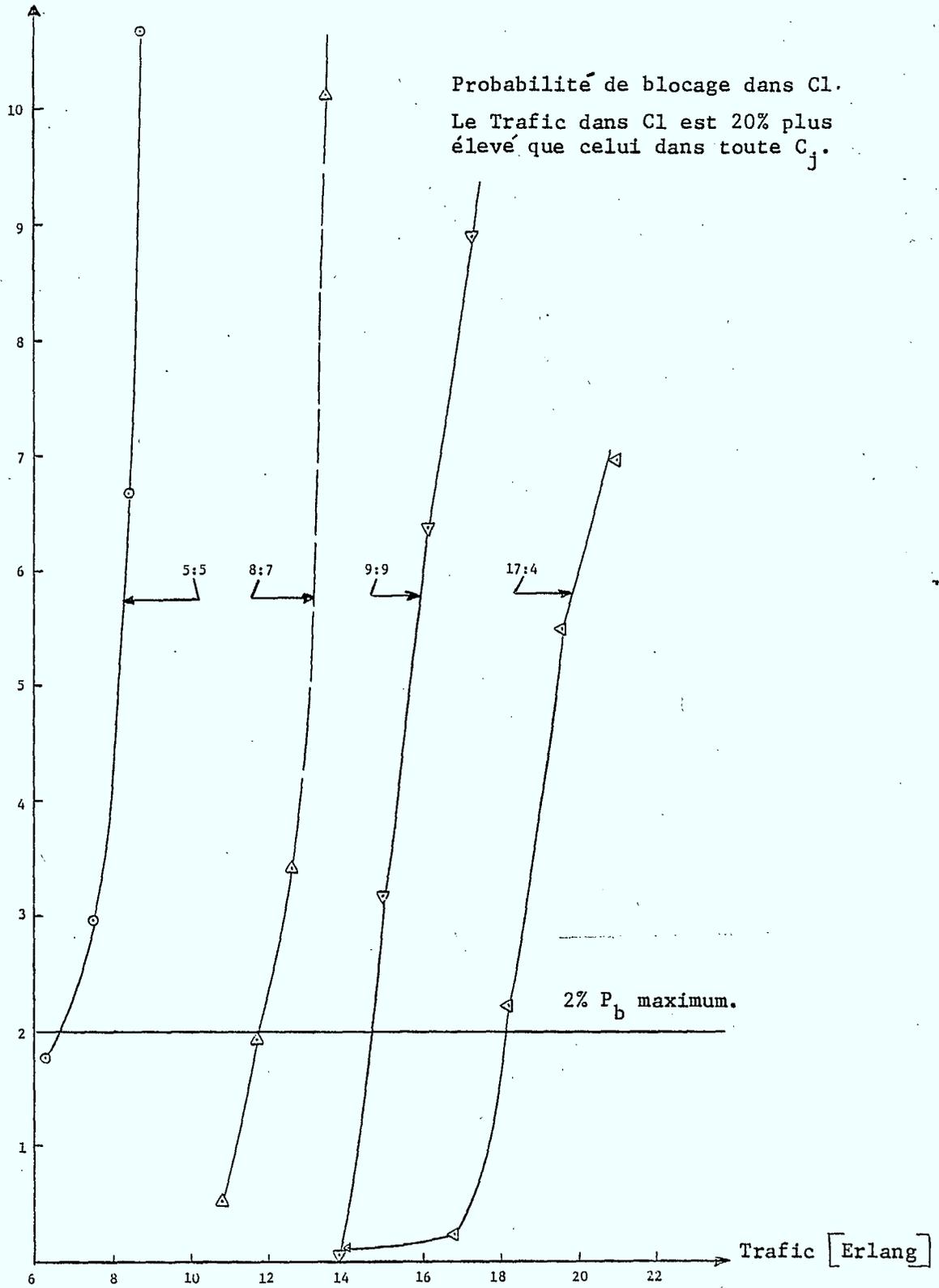


Fig. 3.8 Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 10, 15, 18, 21 canaux et Trafic non-uniforme.

Probabilité de blocage dans C1.
 Le Trafic dans C1 est 20% plus élevé
 que celui dans toute Cj .

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

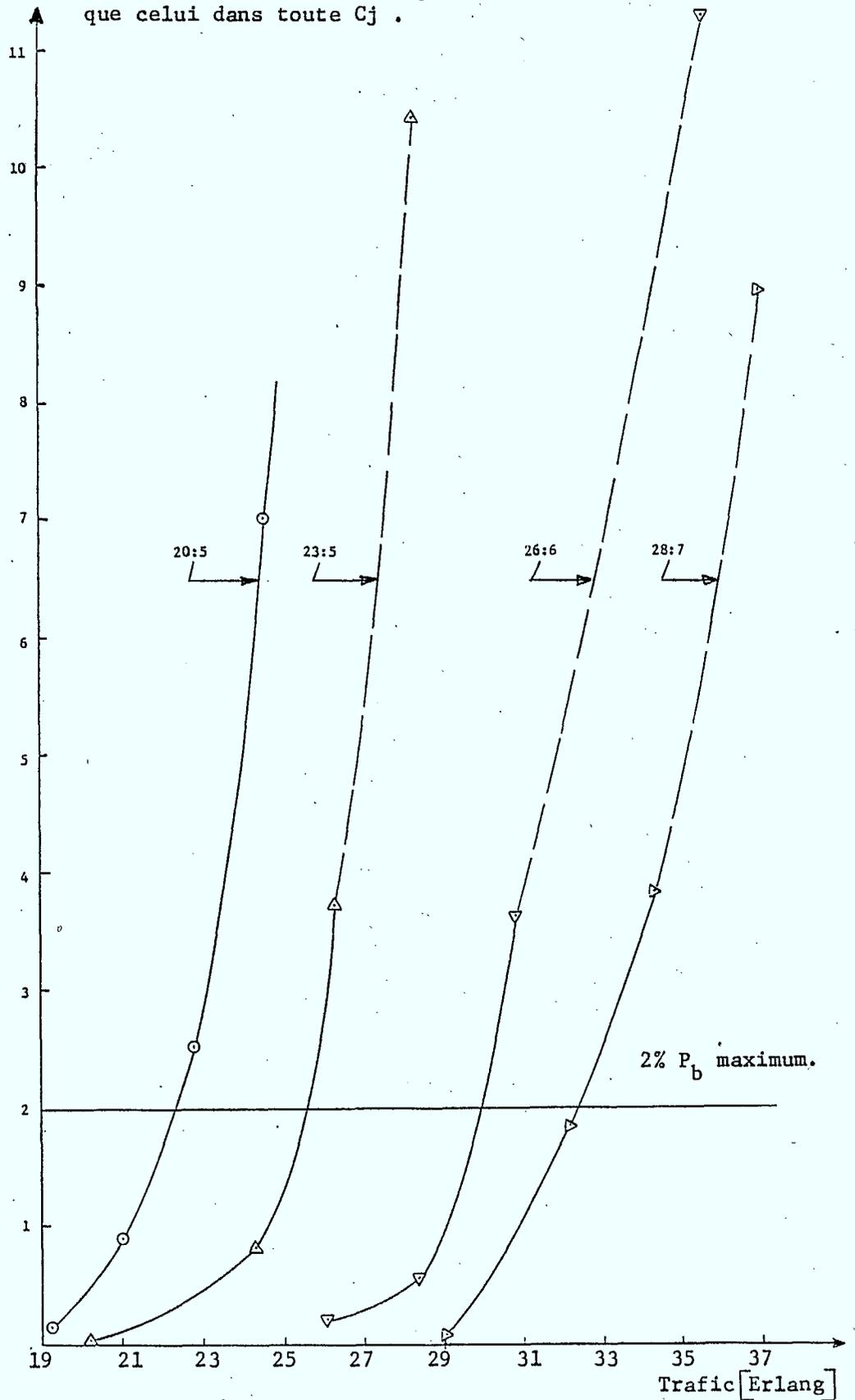


Fig. 3.9 Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 25, 28, 32, 35 canaux et Trafic non-uniforme.

Probabilité de blocage dans C1.
 Le Trafic dans C1 est 20% plus
 élevé que celui dans toute C_j.

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

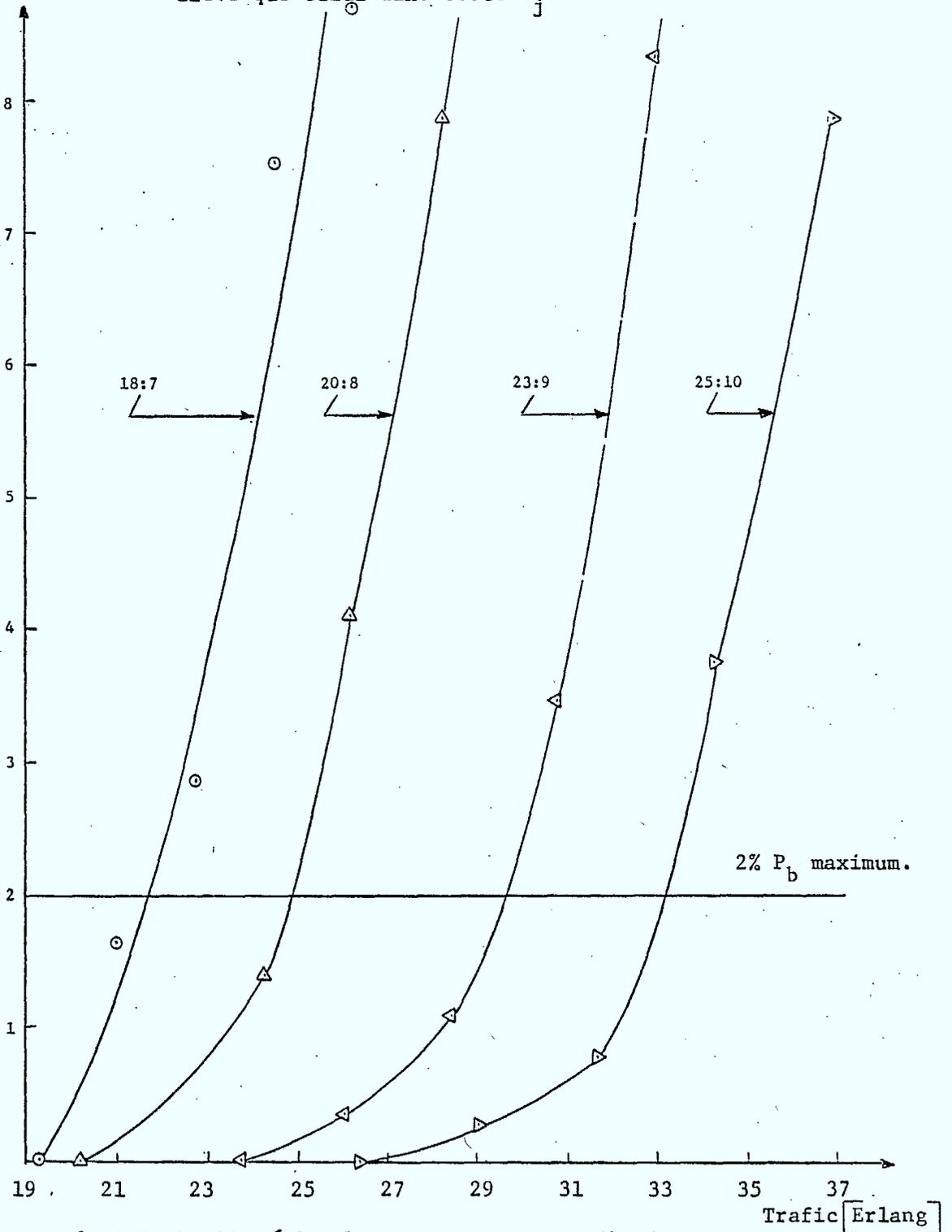


Fig. 3.10 Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 25, 28, 32, 35 canaux et Trafic non-uniforme.

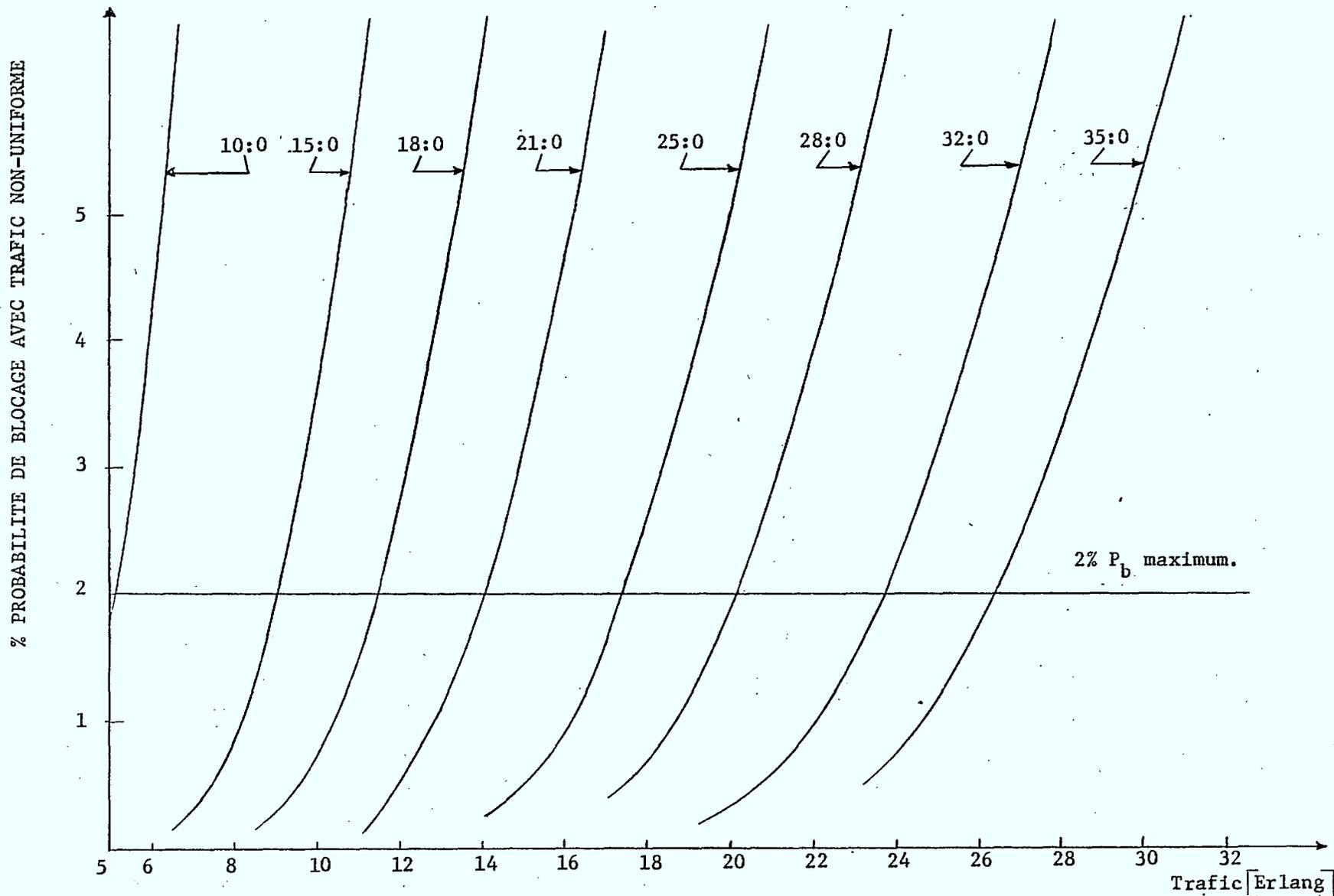


Fig. 311 Probabilité de blocage pour une attribution fixe avec 10, 15, 18, 21, 25, 28, 32 et 35 canaux.

NOMBRE MINIMUM DES CANAUX DANS LE CELLULE CENTRALE C1.

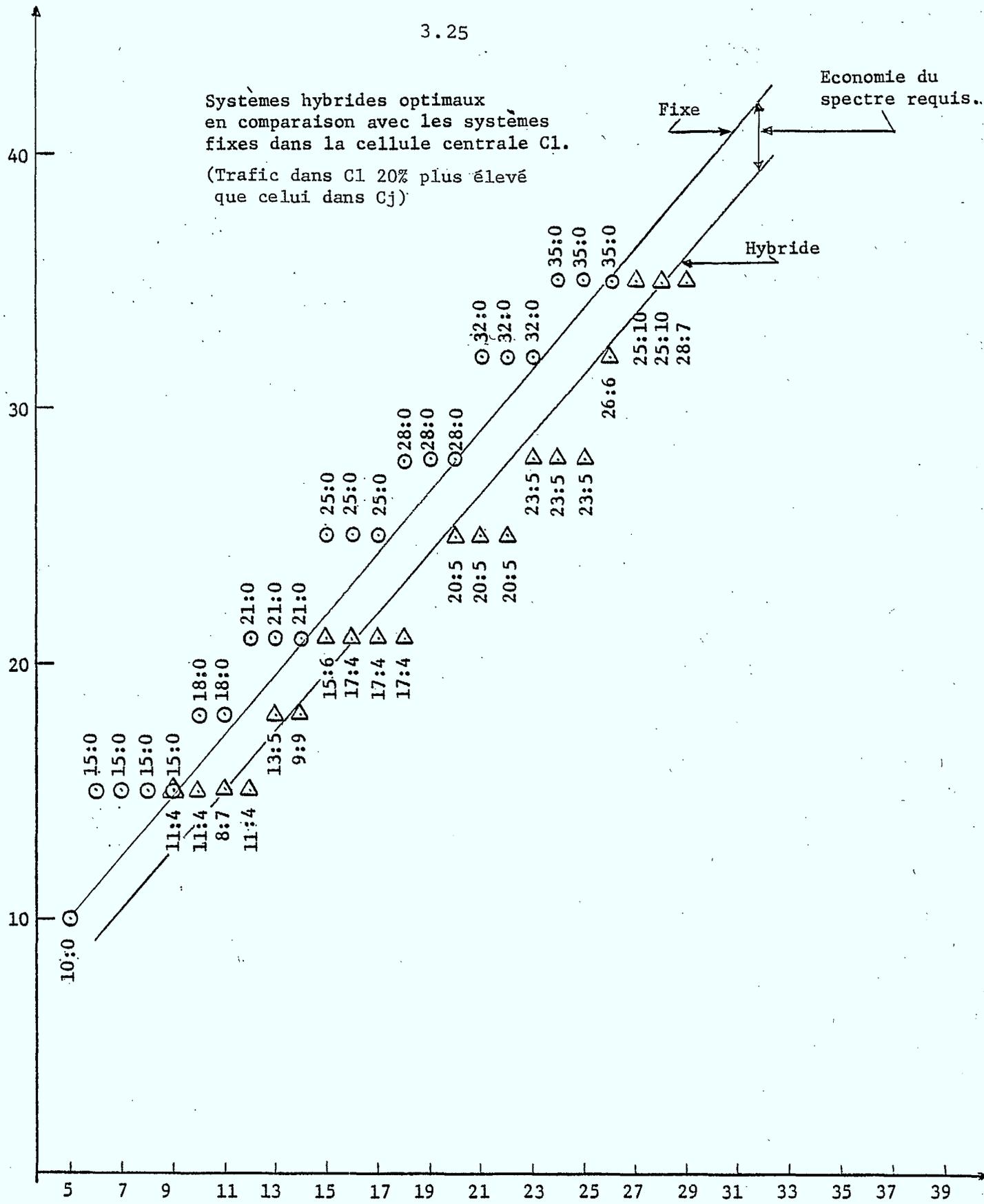


Fig. 3.12 Systemes hybrides optimaux par rapport au nombre des fréquences requises en comparaison avec les systemes fixes.

Trafic [Erlang]

Efficacité spectrale dans la cellule centrale C1.
 (Trafic dans C1 20% plus élevé que dans Cj)

% EFFICACITE SPECTRALE DE SYSTEME HYBRIDE PAR RAPPORT
 AU SYSTEME FIXE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

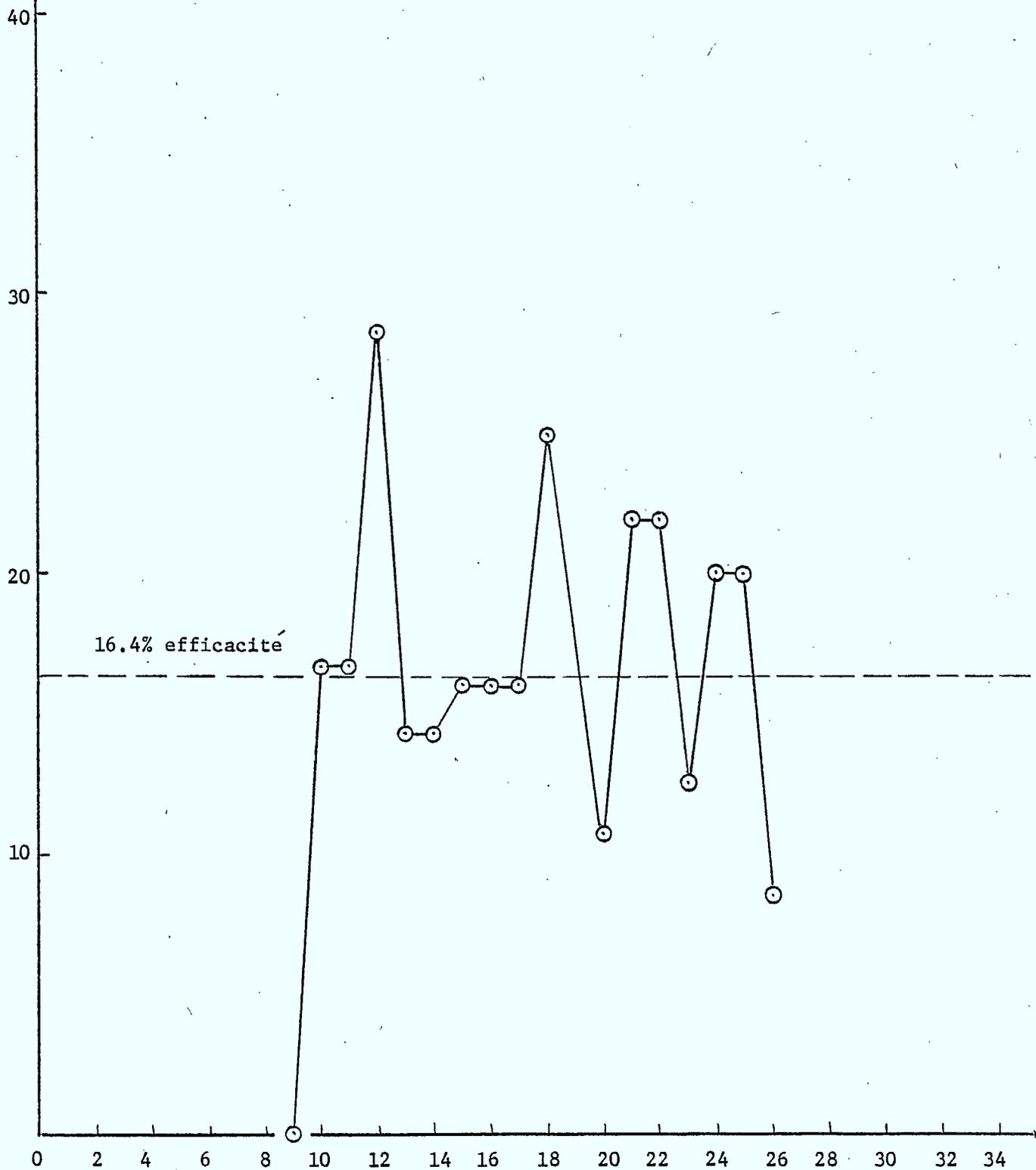


Fig. 3.13 Efficacité spectrale de Système hybride par rapport au Système fixe.

Trafic [Erlang]

que celui dans les autres. Avec cette différence de trafic et 33.3% des canaux dans chaque cellule, nous avons démontré que le système hybride présente une économie spectrale de 16.4% dans C1 et 6.5% dans toute cellule Cj par rapport au système fixe. Ces résultats montrent que l'efficacité spectrale des cellules voisines est plus faible que celle de la cellule centrale.

% (MOYENNE) POUR LA PROBABILITE DE BLOCAGE DANS TOUTE
 CELLULE C_j .

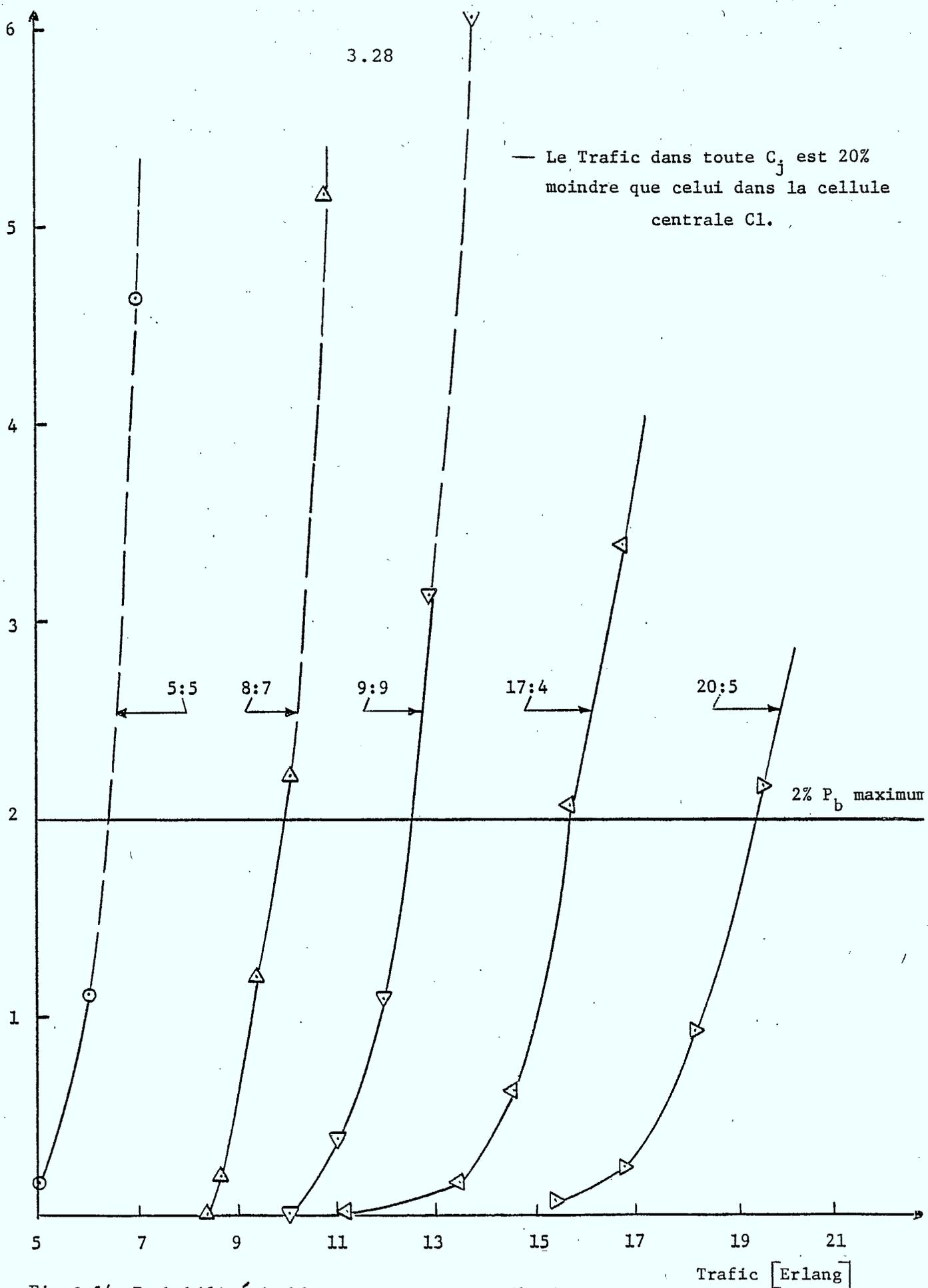


Fig. 3.14 Probabilité de blocage pour une attribution
 hybride avec 10, 15, 18, 21 et 25 canaux, et trafic non-uniforme.

% (MOYENNE) POUR LA PROBABILITE DE BLOCAGE DANS TOUTE
 CELLULE C_j.

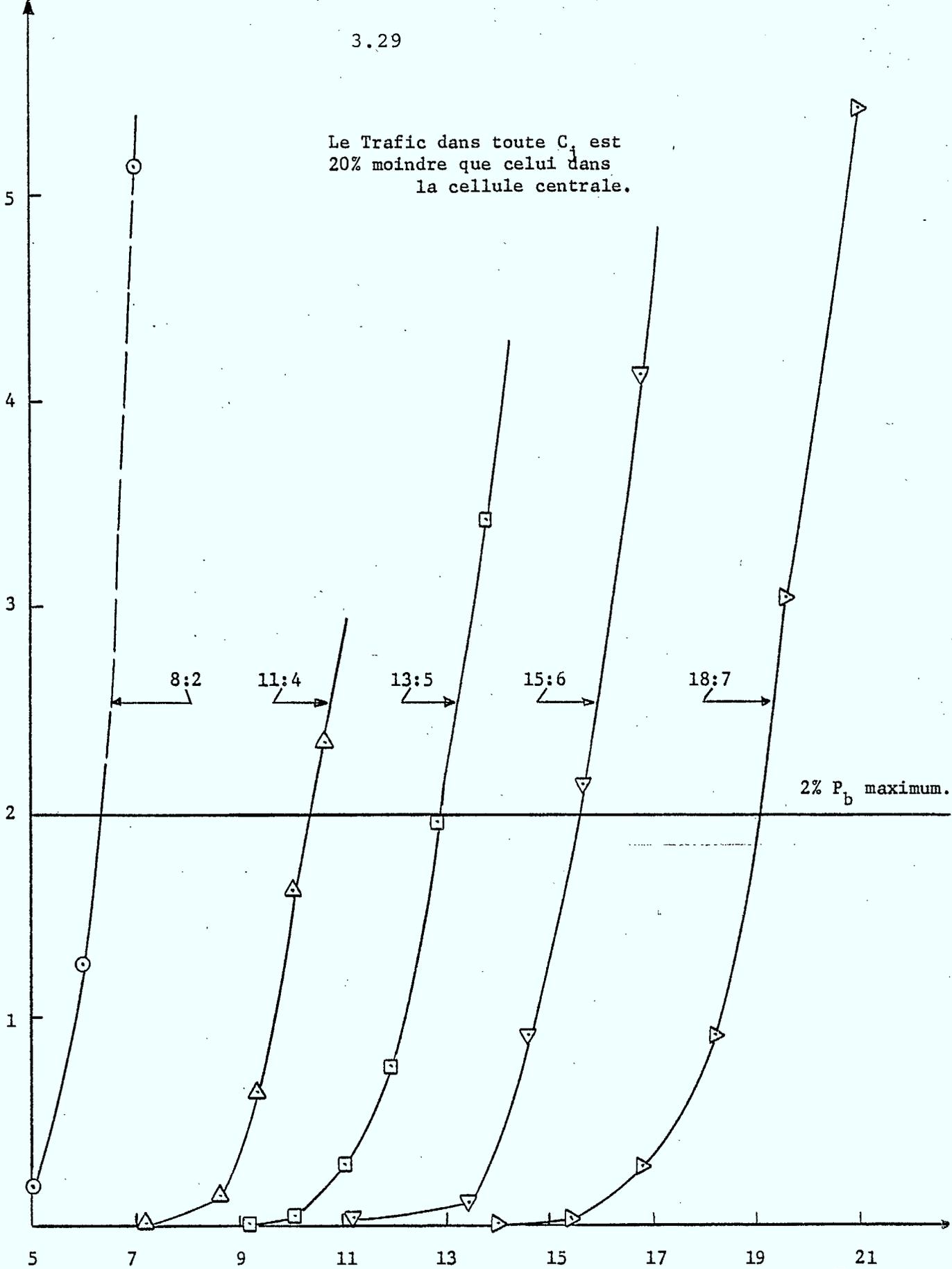


Fig. 3.15 Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 10, 15, 18, 21 et 25 canaux, et Trafic [Erlang]

- Probabilité de blocage dans toute cellule C_j .
- Le Trafic dans toute C_j est 20% moindre que celui dans C_1 .

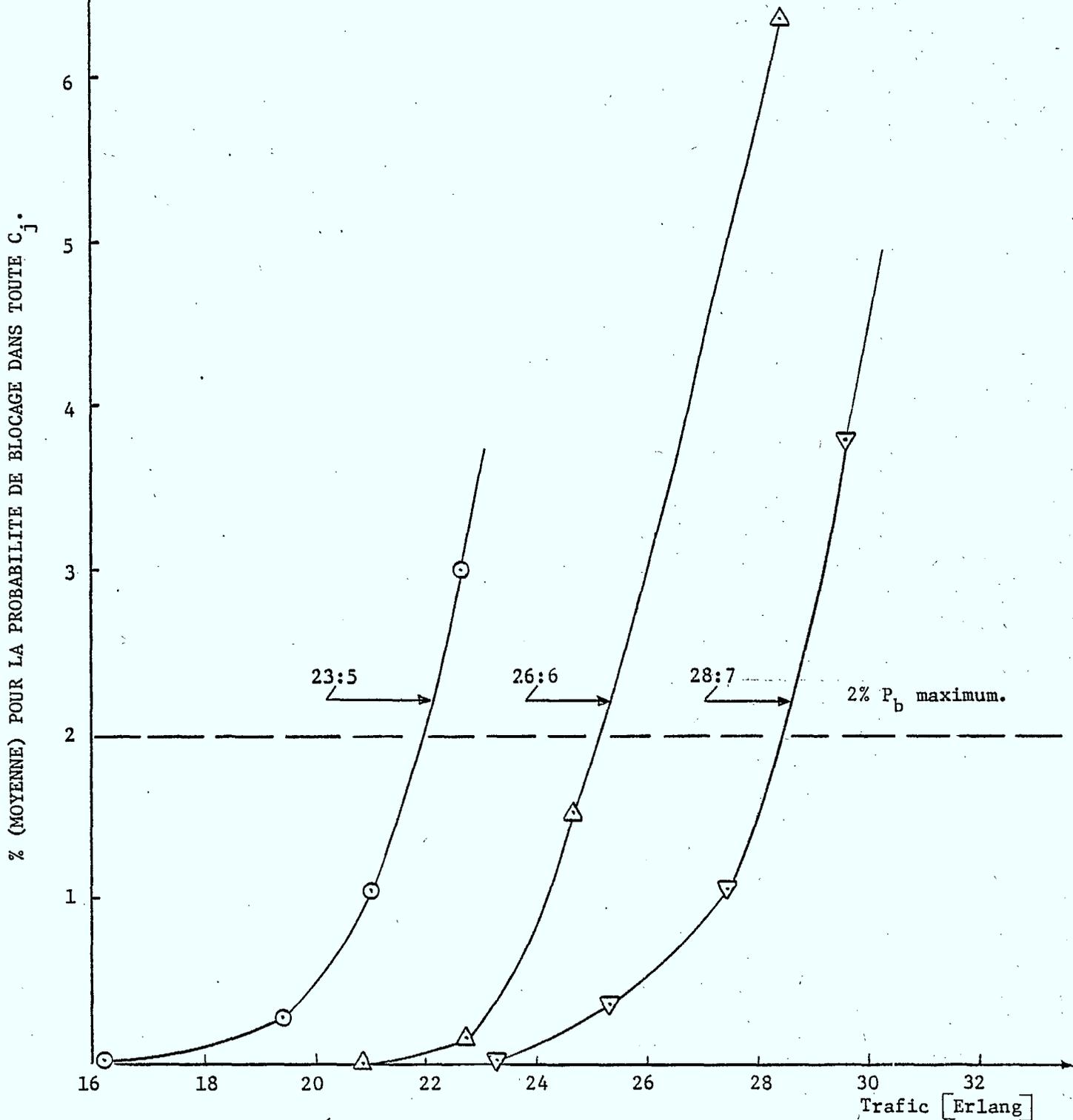


Fig. 3.16 Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 28, 32 et 35 canaux, et Trafic non-uniforme.

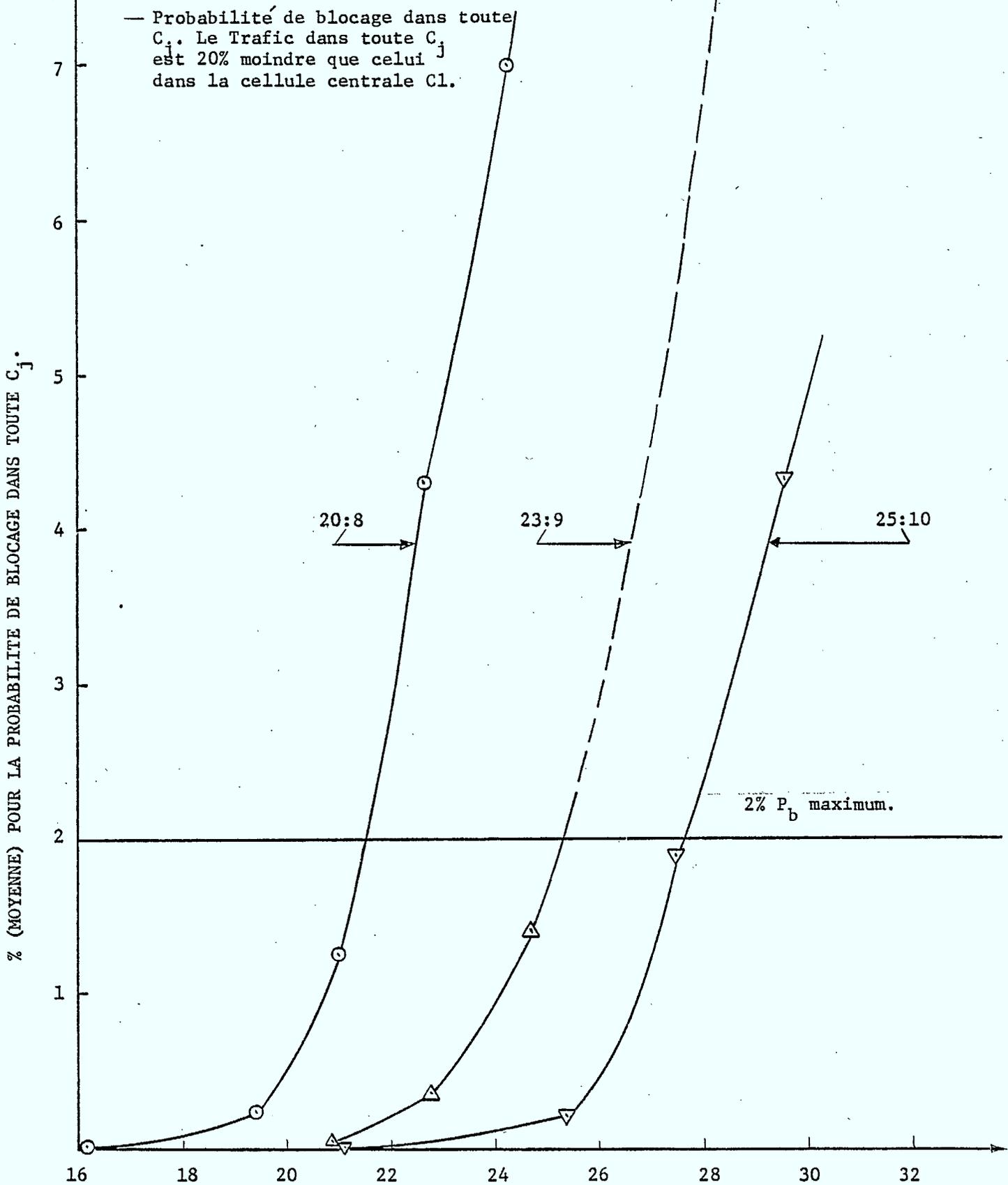


Fig. 3,17 Probabilité de blocage pour une attribution hybride avec 28, 32 et 35 canaux, et Trafic non-uniforme. Trafic [Erlang]

Systemes hybrides optimaux en
comparaison avec les systemes
fixes dans C_j .

(Trafic dans C_j 20% plus
faible que celui dans C_1)

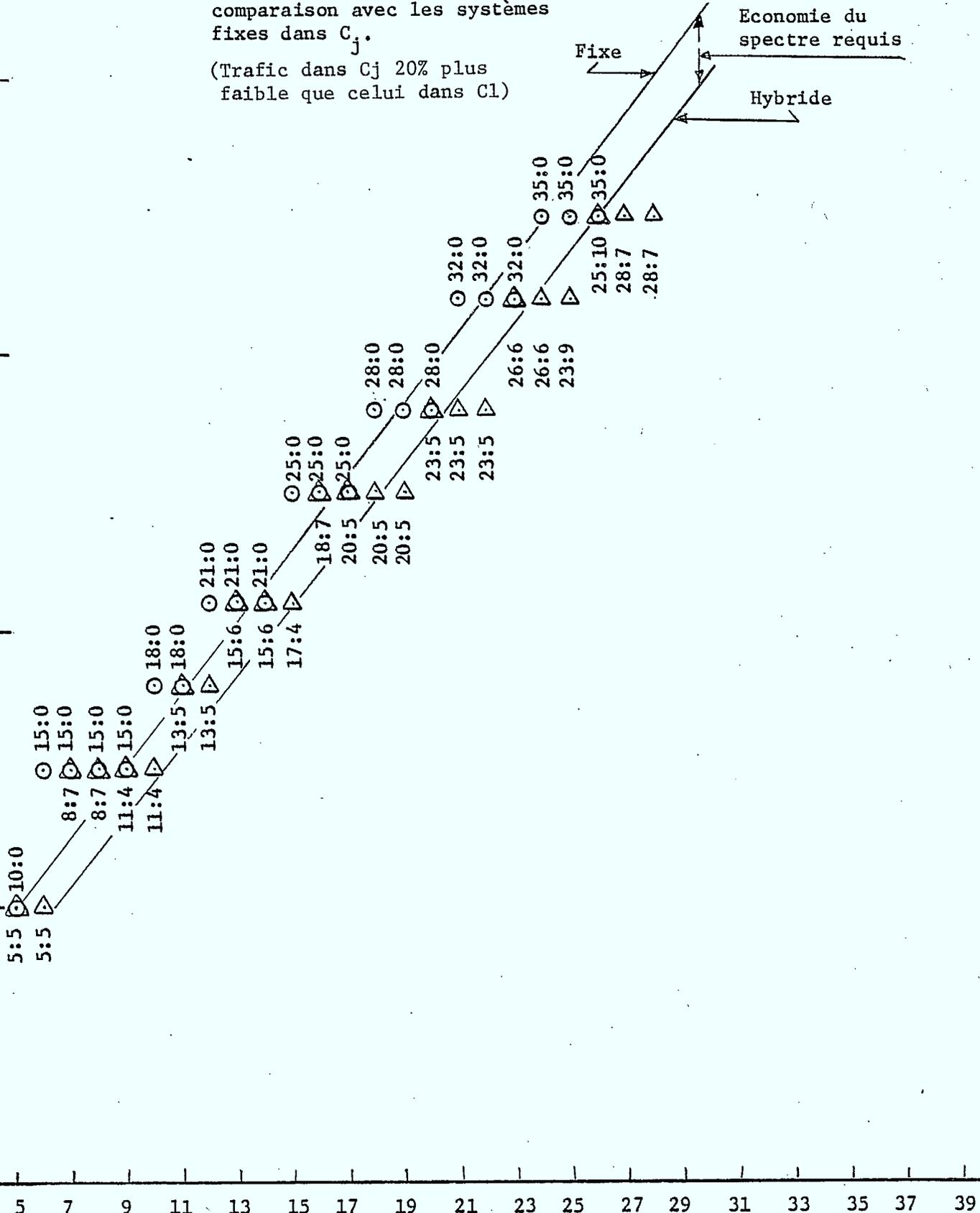
NOMBRE MINIMUM DES CANAUX DANS TOUTE CELLULE C_j .

40

30

20

10



Economie du
spectre requis

Fixe

Hybride

Fig. 3.18 Systemes hybrides optimaux par rapport au nombre
des frequences requises en comparaison avec les systemes
fixes.

Trafic [ERLANG]

Efficacité spectrale dans toute C_j .

(Trafic dans C_j 20% plus faible
que dans C_1)

% EFFICACITE SPECTRALE DE SYSTEME HYBRIDE PAR RAPPORT AU SYSTEME
FIXE DANS TOUTE CELLULE C_j .

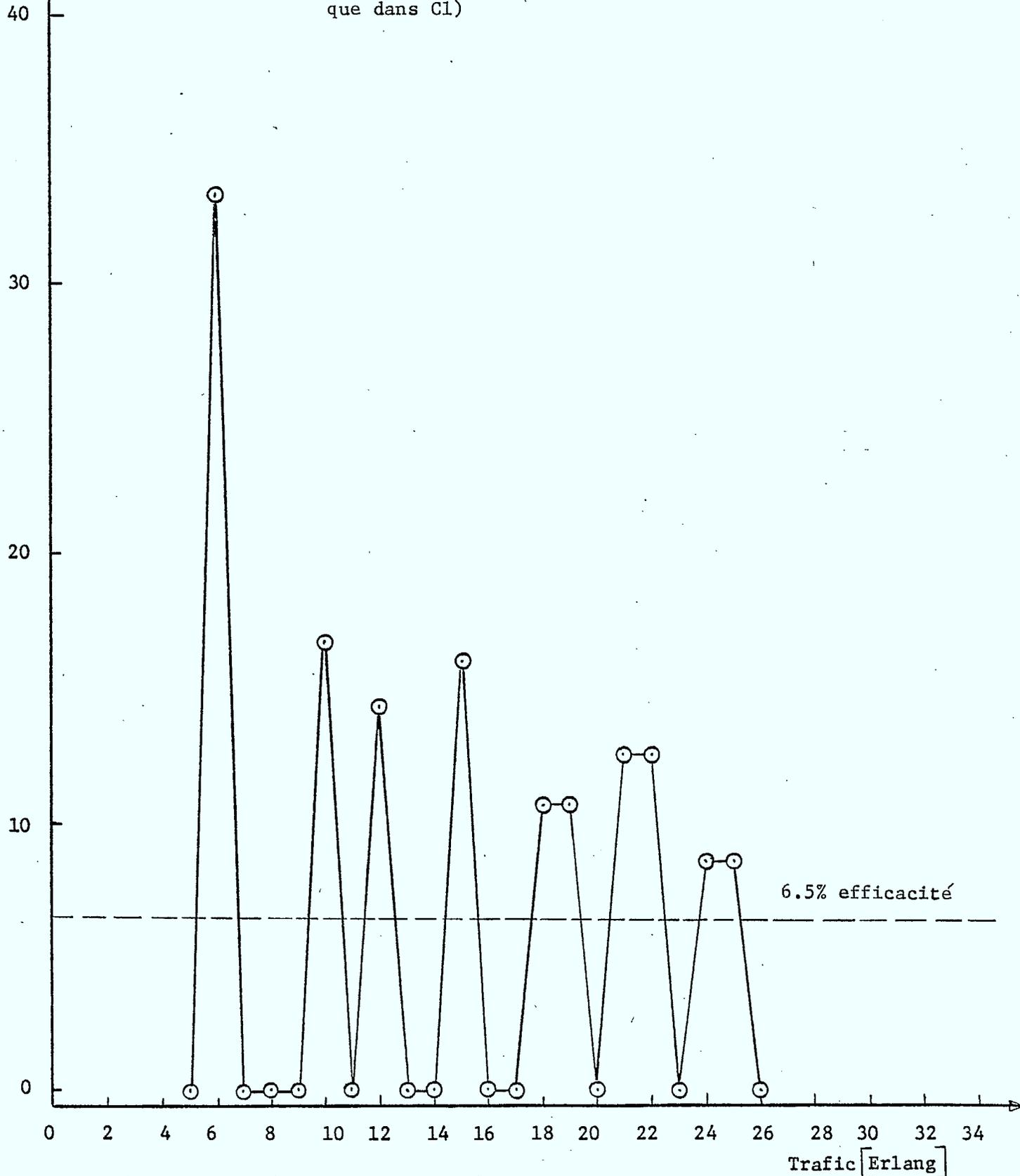


Fig.3.19 Efficacité spectrale de système hybride par rapport au système fixe.

3.2.3. Efficacité spectrale avec différent nombre de canaux dans C1 et toute Cj

TABLEAU 3.3

Nombre de canaux dans l'aire simulée	Nombre de canaux dans C1	% des canaux dans C1	Nombre de canaux dans toute Cj	% de canaux dans toute Cj
30	12	40%	9	30%
45	19	42%	13	29%
54	22	40%	16	30%
63	25	39.7%	19	30.3%
75	29	38.6%	23	30.7%
84	34	40.47%	25	29.8%
96	38	39.6%	27	30.2%

Ici encore, nous avons considéré le même nombre de canaux dans l'aire simulée. Le pourcentage de canaux fixes dans C1 et toute cellule Cj, est de 40% et 30% respectivement.

Le tableau 3.3 ci-dessus, représente le nombre de canaux utilisés dans l'aire simulée. Le nombre de canaux fixes et leur pourcentage dans la cellule centrale sont représentés dans la deuxième et la troisième colonnes. Les deux dernières colonnes représentent le nombre et le pourcentage de canaux assignés dans toute cellule Cj.

3.2.3.1. Probabilité de blocage dans la cellule centrale

Les données du tableau 3.3 ont été évaluées. Les résultats de la probabilité de blocage dans C1 en fonction de trafic sont représentées dans les Figures 3.20 et 3.21.

La Figure 3.22 représente le résultat de la probabilité de blocage pour un système fixe en fonction de trafic dans la cellule centrale.

3.2.3.2. Nombre minimum des canaux dans Cl

Les résultats obtenus dans les Figures 3.20 et 3.21 ont été présentés comme c'est indiqué dans la Figure 3.23 pour la cellule centrale. Il est à noter que la probabilité de blocage est toujours 2% au maximum.

La Figure 3.23 représente une comparaison entre les systèmes hybrides optimaux et les systèmes fixes par rapport au nombre des fréquences requises dans Cl. En analysant cette figure, on peut indiquer quel système est le plus efficace pour le même taux de trafic offert dans Cl. Citons par exemple, que pour un trafic de 8 Erlangs, le système hybride 9:3 offre un service comparable à celui du système fixe 19:0, ce qui donne un gain de 7 canaux dans Cl; en d'autres termes, le système hybride augmente l'efficacité spectrale de 36.8% par rapport au système fixe.

La Figure 3.24 représente le pourcentage de l'efficacité spectrale des différentes divisions du système hybride par rapport à celles du système fixe. En calculant, on peut trouver que la moyenne générale de l'efficacité spectrale du système hybride par rapport au système fixe est de 6.6%.

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

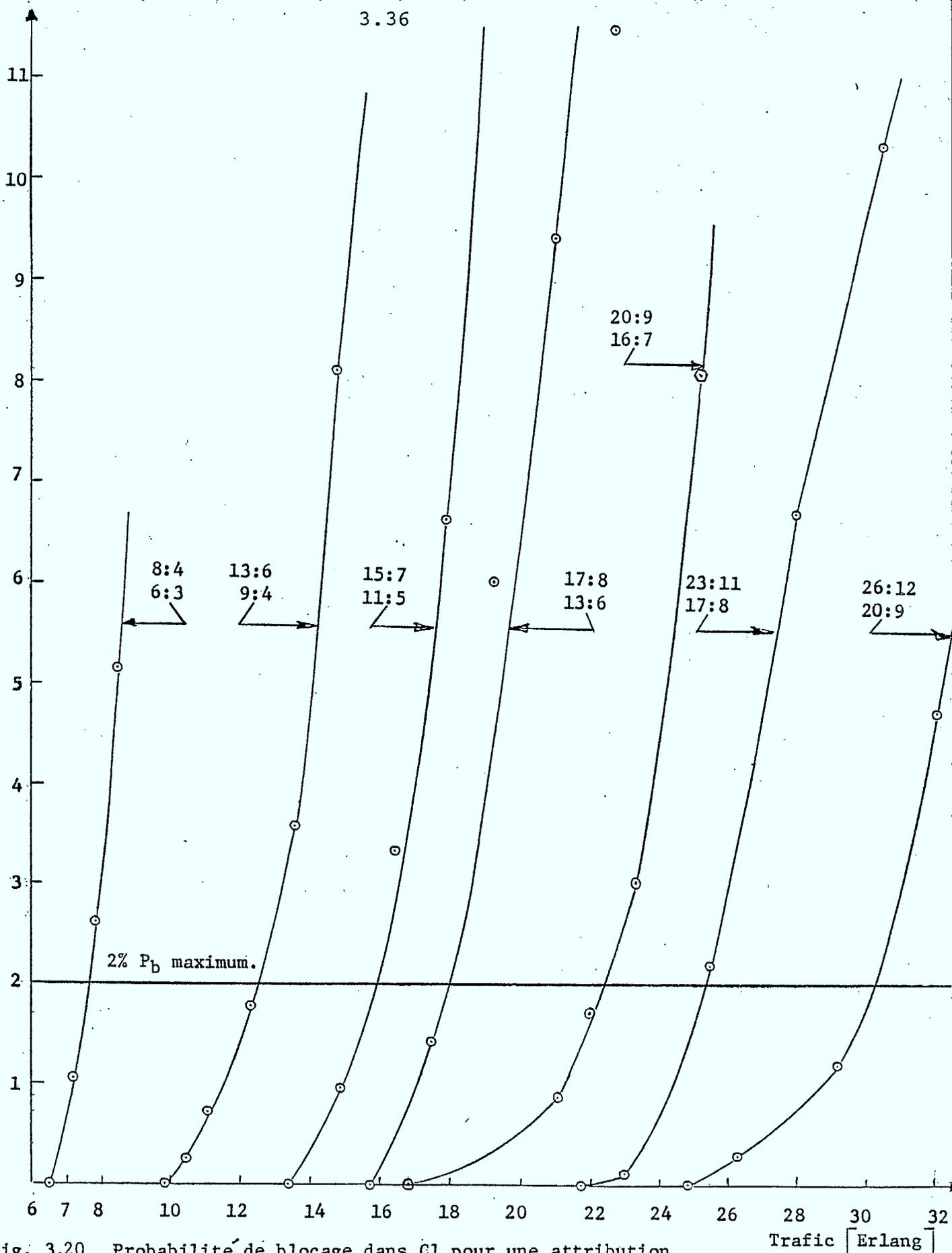


Fig. 3.20 Probabilité de blocage dans C1 pour une attribution hybride avec 12, 19, 22, 25, 34 et 38 canaux. Le Trafic dans C1 est 20% plus élevé que celui dans toute C_j .

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

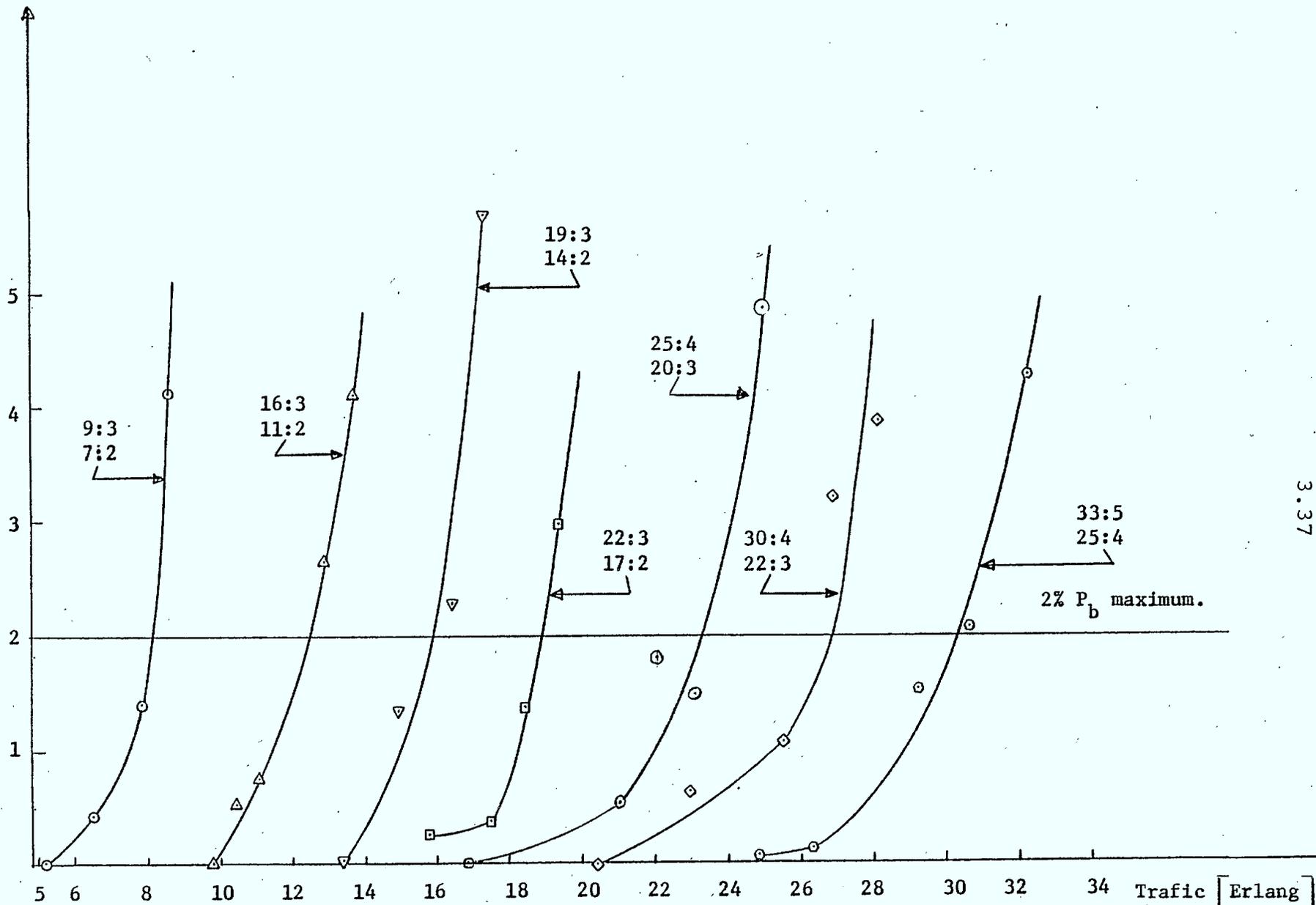
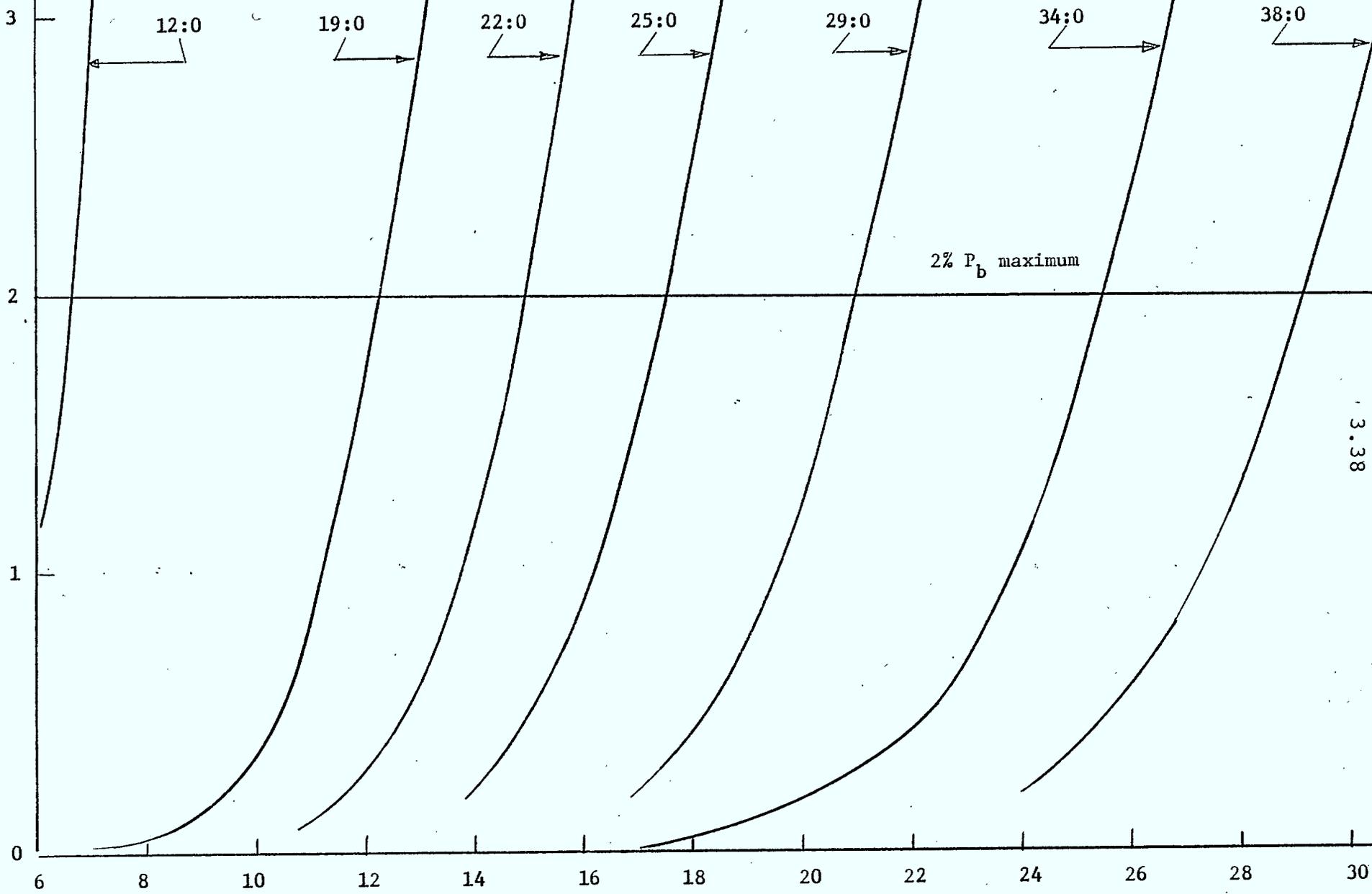


Fig. 3.21 Probabilité de blocage dans C1 pour une attribution hybride avec 12, 19, 22, 25, 34, 29 et 38 canaux. Le Trafic dans C1 est 20% plus élevé que celui dans toute C_j.

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS C1 AVEC TRAFIC NON-UNIFORME.



3.38

Fig.3.22 Probabilité de blocage pour une attribution fixe avec 12, 19, 22, 25, 29 , 34 et 38 canaux. 40% des canaux fixes sont assignés dans la cellule centrale C1.

Trafic Erlan

NOMBRE MINIMUM DES CANAUX DANS LA CELLULE CENTRALE CI.

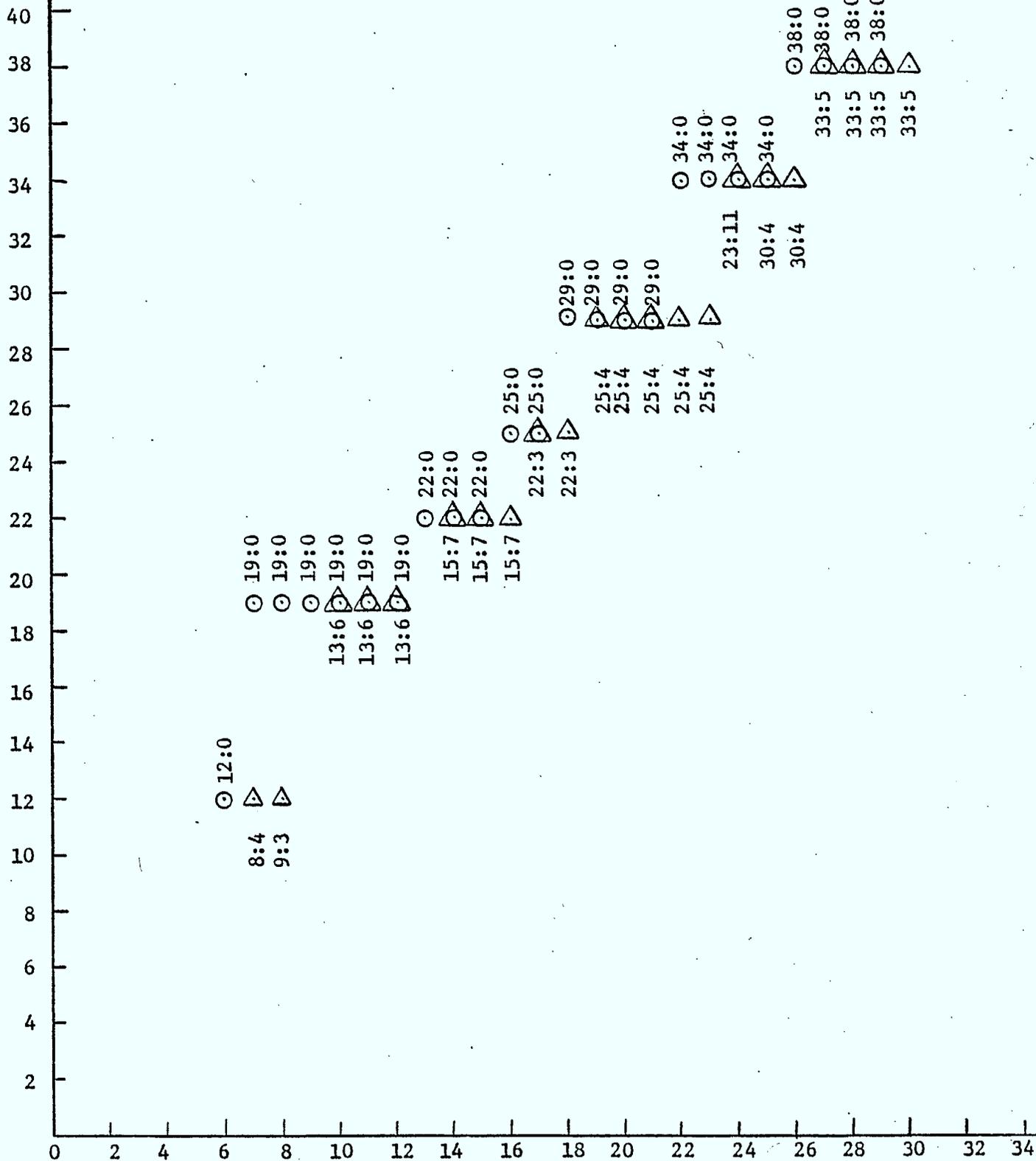


Fig.3.23 Systèmes hybrides optimaux par rapport au nombre des fréquences requises en comparaison avec les systèmes fixes. Trafic [Erlang]

% EFFICACITE SPECTRALE DE SYSTEME HYBRIDE PAR RAPPORT AU SYSTEME FIXE
DANS LA CELLULE CENTRALE.

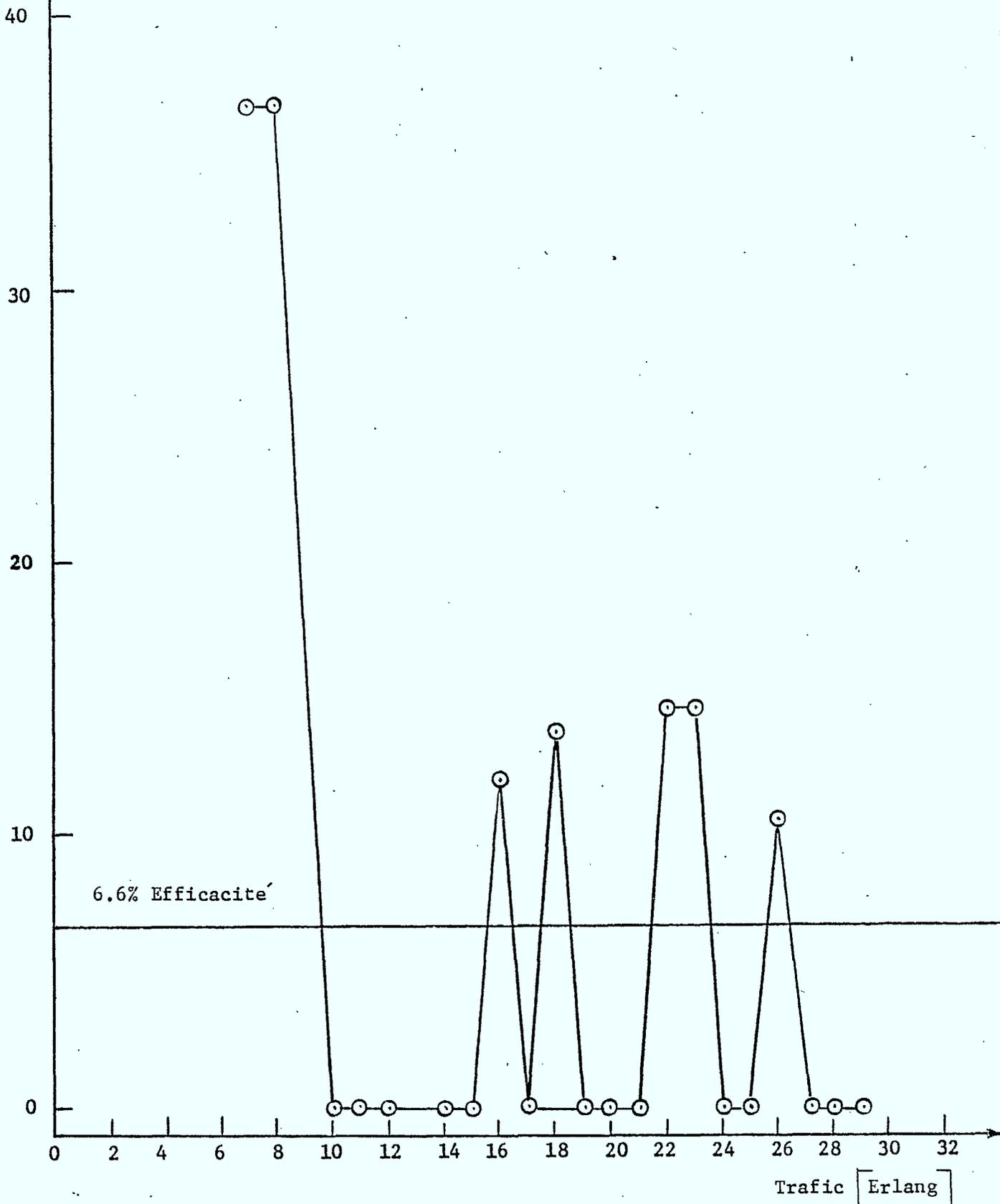


Fig. 3.24 Efficacite spectrale de système hybride par rapport au système fixe dans la cellule centrale.

3.2.3.3. Probabilité de blocage dans toute cellule Cj

Les Figures 3.25 et 3.26 représentent les résultats de la probabilité de blocage d'une attribution hybride dans toute cellule Cj en fonction de trafic. La qualité de service est considérée avec une probabilité de blocage de 2% au maximum. Tandis que la Figure 3.27 représente les résultats de la probabilité de blocage d'une attribution fixe dans toute Cj, 30% des canaux fixes sont attribués dans toutes les cellules de la région qui entoure Cl. Les résultats sont comparés avec le système hybride dans les figures qui suivent dans le paragraphe 3.2.3.4 ci-dessous.

3.2.3.4. Efficacité spectrale: Hybride vs Fixe dans chaque cellule Cj.

Les résultats obtenus, pour la probabilité de blocage de 2% au maximum dans Cj, sont comparées comme c'est indiqué dans la Figure 3.28. Celle-ci représente une fois de plus une comparaison entre le système hybride et le système fixe par rapport au nombre de fréquences requises dans chaque Cj. Si on considère le même taux de trafic offert dans chaque cellule Cj, (8 Erlangs), on observe que le système hybride 9:4 offre un service comparable à celui du système fixe 16:0. Un gain de 3 canaux pour chaque groupe (N2 et N3) est donc obtenu. En d'autres termes, le gain total est de 13 canaux dans l'aire simulée (i.e. celle des groupes N1, N2 et N3).

La Figure 3.29 représente le pourcentage de l'efficacité spectrale du système hybride par rapport au système fixe dans chaque cellule C_j . Celui-ci est de 14.2% en moyenne. Cette efficacité spectrale doit être suffisamment considérable pour la construction des systèmes cellulaires.

3.2.3.5. Conclusions

D'après les conditions où:

1. Le trafic dans C_1 était toujours 20% plus élevé que celui dans toute C_j ,
2. 40% des canaux fixes dans l'aire simulée était attribués à C_1 ,

on peut tirer une autre conclusion concernant l'efficacité spectrale du système hybride par rapport au système fixe. L'efficacité spectrale dans C_1 a été diminuée de 16.4% à 6.6% avec l'augmentation du nombre de canaux de 33.3% à 40%. L'efficacité spectrale dans toute C_j a été augmentée de 6.5% à 14.2% où le pourcentage de canaux fixes a été diminué de 33.3% à 30%. Cette situation est bien considérable, du fait que l'efficacité spectrale du système hybride par rapport au système fixe diminue de plus en plus qu'on augmente le nombre de canaux fixes dans la cellule centrale.

3.2.4. Résultats de simulation avec trafic fixe et variable

Une autre manière sera utilisée pour étudier la performance du système hybride et celle du système fixe.

Afin d'accomplir cette étude, on va se baser sur les configurations données dans le tableau 3.3.

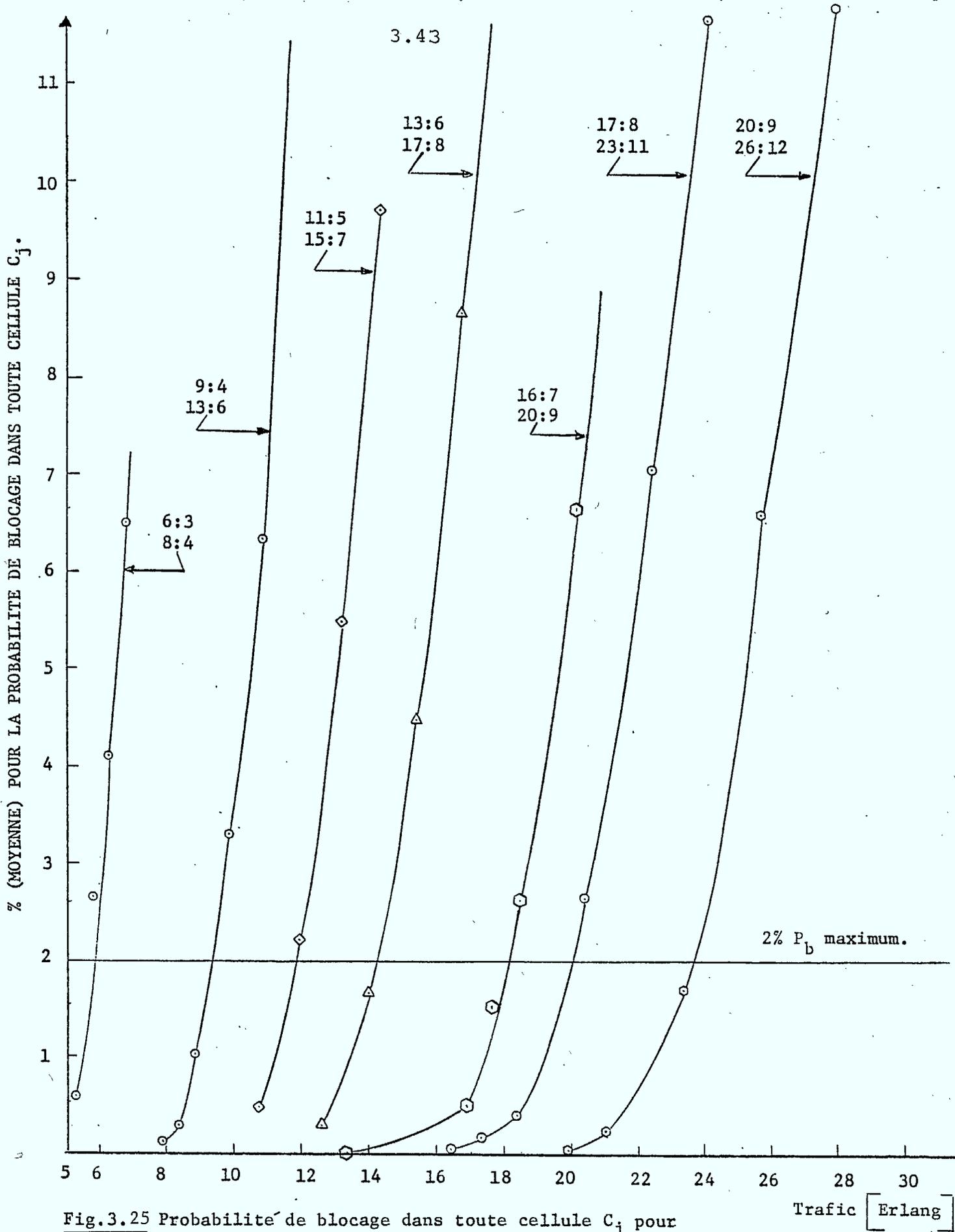


Fig.3.25 Probabilité de blocage dans toute cellule C_j pour une attribution hybride avec 9, 13, 16, 19, 23, 25 et 29 canaux. Le Trafic dans toute C_j est 20% moins élevé que celui dans C_1 .

% (MOYENNE) POUR LA PROBABILITE DE BLOCAGE DANS TOUTE CELLULE C_j

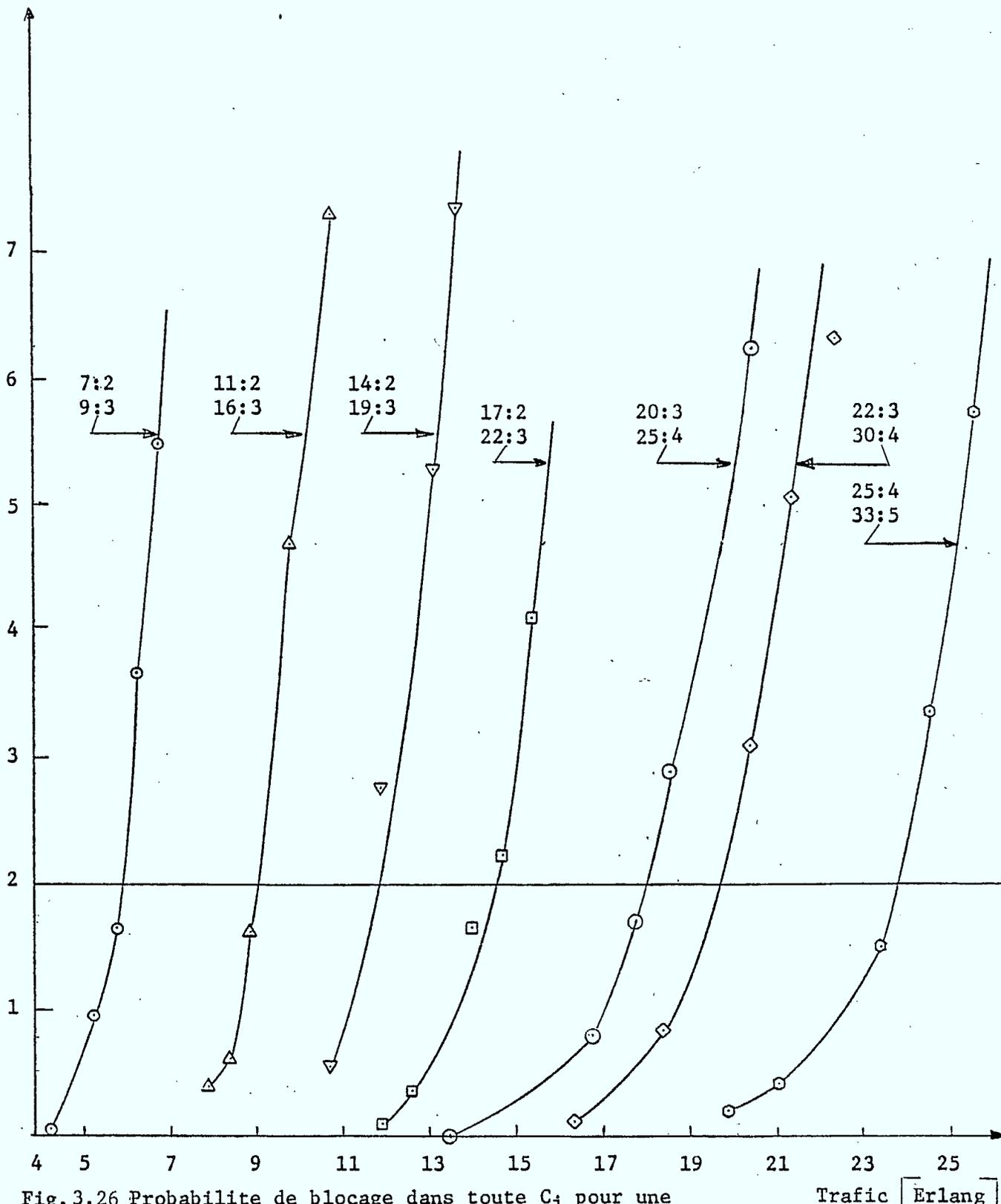


Fig. 3.26 Probabilite de blocage dans toute C_j pour une attribution hybride avec 9, 13, 16, 19, 23, 25 et 29 canaux. Le Trafic dans toute C_j est 20% moins eleve que celui dans C_1 .

Trafic [Erlang]

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS TOUTE CELLULE C_j avec TRAFIC NON-UNIFORME.

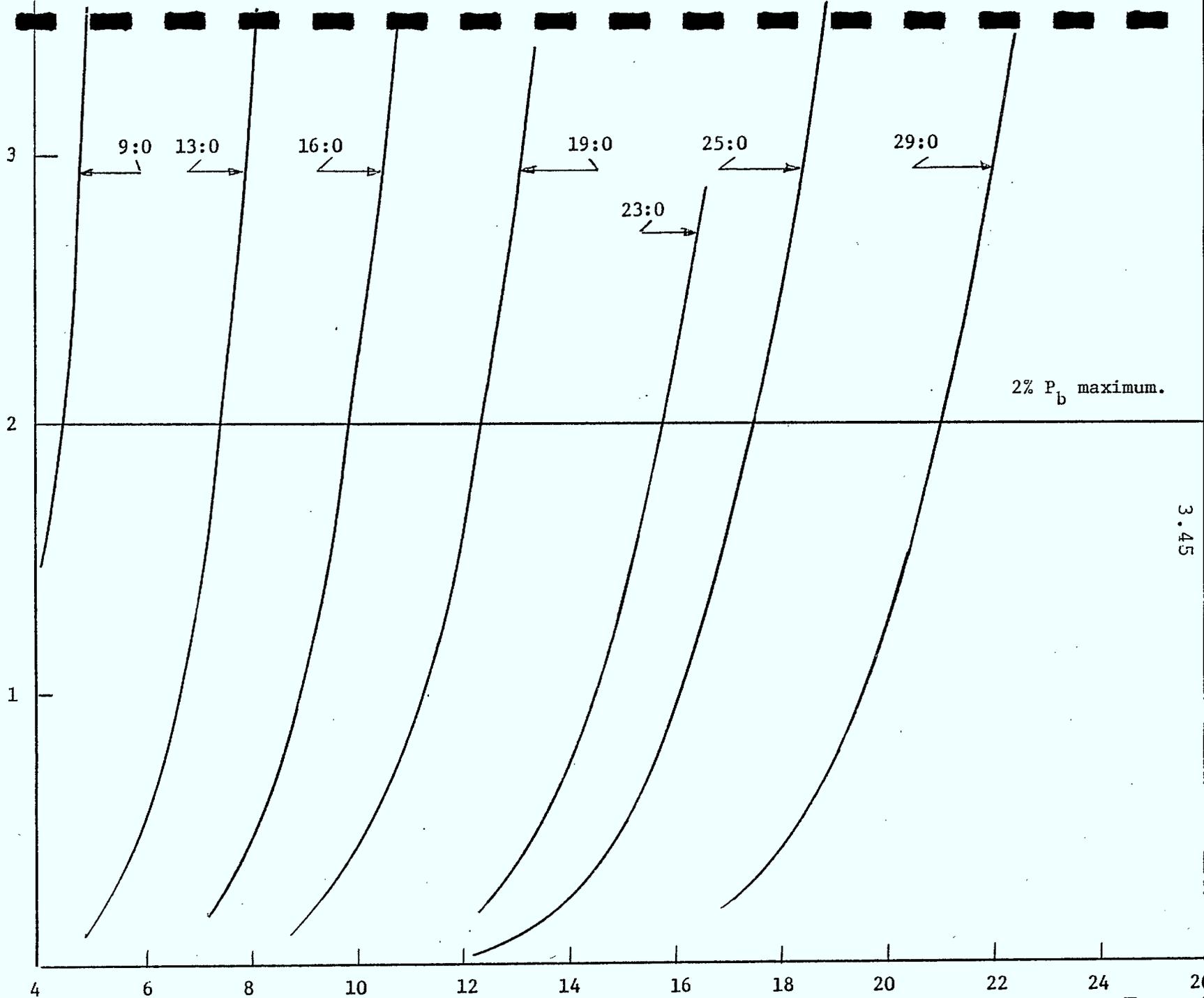


Fig.3.27 Probabilité de blocage dans toute C_j pour une attribution fixe avec 9, 13, 16, 19, 23, 25 et 29 canaux. 30% des canaux fixes sont attribués dans toute cellule C_j . Trafic [Erlang]

NOMBRE MINIMUM DES CANAUX DANS TOUTE CELLULE C_j

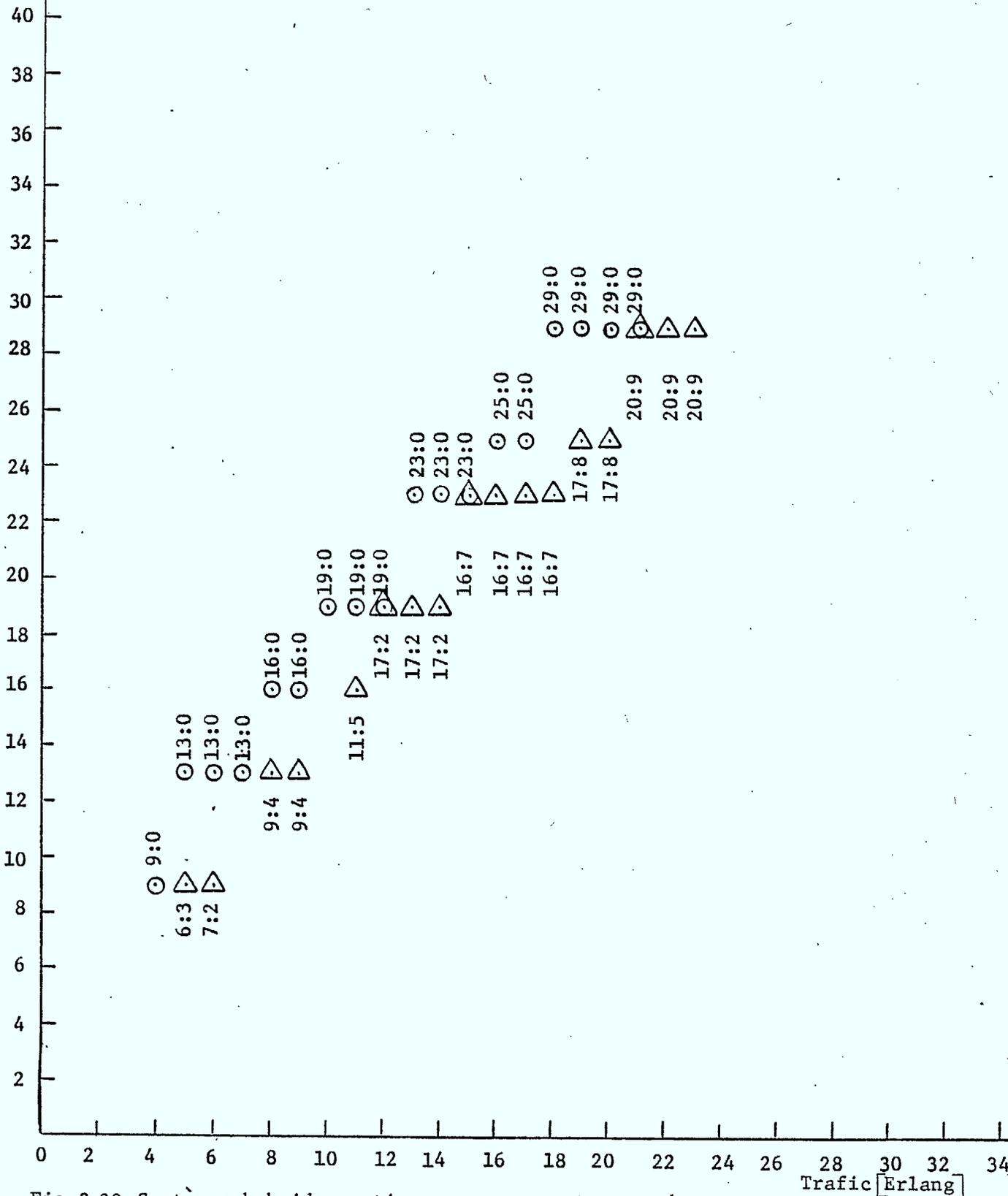


Fig.3.28 Systèmes hybrides optimaux par rapport au nombre des fréquences requises en comparaison avec les systèmes fixes.

% EFFICACITE SPECTRALE DE SYSTEME HYBRIDE PAR RAPPORT AU
SYSTEME FIXE DANS TOUTE CELLULE C_j .

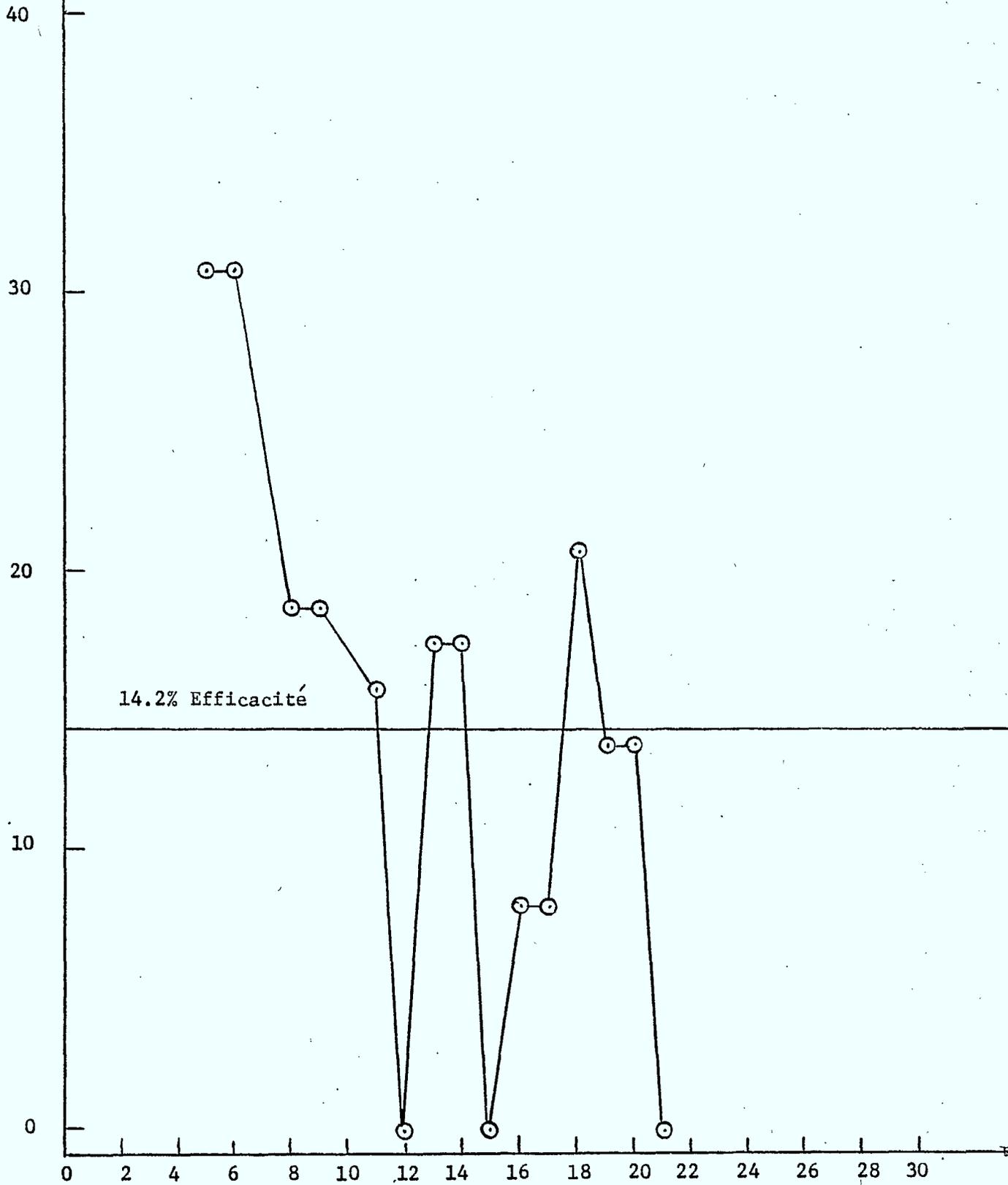


Fig 3.29 Efficacité spectrale de système hybride par rapport au système fixe dans toute cellule C_j .

Trafic [Erlang]

Configurations des systèmes simulés

Nombre moyen de canaux dans C1 avec un trafic non-uniforme et système fixe.	Nombre moyen de canaux pour chaque C _j avec un trafic non-uniforme et système fixe.	Division des canaux dans C1		Trafic offert en Erlang, utilisé dans C1.	
		Fixe : Dynamique	Divisions des canaux dans toute C _j Fixe : Dynamique	Trafic offert en Erlang, utilisé dans toute C _j .	
30	30	30:0 28:2 22:8	30:0 28:2 22:8	21.9, 24.09, 26.28, 30.66, 35.04, 39.42, 43.8	23.1, 23.1, 23.1, 23.1, 23.1, 23.1, 23.1
30	30	30:0 28:2 22:8	30:0 28:2 22:8	24, 26.4, 31.2, 36, 40.8	21.9, 24.09, 28.47, 32.85, 37.23.
20	10	20:0 16:4 12:8	10:0 8:2 6:4	13.12, 17.16, 21.12, 23.76, 26.4, 29.04	5.08, 6.6, 8.13, 9.14, 10.2, 11.18
30	20	30:0 28:2 22:8 18:12 28:2	20:0 20:0 16:4 12:8 16:4	21.9, 28.47, 35.04, 39.42, 43.8	13.2, 17.16, 21.12, 23.76, 26.4.
34	18	34:0 30:4 26:8 22:12	18:0 16:2 14:4 12:6	25.5, 28.05, 33.15, 38.25, 43.35, 48.45.	11.5, 12.6, 14.95, 17.25, 19.5, 21.85

Par cette manière, on représente les meilleurs systèmes qu'on peut utiliser quand le trafic est:

- fixe dans la région de 39 cellules
- successivement variable dans la cellule centrale C1

3.2.4.1. Performance du système avec 30 canaux par cellule initialement

La Figure 3.30 illustre le nouveau résultat obtenu par simulation où le trafic était fixe dans Cj. Par comparaison avec le système fixe 30:0 on peut remarquer que le système 22:8 donne une plus grande efficacité. Même, si on compare ce dernier avec le système hybride 28:2 dont le trafic augmente de 0% jusqu'à 120%, on peut constater sa plus grande efficacité.

En ce qui concerne la moyenne générale de la probabilité de blocage, on a observé qu'elle est égale à 1.74% dans chaque cellule Cj ayant comme caractéristiques: un trafic fixe et un système 22:8. Cette probabilité commence à augmenter avec l'augmentation du trafic dans C1 au-delà de 60% de la charge de base (21.9 Erlangs). La moyenne pour la probabilité de blocage, dans chaque cellule Cj, est égale à 1.6% pour le système 28:2 avec une augmentation de trafic jusqu'à 100% au-dessus de la charge de base 21.9 Erlangs dans C1. Au-delà de 100% de trafic, la probabilité de blocage commence à augmenter dans chaque Cj.

3.2.4.2. Performance du système avec 30 canaux attribués dans chaque cellule

La même stratégie, mais dans ce cas le trafic est successivement variable dans toute l'aire simulée, à condition que:

1. la cellule centrale est supposée d'avoir un trafic variable avec une charge de base de 24 Erlangs pour réaliser une P_b de 4%, et
2. les cellules C_j sont supposées d'avoir un trafic variable avec une charge de base de 21.9 Erlangs pour réaliser une P_b de 2%.

Performance dans C_1

La Figure 3.31 illustre les résultats obtenus pour la probabilité de blocage en fonction de trafic dans C_1 . De cette figure, on obtient que le système 22:8 donne le meilleur résultat avec une augmentation de trafic jusqu'à 10% de la charge de base (i.e. 24 Erlangs). Le même système est le meilleur avec une probabilité de blocage de 2% au maximum et le trafic maximum est de 25.2 Erlang. Au-delà 10% de trafic, le système 28:2 donne la meilleure efficacité jusqu'à 48% au-dessus de la charge de base. De plus en plus que le trafic augmente, on observe que c'est le système fixe (30:0) qui remplace les deux divisions hybrides.

Performance dans C_j

La Figure 3.32 représente les résultats de la probabilité de blocage dans chaque C_j . En comparant les deux divisions 22:8 et 28:2, on peut constater que le premier est le plus efficace quand le trafic augmente jusqu'à 7.5% au-dessus de la charge (21.9 Erlang). Au-delà de ce pourcentage, c'est la division 28:2 qui se trouve le plus efficace avec une probabilité de blocage de 2% au maximum et un trafic 24.1 Erlangs.

En allant très loin, c'est-à-dire au-delà de 65% de trafic, le système fixe 30:0 se présente comme étant le plus efficace.

3.2.4.3. Performance du système avec 20 canaux dans C1 et 10 canaux dans chaque Cj

La Figure 3.33 montre les deux résultats suivants:

Trafic variable dans C1 et fixe dans Cj

Pour C1, si on compare les deux systèmes: (12:8, 6:4) et (16:4-8:2), on constate que le résultat du premier montre son efficacité énorme tout au long du trafic allant de 0% jusqu'à 120%.

Pour Cj, si on compare les deux systèmes: (12:8-6:4) et (16:4-8:2), on peut remarquer que la probabilité de blocage du premier varie entre 0.057% et 1.745%, tandis que celle du second varie entre 0% et 0.52%.

En se basant sur ces résultats, on peut déduire que la majorité des canaux dynamiques sont utilisés au maximum dans C1, ce qui implique qu'il ne reste que très peu pour chaque cellule de Cj.

Du fait de cette utilisation des canaux dynamiques par C1, les canaux qui offrent le service normal dans les cellules Cj ne peuvent pas donner un rendement suffisant comme c'était les cas quand le trafic était variables dans les cellules Cj. Pour cela, la probabilité de blocage augmente dans Cj.

Trafic variable dans C1 et dans Cj

La même figure montre que pour C1 les deux systèmes (12:8-6:4) et (16:4-8:2), l'efficacité est semblable quand le

trafic augmente jusqu'à 42% au-dessus de la charge de base ($P_b < 1\%$). De plus en plus que le trafic augmente jusqu'à 75%, on observe que c'est le système (12:8-6:4) qui donne la meilleure efficacité. Mais, entre 75% et 120% l'efficacité du système (16:4-8:2) se trouve la meilleure.

Une fois que le trafic est rendu au-delà de 120%, c'est le système fixe (20:0-10:0) qui remplace les deux systèmes hybrides en donnant la bonne efficacité.

La Figure 3.34 montre le résultat de la probabilité de blocage obtenu dans C_j : Pour ces cellules, en comparant les deux systèmes (6:4-12:8) et (8:2-16:4), on peut constater que le premier est le plus efficace quand le trafic augmente jusqu'à 85% au-dessus de la charge de base. Au-delà de cette charge, c'est le système (8:2-16:4) qui se trouve le plus efficace. En allant très loin, le système fixe (10:0-20:0) se présente comme étant le plus efficace.

3.2.4.4. Performance du système avec 30 canaux dans C_1 et 20 canaux dans chaque C_j

Cette section montre l'avantage du système d'attribution hybride par rapport au système d'attribution fixe.

Performance dans C_1

La Figure 3.35 explique les propriétés où la cellule centrale utilise 30 canaux fixes. Avec assez de précision, la division des canaux (18:12-12:8) domine sur toutes les autres divisions où le trafic est très bas (d'à peu près 2% au-dessus

de la charge de base (21.9 Erlangs). En augmentant le trafic, les deux systèmes (22:8-16:4) et (28:2-16:4) donnent la même efficacité jusqu'à 30% au-dessus de la charge de base. Au-delà de 30%, le système (28:2-16:4) continue à donner la moindre probabilité de blocage. Le système fixe remplace tous les autres systèmes avec un trafic offert très élevé.

Performance dans Cj

La Figure 3.36 montre la situation de la probabilité de blocage dans Cj. Les deux systèmes (12:8-18:12) et (16:4-22:8) donnent le même résultat à la charge de base, mais la division (16:4-22:8) continue à donner la meilleure efficacité avec l'augmentation de trafic jusqu'à 55% au-dessus de la charge de base (13.2 Erlang). Le système (20:0-28:2 où 2 canaux dynamiques sont valables dans le contrôle central) donne le meilleur rendement avec l'augmentation de trafic au-delà de 55%.

Performance dans Cl

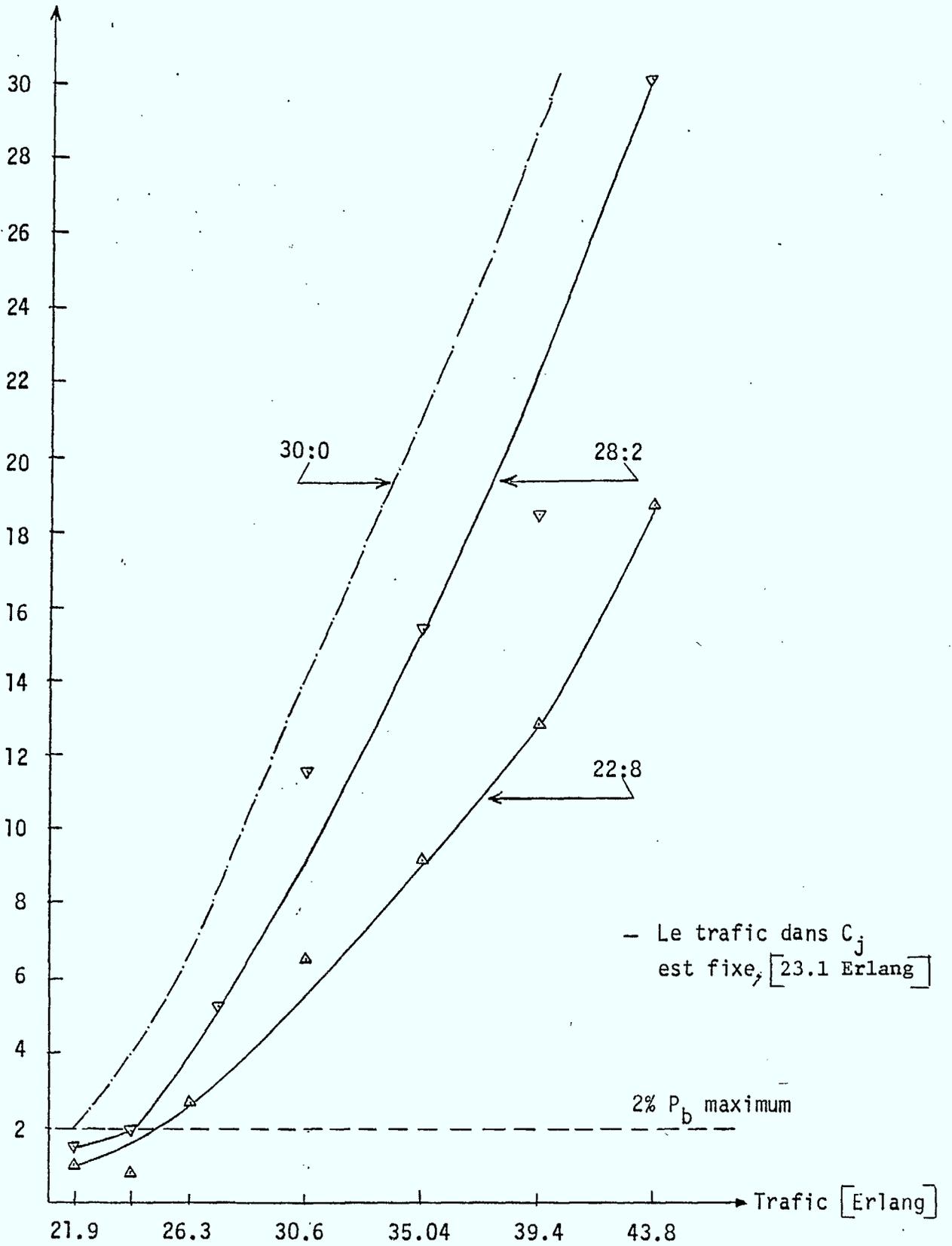
La Figure 3.37 représente les résultats obtenus pour un système avec 34 canaux dans Cl et 18 canaux dans chaque Cj. Dans cette figure on constate les profits que tous les systèmes donnent à peu près la même probabilité de blocage (< 1%) avec une augmentation de trafic jusqu'à 10% au-dessus de la charge de base. Au fur et à mesure que le trafic augmente jusqu'à 65%,

le système (26:8-14:4) il a été trouvé le meilleur. En augmentant encore le trafic, le système avec seulement des canaux fixes est le plus efficace parmi tous les autres systèmes.

Performance dans Cj

La Figure 3.38 représente la probabilité que tous les canaux dans Cj soient occupés. Dans cette figure, on voit que le système avec plus de canaux dynamiques (12:6-22:12) est le meilleur avec l'augmentation de trafic jusqu'à 30% au-dessus de la charge de base. Le système, avec un nombre moyen de canaux dynamiques (16:2-30:4) donne un meilleur rendement au-delà 85% augmentation de trafic.

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE.



- Le trafic dans C_j est fixe, [23.1 Erlang]

2% P_b maximum

Fig. 3.30 Performance du Système avec 30 Canaux par Cellule initialement et trafic non-uniforme

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

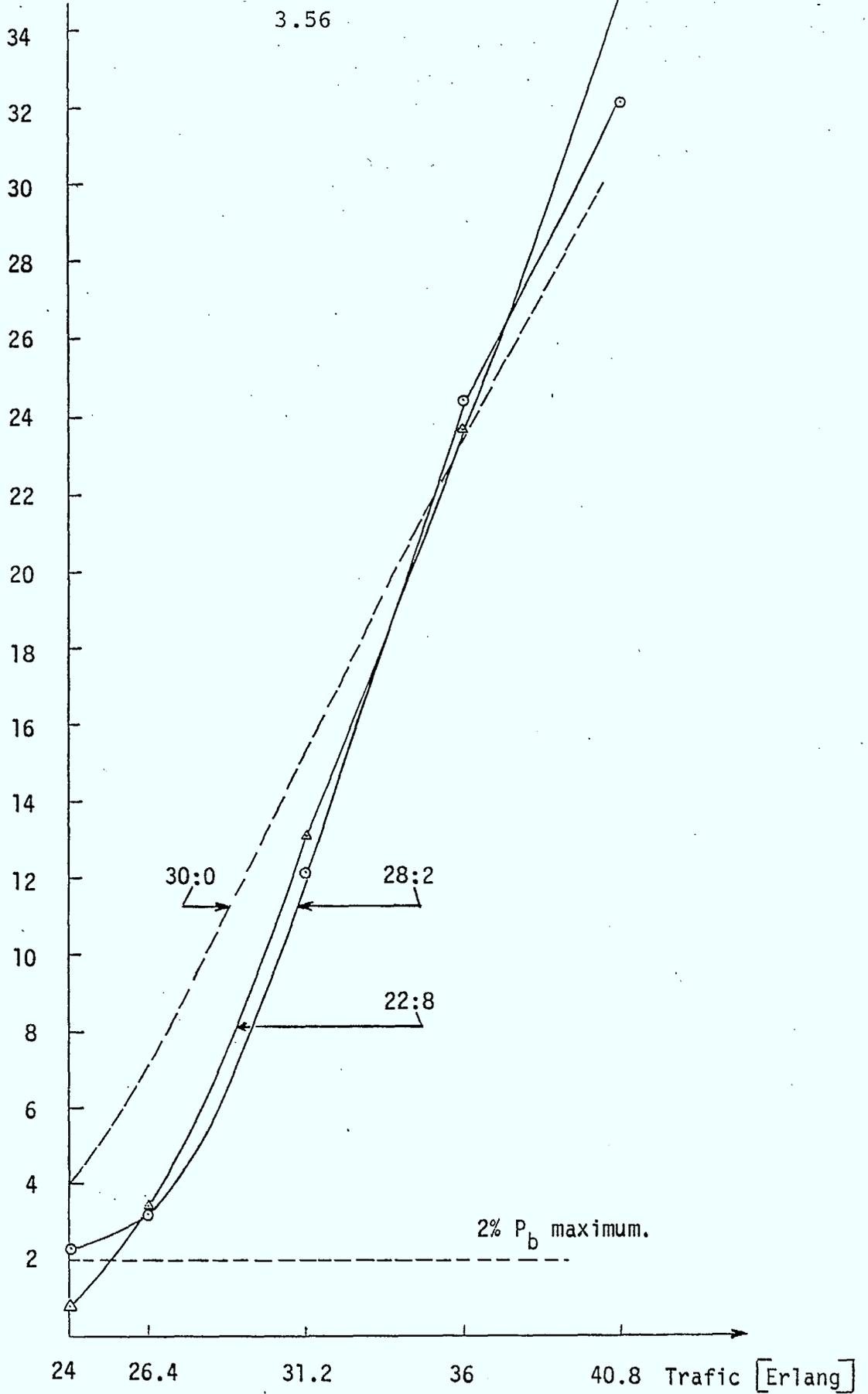


Fig. 3.31 Performance du Système avec 30 Canaux par Cellule initialement et trafic non-uniforme.

% (MOYENNE) POUR LA PROBABILITE DE BLOCAGE
DANS C_j ($1 < j \leq 19$)

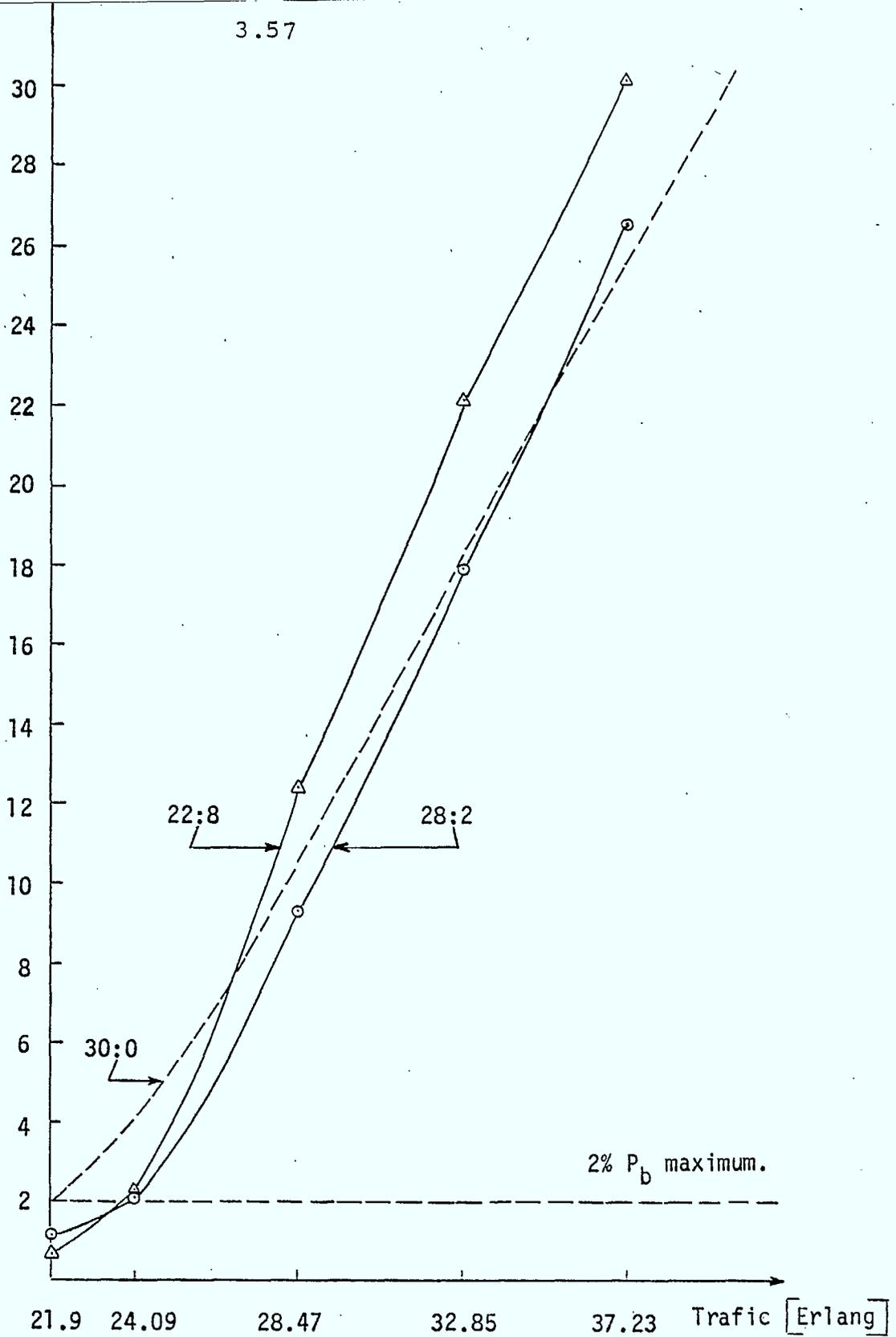


Fig. 3.32 Performance du Système avec 30 Canaux par Cellule initialement et Trafic non-uniforme.

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE.

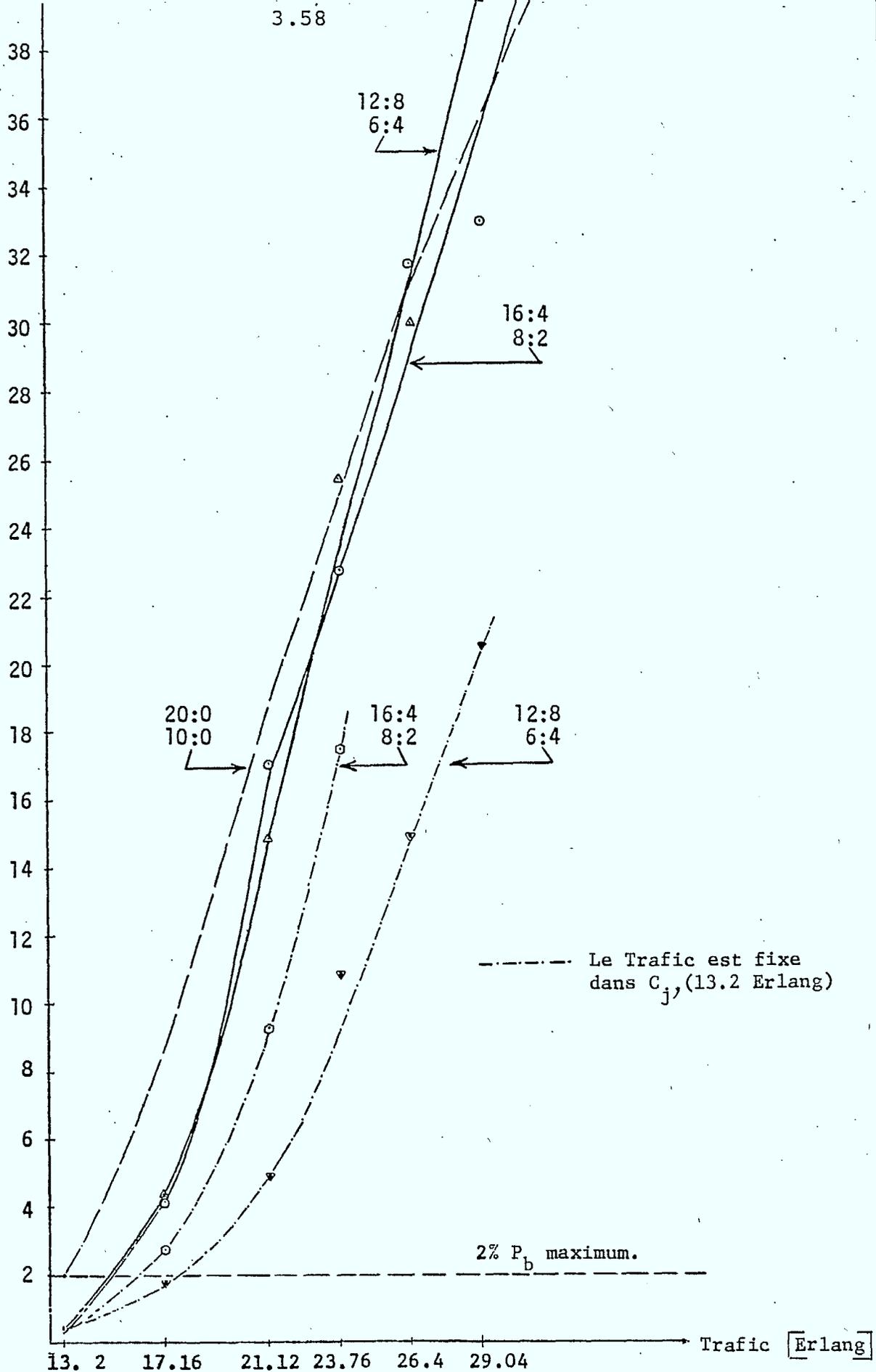


Fig. 3.33 Performance du Système avec 20 et 10 Canaux attribués dans C_1 et dans chaque C_j respectivement

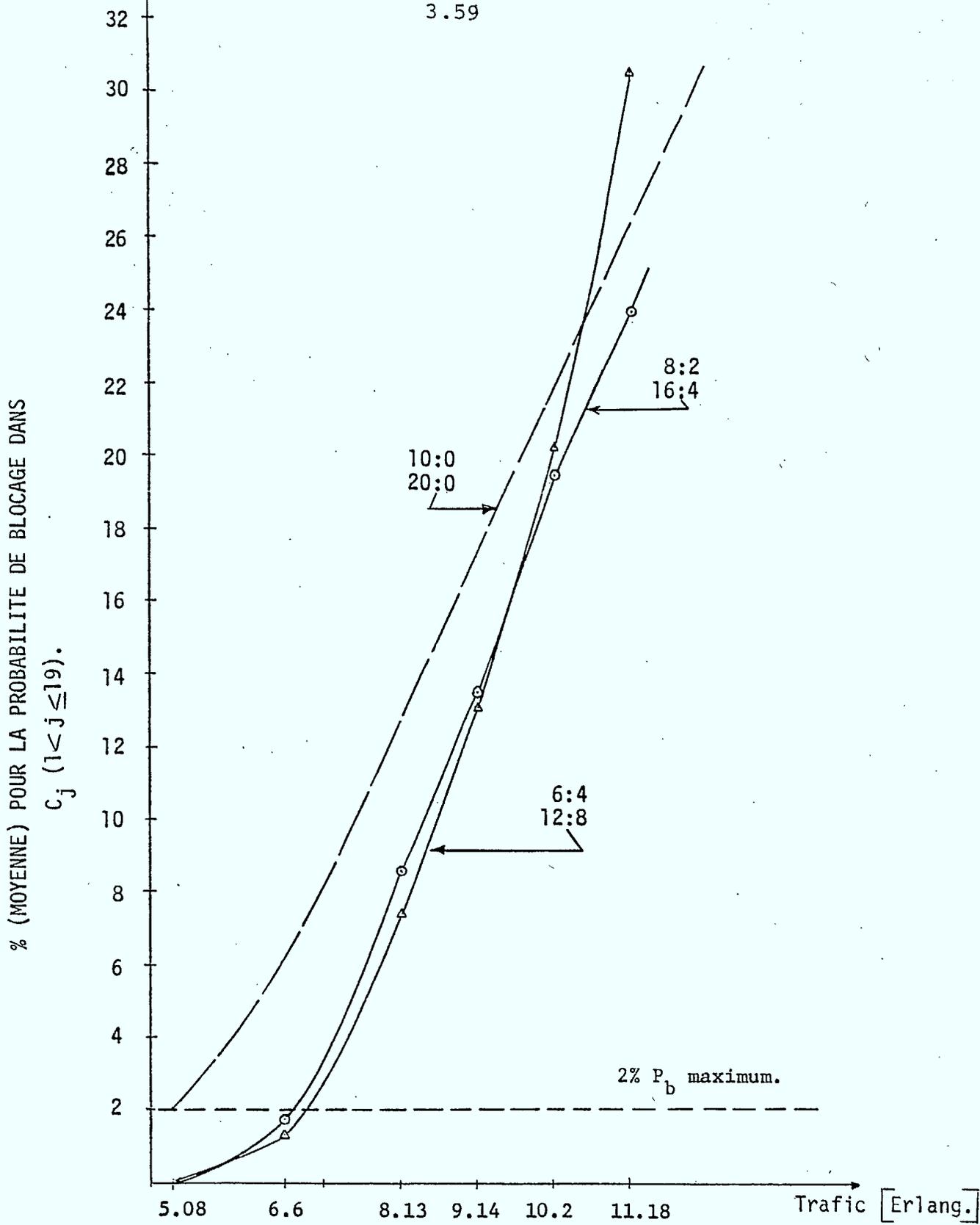


Fig. 3.34 Performance du Systeme avec 10 et 20 Canaux Fixes dans chaque C_j et dans la cellule centrale respectivement.

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

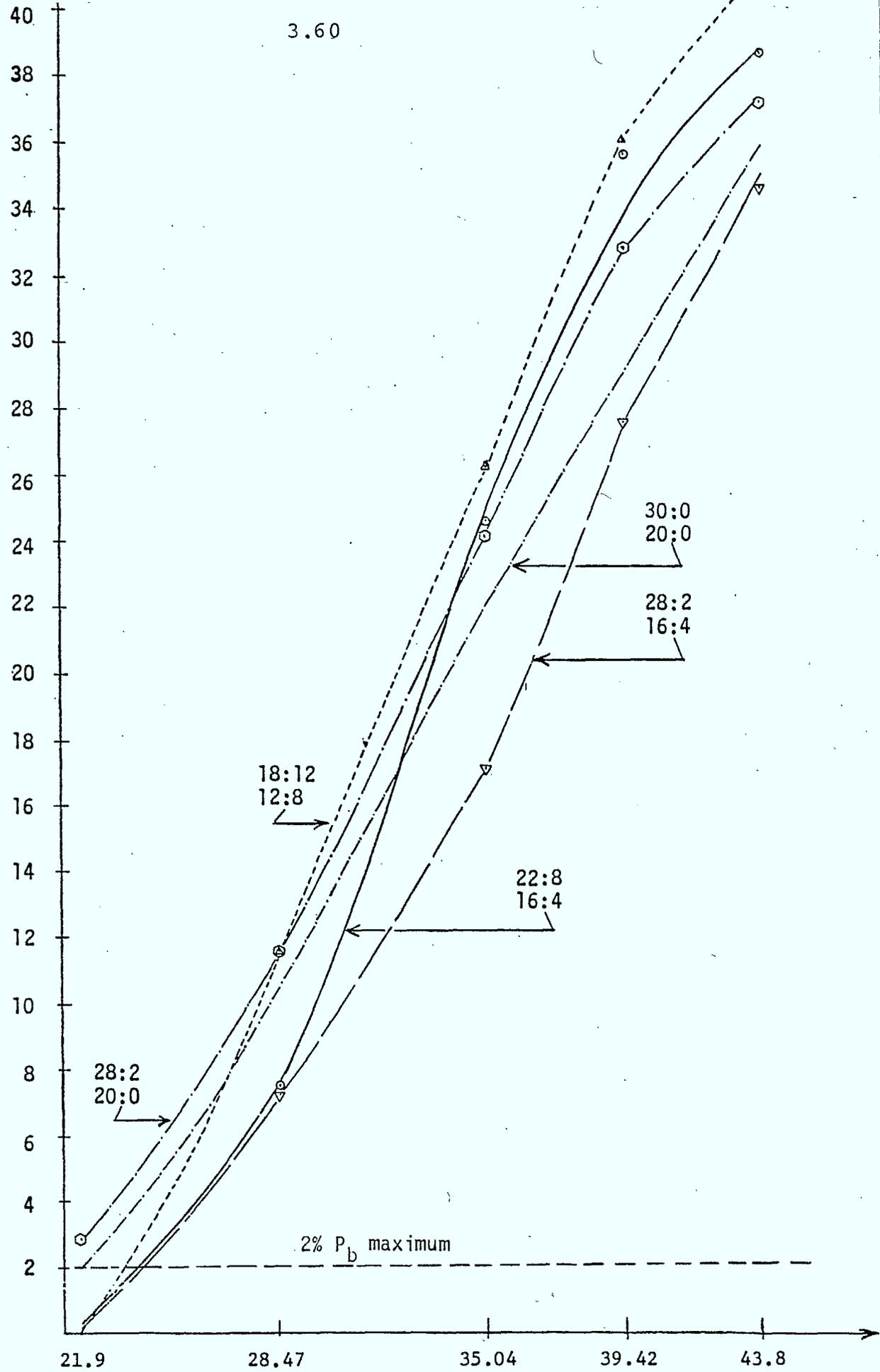


Fig. 3.35

Performance du System avec 30 et 20 Canaux attribués dans C1 et dans chaque C_j respectivement.

Trafic [Erlang]

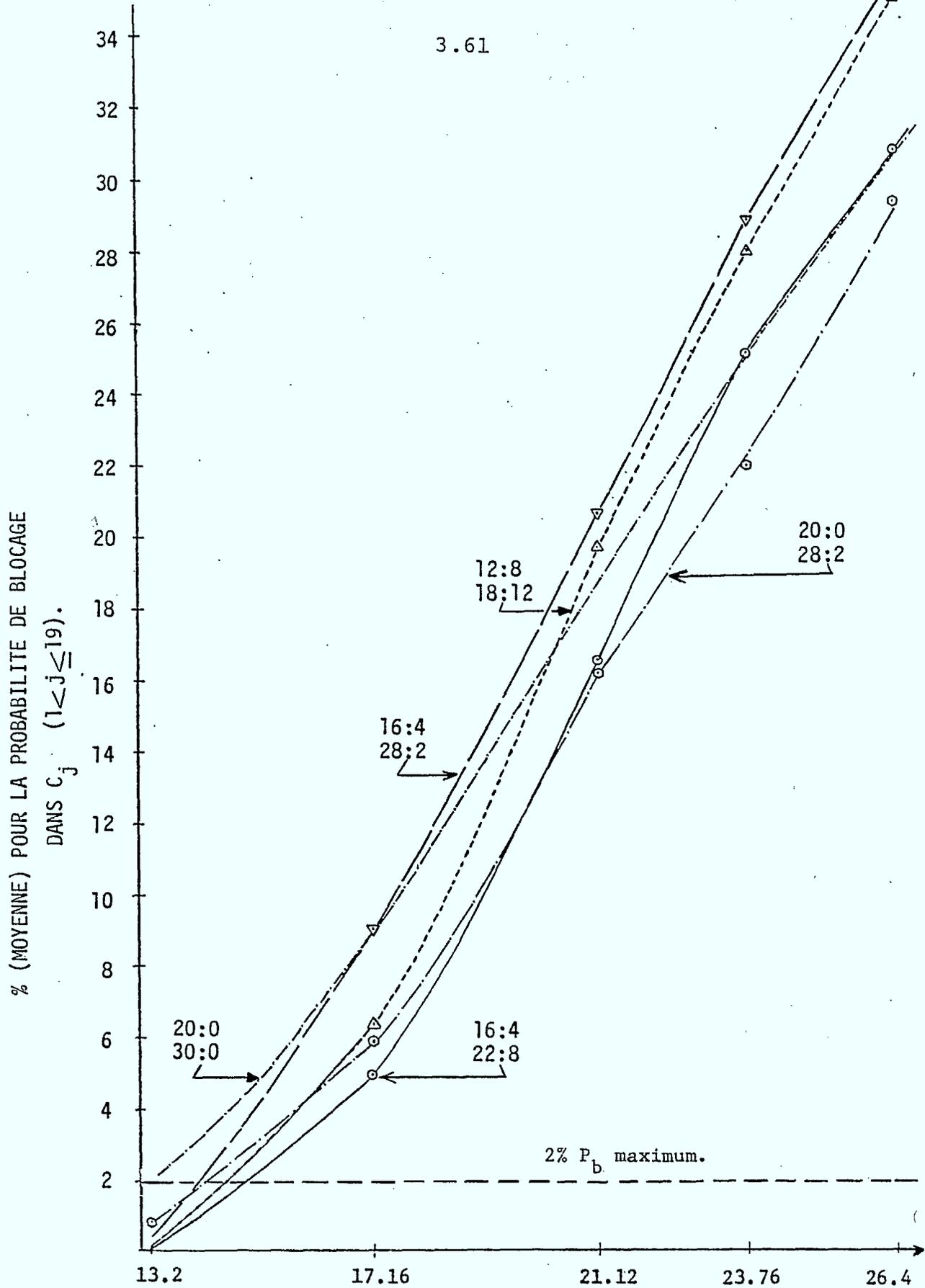


Fig. 3.36 Performance du Systeme avec 20 et 30 Canaux Trafic [Erlang]
Fixes attribués dans chaque C_j et C_l respectivement,

% PROBABILITE DE BLOCAGE DANS LA CELLULE CENTRALE C1.

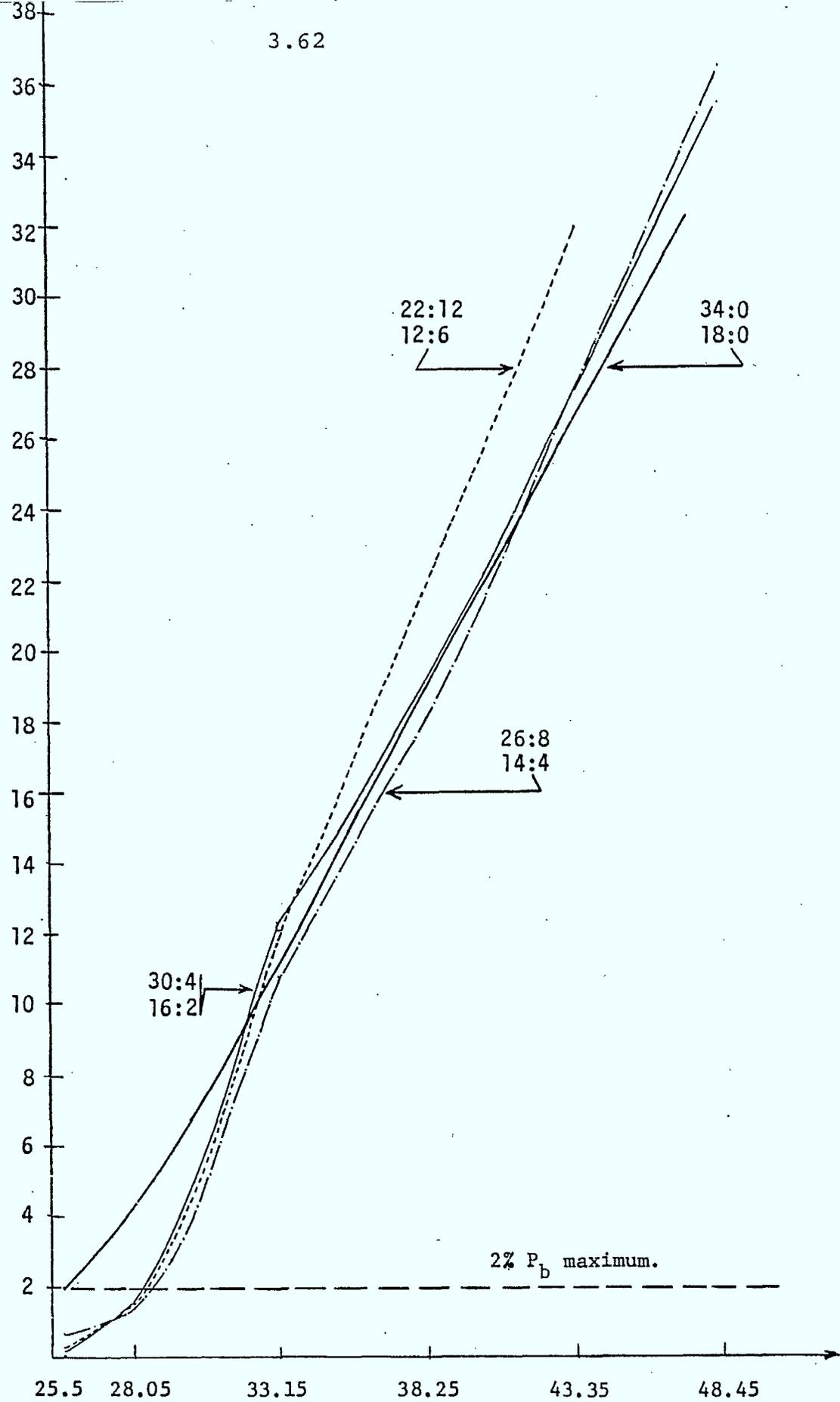


Fig. 3.37 Performance du Systeme avec 34 et 18 Canaux Trafic [Erlang] attribues dans C1 et dans chaque C_j respectivement.

% (MOYENNE) POUR LA PROBABILITE DE BLOCAGE DANS
 C_j ($1 < j \leq 19$).

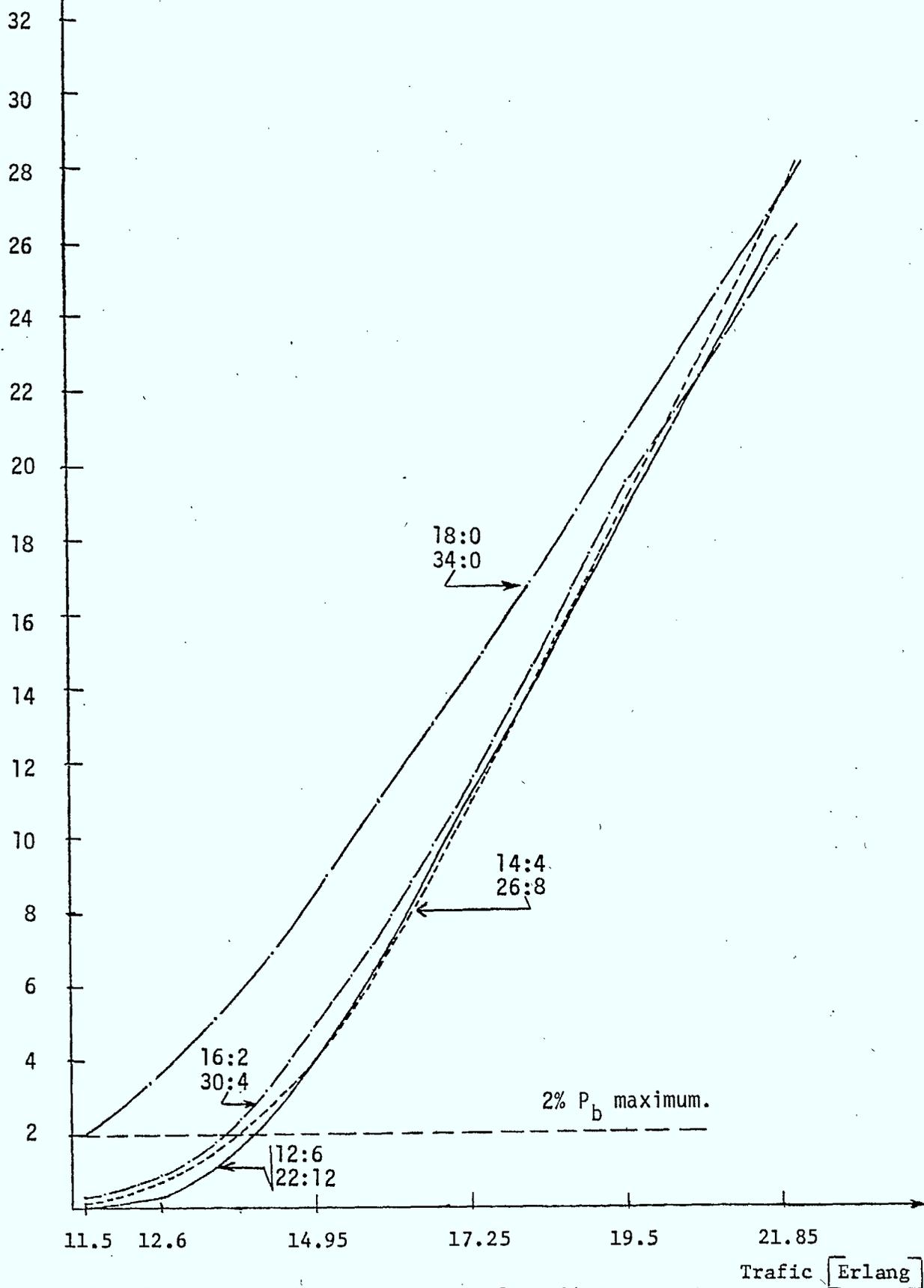


Fig. 3.38 Performance du Systeme avec 18 et 34 Canaux Fixes dans chaque cellule C_j et dans C_1 respectivement.

Trafic [Erlang]

3.3. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre nous avons considéré une méthode de gestion pour le Spectre de Fréquence de la communication terrestre-mobile, notamment les systèmes cellulaires. Un système de 40 cellules ayant une attribution de trafic non-uniforme dans les cellules, basée sur la discipline de service Erlang-B ("appels-bloqués-éliminés") a été étudié par simulation GPSS.

Nous avons divisé le travail de ce chapitre en trois parties: premièrement, on a considéré la cellule centrale avec un trafic différent de X% par rapport à celui des autres cellules qui l'entourent. L'attribution de canaux dans ce cas était identique dans chaque cellule.

Deuxièmement, pour le même système cellulaire, l'attribution de canaux a été considérée non-identique. On a assigné des canaux supplémentaires dans la cellule centrale avec un trafic non-uniforme par comparaison avec celui des autres (C_j).

Finalement, nous avons considéré deux méthodes d'attribution de canaux dans les cellules: fixe et hybride. Pour des taux différents de trafic offert par cellule, nous avons déterminé la probabilité de blocage pour chaque méthode d'attribution ayant des nombres différents de canaux disponibles par cellule.

D'après les analyses qu'on a fait, nous pouvions indiquer quel système d'attribution peut supporter le plus grand trafic et quel système offre le nombre minimum de canaux nécessaires pour des taux différents de trafic, ceci avec une probabilité de blocage de 2% dans la cellule C_1 et dans toutes les cellules C_j .

Les résultats obtenus indiquent que l'efficacité spectrale du système hybride diminue de 16.4% à 6.6% avec une augmentation de canaux de 33.3% à 40% dans la cellule centrale. Cette efficacité spectrale augmente dans les autres cellules de 6.5% à 14.2% où le pourcentage des canaux fixes diminue de 33.3% à 30%.

En addition, dans la simulation du système cellulaire employant le système fixe avec la discipline Erlang-B, nous avons attribué jusqu'à 40% des canaux disponibles dans la cellule centrale et dans les autres, afin de les utiliser de façon dynamique. Pour toutes les configurations du système simulé, les résultats obtenus des Figures 3.30 à 3.38, démontraient à peu près le même résultat. C'est-à-dire, que les systèmes ayant plus de canaux dynamiques ont donné la plus faible probabilité qu'un appel soit bloqué, quelque soit le trafic fixe ou variable dans les cellules C_j . Un cas spécial, c'est que les systèmes ayant plus de canaux dynamiques offre le meilleur service jusqu'à une augmentation de trafic de 70% au-delà de la charge de base. D'autre part, les systèmes ayant seulement des canaux fixes donnent un meilleur rendement pour des charges offertes élevées ($> 100\%$ dans la cellule centrale), à cause de la réutilisation maximum des canaux.

3.4. Références

- 1) James Martin "Systems Analysis for Data Transmission", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1972.
- 2) Martin Nesenbergs, "A Hybrid of Erlang B and C Formulas and its Applications", IEEE Trans. on Comm. Vol.COM-27, No. 1, January 1979, pp. 59-68.
- 3) J. Sin, "A Hybrid Channel Assignment Scheme for Cellular, High-Capacity, Land-Mobile Radio Communications Systems with Erlang-C Service", M.A.Sc. Thesis, University of Ottawa, Canada, April 1979.
- 4) Lewis G. Anderson, "A Simulation Study of Some Dynamic Channel Assignment Algorithms in a High Capacity Mobile Telecommunications Systems", IEEE Trans. on Veh. Tech., Vol. VT-22, No. 4, Nov. 1973, pp. 210-217.
- 5) Joel S. Engel and Martin M. Peritsky, "Statistically Optimum Dynamic Server Assignment in Systems with Interfering Servers", IEEE Trans. on Veh. Tech., VT-22, No. 4, Nov. 1973, pp. 203-209.
- 6) IBM General Purpose Simulation System User's Manual, SH20-0851-1, Second Edition, IBM, White Plains, N.Y., 1971.
- 7) Thomas J. Schriber, "Simulation Using GPSS", John Wiley & Sons, New York, N.U., 1974.
- 8) P.A. Bobillier, B.C. Kahan, A.R. Probst, "Simulation with GPSS and GPSS V", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.
- 9) Richard N. Lane, "Spectral and Economic Efficiencies of Land Mobile Radio Systems", IEEE Trans. on Veh. Tech., VT-22, No. 4, Nov. 1973, pp. 93-103.
- 10) G.A. Arredondo, J.C. Feggler, and J.A. Smith, "AMPS: Voice and Data Transmission", Vol. 58, No.1, BSTJ, January 1979.

- 11) S. Elnoubi, R. Singh and S.C. Gupta, "A New Channel Assignment Scheme in Land Mobile Radio Communications", E.E. Dept., Southern Methodist University, Dallas, Texas, N.T.C. Conference, 1979.
- 12) Harold Staras and Leonard Schiff, "A Dynamic Space Division Multiplex Mobile Radio System", IEEE Trans. Veh. on Tech., Vol. 20, No. 3, August 1979, pp. 206-213.
- 13) Leonard Schiff, "Traffic Capacity of Three Types of Commun User Mobile Radio Communication Systems", IEEE Trans. on Comm. Tech., Vol. Com-18, No. 1, February 1970, pp. 12-21.
- 14) George R. Cooper and Raymond W. Nettleton, "A Spread Spectrum Technique for High-Capacity Mobile Communications", IEEE Trans. on Veh. Tech., Vol. VT-27, No. 4, November 1978, pp. 264-275.
- 15) Philip T. Porter, "Supervision and Control Features of a Small Zone Radiotelephone System", IEEE Trans. on Veh. Tech., Vol. 20, No. 3, August 1970, pp. 75-79.
- 16) D.C. Cox and D.O. Reudink, "Dynamic Channel Assignment in High Capacity Mobile Communications Systems", BSTJ, Vol. 50, No. 60, July-August, 1971, pp. 1833-1857.
- 17) D.C. Cox and D.O. Reudink, "Somme Effects on Channel Occupancy of Limiting the Number of Available Servers in Small Cell Mobile Radio Systems Using Dynamic Channel Assignment", IEEE Trans. on Comm. Vol. COM-27, No. 8, August 1979, pp. 1224-1226.
- 18) Zachary C. Fluht and Eric Nussbaum, "Switching Plan for a Cellular Mobile Telephone System", IEEE Trans. on Veh. Tech., Vol. VT-22, No. 4, November 1973, pp. 197-202.

IV. SIMULATION D'UN PROTOCOLE DE SIGNALISATION POUR LES SYSTEMES CELLULAIRES

4.1. Introduction

Avant même d'obtenir un canal de communication de voix, il est nécessaire que l'utilisateur mobile trouve un canal libre au travers duquel il peut communiquer son intention d'établir un appel. Il faut ainsi fournir à la centrale de commutation pour réseau mobile (MTSO) une identification et une série de chiffres et attendre qu'un canal disponible soit assigné.

Dans les anciens systèmes de communication mobile que l'on rencontre encore aujourd'hui, une "tonalité d'attente" (idle tone) est utilisée pour signaler la disponibilité dudit canal pour permettre tout d'abord la signalisation et ensuite la communication téléphonique.

Cependant, dans les nouveaux services de communication mobile proposés par AT et T, les canaux sont prévus soit pour la signalisation ou soit pour la voix [5]. Cette dernière innovation s'est révélée nécessaire du fait qu'une grande variété de décisions doit être prise pendant l'établissement d'une communication complète et que ces décisions ne peuvent être traitées que sur la base d'une seule tonalité.

Les canaux de signalisation peuvent être subdivisés en deux groupes. Les expressions "téléappel" (paging) et "accès" (access) sont utilisés pour décrire les canaux de signalisation utilisés dans la direction "base-à-mobile" et dans la direction "mobile-à-base" respectivement. Quand un appel à l'intention d'une unité mobile transmis par un réseau téléphonique terrestre

(ou peut-être par un autre utilisateur mobile) arrive au MTSO, un "message de téléappel" est envoyé à toutes les bases qui, à leurs tours, retransmettent le message par le canal mis à disposition (dans la direction base-à-mobile). De cette façon, le système de téléappel est mis à la disposition de toute la région de service; ainsi les unités mobiles, indépendamment de leurs positions devraient être à même de répondre par la base la plus proche. Les données numériques de recherches contiennent les informations suivantes:

1. Numéro d'identification mobile (MIN).
2. Identification de l'endroit du service mobile (MSA) ou l'indicatif local (ACS).
3. Code des couleurs numériques (DCC). Ce dernier est utilisé pour la supervision et également pour déterminer la localisation de la base. Quand une station mobile transmet un "message d'appropriation" sur un canal "mobile-à-base", un préambule contenant le DCC est inclus. Le DCC d'appropriation a été précédemment extrait du "message de téléappel". La raison de ce dernier fait est illustrée par l'exemple suivant. Considérons un système cellulaire bien développé où le rayon d'une cellule est de 1 mille, le facteur de réutilisation ("reuse factor") de même canaux est de 4.7 et dans lequel le DCC n'est pas utilisé. Les utilisateurs possibles de mêmes canaux sont à une distance inférieure à 5 milles, tout à fait dans le rayon de transmission de leurs unités mobiles qui est de 5 à 10 milles. De ce fait, il est possible voire

probable qu'un message d'appropriation soit mal dirigé (c'est-à-dire reçu à une base autre que la plus proche). Cependant, en utilisant le DCC, les bases utilisant les mêmes canaux d'établissement de contacts et le même DCC sont beaucoup plus éloignées que dans le cas de bases n'utilisant que les mêmes canaux d'établissement de contacts. Une base s'attend à recevoir en retour le même DCC qu'elle a transmis elle-même; si ce n'est pas le cas, le message d'appropriation est ignoré.

4. Un paramètre (N) qui spécifie le nombre de canaux d'établissement de contacts dans un ensemble identique (c'est le "facteur de fréquence de réutilisation" (frequency reuse factor); dans le cas où il n'y a qu'un seul canal d'accès par cellule, il est équivalent au nombre d'ensembles de canaux distincts requis dans le MSA).
5. Un paramètre (CMAX) qui spécifie le nombre de canaux d'établissement de contacts à balayer pendant la réponse d'assignation, la tentative d'appropriation ou une confirmation d'ordre.
6. Un paramètre (CPA) qui dit à l'unité mobile si les fonctions de "téléappel" et "accès" sont combinées sur les mêmes canaux d'établissement de contacts ou pas.

Quand le téléappel n'est pas nécessaire, la base ajoute un "texte de remplissage" à la place pour conserver exactement le même format.

Comme il a déjà été mentionné, les canaux "d'accès" sont utilisés pour transmettre des informations numériques de l'unité mobile à la base. Les unités mobiles qui essaient de s'approprier un canal le font aléatoirement de façon à transmettre soit un message d'appropriation (provenant d'une unité mobile), de réponse d'assignation (appel d'une unité mobile terminé), ou une confirmation d'ordre.

Dans les sections suivantes, nous allons examiner les étapes suivies par l'unité mobile pour obtenir un canal d'accès et les méthodes utilisées pour minimiser les collisions*, réduire les interruptions et les surcharges.

4.2 Plan des canaux d'établissement de contacts

La figure 4.2.1 montre comment les canaux d'établissement de contacts sont assignés dans le spectre de fréquence pendant les deux premières étapes de croissance du système. Les fréquences comprises entre 870 à 890 MHz représentent le domaine de fréquences de réception des unités mobiles et de transmission de la base. Inversement, les fréquences comprises entre 825 et 845 MHz représentent le domaine de fréquences de transmission des unités mobiles et de réception de la base. Chaque canal a besoin d'une bande passante de 30 KHz. Ainsi avec les 40 MHz de spectre de fréquences à disposition on obtient 666 canaux duplex.

* les collisions sont définies par une arrivée simultanée de messages d'appropriations à la même base.

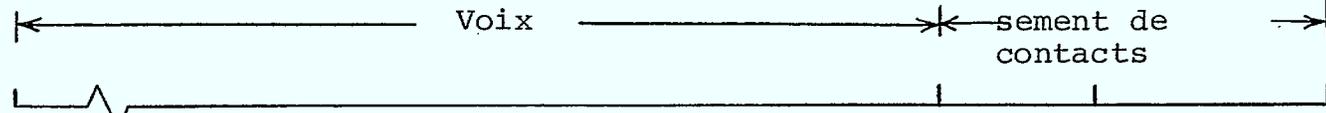
Dans la première étape de croissance du système, de grandes cellules et des antennes omnidirectionnelles sont utilisées et les fonctions de "téléappel" et "accès" sont "combinées" sur les mêmes canaux d'établissement de contacts (rappelons-nous que des canaux duplex sont utilisés et de ce fait "combiné" implique que les "informations de téléappel" sont transmises sur la moitié base-à-mobile du canal et les "informations d'accès" sur la moitié mobile-à-base du même canal duplex).

Dans une deuxième phase, des antennes directionnelles sont introduites et les fonctions de "téléappel" et "accès" sont séparées. Dans la figure 4.2.1, les messages d'entêtes contenant les paramètres du système (décrit dans l'introduction) sont transmis dans les canaux désignés "accès"; alors que le message d'entête et le téléappel (le numéro d'identification mobile) sont transmis par les canaux de téléappel (paging). Il y a parfois une certaine confusion du fait que dans la littérature technique l'expression "accès" est utilisée indifféremment pour décrire les canaux dans la direction "base-à-mobile" par lesquels les paramètres du système sont relayés à la station mobile. Il est important de faire la distinction entre ces canaux d'accès "base-à-mobile" et ceux qui occupent la bande de fréquences de 825 - 845 MHz qui sont utilisés par les unités mobiles lors de la tentative d'appropriation.

Etape de croissance

Configuration du système

N canaux



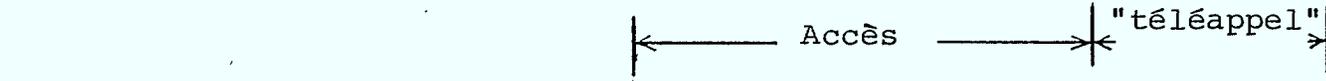
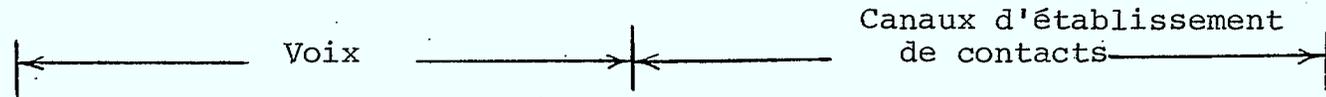
Première étape avec 20000 utilisateurs

Omnidirectionnel

("téléappel" et "accès")

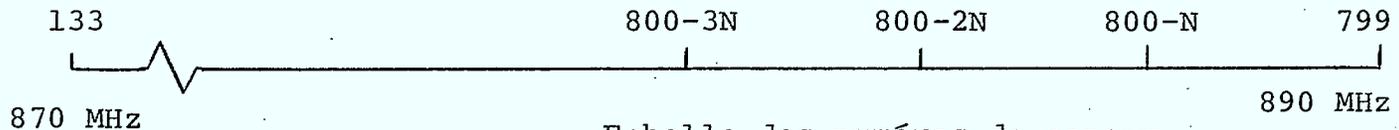
Deuxième étape avec 20000 à 60000 utilisateurs

Après le premier partage



messages d'entête seulement

messages d'entête et de "téléappel"



Echelle des numéros de canaux
 * = réservé temporairement
 N = facteur de réutilisation fréquence

Fig. 4.2.1 Exemple de réajustement de canaux d'établissement de contact avec la croissance du trafic [5]

Lorsque le service se développe de plus en plus, le nombre de canaux réservés pour l'accès est augmenté alors qu'au contraire le nombre de canaux de voix est diminué.

4.3. Logique et architecture de contrôle

4.3.1. Procédure d'initialisation

La procédure d'initialisation est constituée des sous fonctions suivantes qui doivent être exécutées consécutivement après que l'on ait complètement terminé la mise en marche. La fonction principale du travail d'initialisation doit déterminer quels sont les canaux d'établissement de contacts à contrôler. La figure 4.3.1 illustre la signification des différentes expressions mentionnées.

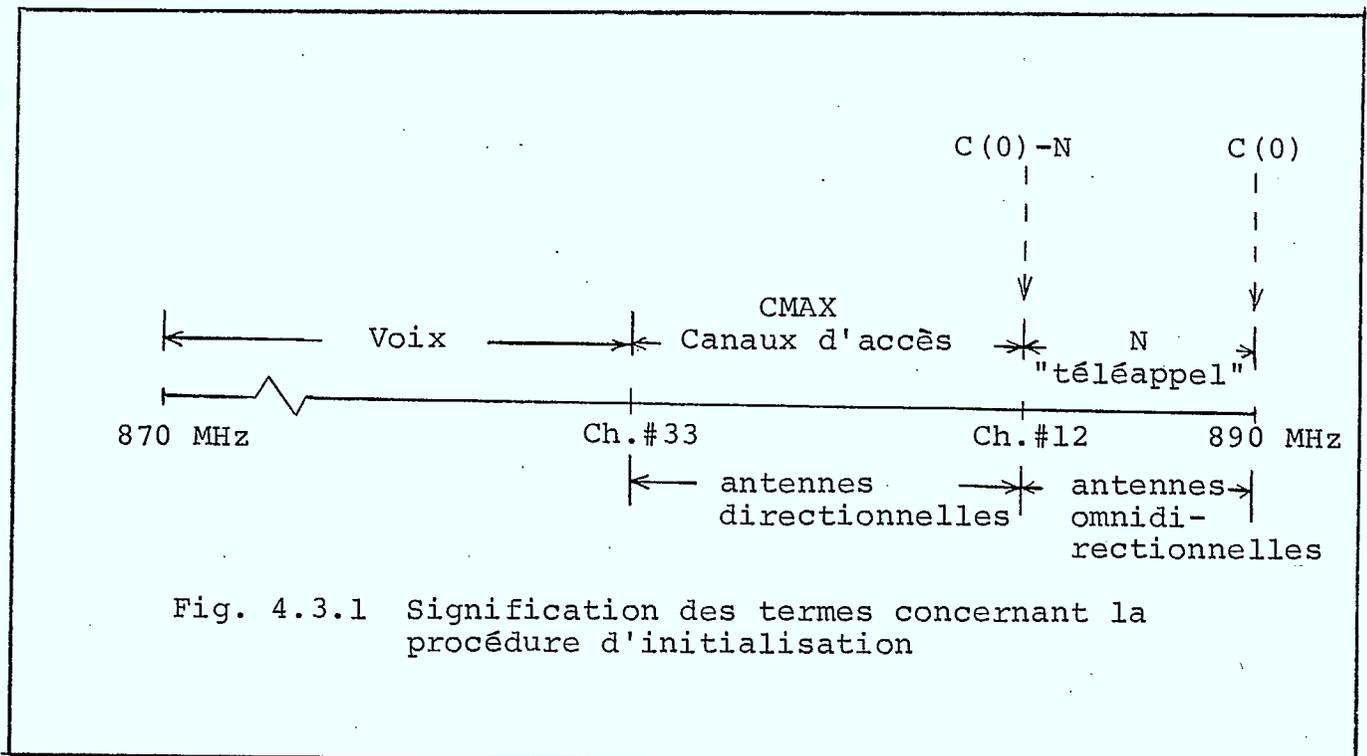


Fig. 4.3.1 Signification des termes concernant la procédure d'initialisation

1. Canaux d'établissement de contacts pour le balayage.

Tous les canaux d'établissement de contacts qui sont utilisés à cette fin forment un bloc continu. L'unité mobile commence son balayage en ajustant son récepteur sur le premier canal $C(0)$, mesure l'intensité du signal sur chacune de ses deux antennes "diversifiées" et s'ajuste sur le prochain canal $C(0)-1$, et répète la procédure. Lorsqu'elle a été exécutée pour le plus "haut" des 21 canaux, l'unité mobile doit alors juger lequel parmi tous les canaux testés donne le plus de signal et s'y régler dessus.

2. Synchronisation des "bits" et des "mots".

3. Déterminer les paramètres du système: DCC, N, CMAX, CPA, ACS et C(acc). Ce dernier, C(acc), représente le canal d'établissement de contact qu'il faut tester en premier lorsque l'on essaie d'avoir accès au système. La valeur est déterminée de la façon suivante:
Si le bit CPA = 1, alors le canal d'établissement de contact initial est $C(0)$

Si le bit CPA = 0, alors sa valeur est $C(0)-N$

4. Prendre la décision d'opération "maison/visiteur".*

L'ACS reçu est comparé avec l'ACS maison mémorisé dans le module d'assignement de numéros (NAM) de l'unité mobile.

* Quand un utilisateur est dans les limites de ses MSA assignés, il est appelé "mobile-maison". En dehors de cette région, il est appelé "mobile-visiteur".

5. Rebalayer N canaux d'établissement de contacts.

Les unités "mobile-maison" doivent commencer la procédure de balayage avec le canal C(h), dont la valeur est dans le NAM. Les unités "mobile-visiteur" (roaming mobile units) doivent commencer la procédure de balayage avec le canal C(0). En général C(h) et C(0) sont les mêmes. Cependant, pour les MSA requérant une numérotation démesurée, un parmi les plusieurs ensembles de numérotation de canaux sera assigné aux stations mobiles et dans ce cas C(h) et C(0) peuvent ne pas être identiques.

6. Décision Finale "maison-extérieur"

La décision maison/extérieur doit être vérifiée d'après les règles suivantes:

La décision maison/extérieur est juste si L'ACS reçu est le même que l'ACS basé sur la décision maison/extérieur précédente.

Si après avoir reçu deux ACS et que, ni l'un ni l'autre n'est le même que l'ACS basé sur la décision maison/extérieur précédente, la décision maison/extérieur est fausse (et toute l'initialisation doit être recommencée).

Le travail d'initialisation est immédiatement suivi par un état d'attente pendant lequel l'utilisateur se contente de surveiller le canal d'établissement de contact qu'il a choisi et de contrôler l'arrivée possible des événements suivant chaque 46.3 msec. (cet interval de temps correspond à la périodicité des messages envoyés dans les données de téléappel).

1. Concordance de téléappel
2. Demande de l'origine par l'utilisateur
3. Ordres
4. Mise à jour de l'information d'entête (CMAX, N, etc)
5. Commande de rebalayer
6. Fin du temps à disposition pour le rebalayage
7. Perte du mot de synchronisation

Si le temps à disposition pour le rebalayage expire, la fonction d'inoccupation (idle task) rentre en service et l'exécution de l'initialisation doit commencer. Cela garanti que l'unité mobile est toujours entrain de surveiller le meilleur canal d'établissement de contact possible (du point de vue intensité du signal).

4.3.2. Séquence d'origine d'appel

Maintenant, supposons que l'utilisateur mobile désire faire un appel. Premièrement, il introduit les chiffres dans la mémoire registre et presse le bouton TRANSMISSION (Fig. 4.3.2(a)). La logique de l'unité mobile reconnaît ceci comme étant une demande de service et initialise la valeur du compteur de temps d'accès à 6 secs. Cela limite le temps à disposition pour réussir l'accomplissement de la séquence d'origine d'appel et sert ainsi à éviter de continuelles collisions. L'état du compteur est examiné périodiquement et décide s'il est possible de continuer par les

étapes suivantes ou non.

1. Balayer tous les canaux d'établissement de contacts (Fig. 4.3.2 (b)). L'unité mobile doit balayer CMAX canaux d'établissement de contacts en commençant par C(acc) et se "crocher" sur celui qui a le signal le plus fort.
2. Acquérir la synchronisation pour les bits et les mots et décoder le code des couleurs numériques. (Fig.4.3.2(c)).
3. S'approprier le canal d'établissement de contact inverse (mobile-à-base). Avant d'essayer de s'approprier ce canal, l'unité mobile doit déterminer si ledit canal est occupé ou libre en effectuant un vote majoritaire (2 sur 3) sur les 3 derniers bits d'état occupé/libre reçu (chaque 11ème bit du message de téléappel est prévu à cet effet. Tant que la base reconnaît qu'un message d'appropriation est pour elle, elle met le bit représentant l'état "occupé/libre" à l'état "occupé"). Si le canal se trouve libre, la transmission des données d'appropriations peut commencer. Par contre, si le canal est occupé, l'unité mobile doit attendre un temps aléatoire et ensuite réexaminer l'état "occupé/libre". Chaque fois que l'unité mobile doit attendre, un différent temps aléatoire, réparti uniformément entre 0 et 200 msec. est utilisé.

Si l'état "occupé/libre" devient "occupé" avant que 48 bits soient envoyés on ne devient pas "occupé" avant que le 96ème bit ne soit envoyé, l'unité mobile doit assumer que la base n'a pas reçu ou reconnu sa demande de service. Dans ce cas, la tentative d'appropriation présentement en fonction est stoppée; un nouveau temps d'attente est calculé et mis en service. L'état occupé/libre ne sera examiné qu'après que le délai ne se soit écoulé complètement.

D'autre part, si pendant l'interval délimité par le 48ème et 96ème bit l'état "occupé/libre" devient "occupé", alors l'unité mobile continue de transmettre la demande d'information d'origine. Les figures 4.3.3 et 4.3.4 montrent le format et les différents éléments du message d'origine.

4. Désignation initiale du canal de voix (Fig. 4.3.2(d)).

Le MTSO choisit un canal de voix libre (et une connection terrestre reliant le MTSO à la base) et informe la base de sa sélection.

A son tour, la base en question relaye l'assignement du canal sur le canal d'établissement de contact "base-à-mobile" et commence à transmettre une tonalité de supervision (SAT) sur le canal de voix sélectionné. Il y a trois SAT, à 5970, 6000 et 6030 Hz de la même façon qu'il y a trois DCC et qu'il y a une correspondance un-à-un entre les deux. Les

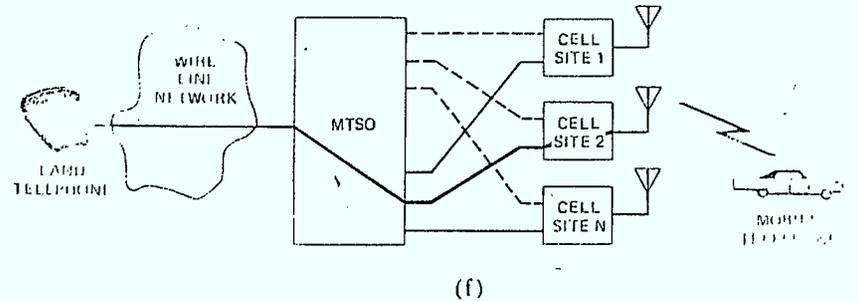
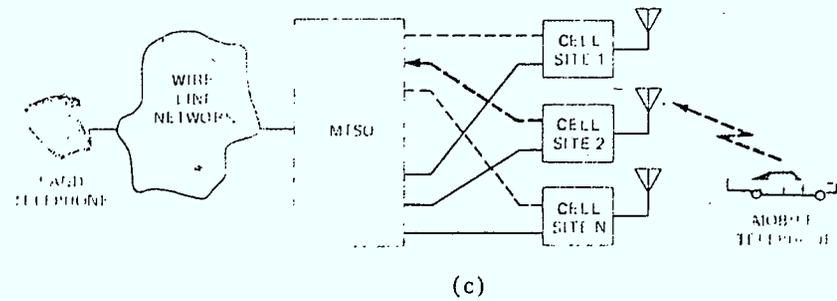
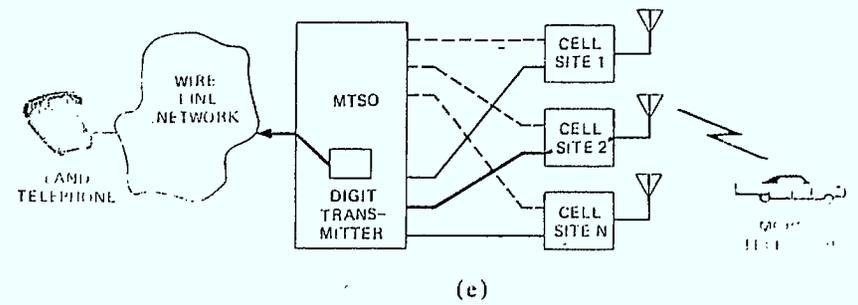
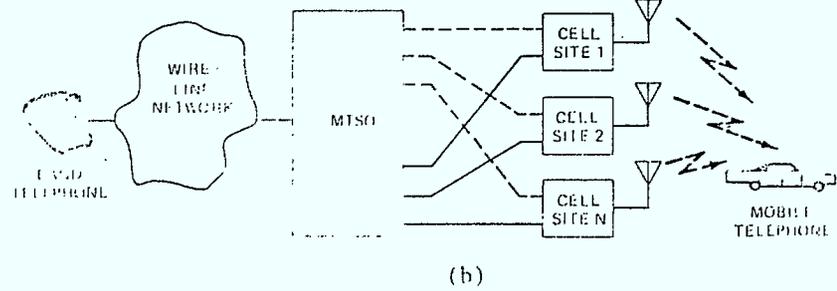
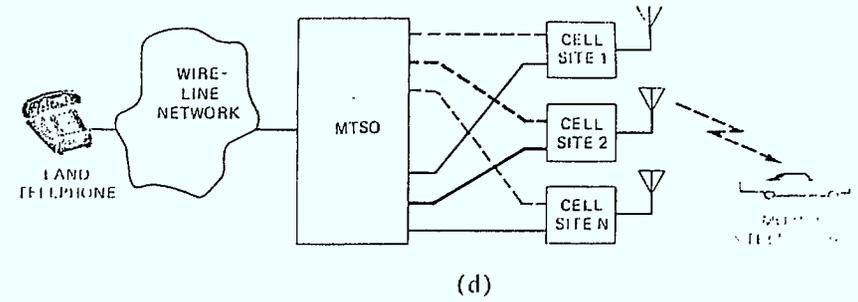
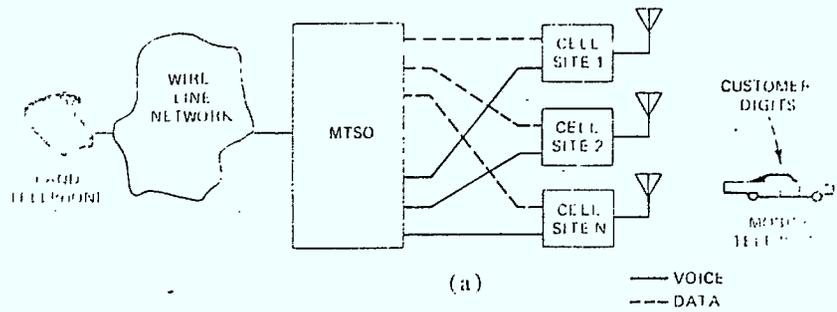
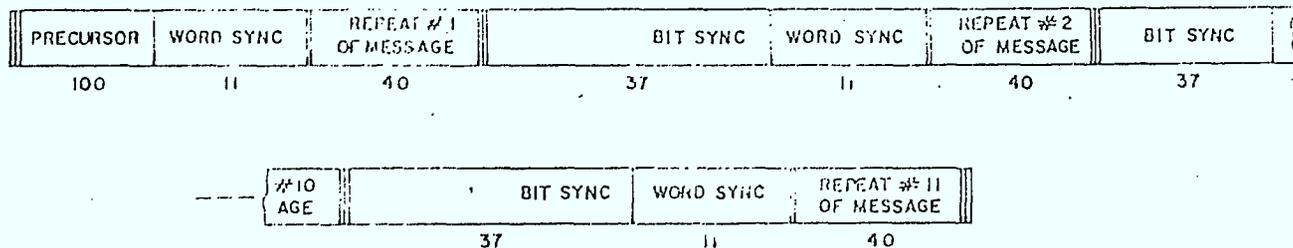


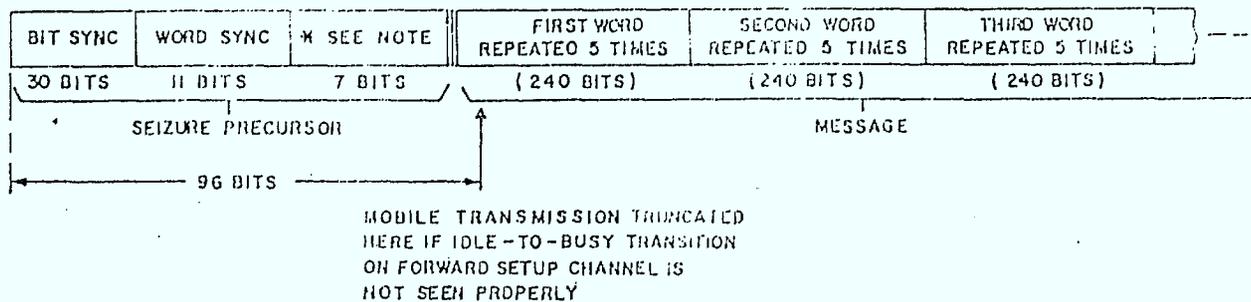
Fig. 4.3.2. Séquence d'appel initié par l'utilisateur mobile



BIT SYNC IS 1010 ---
 WORD SYNC IS 11100010010
 MESSAGE IS REPEATED 11 TIMES, WITH EACH REPEAT
 SEPARATED BY 37 BITS OF DOTTING SEQUENCE (BIT SYNC)
 AND 11 BITS OF WORD SYNC

Fig. 4.3.3(a) Message dans le canal de voix "terre-à mobile"

4.14



MESSAGES COMPOSED OF ONE OR MORE WORDS FOLLOW THE SEIZURE PRECURSOR
 * DIGITAL COLOR CODE—CODED AS PER SECTION 3.4.10.4

BIT SYNC = 1010...10
 WORD SYNC = 1100010010

Fig. 4.3.3(b) Message dans le canal d'établissement de contact mobile-à-base

Message d'origine - Un message d'origine doit être envoyé à la base en utilisant de deux à cinq mots dépendant de l'état du bit NAM du status de l'unité mobile (maison/visiteur) des informations d'entête qu'il reçoit et du nombre de chiffres composés par l'utilisateur. Les mots suivants peuvent être transmis:

Mot 1

F	NAWC	T	S	E	RSVD	S	MIN 1 ₂₃₋₀			P
-		-			-	C				
1		1	1	1	000	M				
						1				
1	3	1	1	1	3	2	24			12

Mot 2

F	NAWC	SCM2	R	ORDER	RSVD=1010...	MIN 2 ₃₃₋₂₄	P
-			S	=			
0			V	00000			
			D				
			=				
			10				
1	3	6	2	5	9	10	12

Mot 3

F	NAWC	SERIAL #						P
-								
0								
1	3	32						12

Mot 4

F	NAWC	1st DIGIT*	2nd DIGIT*	...	...	...	...	7th DIGIT*	8th DIGIT*	P
-										
0										
1	3	4	4	4	4	4	4	4	4	12

Mot 5

F	NAWC	9th DIGIT*	10th DIGIT*	...	...	...	...	15th DIGIT*	16th DIGIT*	P
-										
0	000									
1	3	4	4	4	4	4	4	4	4	12

*Or null character

Fig. 4.3.4 Composante du message d'origine d'appel

L'INTERPRETATION DES ELEMENTS DE DONNEES

F	Indicateur de premier mot. Mis à 1 dans le premier mot, mis à 0 pour les suivants
NAWS	Nombre de mots additionnels à venir. Mis à un de moins que le nombre total de mots dans le mot 1; réduit de 1 pour chaque mot suivant
T	Mis à un pour identifier un message comme une "origine" plutôt qu'un "téléappel" ou un ordre de réponse.
S	Lorsqu'il est à 1, le numéro de série (mot 3) sera transmis, s'il est à 0, le numéro de série ne sera pas transmis
E	Lorsqu'il est mis à 1, une information d'identification plus complète (mot 2) sera transmise, s'il est à 0, cette identification supplémentaire ne sera pas transmise
SCM1	Marquage de classe auxillaire
SCM2	Marquage de classe auxillaire
ORDER	Identifie le mot comme une origine lorsqu'il est mis à 00000
MIN1	Numéro d'identification mobile
MIN2	Numéro d'identification mobile
SERIAL #	Identifie le numéro de série de fabrication de l'unité mobile
DIGIT	Chiffre composé. Le plus petit bit significatif à droite
RSVD	réservé pour utilisation future. Pour l'instant, tous les bits doivent être comme indiqué.
P	Bits de parité

Fig. 4.3.4 (suite)

SAT sont utilisés pour des appels de supervisions et de confirmations des différentes actions sur les canaux de voix; et les DCC ont la même fonction mais sur les canaux de données. La station mobile se règle sur le canal de voix désigné et le SAT qu'il y trouve est retransmis. Au moment où la base reconnaît le SAT retransmis, elle donne la condition "occupé" (off-hook) sur la ligne terrestre. Le MTSO interprète ceci comme ayant réussi le travail de désignation du canal.

5. Transmission numérique (Fig. 4.3.2(c)).

Le MTSO termine l'appel en utilisant le réseau terrestre en utilisant les transmissions numériques classiques.

6. Conversation (Fig. 4.3.2(f)).

Le MTSO établit une connection téléphonique complète.

4.4. Description du système simulé

Pour la simulation, nous considérons un système de communication mobile de 40 cellules et un schéma d'attribution de canaux fixe, où on a des relations bien définies entre les canaux et les cellules dans lesquelles ils sont employés. Les canaux peuvent être réutilisés à intervalle spécifié par le facteur de réutilisation de mêmes canaux D/R. "D" représente la distance physique entre bases utilisant de même canaux et "R" le rayon de la cellule (mesuré du centre à l'un des sommets). Pour des cellules de formes hexagonales, la relation entre D/R et le nombre d'ensembles de canaux distincts "N" requis est:

$$D/R = \sqrt{3N}$$

Dans le modèle simulé, N est égal à 3 et par conséquent le rapport D/R est aussi égal à 3. Ces considérations sont illustrées par la Figure 4.4.2.

Les suppositions générales suivantes sont faites:

1. Le temps d'entre-arrivée des requêtes d'appels de chaque cellule est distribuée exponentiellement avec une valeur moyenne de $1/\lambda$ secs (en d'autre terme, le rythme des arrivées est de λ appels/sec.).
2. Toutes les cellules sont uniformes par rapport à la grandeur, forme et distribution spatiale de trafic.

Les suppositions suivantes se rapportent aux canaux de signalisation:

3. Le temps pendant lequel on peut garder le canal de signalisation a une valeur nominale de 100 msec. On arrive à cette valeur si l'on assume un rythme de transmission de 10 kb/sec et une longueur de 1000 bits en moyenne pour chaque requête d'appel.
4. La base reçoit toujours la requête d'appel lorsqu'il y en a une de transmise. En réalité, la probabilité qu'un message ne sera pas détecté lorsqu'il est transmis est d'environ 10^{-4} pour un S/I = 15 dB [5].

Les suppositions suivantes se rapportent spécialement à la portion des canaux de voix assignés du modèle de simulation:

5. Le temps de maintien de l'appel est distribué exponentiellement avec une valeur moyenne de 120 secs.
6. Les unités mobiles sont identifiables et peuvent se régler sur n'importe quel canal sélectionné par le MTSO.
7. Les véhicules ne traversent pas les limites des cellules pendant qu'un appel est effectué. Cela signifie que l'appel utilise un canal déterminé pour la totalité du temps de maintien de l'appel (déterminé par la distribution exponentielle décrite précédemment) et n'est pas forcé de terminer son appel prématurément parce qu'il n'y a pas de canaux disponibles dans la nouvelle cellule.

4.5. Nomenclature

Les abréviations suivantes ont été adoptées et seront beaucoup utilisées par la suite:

$a:f$ = rapport de division de canaux

a = nombre de canaux d'accès

f = nombre de canaux fixes (voix)

\bar{d}_1 = délai moyen rencontré par un appel arrivant depuis le moment où l'appel est créé jusqu'au moment où l'appel a obtenu un canal d'accès (ou jusqu'au moment où l'appel est enregistré comme "failli" parce qu'un canal d'accès libre n'a pas pu être trouvé).

\bar{d}_2 = délai moyen rencontré seulement par les appels qui n'ont pas pu obtenir de canal d'appel à la première tentative et qui sont alors forcés d'attendre et de réessayer (\bar{d}_1 et \bar{d}_2 ne sont utilisables que lorsque R n'est pas égal à zéro).

D = délai aléatoire généré avant d'essayer l'appropriation d'un canal d'accès (ex: $D = (a,b)$ signifie que les délais sont distribués uniformément entre les limites "a" et "b").

H = temps d'occupation du canal d'accès (msec).

P_{ba} = probabilité de blocage des canaux d'accès

= $\frac{\text{nombre d'appels qui n'arrivent pas à obtenir un canal d'accès}}{\text{nombre d'appels qui arrivent dans le système}}$

P_{bal} = probabilité de ne pas obtenir un canal d'accès à la première tentative; ou identiquement, la probabilité qu'au moins une nouvelle tentative sera nécessaire.

$$= \frac{\text{nombre d'appels qui n'arrivent pas à obtenir un canal d'accès à la première tentative}}{\text{nombre d'appels qui arrivent dans le système}}$$

P_{bc} = probabilité de blocage combinée

$$= \frac{\text{totalité des appels bloqués parce qu'ils ne trouvent pas un canal d'accès ou un canal de voix}}{\text{nombre d'appels qui arrivent dans le système}}$$

P_{bv} = probabilité de blocage des canaux de voix

$$= \frac{\text{nombre d'appels qui n'arrivent pas à trouver un canal de voix}}{\text{totalité des appels qui arrivent ou n'arrivent pas à trouver un canal de voix}}$$

Dans ce cas, le dénominateur représente le nombre total d'appels qui arrivent dans la partie du programme se rapportant à la désignation de canaux de voix après avoir passé par la logique de contrôle des canaux d'accès.

R = nombre maximum de nouvelles tentatives permises pour obtenir un canal d'accès.

T = "charge" de trafic exprimé en "Erlangs"
(sans dimension et égal au produit du rythme d'arrivée, λ , et du temps moyen d'occupation de canaux de voix, $1/\mu = 120 \text{ sec}$).

4.6. Modèle de simulation

Le modèle des canaux d'accès est montré sur la figure 4.4.3. Dans le programme de simulation, les canaux d'accès appartenant à une cellule particulière reçoivent des numéros ordonnés de façon séquentielle. De ce fait, la première fois que le canal d'accès "X" est rencontré dans le diagramme de simulation (flowchart), il représente le plus grand de ces numéros. Par la suite, "X" est décrémenté, on réinitialise selon les besoins. Il y est également indiqué entre parenthèses les valeurs nominales de certaines valeurs. Par exemple, le temps de conservation de canaux d'accès est précisé comme étant de 100 msec.

Maintenant, considérons le fonctionnement de ce modèle. Après avoir déterminé le canal d'accès "X" comme étant libre, une demande d'appel arrivante peut l'utiliser pendant un temps prescrit avant d'accéder à la partie d'assignement du canal de voix du programme. Cela consiste en un processus d'assignement de canaux fixe comme il l'est souligné dans la section 4.4.4 et d'un service Erlang B donné. Cela veut dire que les appels sont servis immédiatement si un canal de voix est libre dans la cellule en considération, mais par contre qu'ils sont bloqués et obligés de quitter le système si tous les canaux de voix sont occupés. Implicitement, il y a deux niveaux de logiques complètement séparés dans le programme

de simulation. Le niveau le plus haut, qui apparaît en premier, se rapporte aux canaux d'accès. Le niveau suivant, qui n'est atteint que par les demandes d'appels qui ont pu obtenir un canal d'accès avec succès, se rapporte aux problèmes d'assignement de canaux de voix. En monde réel, cela correspond à la situation où les tests nécessaires pour trouver un canal d'accès libre sont effectués par l'unité mobile pendant que le choix du canal de voix assigné à l'appel est fait en MTSO.

Revenons maintenant au diagramme de simulation de la figure 4.4.3 et considérons le cas où la demande d'appel trouve le canal d'accès "X" occupé. Les états occupé/libre des canaux d'accès "X-1", "X-2", etc... sont alors testés successivement jusqu'à ce qu'un canal libre soit trouvé ou qu'il n'y ait plus de canaux à tester dans la cellule en question. Dans le premier des deux cas, la demande d'appel sort de la boucle, occupe le canal d'accès sélectionné pendant le temps prescrit et continue jusqu'à la section du programme contrôlant l'assignement des canaux de voix. Dans le second cas, la demande d'appel sort aussi de la boucle mais cette fois-ci par le bas. Si le nombre maximum de tentative R est égal à zéro, alors l'appel est perdu; ce qui veut dire qu'il quitte le système et n'y retourne pas. D'autre part, si R est plus grand que zéro, alors la demande d'appel va de nouveau essayer d'obtenir un canal d'accès mais seulement après un délai aléatoire.

Ce délai aléatoire élimine le synchronisme qu'il pourrait y avoir entre des tentatives d'appels qui arrivent dans le système en même temps. D'ailleurs, si la nouvelle tentative pour obtenir un canal d'accès était faite immédiatement, on trouverait simplement le canal d'accès encore occupé. Après le délai requis, l'état du compteur de temps d'accès est évalué pour cette demande d'appel particulière. Si le temps mesuré depuis le moment où la demande d'appel est initiée dépasse 6 secondes, alors la demande d'appel est retirée du système et n'y retourne pas. Cette limitation de temps intervenant même si la séquence d'établissement de contact n'est pas réussie agit comme un mécanisme supplémentaire de limitation de collisions continues. Si le temps d'accès n'est pas expiré, "R" est décrémenté de un et la valeur de "X" est réinitialisée. Alors, on retourne au sommet du diagramme de simulation et la succession des événements cités précédemment recommence.

4.7. Limitation du modèle des canaux de signalisation

Il n'est pas recommandé d'essayer d'incorporer un compteur de temps d'accès à ce modèle. La raison en est expliquée dans l'exemple suivant qui utilise des valeurs représentatives pour les différents paramètres. Considérons le cas où $D = (0,200)\text{msec}$, $R = 10$ et la limite de temps des tentatives d'accès au système est de 6 sec. En examinant le diagramme de simulation de la figure 4.4.3, on peut voir que même dans le cas

extrême où 10 tentatives sont nécessaires et que le délai maximum de 200 ms est utilisé avant chacune des tentatives, le temps disponible pour l'accès ne va pas expirer. En d'autres termes, le paramètre R (nombre maximum de tentatives) va, dans tous les cas, être l'élément de limitation dans les tentatives d'initialisation d'appel. Ce problème n'est pas dû à une mauvaise conception de la logique du modèle, mais plutôt au fait que le modèle représente une abstraction de la réalité (et de ce fait une simplification). Dans un cas réaliste, les événements suivants ont ou peuvent avoir lieu [12].

1. Le compteur de temps d'accès fonctionne pendant que l'unité mobile balaye les canaux de "téléappel" en cherchant lequel donne le plus fort signal (le canal d'accès associé avec ce canal de "téléappel" sera alors utilisé pendant l'appel d'initialisation). Cette recherche nécessite un maximum de 750 msec. Une fois que la sélection est faite, il faut encore compter que 400 msec sont nécessaires pour la synchronisation des bits. Le compteur de temps d'accès continue de tourner.

2. Avant que l'unité mobile puisse transmettre son message d'appropriation, il y a un délai depuis le moment où l'émetteur est enclenché et le moment où sa puissance de sortie est à moins de 3 dB de sa valeur maximale. Pendant ce temps, le compteur de temps d'accès tourne.

3. La base peut ne pas recevoir ou reconnaître un message d'initialisation légitime (peut-être parce que l'unité mobile

entre dans une zone à mauvaise propagation des ondes). Alors, l'unité mobile doit attendre avant de ré-essayer d'obtenir un canal d'accès. Pendant ce temps, le compteur de temps d'accès tourne.

4. Quand la transmission des données d'appropriation est complétée, l'unité mobile devra attendre un maximum de 5 secs pour la désignation du canal, temps pendant lequel le compteur de temps d'accès tourne. Si l'information n'est pas reçue pendant le temps prescrit, l'unité mobile doit alors attendre pendant un temps de durée aléatoire avant de ré-essayer l'accès.

Considérons ces facteurs un à un. Premièrement, les points 1 et le 2 représentent des délais relatifs fixes. Il est évident que l'on ne gagnerait rien en incorporant ces délais prédéterminés directement dans le modèle puisque les résultats (en particulier \bar{d}_1 et \bar{d}_2) peuvent être facilement réajustés "après-coup" de façon à représenter la situation actuelle. Deuxièmement, en regard du point 3, il a été précédemment relevé que la probabilité que la base ne détecte pas un message d'appropriation lorsqu'il y en a un de transmis est d'environ 10^{-4} pour un $S/I = 15$ dB. Cela ne veut pas dire qu'en moyenne 1 appel sur 10,000 ne pourra pas obtenir le service puisque si l'appel initial d'appropriation n'est pas jugé réussi, l'unité mobile va automatiquement attendre et ré-essayer d'obtenir l'accès au système. Ainsi il a été jugé que ce facteur n'avait pas un effet significatif sur le taux de réjection des canaux de signalisation.

Finalement, les actions spécifiées dans le point 4 arrivent après qu'un appel ait obtenu un canal d'accès et que le message d'appropriation soit transmis. Si l'on permet aux appels arrivant au MTSO de s'accumuler pendant une courte période de temps, il est évident que la probabilité de blocage des canaux de voix sera affectée alors que la probabilité de blocage des canaux de signalisation ne le sera pas du tout, ceci étant le point d'intérêt principal de notre recherche.

Du fait qu'aucun des facteurs énumérés ci-dessus n'ait été inclus dans le modèle, il n'a pas été possible d'utiliser une valeur réaliste (6 secs) comme valeur initiale pour le compteur de temps d'accès. Par conséquent, le mécanisme du compteur de temps d'accès a été complètement supprimé dans les essais effectués jusqu'à maintenant.

4.8. Résultats des simulations

Les principaux résultats de simulation sont montrés dans les figures 4.4.4 à 4.4.13. Les valeurs des paramètres qui ne changent pas pendant la durée des essais sont indiquées. En particulier, dans les cas où la charge de trafic et le rapport de division des canaux ont des valeurs fixes, elles sont respectivement de 60 Erlangs et le rapport $a:f = 1:10$ ou $2:10$. Il semblerait que 60 Erlangs soit une charge de trafic excessive pour 10 canaux de voix et c'est en fait le cas. 10 canaux devraient théoriquement saturer à 10 Erlangs. Cependant, il faut se rappeler que l'on a tout intérêt à accumuler des statistiques.

au sujet des canaux de signalisation; car on a ainsi pu se rendre compte que c'est à partir d'un trafic d'environ 60 Erlangs que la probabilité de blocage commence à devenir appréciable ($> 2\%$) dans le cas d'un canal d'accès par cellule. D'autre part, il apparaît que la probabilité de blocage de canaux de voix (P_{bv}) n'est pas affectée de façon significative par la logique des canaux de signalisation.

Ainsi, le choix de "f" a peu d'importance puisque P_{bv} peut être directement "prédit" avec la formule Erlang B pour n'importe quel choix de "F" et "T". Ce dernier fait permet ainsi la comparaison des résultats de simulation avec les valeurs théoriques et par là-même fourni un moyen de déterminer si le programme de simulation fonctionne correctement. Dans tous les cas, la charge de trafic T se rapporte aux canaux de voix. Mais si le temps moyen d'entre-arrivée des demandes d'appels ($1/\lambda$) est demandé, il peut être calculé comme suit:

$$1/\lambda \text{ (sec)} = 120/T \text{ (Erlang)} \quad (7.1)$$

Les figures 4.4.4 et 4.4.5 montrent la réponse de la probabilité de blocage des canaux d'accès (P_{ba}) lorsque la charge de trafic augmente. La relation est quasi linéaire malgré que le graphique indique progressivement de plus grandes déviations par rapport à la linéarité quand R augmente. Cette tendance générale continue même pour un trafic exceptionnel de 240 Erlangs (n'est indiqué sur aucune figure). Une situation similaire est représentée à la figure 4.6 avec l'exception que maintenant il y a 2 canaux d'accès

par cellule. Le cas de 3 canaux d'accès par cellule a aussi été examiné, mais l'on a trouvé que la valeur très basse de P_{ba} (0.01%) était sans conséquence pour une charge de trafic inférieur à 240 Erlangs. La figure 4.4.7 contient toutes les informations des figures 4.4.4. et 4.4.5 mais présentées de façon différentes. On peut conclure de ce graphique que lorsque la charge de trafic est statique, P_{ba} diminue très rapidement lorsque le nombre de tentatives permises est augmenté. La formule empirique suivante est en général utilisable:

$$P_{ba} (\%) = \frac{T/13}{(R+1)^2}$$

(Les valeurs nominales de H et D, c'est-à-dire 100 msec et (0,200) msec respectivement, sont utilisées; et il y a un canal de signalisation par cellule).

La logique des canaux d'accès a pour effet de légèrement déplacer vers le bas le blocage qui en résulte et qui apparaît sur les canaux de voix comme le montre la figure 4.4.8. Cependant, les effets sont minimum et ne peuvent être remarqués que pour de petites valeurs de R et de grandes valeurs de H. La raison en est la suivante: lorsque R est petit et H grand, d'assez importants blocages ont lieu sur les canaux d'accès; de ce fait, moins d'appels que normalement entrent dans le segment du programme qui s'occupe de l'assignement des canaux de voix. Le temps d'entre-arrivée est passablement rallongé

impliquant une charge de trafic plus faible et par conséquent une probabilité de blocage plus basse pour un nombre donné de canaux de voix. De la figure 4.4.8, on remarque également la relation linéaire entre P_{ba} et le temps d'occupation des canaux d'accès H .

La figure 4.4.9 indique que la probabilité globale de blocage, P_{bc} , et la probabilité de blocage des canaux de voix, P_{bv} , sont les mêmes (notez que différentes figures de bases sont utilisées dans les définitions de P_{bc} et P_{bv}). Le résultat est valable aussi bien pour une petite charge de trafic que pour une grande. Observons également que la somme de "a" et "f" reste constante. Cela illustre le fait que lorsque l'on utilise de plus en plus de canaux d'une cellule pour la fonction de signalisation dans le but de réduire P_{ba} , il y aura de moins en moins de canaux disponibles pour la transmission de la voix, causant une augmentation de P_{bv} . Finalement, ces courbes se situent presque exactement sur la courbe obtenue avec la formule "Erlang B" pour les cas de 8, 9 et 10 canaux; une indication supplémentaire que la logique des canaux de signalisation n'influence pas beaucoup P_{bv} .

La figure 4.4.10 montre la variation de P_{ba} en fonction du délai aléatoire D qui est produit avant chaque nouvelle tentative. Les incréments à valeurs égales de la valeur moyenne de la distribution uniforme du délai sont indiqués sur l'axe horizontal*.

* Si une variable aléatoire est distribuée uniformément entre les limites "a" et "b", alors la valeur moyenne de la distribution est $(a+b)/2$.

Il est possible d'imaginer que la diminution graduelle illustrée par la figure va continuer et que P_{ba} va approcher zéro asymptotiquement lorsque la valeur de D approche infini. Cette hypothèse est basée sur le raisonnement intuitif suivant:

Alors que la valeur moyenne de D augmente, il y aura moins d'appels ré-essayant d'obtenir un canal d'accès pendant une période de temps arbitraire, c'est-à-dire moins de concurrence pour une même ressource limitée. Par conséquent, la probabilité de blocage doit diminuer.

Les délais moyens \bar{d}_1 et \bar{d}_2 rencontrés par les demandes d'appels lorsqu'elles essayent d'obtenir un canal d'accès ont la forme présentée par les figures 4.4.11, 4.4.12 et 4.4.13. Pour les raisons expliquées aux points 1 et 2 de la section précédente, ces courbes devraient être décallées contre le haut d'approximativement 1 seconde.

La variable indépendante de la figure 4.4.11 est le temps d'occupation de canaux d'accès. Lorsque cette longueur de temps qu'une cellule particulière utilise est augmentée, les délais d'attente des autres appels augmentent de façon correspondante.

Pour la figure 4.4.12, la variable indépendante est la charge de trafic. Le délai \bar{d}_2 augmente tout d'abord abruptement et puis semble se stabiliser à environ 30 Erlangs. Cependant, ceci n'est que temporaire; car la courbe monte à nouveau lorsque T augmente au-delà de 120 Erlangs. Il est évident qu'il y aura une

limite maximale pour le délai. Par exemple, si $R = 3$ et $D = (0, 200)$ msec, le délai ne pourra jamais dépasser 600 msec et va probablement se stabiliser à environ 300 msec (un délai moyen de 100 msec est produit avant chaque nouvelle tentative). En fait, il a été observé que pour une quantité de trafic d'un ordre de grandeur de 1200 à 1400 Erlangs et pour le cas de $R = 3$, le délai \bar{d}_2 continue d'augmenter graduellement de 220 msec à 230 msec. A noter qu'un trafic de cet ordre de grandeur correspond à un temps d'entre-arrivée d'approximativement 100 msec, ce qui est égal à la valeur nominale du temps d'occupation de canaux d'accès. La figure 4.4.13 indique que la réponse de \bar{d}_1 à une augmentation de trafic est remarquablement différente de celle de \bar{d}_2 . Ici, il est évident que la relation est assez linéaire.

La figure 4.4.14 montre un résultat intéressant. Les variations de P_{ba} et P_{bal} ont été tracées en fonction de R pour un trafic constant de 30 Erlangs. Remarquez que P_{ba} diminue rapidement, alors que P_{bal} monte légèrement. La raison de ce comportement n'est pas difficile à découvrir. Lorsque R est augmenté, il y a de plus en plus d'appels ré-essayant d'obtenir l'accès. Ainsi, lorsqu'un tout nouvel appel arrive, il risque fort de trouver les canaux d'accès de sa cellule occupés et par conséquent il sera forcé de ré-essayer d'accéder au moins une nouvelle fois.

Un compromis est alors apparent: limiter le nombre de tentatives d'accès permises ($R \leq 2$) et la probabilité d'obtenir un canal d'accès à la première tentative sera améliorée. En plus, les délais moyens \bar{d}_1 et \bar{d}_2 seront plus petits qu'autrement. Cependant, la probabilité de blocage à long terme P_{ba} sera relativement haute (approximativement 1% ou plus, pour 1 canal de signalisation parallèle et pour un trafic plus grand que 10 Erlangs). Inversement, en permettant un plus grand nombre de tentatives, P_{ba} sera réduite alors que les performances du système exprimées avec P_{bal} , \bar{d}_1 et \bar{d}_2 seront dégradées.

4.9. Conclusions

Nous avons trouvé que si deux nouvelles tentatives automatiques ou plus sont permises, un seul canal de signalisation par cellule est requis afin de maintenir la probabilité de blocage de canaux d'accès inférieur à 2% pour une charge de trafic jusqu'à 120 Erlangs. Ce trafic correspond à un temps d'entre-arrivée moyen de 1 seconde et il est douteux que même dans les cellules les plus peuplées la demande de trafic dépasse cette valeur. D'autre part, la probabilité de blocage de canaux d'accès diminue d'un facteur d'au moins 100 si 2 canaux d'accès par cellule sont utilisées et que les autres facteurs (H,D,T, etc.) restent inchangés. Avec 3 canaux d'accès par cellule ou plus, le taux très bas de réjection des appels ($< 10^{-4}$) est sans conséquence pour toutes les charges de trafic jusqu'à 240 Erlangs.

Une formule empirique qui relie la probabilité de blocage de canaux d'accès P_{ba} , la charge de trafic T et le nombre de nouvelles tentatives permises R a été trouvée. Cette formule indique que P_{ba} est inversement proportionnel au carré de R . Nous avons conclu que la logique des canaux de signalisation n'influence pas beaucoup la probabilité de blocage des canaux de voix.

La nature des délais que l'on rencontre lorsque l'on cherche à obtenir un canal de signalisation libre a été examinée en fonction du trafic et du temps d'occupation de canaux d'accès.

Finalement, nous avons illustré le genre de compromis qu'il peut y avoir lorsque l'on ajuste la valeur de certains paramètres du système. Par exemple, nous avons démontré qu'une valeur de $R \leq 2$ augmente les chances d'obtenir un canal d'accès à la première tentative d'accès tout en minimisant les délais. D'autre part, pour des valeurs de $R > 2$, la probabilité de blocage de canaux d'accès est fortement réduite.

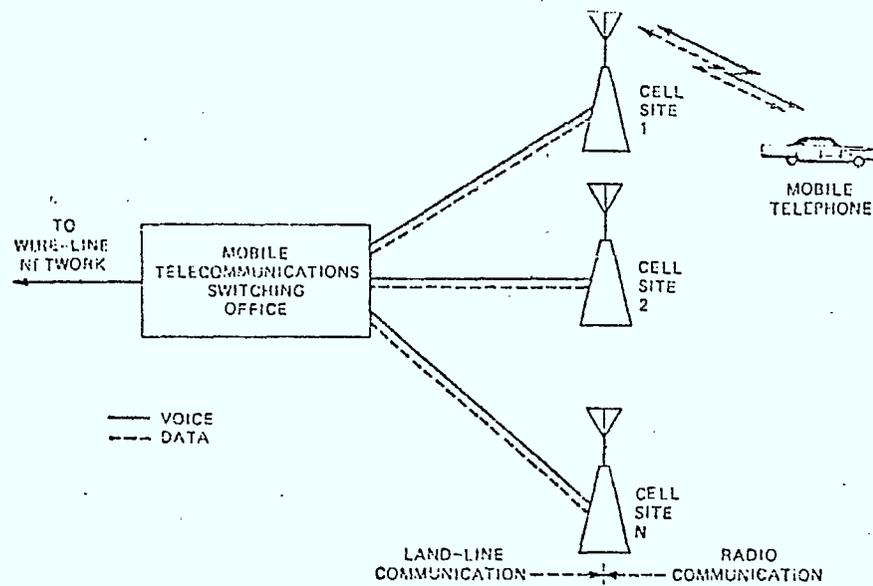


Fig. 4.4.1. Eléments de contrôle majeurs dans un système cellulaire [8]

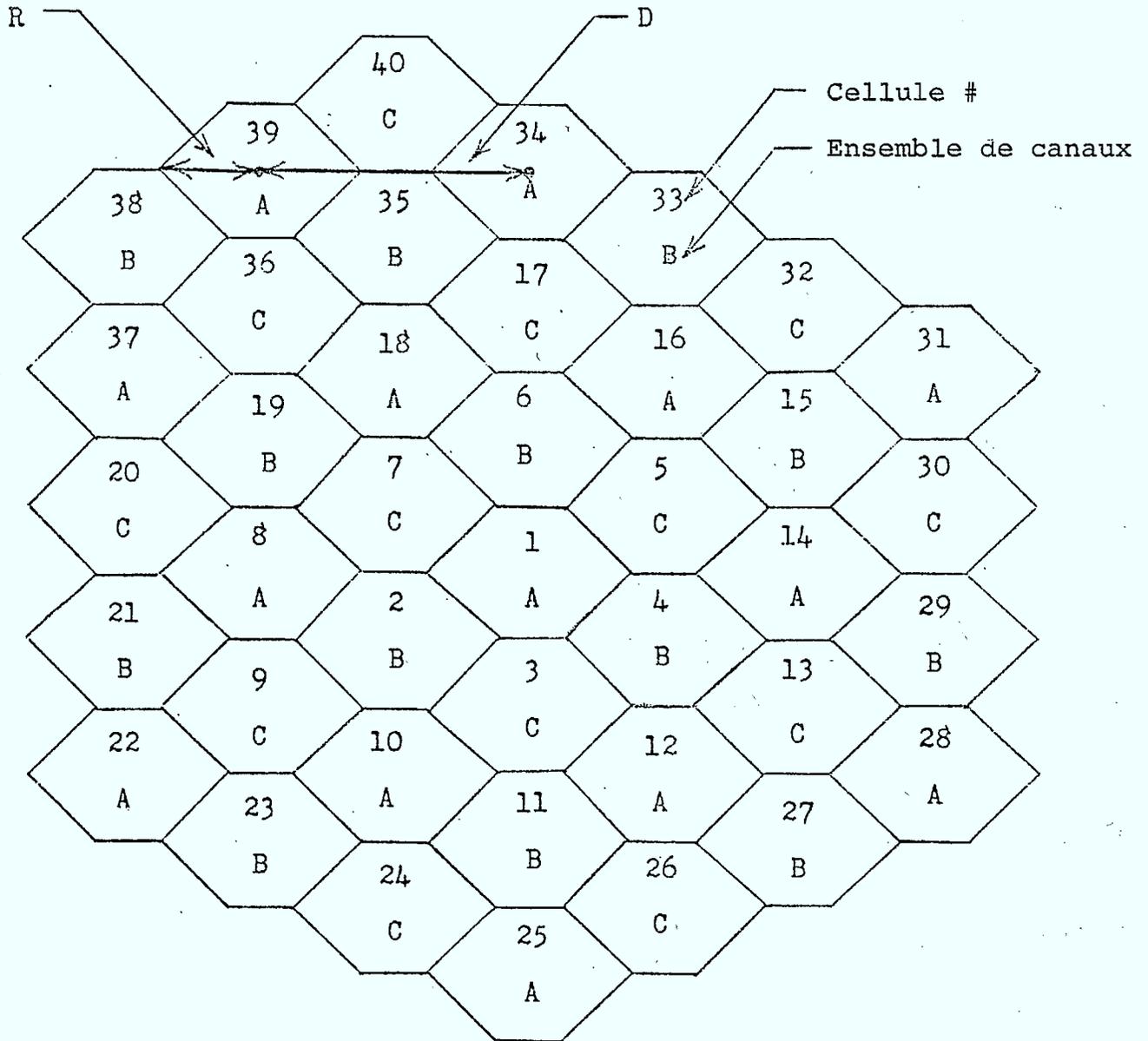


Fig. 4.4.2. Configuration cellulaire hexagonale utilisant 3 ensembles de canaux distincts

1. FIXER PARAMETRE DES REESSAIS, R
2. FIXER LE COMPTEUR DU TEMPS D'ACCES
3. FIXER VALEUR INITIALE DE "X"

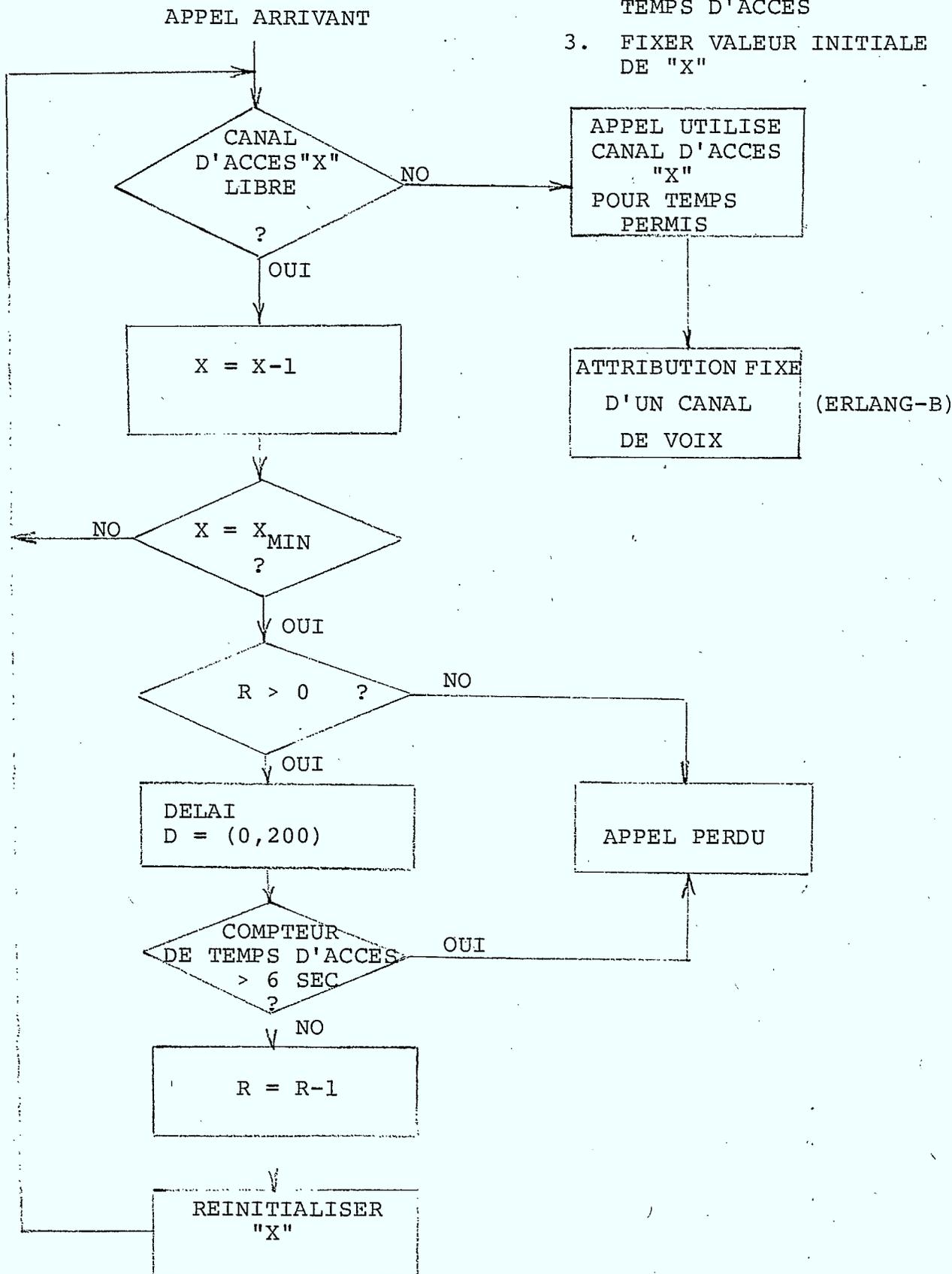


Fig. 4.4.3. Modèle des canaux d'accès

Fig. 4.4.4. Probabilité de blocage
des canaux d'accès
vs
trafic offert

$a : f = 1 : 10$

$D = (0,200)$ msec.

$H = 100$ msec.

P_{ba} (%)

8

7

6

5

4

3

2

1

0

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

100

110

120

Traffic, T (Erlang)

$R = 0$

$R = 1$

$R = 2$

Fig. 4.4.5. Probabilité de blocage
des canaux d'accès
vs
trafic offert

$a : f = 1 : 10$

$D = (0, 200)$ msec.

$H = 100$ msec.

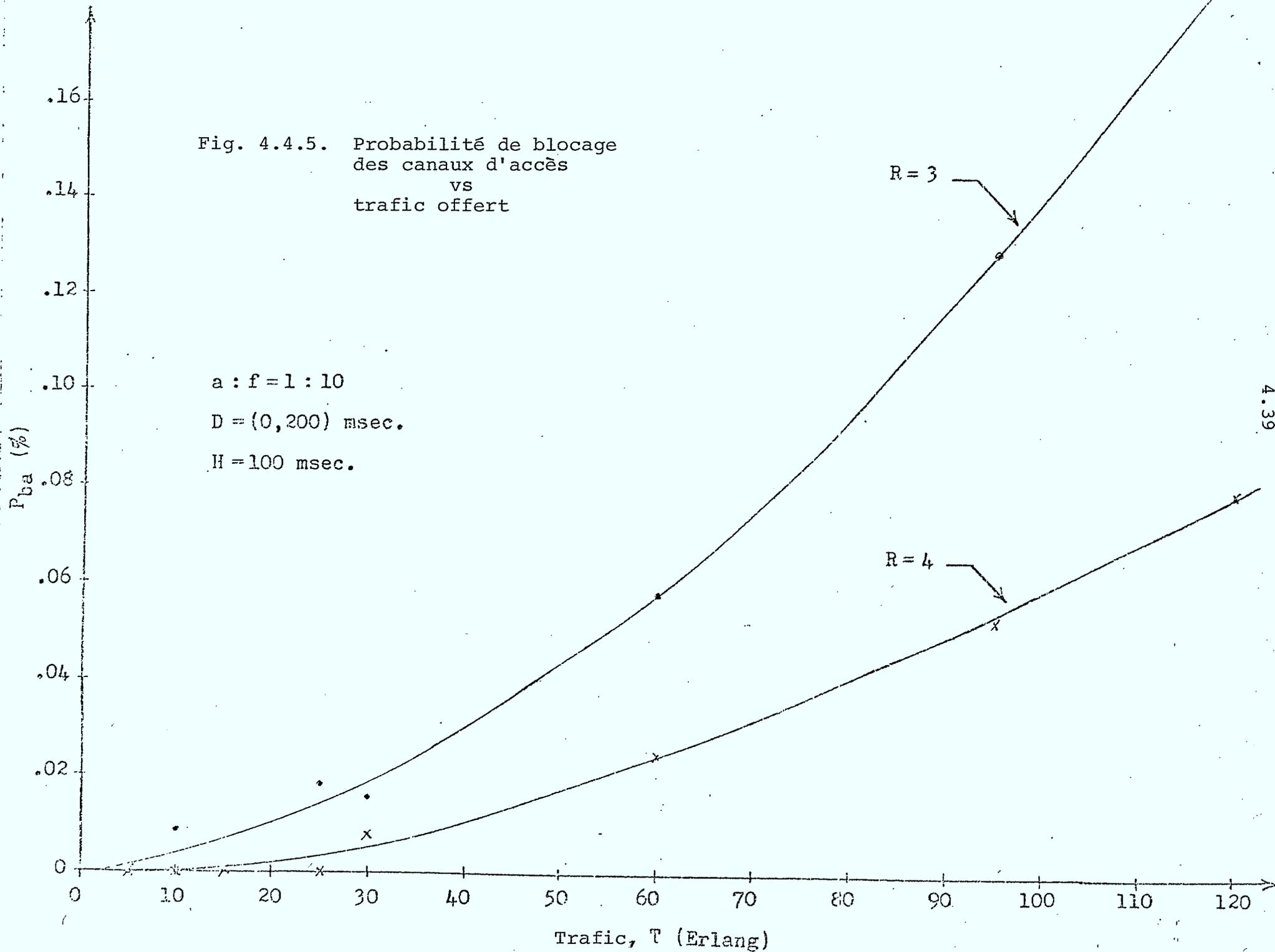


Fig. 4.4.6. Probabilité de blocage
des canaux d'accès
vs
trafic offert

$a : f = 2 : 10$
 $D = (0, 200)$ msec.
 $H = 100$ msec.

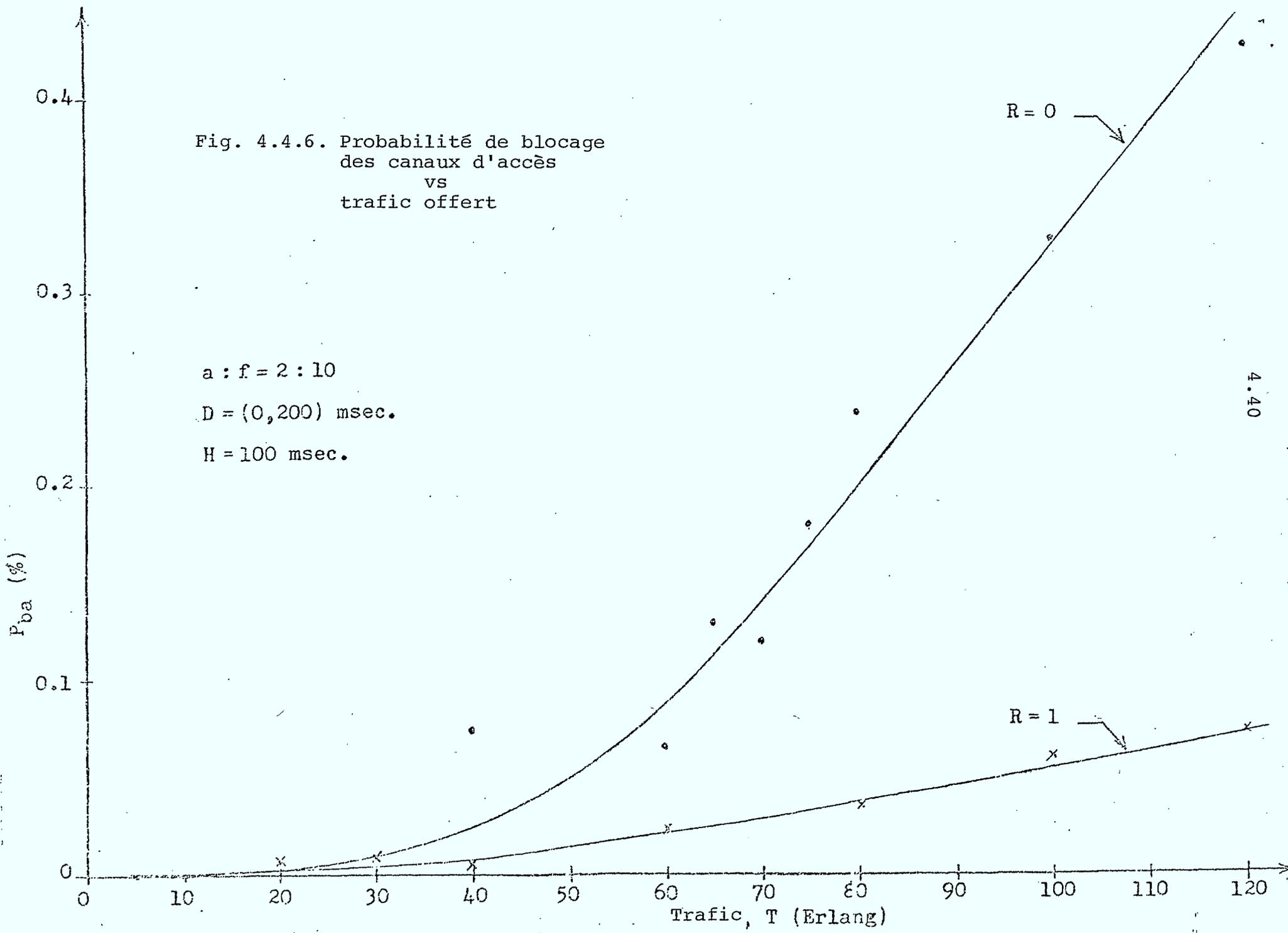
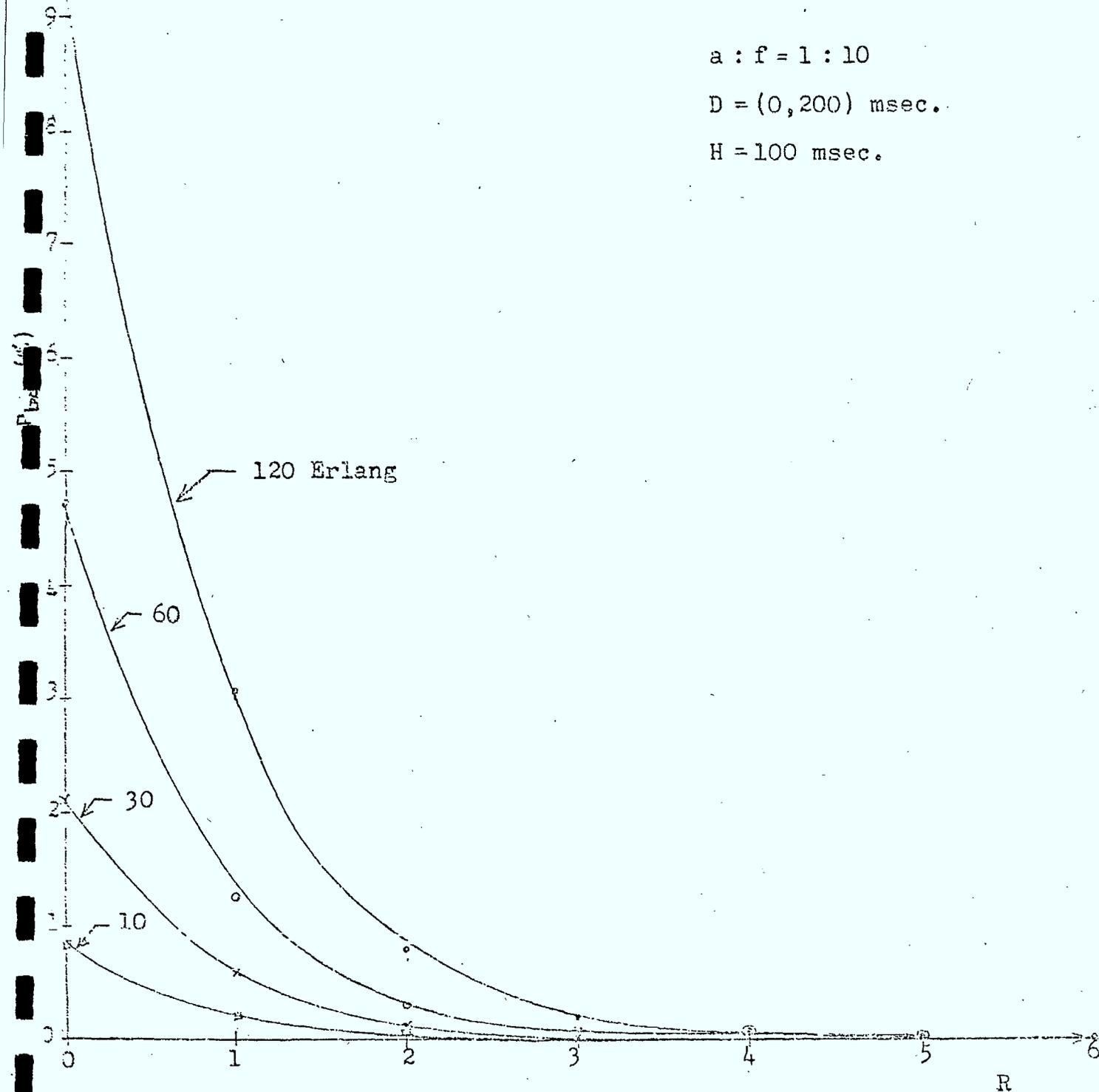


Fig. 4.4.7. Probabilité de blocage
des canaux d'accès
vs
No.max. des réessais R

$a : f = 1 : 10$

$D = (0, 200)$ msec.

$H = 100$ msec.



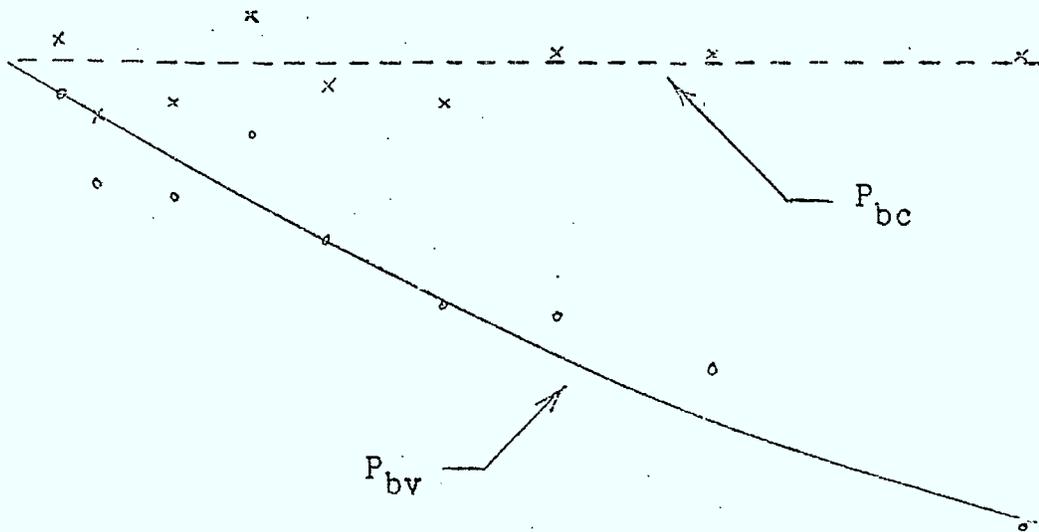


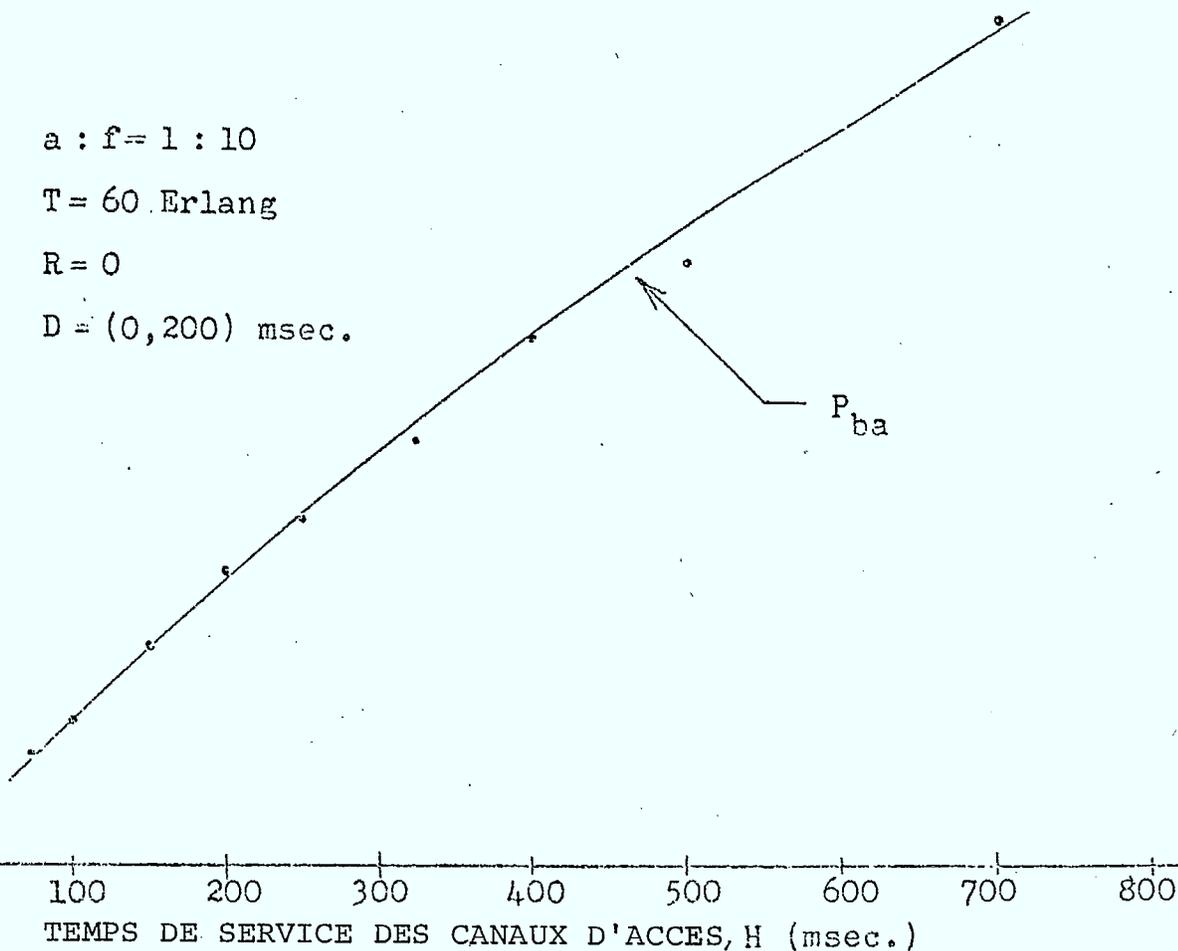
Fig. 4.4.8. Probabilités de blocage des canaux d'accès, P_{ba} , et de voix, P_{bv} , vs temps de service des canaux d'accès

$a : f = 1 : 10$

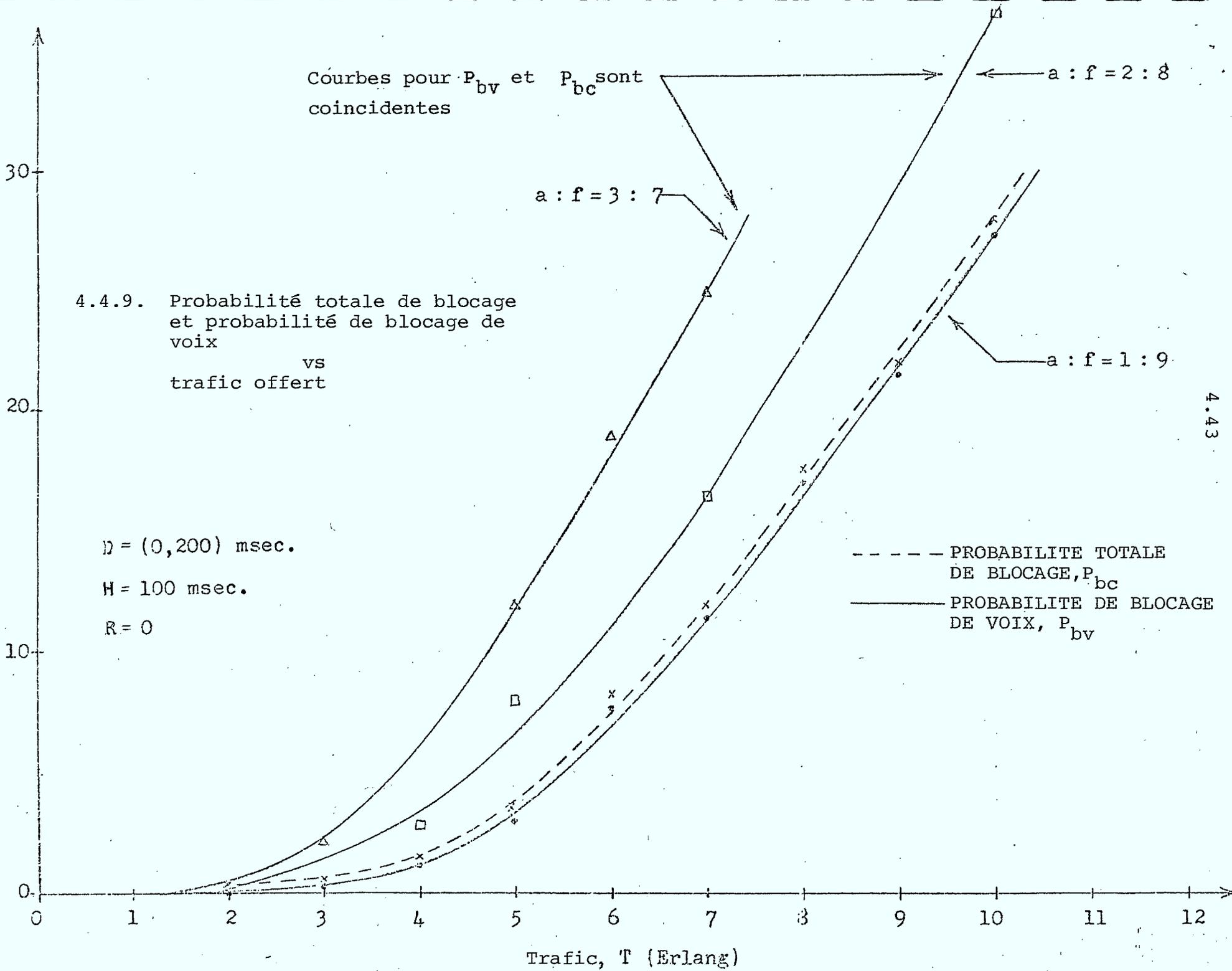
$T = 60$ Erlang

$R = 0$

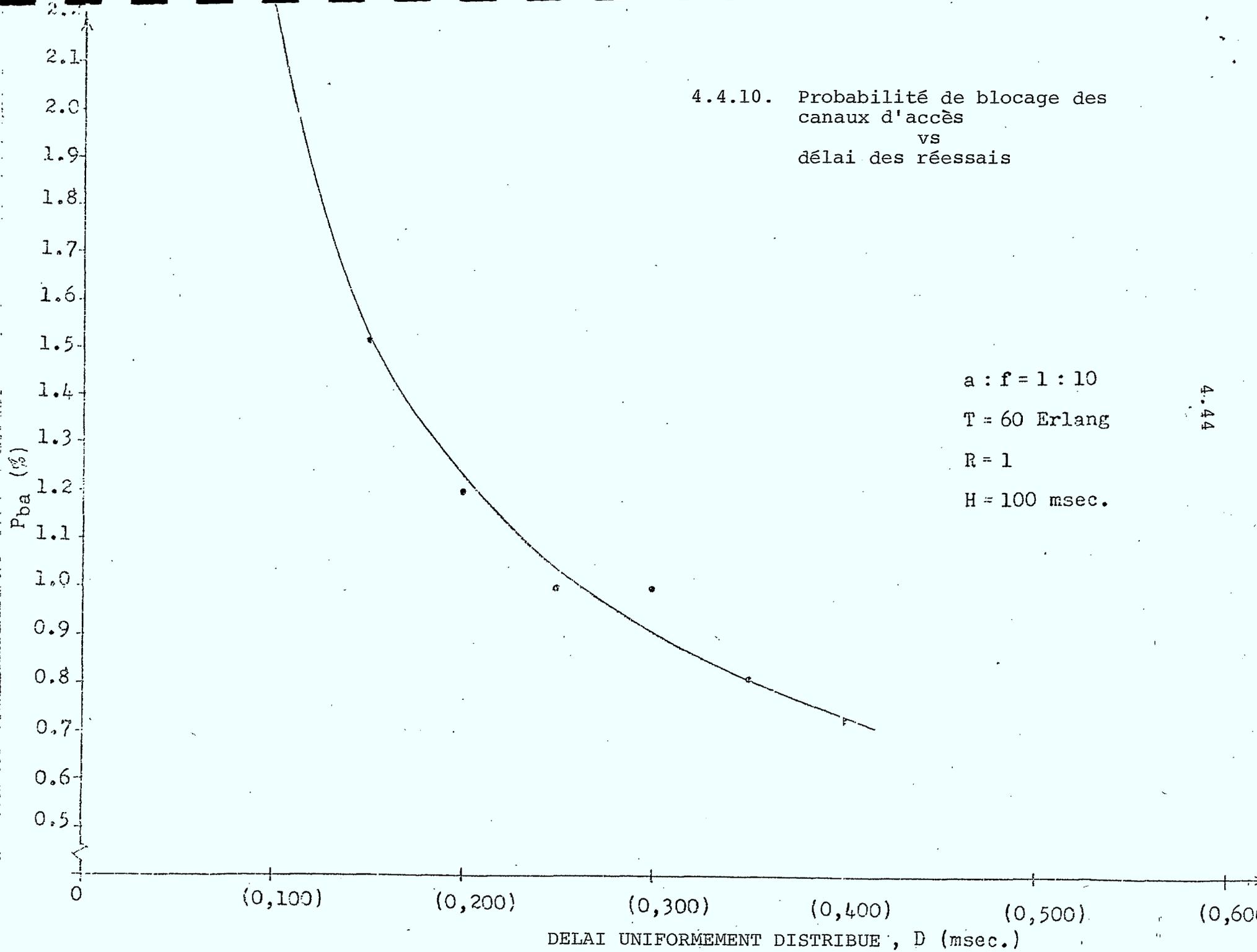
$D = (0, 200)$ msec.

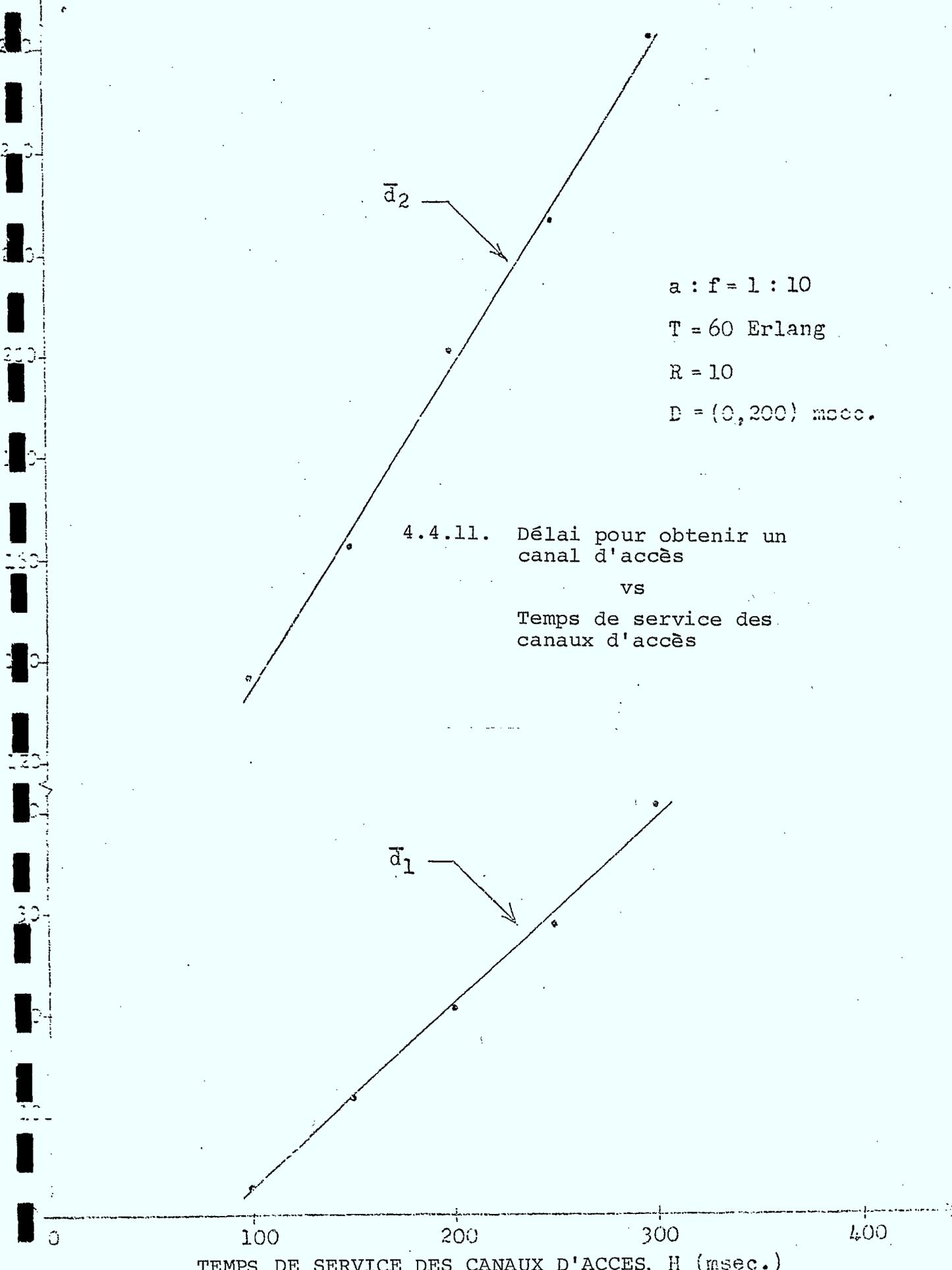


% PROBABILITE DE BLOCAGE



4.4.10. Probabilité de blocage des
canaux d'accès
vs
délai des réessais

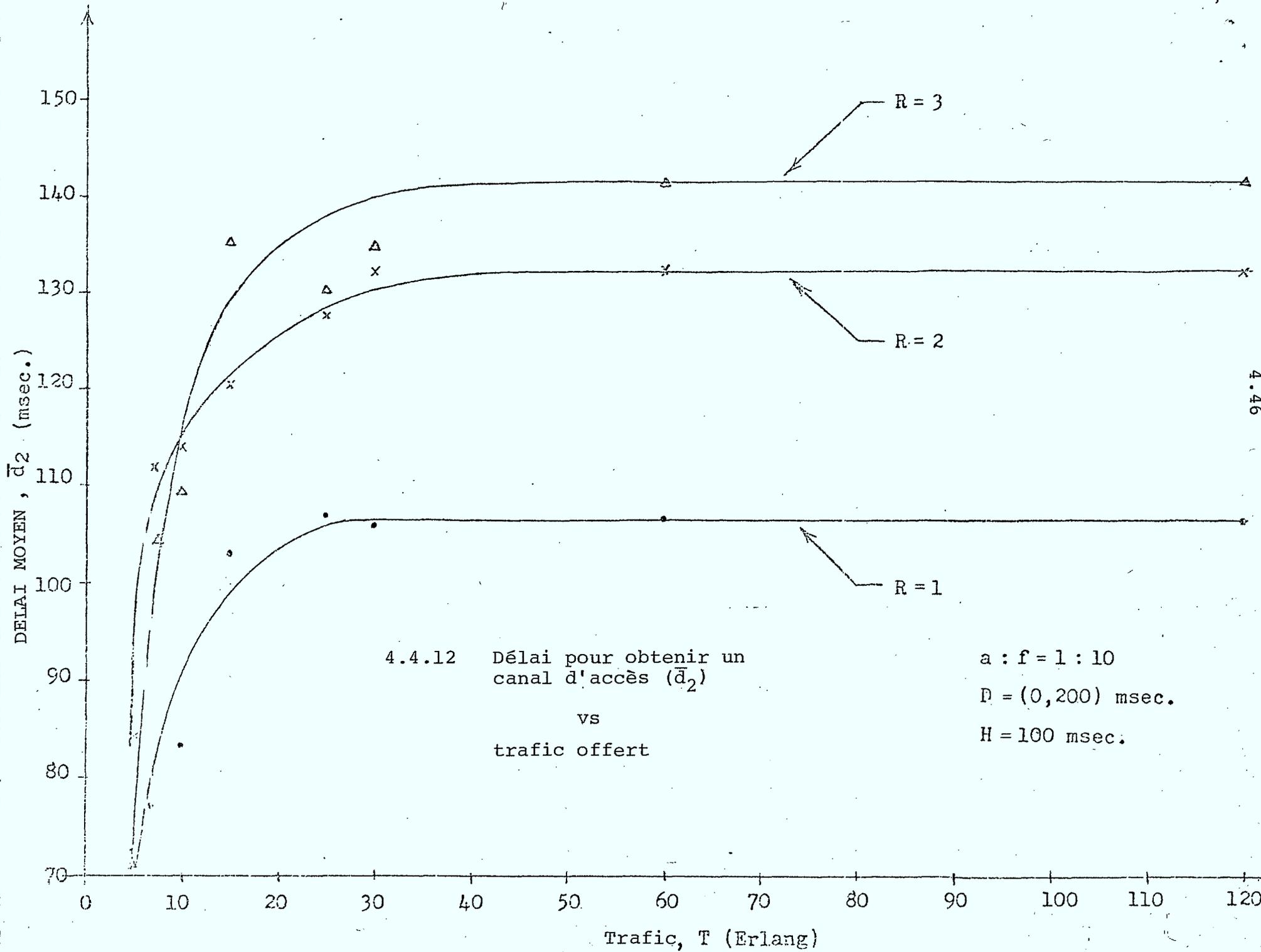




a : f = 1 : 10
 T = 60 Erlang
 R = 10
 D = (0, 200) msec.

4.4.11. Délai pour obtenir un canal d'accès
 vs
 Temps de service des canaux d'accès

TEMPS DE SERVICE DES CANAUX D'ACCES, H (msec.)



4.4.13. Délai pour obtenir un canal d'accès (\bar{d}_1)
vs
trafic offert

$a : f = 1 : 10$

$D = (0,200)$ msec.

$H = 100$ msec.

DELAI MOYEN, \bar{d}_1 (msec.)

17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

R = 3

R = 2

R = 1

Trafic, T (Erlang)

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

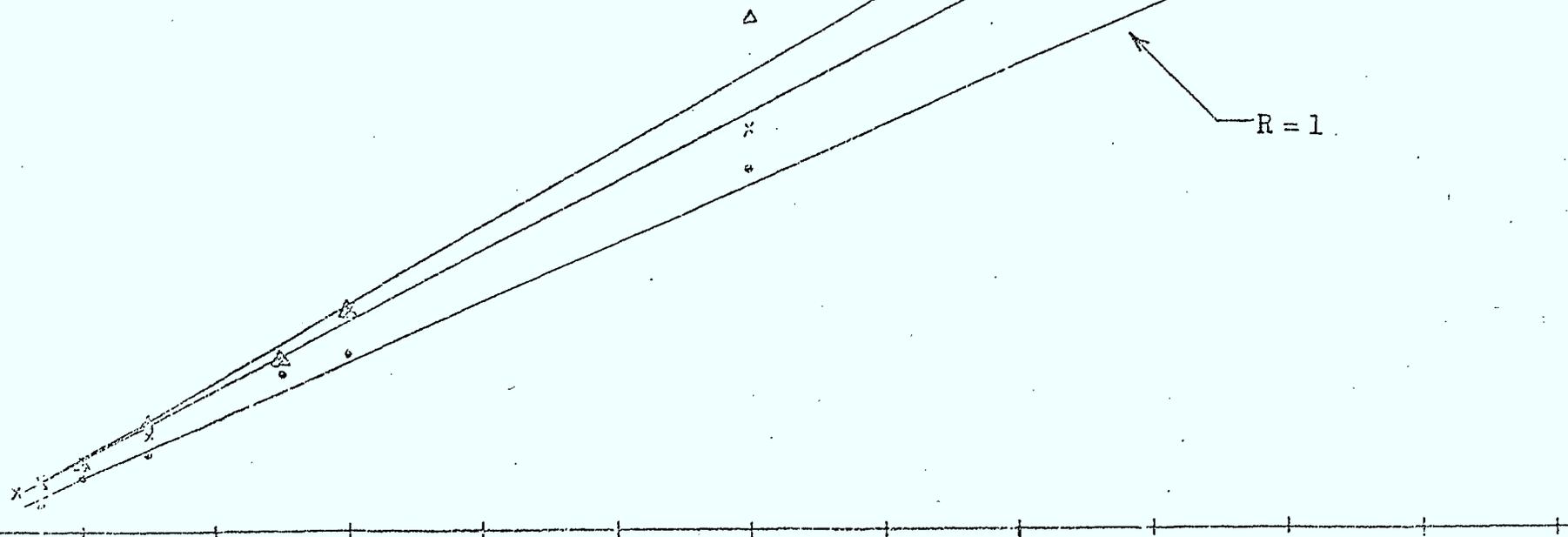


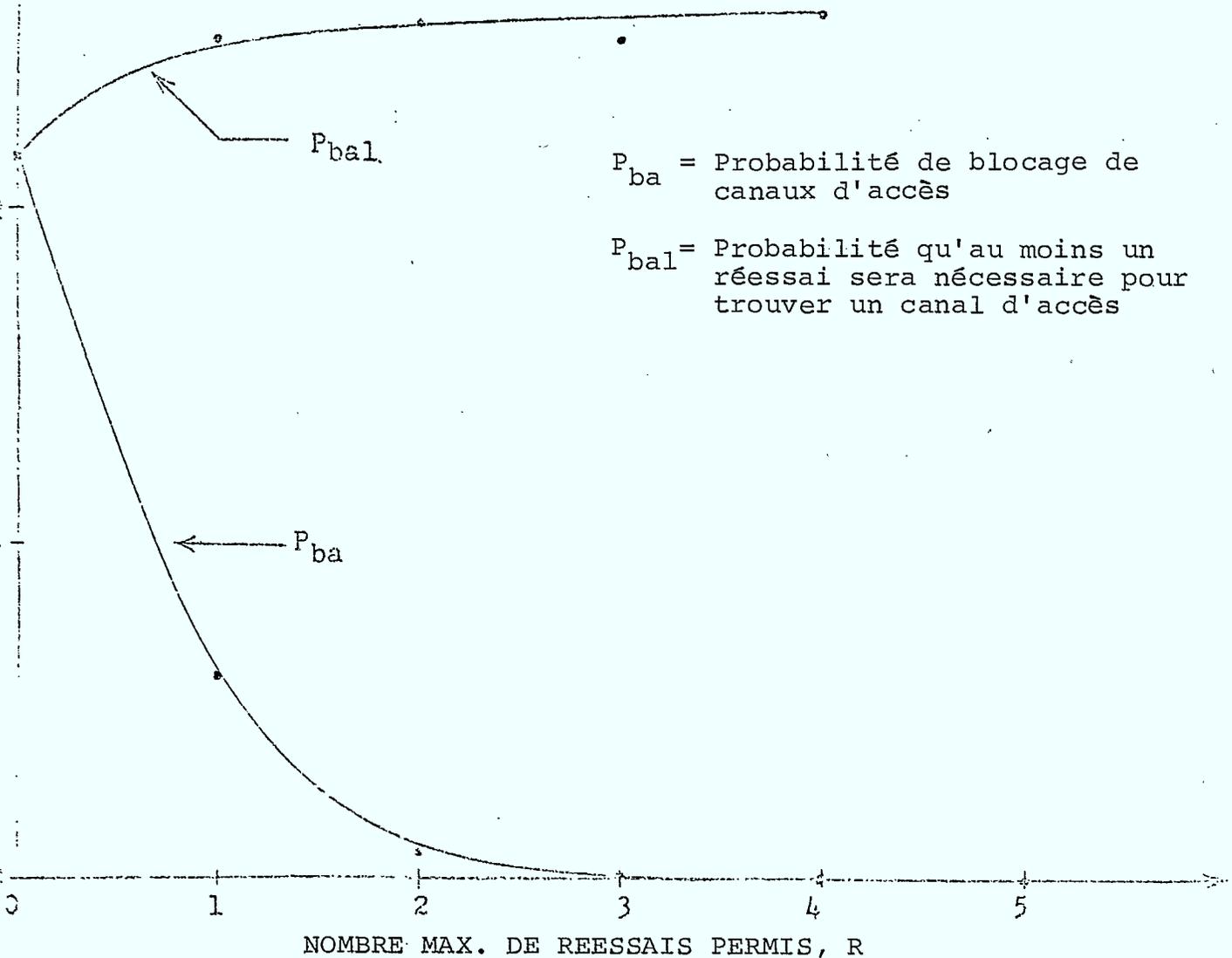
Fig. 4.4.14. Probabilités de blocage P_{ba} et P_{bal} , comme fonctions du nombre max. de réessais, R .

$a : f = 1 : 10$

$D = (0,200)$ msec.

$H = 100$ msec.

BAYARTE / BIENAGE



4.10. Références

1. P. Bobillier, B. Kahan, A. Probst, "Simulation with GPSS and GPSS V", Prentice-Hall, 1976.
2. N.D. Georganas, "Etude de Méthodes de la Gestion du Spectre des Fréquences pour les Systèmes de Communications Mobiles Phase II", Rapport final, Contrat D.O.C., Mars 1980.
3. T.J. Kahwa and N.D. Georganas, "A Hybrid Channel Assignment Scheme in Large-Scale Cellular-Structured Mobile Communication Systems", IEEE Trans. on Comm., April 1978, pp. 432-438.
4. Thomas J. Schriber, "Simulation Using GPSS", John Wiley & Sons, 1974.
5. "Advanced Mobile Phone Service", BSTJ, Vol. 58, No. 1, Jan. 1979.
6. "General Purpose Simulation System V, User's Manual", IBM, SH20-0851-1, 2nd ed., August 1971.
7. "Operator's Manual of Mobile Unit", AT&T, Section 3.4 (Logic Section) and Section 3.5 (Signalling).
8. C.K. Davis and R.F. Mitchell, "Traffic On A Shared Radio Channel", Phillips Research Laboratories, Redhill, Surrey, UK.
9. C.K. Davis and R.F. Mitchell, "Blind Queueing -- A Signalling Protocol for Trunked, Mobile Radio Systems", Phillips Research Laboratories, Redhill, Surrey, UK.
10. Thomas J. Schriber, Simulation Using GPSS, John Wiley & Sons, 1974.
11. J. Sin and N.D. Georganas, "A Simulation Study Of A Hybrid Channel Assignment Scheme for Cellular, Land-Mobile Radio Systems with Erlang-C Service", IEEE Trans. on Comm., Vol.COM-29, No.2, Feb. 1981.
12. "Mobile Telephone Vehicular Equipment Specification", AT&T, April 1979.

V. SATELLITES DANS LA COMMUNICATION MOBILE

5.1. Introduction5.1.1. Systèmes de communications mobiles

Le service mobile-terrestre de communication par radio englobe une grande variété d'utilisateurs que l'on peut répartir en deux catégories principales, soit la radio pour la sécurité et les services spéciaux (Safety and Special Radio, SSR) et les services à porteuse commune (Common Carrier Services) [20].

La catégorie SSR est la plus grande du marché total (à l'exception de la bande des citoyens, CB) et la sécurité publique constitue l'élément le plus important de cette catégorie. La sécurité publique comporte diverses applications en matière de communication, notamment les opérations d'évaluation et de secours en cas de désastre, la communication médicale d'urgence (Emergency Medical Communication, EMC), les opérations de recherche et de sauvetage, l'application des lois, particulièrement dans les domaines des drogues et de l'immigration et le camionnage entre états.

Les services SSR sont principalement assurés par des réseaux de communication par distribution, dont le téléappel constitue une subdivision importante. Le principal élément de la catégorie à porteuse commune est le service de téléphone mobile (Mobile Telephone Service, MTS), actuellement fourni par

deux types de systèmes, celui à cadran, tel que représenté par le service amélioré de téléphone mobile (Improved Mobile Telephone Service, IMTS) et le système manuel.

Ces services sont limités par le nombre d'abonnés qui peuvent en profiter, puisque le nombre de canaux assignés dans les régions métropolitaines est insuffisant. En outre, la zone de rayonnement utilisable par un abonné quelconque est restreinte puisque le service est assuré par plusieurs entreprises non coordonnées qui ont recours à trois bandes, où un équipement différent est utilisé pour chaque bande.

Le plus grand obstacle à la croissance des services mobiles est le manque d'un spectre de fréquences convenable. C'est en raison de ces manques, entre autres, des services mobiles actuels, que le concept du système cellulaire a été mis au point. Un tel système a pour objectif d'alléger les encombrements du trafic mobile dans des zones à forte densité de population en augmentant les capacités du système, en améliorant le rendement et en normalisant l'équipement et les méthodes.

5.1.2. Systèmes cellulaires

Au chapitre II, nous avons présenté de façon quelque peu détaillée, les concepts de base des systèmes cellulaires. En reprenant brièvement, précisons que les systèmes cellulaires

sont constitués de nombre de cellules géographiques relativement petites, chacune disposant de sa propre antenne et de son appareil émetteur-récepteur de modulation de fréquence. L'ensemble des régions desservies par les cellules individuelles forme la zone de diffusion du système. Les appels destinés à des véhicules se trouvant à l'intérieur de la zone de diffusion, sont acheminés à un centre de commutation, puis, par ligne téléphonique à l'émetteur-récepteur cellulaire approprié pour la transmission par radio au véhicule.

Lorsqu'en se déplaçant le véhicule entre dans une cellule adjacente, l'appel est automatiquement transféré sans interruption du service. Grâce à la réutilisation du spectre de fréquences, on peut considérablement augmenter le nombre total de canaux utilisables par zone de service, comparativement au système traditionnel. Un système cellulaire est actuellement mis à l'essai par AT&T à Chicago et par American Radio Telephone (ART) dans la région de Baltimore-Washington.

Les systèmes cellulaires ne pourront répondre aux besoins des personnes vivant à l'extérieur des régions urbaines ou le long des autoroutes principales.

Une grande partie de la superficie du pays ne se prête pas aux systèmes de communication mobile à réseau terrestre et une forte proportion de la population totale habite dans ces régions.

5.1.3. L'utilisation de satellites

On prétend que les satellites pourraient devenir un moyen efficace par rapport aux coûts, de servir ce marché à plus faible densité et ainsi compléter les systèmes terrestres des régions urbaines et à plus forte densité de population de manière à obtenir un service intégré à l'échelle du pays.

Le système intégré de communication mobile terrestre par satellite (Integrated Terrestrial/Land Mobile Satellite Systems, T/LMSS) fournirait un service téléphonique mobile et un service de distribution des appels par satellite dans les régions rurales et éloignées qui serait équivalent au service habituellement offert dans les régions urbaines où des réseaux terrestres sont utilisés. Le T/LMSS permettrait aussi l'interconnexion de zones de communication séparées par de grandes distances ainsi que les communications d'urgence qui comprennent les services médicaux, l'application des lois, les évaluations et le secours en cas de désastres naturels ou causés par l'homme (voir fig. 5.1).

Les trois raisons suivantes justifient l'installation d'un réseau de communications d'urgence:

1. assurer de telles communications dans les endroits où elles n'existent pas;
 2. remplacer les circuits qui ont été coupés par l'événement;
- et

3. augmenter les réseaux de communication existants afin d'alléger la saturation des voies immédiatement après le désastre.

Les communications médicales d'urgence (Emergency Medical Communications) (EMC) permettent la communication téléphonique et la télémessure des signes vitaux entre le personnel paramédical et l'hôpital. Diverses études et expériences ont permis de conclure que généralement, les systèmes de communication existants ne suffisent pas à combler des besoins urgents importants [16].

5.1.4. Expériences auprès d'utilisateurs éventuels d'un service par satellite

Certains utilisateurs éventuels d'un système de communications mobiles, qui habitent surtout des régions éloignées ou à faible densité de population, ont participé à des expériences effectuées à l'aide de satellites d'application technologique (ATS) de la NASA.

La NASA s'occupe de la coordination des expériences auxquelles participent des utilisateurs provenant du gouvernement et d'autres du secteur privé. Diverses applications du système sont étudiées dans le cadre des expériences, notamment la fourniture de soins médicaux, les services médicaux d'urgence, les communications en matière de recherches et de sauvetage, l'application des lois, particulièrement en ce qui a trait aux drogues et à l'immigration, la délimitation de

positions et le camionnage entre états.

5.1.4.1. Aspect relatif aux services médicaux d'urgence

Une étude de l'effet des appareils de soutien de la vie (Advanced Life Support) (ALS) sur les services médicaux d'urgence (EMS) offerts par l'entremise d'un système de communications mobiles passant par satellite est en cours dans deux régions des Etats-Unis [20].

Le Southeast Mississippi Air Ambulance Service District (SEMAAD) qui couvre un territoire de 4000 milles carrés habités par environ 180,000 habitants, étudie la possibilité d'en arriver à une transmission sûre des rythmes cardiaques tout en permettant une communication verbale entre médecin et personnel paramédical.

Le service d'ambulance Acadian (Acadian Ambulance Service) qui s'occupe de près de 6000 personnes réparties sur un territoire de 9000 milles carrés compte deux ambulances équipées pour la communication par satellite, ce qui permet la transmission de données médicales, d'information logistique et de conseils de médecins.

Ces expériences ont les objectifs suivants:

1. Déterminer l'effet de cette combinaison de main-d'oeuvre et de technologie sur les systèmes EMS (Emergency Medical Services) ruraux, d'un point de vue médical, économique et technique;

2. démontrer la valeur d'un tel système et établir certaines communications pratiques dans un contexte de service d'urgence.

5.1.4.2. Aspect relatif à l'application des lois

Bien que les communications permettant l'application des lois soient satisfaisantes à l'échelle des états et des comtés, au niveau fédéral le FBI et l'organisme chargé de contrôler le trafic des drogues ne jouissent pas d'un système de communication convenable[21]. Le système actuel, en plus de ses frais d'exploitation élevés, couvre un territoire restreint et ne permet pas une diffusion rapide dans les régions éloignées. Puisque les systèmes comportant des satellites sont en mesure de combler ce besoin, le concept T/LMSS peut compter sur un marché additionnel.

5.1.4.3. Aspect relatif au camionnage entre états

Dans ces expériences on a recours aux communications par satellite pour effectuer certaines opérations ordinaires dont le téléappel, les communications d'urgence et l'aide aux conducteurs. Elles visent à mesurer la qualité et la fiabilité des communications par satellite, compte tenu des trajets multiples, du blocage des signaux, des bruits environnementaux et de l'interférence.

5.1.4.4. Aspect relatif à la communication en situation d'urgence

L'association nationale des recherches et des sauvetages (National Association for Search and Rescue, NASAR)

effectue, en collaboration avec l'aviation américaine (USAF) des expériences ayant pour but de: 1. démontrer l'efficacité des communications par satellite entre des terminaux terrestres mobiles et fixes dans des situations de défense civile, de recherches et de sauvetage et enfin, de missions de secours en cas de désastre; 2. déterminer l'utilité, la qualité et la fiabilité des communications d'urgence à faible débit binaire, transmises par satellite.

D'après les résultats de ces expériences effectuées dans des situations véritables et simulées, un besoin manifeste existe pour la mise sur pied de systèmes de communications en situation d'urgence intégrés, satellite/terrestre [16].

Le présent chapitre expliquera le concept du T/LMSS de façon détaillée et établira ses possibilités d'améliorer les communications mobiles.

5.2. Système Terrestre-Mobile-Satellite (T/LMSS)

5.2.1. Description Générale

Le système téléphonique mobile soutenu par satellite fonctionne comme un service de téléphone mobile fondé sur le concept cellulaire proposé à l'origine par la firme Bell et mis à l'essai à Chicago et Washington-Baltimore.

Dans un système cellulaire, le nombre de canaux par cellule et les dimensions des cellules sont établies en fonction de la densité du trafic aux heures de pointe (Erlangs/km²),

conformément au degré de service requis. Dans le cas des systèmes terrestres, les facteurs de propagation imposent des limites pratiques à la grandeur de la cellule. Pour les très petites cellules, la propagation relative à la portée optique prédomine, ce qui fait que les cellules utilisant les mêmes fréquences doivent être séparées par des distances relativement grandes. Pour les grandes cellules, l'intensité de champ s'affaiblit rapidement au-delà de l'horizon radio, ce qui limite le rayon maximal de la cellule à une distance variant entre 30 et 50 km. Les satellites ne sont en mesure d'assurer une communication qu'avec des cellules dont le rayon est supérieur à 30 km.

Les caractéristiques avancées des systèmes cellulaires terrestres sont comprises dans le concept cellulaire avec satellite. La réutilisation des fréquences et le recours à des lignes auxiliaires assurent une utilisation hautement efficace du spectre. Les protocoles d'exploitation sont compatibles avec les systèmes terrestres. Certains éléments de l'équipement dans les véhicules, sinon l'équipement complet, peuvent servir à la communication par l'entremise des satellites, ainsi que par l'entremise des systèmes terrestres.

Bien que certains abonnés utiliseront exclusivement soit le système terrestre, soit le système par satellite, nombre d'autres se serviront des deux systèmes. Le raccordement des

systemes constitue une particularité importante du concept T/LMSS.

Le système proposé est un système à accès multiple par assignation en fonction de la demande, AMAD (demand assigned multiple access, DAMA) à canal unique par onde porteuse. Le système AMAD attribue des paires de canaux au niveau du satellite, afin d'établir l'interconnexion à mesure que les appels sont faites par les utilisateurs. Ces attributions sont faites en choisissant des canaux du satellite à partir du groupe de canaux disponibles, puis en attribuant une paire de fréquences entre la station terrestre et l'unité mobile. Une fois l'appel terminé, les fréquences retournent au groupe de canaux en attendant un autre appel.

5.2.2. Antenne à faisceaux multiples

Le système fonctionne à l'aide d'un satellite muni d'une antenne à faisceaux multiples. Chaque faisceau illumine une "empreinte" ou "cellule" de portée limitée, à l'intérieur de la zone de service totale. Les nombreuses empreintes ont pour but de permettre la réutilisation des fréquences de la façon que le fait un système cellulaire terrestre.

Des études fondées sur diverses séries d'hypothèses ont été menées afin de déterminer le coût et le rendement d'un système terrestre mobile-satellite [23]. On suppose généralement qu'un satellite géostationnaire serait utilisé pour fournir des

des canaux téléphoniques sur la largeur de bande aux véhicules dotés d'une antenne simple (gain d'environ 3.5 dB_i) et un appareil émetteur-récepteur mobile traditionnel.

Initialement, un système nouvellement implanté n'utiliserait que quelques empreintes. Avec la croissance de la demande, on pourra mettre le système en communication avec des satellites dotés d'antennes de plus grande dimension, de manière à former un plus grand nombre d'empreintes et permettre une plus grande réutilisation des fréquences.

5.2.3. Choix de canal et réutilisation des fréquences

Les canaux du spectre attribué sont répartis en groupes. Des groupes de canaux différents sont attribués aux cellules adjacentes afin d'éviter l'interférence aux limites des empreintes.

Il semblerait pratique de construire des antennes de satellite dont les lobes latéraux sont tellement bas, que l'on ait besoin que de trois groupes de canaux [4].

Tout véhicule qui utilise le système peut avoir recours à l'ensemble des canaux, dans tous les groupes de fréquences. Chaque groupe de fréquences comporte au moins un canal d'appel (de station mobile à satellite) et un canal de contrôle (de satellite à station mobile). Le reste des canaux d'un groupe sont des canaux de "conversation".

5.2.4. Transmission des appels

Les façons de procéder, les appareils de commutation terrestres et le logiciel sont semblables au système cellulaire terrestre. Lorsqu'un appareil de radiocommunication mobile est mis en marche, il balaye automatiquement les canaux de contrôle du système terrestre et se rattache à ce système si le véhicule se trouve dans une zone de service terrestre.

S'il ne reçoit pas de signal d'un canal de contrôle terrestre, il balaye automatiquement les canaux de contrôle du satellite et se rattache à celui qu'il reçoit, qui est déterminé en fonction de l'empreinte à l'intérieur de laquelle le véhicule est situé.

Lorsque l'abonné compose un numéro, ce numéro, ainsi que son propre numéro sont acheminés à un registre de mémorisation. Lorsque le canal de contrôle indique que le canal d'appel est libre, l'appareil situé dans le véhicule transmet la demande, par l'entremise du canal d'appel, au centre de contrôle (station terrestre ou satellite); ensuite l'interconnexion se fait avec l'ordinateur de contrôle qui attribue le canal de conversation pour l'appel.

Une fois l'appel terminé, un signal à cet effet est transmis au centre de contrôle. Si le signal de la fin n'est pas reçu par suite d'une interruption du signal attribuable au relief terrestre ou à une obstruction, le centre de contrôle

effectue les opérations de fin d'appel à un moment précis après que le signal ait disparu du canal.

5.2.5. Raccordement des appels avec le réseau de téléphone

On suppose que le service de communication mobile satellite-terrestre (T/LMSS) utilisera la bande UHF pour les communications mobile-satellite et la bande des hyperfréquences (Ku) pour les communications entre les satellites et les stations terrestres (parfois appelées terminaux d'acheminement des communications, Communications Routing Terminals, CRT).

Les appels provenant de l'émetteur-récepteur mobile sont reçus par le satellite, par l'entremise de la bande UHF, puis transférés à la bande des hyperfréquences avant d'être transmis à la station terrestre. La station terrestre relie les appels avec le réseau de téléphone public. Pour le trajet de retour, l'appel part du réseau téléphonique, passe par la station terrestre, puis est transmis au satellite par l'intermédiaire de la bande d'hyperfréquences. Le satellite transfère l'appel à la bande UHF puis le transmet à l'utilisateur mobile (voir fig.5.1).

Les méthodes pour établir la communication entre un abonné utilisant un téléphone mobile et son interlocuteur peuvent être divisées comme suit:

1. Aucune commutation des appels parmi les faisceaux du satellite, avec une station terrestre ou plus par empreinte;
2. Commutation entre les faisceaux du satellite.

5.2.5.1. Absence de commutation (une station terrestre ou plus par empreinte)

Dans ce cas, on compte au moins une station terrestre par empreinte.

Chaque faisceau du satellite peut être indépendant des autres; en fait, chaque faisceau est un relai traducteur de fréquences distinct et aucune commutation entre les faisceaux du satellite n'est^s requise [4].

La communication d'un abonné mobile est transmise au satellite sur bande UHF, par l'entremise d'un canal qui lui a été attribué. L'appel est retransmis sur un canal de la bande Ku (12 GHz vers le satellite, 14 GHz vers la station terrestre) vers la station terrestre (dans la même empreinte que le véhicule) puis, par l'entremise du réseau téléphonique, à l'interlocuteur dont la communication passe par le réseau téléphonique et la même station terrestre est transmise sur bande Ku au satellite, puis au véhicule sur bande UHF mobile.

L'appel est transmis de la station terrestre au téléphone fixe par l'entremise du réseau de téléphone public, qu'il s'agisse d'un appel interurbain ou non.

La transmission d'appels d'appareils mobiles à des téléphones fixes comporte une branche vers le satellite qui entraîne une attente d'environ un quart de seconde dans le trajet. Si l'appel est transmis d'un poste mobile à un autre situé dans la même empreinte, il est transmis par la station

terrestre qui dessert cette empreinte.

Si les postes mobiles sont situés dans des empreintes différentes, l'appel doit, par l'intermédiaire du satellite, passer par la station terrestre se trouvant dans la zone de l'appel de départ, puis être retransmis par l'entremise du réseau de téléphone public, à la station terrestre se trouvant dans la zone où l'appel est destiné et enfin, rejoindre l'interlocuteur désiré par l'entremise du faisceau de satellite de l'empreinte où il se trouve. Dans l'un ou l'autre des cas, la communication doit passer par deux branches, ce qui représente à peu près une demi-seconde.

5.2.5.2. Commutation des faisceaux du satellite

S'il y a commutation des faisceaux du satellite, alors il n'est pas nécessaire d'avoir une station terrestre ou plus dans chaque empreinte.

L'élément station terrestre peut se présenter sous diverses configurations: il peut y avoir une seule station pour tout le système, quelques stations régionales où, une ou plusieurs stations dans chaque empreinte. Le degré de commutation au niveau du satellite dépendra de la configuration choisie et des entités qui exploitent le système.

5.2.5.2.1. Appel d'un abonné mobile destiné à un appareil fixe

La communication d'un abonné mobile est transmise au satellite par l'entremise de la bande UHF mobile

attribuée. Si l'interlocuteur auquel l'appel est destiné est situé dans la même empreinte et qu'il y a une station terrestre dans cette empreinte, aucune commutation n'est requise et l'interconnexion se fait comme il est expliqué auparavant.

S'il n'y a pas de station terrestre ou si l'interlocuteur visé se trouve dans une autre empreinte, l'appel est transféré à un autre faisceau du satellite, puis retransmis par bande d'hyperfréquences (Ku) à une station terrestre située à l'intérieur ou à proximité de la nouvelle empreinte et enfin, transmis à la personne appelée par l'intermédiaire du réseau de téléphone public.

5.2.5.2.2. Appel d'un appareil mobile à un autre

S'il s'agit d'un appel provenant d'un appareil et destiné à un autre appareil mobile, il y a commutation de l'appel au faisceau couvrant l'empreinte de l'interlocuteur visé, puis transmission au véhicule par l'entremise d'un canal mobile sur bande UHF.

Ce genre de commutation au niveau du satellite ne comporte qu'un délai d'une branche (environ un quart de seconde) dans tous les cas et permet d'épargner sur les frais d'exploitation en acheminant les appels interurbains par le satellite plutôt que par le réseau public de commutation téléphonique.

La commutation au niveau du satellite peut être commandée par une station terrestre ou par un ordinateur

de contrôle intégré au satellite.

5.2.5.3. Transmission d'un appel

Lorsqu'un appel est destiné à un appareil mobile, la station terrestre commence par essayer d'atteindre le véhicule en transmettant l'appel sur les canaux de commande à l'intérieur de l'empreinte habituel du véhicule. S'il n'y a pas de réponse, la station répète l'appel dans d'autres empreintes et établit la communication par l'entremise de l'empreinte où se trouve le véhicule en question.

Les protocoles d'exploitation et le logiciel sont les mêmes que dans le cas des systèmes cellulaires terrestres.

Les véhicules équipés à la fois pour le service terrestre et la communication par satellite tenteront pour commencer, de passer par le système terrestre. En cas d'échec, l'appareil scrute à la recherche du satellite.

Lorsque l'équipement du véhicule détermine que le niveau moyen du signal reçu sur le canal de commande qu'il contrôle tombe à un trop faible niveau, cela veut dire que le véhicule est entré dans une nouvelle empreinte. L'appareil procède donc automatiquement à un autre balayage, à la recherche d'un canal de commande terrestre pour commencer, puis d'un canal de commande par satellite.

5.2.5.4. Transmission d'appels en cours lorsque le véhicule change de cellule

Comme dans le cas des systèmes terrestres, aucune mesure spéciale n'est requise lorsqu'un abonné passant par satellite, change de cellule au cours d'un appel. Un chevauchement suffisamment grand des zones de service des empreintes a été prévu: ainsi, il est peu probable qu'un véhicule traverse la zone de chevauchement entière au cours d'une conversation. Si une telle situation devait se produire, l'abonné peut refaire l'appel par l'entremise du faisceau du satellite, attribué à la nouvelle empreinte.

5.2.5.5. L'installation de gestion des communications (Communication Management Facility, CMF)

L'installation de gestion des communications (CMF) remplit les fonctions requises de gestion en communication pour le système entier. Le CMF peut se trouver dans une station terrestre spécialisée ou être intégré au satellite. On propose de le doter d'un ordinateur principal qui servira à coordonner toutes les fonctions de mise à l'essai, de surveillance et de contrôle du système. De plus, le CMF tient les livres et s'occupe de la facturation pour l'ensemble du système. Il vérifie aussi périodiquement l'état de chaque station terrestre. Une quantité fixe de puissance qui représente une infime partie de la puissance totale utilisable du satellite est réservé pour les stations terrestres

et le CMF. Ainsi, presque toute la puissance du satellite est consacré aux terminaux mobiles.

5.3. Systèmes T/LMSS proposés

Plusieurs systèmes fondés sur le concept T/LMSS décrit à la partie 5.2 ont été proposés.

A la référence 4, on propose un système T/LMSS avec satellite à faisceaux multiples, placé en orbite géostationnaire et couvrant les Etats-Unis continentaux de 69 faisceaux.

La figure 5.3 démontre les "cellules" du satellite attribués aux états contigus. Vus en coupe transversale, les faisceaux sont circulaires et sont d'une largeur d'environ 0.5° . Les numéros à l'intérieur des cellules représentent les groupes de canaux qui sont répartis de manière à permettre un facteur 3 de fréquence.

La bande de fréquence utilisée est la bande L (1500-1600 MHz) ou UHF (800-900 MHz). En utilisant la formule Erlang-B, on suppose l'utilisation d'un signal dont le rapport signal-bruit minimal est de 50 dB et une qualité de service de P.02 (2% des appels non transmis durant l'heure de pointe). En prévoyant une largeur de bande de 10 MHz pour la transmission entre le véhicule et le satellite et de 10 MHz entre le satellite et le véhicule, le système permet l'utilisation d'un total de 333 canaux téléphoniques en duplex. On peut donc compter sur 111 canaux dans chaque empreinte. Si 3 canaux par empreinte sont

réservés pour les fonctions d'appel et de contrôle, il reste 108 canaux téléphoniques dans chaque empreinte.

Compte tenu de ces caractéristiques et d'une intensité d'utilisation de 95 Erlangs, le système pourra répondre aux besoins de 2850 abonnés par empreinte ou 196,659 abonnés si, durant l'heure de pointe, chaque abonné fait un appel de 120 secondes en moyenne.

A la référence 21, on propose un système dont la bande se situerait entre 800 et 900 MHz et qui s'étendrait sur la totalité des Etats-Unis continentaux. Pour les régions rurales des E.-U. à plus forte densité, (45 personnes/km²) le satellite pourrait être muni de faisceaux comprenant 100 canaux chacun. Dans les régions rurales à plus faible densité (10 personnes/km²), chaque faisceau pourrait contenir environ 30 canaux. Le nombre total de faisceaux serait inférieur à 50 et le système pourrait répondre aux besoins d'environ 300 à 325,000 utilisateurs mobiles.

La référence 30 traite d'un système dont la bande de fréquence se situerait entre 620 et 790 MHz. La largeur de bande UHF est de 170 MHz (80.5 MHz vers le satellite et 80.5 vers la station terrestre). Par conséquent, avec un espacement de 25 KHz entre les canaux, un seul faisceau UHF peut transmettre 3200 appels simultanément. Les résultats d'une étude énumèrent sept possibilités à l'égard du satellite et prévoient des antennes

de quatre grandeurs différentes, ces éléments d'option ayant servi de données pour l'analyse globale des avantages du système.

A la référence 17, on utilise un système de 15 faisceaux de satellite pour illustrer les possibilités de service et les caractéristiques techniques d'un système mobile terrestre-satellite avec divers genres d'utilisateurs dont le service téléphonique mobile (Mobile Telephone Service - MTS), le service de distribution automatique (Automatic Dispatch Service, ADS), la sécurité publique (Public Safety, PS) et les services médicaux d'urgence (Emergency Medical Services, EMS).

5.4. Attribution des fréquences

Les bandes de fréquence généralement considérées convenables pour les communications mobiles-satellite varient entre environ 100 MHz et 10 GHz.

Aux fréquences plus faibles, l'absorption atmosphérique et la scintillation diminuent le rendement et aux fréquences plus élevées, l'absorption par les éléments constitutants de l'atmosphère devient importante. Les bruits étrangers constituent un facteur important pour les fréquences inférieures à 2000 MHz.

Des calculs ont démontré que pour une station terrestre mobile dotée d'un système dont le niveau de bruit est de 450 k et d'une antenne multidirectionnelle simple, des fréquences allant jusqu'à 2000 MHz sont appropriées.

La bande variant de 806 à 890 MHz a été approuvée pour l'hémisphère occidental au cours de la Conférence administrative mondiale des télécommunications spatiales CAMTS (World Administrative Radio Conference, WARC) de 1979 pour les raisons énoncées ci-dessus et celles qui suivent.

Cette bande devient excellente pour l'implantation d'un système T/LMSS puisque ces fréquences sont maintenant attribuées tant aux services terrestres que spatiaux. Ainsi, l'équipement mobile requis est semblable à celui utilisé pour le service mobile terrestre, ce qui permet des économies d'échelle et d'équipement commun. L'utilisateur se voit donc offrir une possibilité à l'égard d'un système terrestre-spatial qui pourrait être efficace par rapport aux coûts.

Ce choix de fréquences comporte des particularités techniques souhaitables, compte tenu du bruit de fond, de la grandeur de l'antenne, de la séparation de la fréquence vers le satellite de celle vers la station terrestre, des avantages quant au rendement et la technologie requise qui est d'un coût peu élevé.

Bien que les communications mobiles-satellite se fassent au moyen de la bande UHF, les communications entre la station terrestre et le satellite se feront par l'intermédiaire de la bande d'hyperfréquences (Ku). On économise ainsi le

pouvoir du satellite puisque les stations terrestres se servant de la bande Ku ont un rendement relativement plus élevé que les terminaux mobiles UHF.

5.5. Système de mesure de l'utilisation du spectre

Le recours à un système de mesure de l'utilisation du spectre a pour but de:

- 1) permettre la comparaison des autres possibilités techniques de façon à fournir un service de communication conforme à leur efficacité spectrale relative;
- 2) évaluer les capacités ultimes des autres possibilités techniques, à divers stades de mise au point; et
- 3) servir de guide pour établir des normes minimales d'efficacité spectrale [34].

Plusieurs systèmes de mesure pour le service mobile terrestre ont été proposés et le système de mesure du trafic à l'heure de pointe par unité de largeur de bande et par unité de superficie (Erlangs/MHz/km²) a été jugé le plus utile [25].

Il permet une mesure de l'utilisation du spectre par le trafic à l'heure de pointe pour chaque appareil mobile qui dépend considérablement du service particulier. Il tient compte de la largeur de bande requise pour le système particulier et de la région géographique au-dessus de laquelle la largeur de bande est utilisée et donc inaccessible aux autres systèmes.

La charge d'un canal est déterminée au moyen de la formule $L_c = a/s$, "a" étant le trafic de l'heure de pointe (en Erlang) et "s" le nombre de canaux. La figure 5.4 illustre la charge de canal pour divers degrés de service (P.02, P.05, etc.) par rapport au nombre de canaux. La probabilité à l'égard d'appels non transmis est établie au moyen de la formule Erlang B.

5.5.1. Système traditionnel, grande région - Système cellulaire, petite région

A titre d'exemple, avec un degré de service de P.02, on obtient une utilisation du spectre, pour un système traditionnel à canal unique couvrant une grande région, de 1.64×10^{-5} Erlangs/MHz/km². Pour un système cellulaire caractérisé par la réutilisation des fréquences et l'emploi de lignes auxiliaires, l'utilisation du spectre est de 0.44 Erlangs/MHz/km², ce qui est environ 27,000 fois supérieur à l'utilisation obtenue pour le système traditionnel cité en exemple.

5.5.2. Satellite desservant une grande région

L'utilisation du spectre pour un système mobile terrestre-satellite est en grande mesure déterminée par la grandeur équivalente de la cellule ou empreinte.

La figure 5.2 démontre un modèle de couverture des Etats-Unis au moyen d'un système par satellite utilisant 56 faisceaux avec une largeur de faisceau (3 dB) d'environ 0.75 degrés.

La région "illuminée" par une antenna à largeur de

faisceau constante est une fonction de l'angle géocentrique entre l'intersection du centre du faisceau sur la surface terrestre et le point situé directement sous le satellite. En général, l'intersection d'un faisceau circulaire et de la surface terrestre donne une région délimitée par une ellipse.

La référence 25 fournit les équations représentant la superficie du cap sphérique A_0 lorsque le centre du faisceau est dirigé vers le point situé directement sous le satellite et la superficie elliptique lorsque l'angle géocentrique entre le point situé directement sous le satellite et le centre du faisceau (défini comme l'angle de contrôle terrestre) n'est pas zéro.

En faisant des calculs approximatifs, la superficie recouverte par un faisceau circulaire de ϑ_0 degrés et dont le centre correspond au point situé directement sous le satellite est obtenu au moyen de la formule suivante:

$$A_0 = 307 \times \vartheta_0^2 \times 10^3, \text{ [km}^2\text{]} \quad (1)$$

La marge d'erreur est inférieure à 1% lorsque la largeur du faisceau est inférieure à 3° .

On peut effectuer le calcul approximatif de la superficie lorsque les angles terrestres centraux ne sont pas zéro, au moyen de la figure 5.5 qui exprime le coefficient de la superficie elliptique par rapport à la superficie située sous le satellite, en tant que fonction de l'angle terrestre central.

Au moyen de l'exemple suivant, on peut illustrer la mesure de l'utilisation du spectre pour un système de communication mobile par satellite.

Le système se compose d'un satellite à faisceaux multiples couvrant les Etats-Unis au moyen de 56 faisceaux, chacun ayant une largeur de 0.75 degrés et un facteur de réutilisation des fréquences de 3.

Chaque faisceau compte 48 canaux entièrement en duplex, la largeur de bande de chaque canal est de 25 KHz (X 2) et un angle terrestre moyen de 40 degrés est utilisé.

D'après la figure 5.4, pour un degré de service de P.02, 48 canaux peuvent assurer un trafic de 38.4 Erlangs. D'après l'équation 1, A_0 est $173 \times 10^3 \text{ km}^2$ et la largeur de bande de chaque canal est 2.4 MHz.

Lorsque l'angle terrestre central est zéro, la mesure de l'utilisation du spectre est 3.08×10^{-5} Erlangs/MHz/km². Lorsque l'angle terrestre central est de 40 degrés, il est diminué d'un facteur de 1.59 (fig. 5.5), ce qui donne 1.94×10^{-5} Erlangs/MHz/km², soit à peu près la même superficie que dans le cas du système traditionnel couvrant une vaste région.

5.5.3 Facteurs qui influencent l'utilisation du spectre

On désire augmenter la mesure de l'utilisation du spectre. Pour les satellites à faisceaux multiples, la mesure du spectre, s/u est obtenue comme suit: 25

$$n_{s/u} = \frac{1.63 \times 10^{-6} L_c}{\theta_o^2 R_f K_o} \text{ Erlangs/MHz/km}^2$$

lorsque

L_c représente la charge du canal

B représente la largeur de bande en MHz pour chaque demi-circuit

R_f représente le facteur de réutilisation des fréquences

K_o représente le facteur de correction pour les angles de

contrôle terrestres qui ne sont pas de zéro degré

et θ_o représente la largeur de faisceau de l'antenne

Largeur de faisceau de l'antenne du satellite et réutilisation des fréquences

La largeur de faisceau de l'antenne du satellite (θ_o) contrôle la grandeur des zones de service individuelles et, puisqu'elle est quadratique, constitue peut-être le moyen le plus efficace d'augmenter la mesure de l'utilisation du spectre. Plus la réutilisation des fréquences est faible, plus la mesure est grande; ainsi, le facteur réutilisation 3 est souvent choisi.

Largeur de bande des canaux

Puisque 25 KHz constitue un espacement minimal pratique entre les canaux, un système à bande latérale unique est proposé. Une technique à bande latérale unique qui réduit au minimum les désavantages du système traditionnel à bande latérale unique (c.-à-d., affaiblissement rapide, bruit d'impulsion rapide dans les zones urbaines, instabilité des fréquences et effet de Doppler-Fizeau) s'appelle SYNCOMPEX [25].

La largeur de bande totale est de moins de 4 MHz. Bien que cette technique soit prometteuse, il reste à en faire la démonstration.

Angle terrestre central: En plaçant le satellite à la longitude correspondant au centre de la zone de service, on réduit ainsi au minimum l'angle terrestre central.

Limite supérieure des satellites: En appliquant des limites pratiques à ces paramètres, on obtient une mesure de l'utilisation du spectre de l'ordre de 1.36×10^{-2} Erlangs/MHz/km². On peut ainsi constater, que du point de vue du spectre, les satellites sont aussi efficaces que les systèmes terrestres lorsqu'il s'agit de desservir les régions rurales et éloignées.

5.6. Délimitation de positions - par satellite

Une grande série d'expériences effectuées avec le satellite d'application technologique, ATS (application technology satellite) de la NASA ont démontré qu'il est possible d'utiliser des satellites géostationnaires pour la localisation automatique et en direct de véhicules (délimitation de positions) sur une superficie terrestre considérable. Cette méthode est bien plus avantageuse que celle consistant à élargir la couverture à une vaste région au moyen de répéteurs de ligne optique.

5.6.1. La délimitation de positions au moyen de dispositifs de mesure de la position

La figure 5.6 illustre un système proposé de localisation de véhicules sur une vaste région, qui augmenterait les

services offerts par un système de communication mobile par satellite. Un véhicule doté d'un dispositif approprié de mesure de la position fait une mise à jour constante de sa position. Périodiquement, ou sur demande d'un poste central, les données calculées à l'égard de la position sont transmises du véhicule à un satellite, puis retransmis au poste central où elles sont traitées par un système d'affichage informatisé et présentées d'une façon convenable.

Les dispositifs de mesure de la position d'un véhicule peuvent être regroupés comme suit:

1. Proximité
2. Délimitation exacte
3. Haute fréquence (radio frequency)

Les dispositifs de proximité et de délimitation exacte sont très peu pratiques, manquent de précision et sont habituellement d'un coût trop élevé pour assurer un service sur une vaste région.

La technique LORAN-C de la catégorie des hautes fréquences (radio frequency) est communément utilisée. Elle est fondée sur les différences entre les temps d'arrivée de signaux par impulsions de 100 KHz, provenant d'un émetteur de forte puissance.

La configuration de base du système de localisation de véhicules LORAN-C est indiquée à la figure 5.7.

Les relevés de différences de temps entre la station principale et deux stations secondaires sont transmis au récepteur LORAN-C intégré au véhicule. Ces données sont ensuite retransmises par satellite à une station de base. A la station de base, un ordinateur transforme les relevés de différences de temps en coordonnées de la grille, puis en coordonnées X, Y sur la carte appropriée.

Le système LORAN-C est utilisé de façon très répandue pour la navigation sur les océans; grâce aux récentes réalisations dans ce domaine, il est possible de mettre en oeuvre un système semblable sur une vaste région terrestre. La précision des localisations varierait entre 300 et 1500 pieds [27]. On a cerné les caractéristiques techniques des récepteurs LORAN-C maritimes et ces derniers ont été modifiés pour permettre leur utilisation en milieu terrestre, à l'aide d'un modem compatible avec un système de communication mobile par satellite à bande étroite.

Les récentes activités de la firme MITRE et d'autres sociétés se sont concentrées sur l'évolution et la mise au point d'un système LORAN-C terrestre de grande précision.

L'application de la technique LORAN-C dépend de la présence de signaux LORAN-C dans la région géographique visée. Actuellement, deux tiers des Etats-Unis sont couverts par les signaux LORAN-C.

5.6.2. Délimitation de positions par la méthode des codes de tonalité (Tone-Code Ranging)

Dans la méthode de délimitation des positions au moyen de dispositifs de mesure, le satellite ne faisait qu'assurer la liaison pour les communications. Avec la méthode des codes de tonalité, la position du véhicule est déterminée en mesurant les distances entre le véhicule et deux satellites, en utilisant un transpondeur à base terrestre et le réseau mondial de transpondeurs UHF à "trilatération" (trilateration).

Les distances entre les satellites et le véhicule sont établies en mesurant le temps de propagation d'un signal qui est émis d'une station terrestre centrale, par les satellites, est transmis aux véhicules, puis revient en suivant le même trajet.

Les canaux de communication à bande étroite sont sujets à des retards variables attribuables à l'équipement. Il y aurait donc lieu d'intégrer un circuit d'étalonnage automatique au transpondeur du véhicule qui déterminerait le retard attribuable à l'appareil pour chaque distance mesurée.

La précision de la délimitation des positions de véhicules est aussi sérieusement limitée par les variations aléatoires des retards ionosphériques de propagation entre le satellite et le véhicule. Il n'existe aucun appareil permettant de prédire instantanément et avec la précision voulue, les retards de propagation.

En supposant que l'ionosphère est homogène pour une région donnée, les mesures de distance jusqu'à un répondeur fixe à proximité du véhicule (situé dans un endroit connu désigné comme référence terrestre), fournira une évaluation du retard de propagation sur le parcours du rayon au véhicule. A mesure qu'augmentent les distances entre le terminal mobile et les répondeurs fixes, il est moins justifié de supposer que l'ionosphère est homogène.

Une fois effectuées, les corrections pour tenir compte des retards de propagation causés par l'ionosphère et la troposphère, et des retards attribuables à l'équipement, on peut convertir le temps de parcours en une distance, en multipliant le temps par la vitesse de la lumière.

Les temps de propagation sont mesurés en ajoutant un marqueur de temps, qui se présente sous forme d'un code d'interrogation de tonalité, au signal transmis et en observant le temps de transmission dans les deux directions. Le signal d'interrogation est une tonalité de courte fréquence audio, suivie d'une synchronisation numérique et d'un code d'adresse.

Doté d'un répondeur logique numérique, l'équipement de communication véhicule-satellite devient un transpondeur de distances. Pour obtenir les distances véhicule-satellite, la station terrestre principale transmet une impulsion de tonalité

suivie du code d'adresse numérique unique du transpondeur. Le satellite répète le code d'interrogation de tonalité et tous les transpondeurs situés à l'intérieur de la largeur de bande de l'antenne reçoivent la retransmission. Seul le transpondeur qui reconnaît son code d'adresse retransmettra la séquence du code de tonalité après un délai précis. Le satellite répète la réponse du transpondeur. La station terrestre principale reconnaît le code d'adresse comme celui qui a été envoyé et enregistre le temps de parcours dans les deux directions du signal entre la station terrestre principale et le satellite et le temps de parcours dans les deux directions du signal entre la station terrestre principale et le transpondeur. On peut interroger en succession un nombre quelconque de transpondeurs éloignés.

Il faut connaître la position exacte des satellites afin de délimiter avec précision la position de véhicules. En raison des imperfections de leurs orbites géostationnaires, les satellites se déplacent par rapport à la terre. Par conséquent, il faut connaître les positions des satellites en temps réel (instantanément) avant de pouvoir localiser un véhicule. Pour se faire, deux méthodes sont proposées.

La première consiste à utiliser une référence terrestre (ground truth reference, GTR) qui est une station de base dont la position est précisément connue. La délimitation de

position de la station de base établie au moyen du code de tonalité est comparée avec la position connue afin de pouvoir déterminer les corrections qu'il y aura vraisemblablement lieu d'apporter aux positions des satellites. (Cette mesure sert aussi à estimer le délai de propagation décrit ci-dessus).

La deuxième méthode consiste à localiser les satellites par "trilatération", une technique qui éliminerait la nécessité d'un point de référence terrestre.

En raison de la nécessité d'avoir des mesures précises, il est proposé d'avoir recours à une combinaison de ces deux méthodes.

La technique de délimitation des positions est automatique. Environ une seconde après la transmission d'un signal d'interrogation sous forme de code de tonalité à partir de la station terrestre principale, les renseignements traités par ordinateur sortent sur imprimante, selon la présentation désirée.

5.6.3. Délimitation de positions au moyen d'un satellite à répéteur actif

Les expériences effectuées avec des avions, des automobiles et des bateaux ont démontré que la mesure active des distances au moyen de deux satellites de communication placés en orbite géostationnaire peuvent permettre de localiser les véhicules de façon précise sur de grandes superficies de la terre [1,3,7,8]. Ces mêmes satellites transmettent les communications

en téléphonie et autres communications entre l'appareil et une station terrestre.

Mais cette façon de procéder comporte un désavantage: un seul satellite est requis pour la communication, mais un deuxième satellite actif de relais doit être ajouté pour la délimitation de positions.

Un nouveau concept décrit à la référence 1 élimine cette objection. La délimitation de positions peut être accomplie par un seul satellite actif de communication et de mesure des distances. Un deuxième satellite est requis, mais seulement pour mesurer le temps d'arrivée d'un signal quelconque du satellite. Il est en orbite pour des raisons totalement indépendantes du système de délimitation des positions. Il n'a pas à recevoir ni à retransmettre de signaux pour le système de délimitation des positions.

5.6.4. Expériences sur la délimitation de positions par la méthode des codes de tonalité

Le système opérationnel MARISAT démontre que la délimitation de positions est un service pratique et efficace par rapport aux coûts dans le cas de navires [3].

Les satellites d'application technologique (application technology satellite, ATS) ATS-1, 3, 5 et 6 de la NASA ont été utilisés dans une série d'expériences sur la délimitation de positions et la communication mobile par satellite [6,7,8]. Une série d'essais ont été effectués avec une automobile en 1976.

L'observatoire radio-optique de la firme Général Electric, situé près de Schenectady, état de New York, a servi de station terrestre principale. Une deuxième station terrestre (référence terrestre) était relativement à proximité de la zone où se déplaçait le véhicule. La référence terrestre effectuait des corrections en temps réel à l'égard des positions connues des satellites et des retards de propagation causés par l'ionosphère.

Des mesures de distances en succession effectuées à partir de transpondeurs de "trilatération" fournissaient une localisation en temps réel des satellites.

Les délimitations de position ont été faites en temps réel et la marge d'erreur était d'environ 0.25 mille; 0.1 mille lorsque le système était entièrement étalonné.

En moins d'une seconde après que l'automobile ait été interrogée, l'ordinateur situé à l'observatoire en imprimait la latitude et la longitude. L'expérience comportait tous les aspects d'un système opérationnel de surveillance des positions.

La référence 3 décrit des expériences semblables organisées par la NASA et qui comprenaient cinq camions voyageant sur de longues distances dans le cadre du service ordinaire; deux jeeps de communications d'urgence de l'aviation; un hélicoptère de recherche et de sauvetage; enfin, un remorqueur sur le Mississippi.

Les canaux de communication à bande étroite utilisés dans ces expériences ont permis la transmission de séquences de

mesure de courte durée. Les délimitations de positions des véhicules obtenues étaient précises à quelques centaines de pieds près.

5.7. Composants du système

Les principaux domaines d'étude en ce qui a trait à la conception du système sont les suivants: 1) le choix d'une technique d'accès multiple; 2) la modulation; 3) le contrôle du réseau; 4) la mise au point de l'équipement devant fonctionner dans l'espace, une attention particulière devant être accordée aux dimensions de l'antenne. L'accès multiple par répartition dans le temps, AMRT (time-division multiple access, TDMA) est recommandé pour les liaisons partant des stations terrestres et dirigées vers les terminaux mobiles, tandis que l'accès multiple par répartition en fréquence, AMRF (frequency-division multiple access, FDMA) semble mieux convenir pour les liaisons partant des postes mobiles et dirigées vers les stations terrestres [18,24].

Une étude de la technique de modulation numérique démontre qu'elle comporte plusieurs avantages par rapport à la modulation de fréquence analogique [13]. On aura vraisemblablement recours à la modulation analogique dans les premiers systèmes (surtout afin d'assurer une compatibilité avec les systèmes terrestres), mais on s'attend à ce que la modulation numérique soit de plus en plus utilisée, à mesure que les prix de l'équipement numérique baissent.

5.7.1. L'émetteur-récepteur mobile et la station terrestre

Les émetteurs-récepteurs mobiles proposés du système de communication mobile par satellite ont les mêmes caractéristiques que les émetteurs-récepteurs mobiles actuellement utilisés. Ils comprendront aussi un synthétiseur de fréquences (ainsi qu'un dispositif de logique fonctionnant au moyen d'un microprocesseur) et un module servant à traiter une fréquence de référence.

La combinaison synthétiseur de fréquences-dispositif de logique scrutateur remplit les fonctions de l'émetteur-récepteur mobile; la fréquence de référence sert de point de repère pour le synthétiseur et son niveau sert aussi à régler le pouvoir d'émission des émetteurs-récepteurs.

Voici les différences entre les stations terrestres et les terminaux mobiles:

- 1) l'élément haute fréquence, HF (radio frequency, RF) des émetteurs-récepteurs mobiles fonctionnent sur bande UHF, tandis que celui de la station terrestre fonctionne sur bande d'hyperfréquences (Ku);
- 2) les émetteurs-récepteurs mobiles utilisent de petites antennes tandis que les stations terrestres utilisent une antenne à réflecteur de 5 à 10 mètres de diamètre;
- 3) l'ordinateur du système de la station terrestre est remplacé par un dispositif de logique fonctionnant au moyen de microprocesseur dans le cas des terminaux mobiles;

- 4) les sources de fréquences des terminaux mobiles ont une stabilité variant de 0.002% à 0.005%, tandis que les sources de fréquences des stations terrestres ont une stabilité supérieure à une partie sur 10.

Ces différences contribuent à faire de l'émetteur-récepteur mobile un appareil économique.

5.7.2. Antenne multifaisceaux du satellite

La principale particularité du satellite est une antenne de grande dimension, probablement une antenne à réflecteur parabolique possiblement à alimentation décalée. Un tel réflecteur peut atteindre un diamètre de 200 m ce qui constitue actuellement la limite dans ce domaine. Ces systèmes d'antennes ne doivent pas être plus petits que certaines dimensions afin de pouvoir assurer l'interconnexion avec les petits terminaux mobiles et aussi à cause de la nécessité d'avoir un nombre suffisant de faisceaux pour satisfaire la population d'utilisateurs.

La deuxième grande particularité est l'antenne multifaisceaux qui est en mesure de créer simultanément des faisceaux multiples, chacun pouvant être formé à partir d'un certain nombre de plus petits faisceaux, selon le principe de la superposition. Il est préférable d'utiliser les faisceaux constitutifs les plus étroits possible, en les rapprochant le plus possible. On obtient ainsi de très grandes antennes et un nombre élevé de faisceaux constitutifs, chacun devant être dirigé et alimenté individuellement.

Ces contraintes limitent à 200 le nombre de faisceaux qui peuvent être utilisés pour illuminer les Etats-Unis continentaux.

La largeur de faisceau minimale possible de l'antenne du satellite est une fonction complexe du diamètre de l'antenne, de la fréquence d'exploitation, de la structure de l'antenne, des matériaux, de l'environnement thermique, de la technique d'orientation du faisceau et du système de contrôle de l'altitude.

Une capacité démontrée de l'ordre de 0.01° à 0.05° utilisant les techniques d'orientation de la monopulsation et de l'interféromètre, donne une indication de la limite minimale de la largeur de faisceau qui régit le nombre total possible de faisceaux [25].

La troisième particularité importante est le grand nombre de canaux émetteurs et récepteurs. Un exemple de cette particularité est l'utilisation de deux bandes de 4 MHz (une vers le satellite, l'autre vers la terre) et un espacement des canaux de 33.3 KHz qui donne de 240 à 6000 canaux lorsque le nombre de faisceaux varie de 8 à 200.

La quatrième grande particularité du satellite est l'ensemble de matrices de commutation, qui assurent une interconnexion complète entre toute paire de canaux en duplex. Les matrices initiales à faisceau unique s'occupent du trafic qui se limite à un seul faisceau. Lorsque la commutation de faisceaux est utilisée, des matrices secondaires sont requises pour s'occuper

du trafic entre les faisceaux. Un ordinateur est aussi requis pour traduire les renseignements contenus dans le signal d'appel dirigé vers le satellite, en information permettant la communication et la commutation. La figure 5.8 démontre les contraintes de la conception du vaisseau spatial [29].

L'antenne de communication INTELSAT-V utilise la technique d'antenne à multifaisceaux qui comporte des réflecteurs distincts à alimentation décalée, pour la réception et la transmission. L'antenne est dotée d'un réflecteur de 8 pieds, alimentée par un ensemble de 78 sources d'alimentation. Pour le concept T/LMSS, il faudra des antennes de satellite encore plus complexes, ayant certaines caractéristiques telles que la recombinaison (reconfigurability), soit la capacité de régler la forme des faisceaux par commande, afin de répondre aux besoins en évolution des utilisateurs et d'éviter l'interférence.

La référence 12 décrit une antenne multifaisceaux à bande X et à commutateur multiple mise au point pour un satellite géostationnaire dont la configuration de la radiation de couverture variable peut être contrôlée à partir de la terre. L'antenne se compose d'une lentille à système de guide d'ondes, illuminée par un ensemble d'alimentation de 19 éléments. Il existe une technique pour le calcul des propriétés de radiation de l'antenne où ce calcul correspond très bien aux données mesurées expérimentales.

Une charge utile de 18 faisceaux multiples pour la communication entre satellite et terminaux mobiles a été mis au point,

construit et mis à l'essai [11].

Cette charge a été analysée en tenant compte de l'efficacité des communications, de la masse, de la consommation énergétique et de la fiabilité. A la suite de ces analyses, la configuration multifaisceaux dont les faisceaux se forment à une fréquence intermédiaire (FI) (30 MHz dans le présent cas) et une conversion en amont cohérente (upconversion) et une amplification linéaire du pouvoir à haute fréquence, HF (radio frequency, RF), soit de 1535 à 1660 MHz, a été choisie comme étant la plus appropriée.

En choisissant une formation de faisceaux à fréquence intermédiaire, tout le traitement des faisceaux pourrait être accompli au moyen d'une faible masse et en utilisant peu de pouvoir, en ayant recours à la technologie des plaquettes avec circuit imprimé (PCB).

A la suite d'une vaste enquête sur les différents types d'éléments d'antenne, l'élément à retour d'arc court est généralement choisi comme étant le plus efficace pour assurer une couverture globale à partir d'une position géostationnaire.

Différentes méthodes pour assurer la linéarité des amplificateurs à haute puissance ont été étudiées et le problème a dû être réglé à l'intérieur même du dispositif à transistors.

18 amplificateurs de puissance ont été utilisés pour chaque faisceau de la matrice formatrice de faisceaux et 18 convertisseurs en amont (upconverters) servant à convertir la FI de 30 MHz à 1.5 GHz, ont été utilisés. Ils effectuent la conversion

des amplificateurs de puissance linéaires, provenant de la matrice et destinés à la haute fréquence (radio frequency).

Cette expérience démontre qu'il est possible de mettre au point une charge utile constituée d'un ensemble puissant de faisceaux multiples pour être utilisé dans le cadre d'un système global de communications avec des terminaux mobiles.

La possibilité de faire entrer une antenne de grande dimension à l'intérieur d'un véhicule de lancement est un facteur qui limite les possibilités d'application des antennes à faisceaux multiples, tandis que l'unité d'alimentation et les considérations en matière de conception thermique sont les principaux obstacles dans la conception du satellite.

5.7.3. Réutilisation des fréquences

En raison de la forte utilisation du spectre, la réutilisation des fréquences et le recours à des lignes auxiliaires comme dans le cas des systèmes cellulaires terrestres, ont été proposés pour le système T/LMSS. Le nombre de faisceaux requis pour couvrir la région désirée dépend de la réutilisation des fréquences voulue, qui est une fonction de la charge du trafic, c'est-à-dire, le nombre de canaux requis, et de la largeur de bande disponible. En général, une largeur de bande B peut être subdivisée en K sous-bandes ou groupes, chacun étant réutilisé M nombre de fois. Alors, la largeur de bande réelle, B_{eff} , et le nombre de faisceaux, N , sont exprimés comme suit:

$$B_{\text{eff}} = M \cdot B$$

$$N = M \cdot K$$

Le nombre K est une variable de conception: pour un plan régulier d'attribution de fréquences dans un système cellulaire, on ne peut lui donner que certaines valeurs, par exemple, $K = 3, 4, 7$, etc. Lorsque $K = 3$, l'espacement entre les cellules utilisant la même fréquence n'est pas grand, ce qui crée une assez grande interférence de canaux adjacents, à moins que les lobes latéraux de l'antenne soient rigoureusement contrôlés. On a conclu qu'un facteur de réutilisation des fréquences de 3 est possible pour le système de communication mobile-terrestre-satellite si on supprime au moins 30 dB des lobes latéraux de l'antenne [4,25]. La figure 5.2 donne les configurations lorsque $K = 4$ et $K = 7$ ainsi qu'un système lorsque $K = 3$, qui couvre les Etats-Unis continentaux de 56 faisceaux, chacun ayant une largeur d'environ 0.75 degrés [13].

5.7.4. Traitement de la voix et des signaux

Un système de communication mobile-terrestre-satellite est caractérisé par la variété des genres d'information à transmettre. Parmi les services possibles, mentionnons la transmission de conversations et de données, la délimitation de positions, la surveillance et le contrôle des véhicules. Comme il a été précédemment mentionné, le système numérique

permettrait l'utilisation la plus efficace du satellite, bien qu'on puisse s'attendre à ce que le système analogique soit utilisé les premières fois.

Afin de permettre le plus de souplesse possible à l'utilisateur mobile tout en maintenant les coûts à un niveau peu élevé, de petites antennes à gain faible et à large faisceau sont requises. Le choix d'une telle antenne comporte des obstacles sérieux, principalement la présence de trajets multiples spéculaires provenant du sol, des immeubles et du relief environnant qui causent un degré considérable d'interférence "inter-symboles".

Le trajet direct entre le terminal mobile et le satellite est caractérisé par les pertes de transmission, les retards, la scintillation, l'absorption atmosphérique et le décalage Doppler. Par contre, le trajet multiple est caractérisé par sa puissance relative, son retard relatif, par le décalage et le retard Doppler relatifs et la fonction de dispersion Doppler.

On a mis au point un simulateur de canaux pour la bande L afin de rendre possible l'établissement de tout coefficient entre le trajet direct et les trajets multiples. Le simulateur reproduit avec précision un véritable canal à trajets multiples et donne une évaluation réaliste des données ayant trait au rendement dans des conditions opérationnelles [15].

Il existe plusieurs moyens de régler le problème du trajet multiple. L'utilisation d'un modulateur à bande très

large serait d'un coût trop élevé, tandis que l'utilisation d'une combinaison de périodes de temps intercalées créerait des retards inacceptables aux utilisateurs des canaux téléphoniques. Les bonds de fréquences bit par bit constitueraient une mauvaise utilisation de la largeur de bande, tandis que les bonds de fréquences ne se prêtent pas bien aux communications téléphoniques.

Selon une nouvelle technique proposée à la référence 24, on utilise un processeur de signal fonctionnant par impulsions de salves, qui est transparent au genre de renseignements qui sont transmis. Pour les systèmes de communication par satellite, il faut habituellement prévoir des marges d'évanouissement assez importantes de manière à combattre cet évanouissement, mais la présente technique utilise l'information fournie pour améliorer le rendement.

5.8 Marché - Coûts

Le secteur du marché qui est d'un intérêt particulier pour le système de communication mobile terrestre-satellite (T/LMSS) comprend une partie de la radio pour la sécurité et les services spéciaux (Safety and Special Radio, SSR), dont la valeur du marché prévue est de \$2.9 milliards en 1985 (dollars US). Quant aux services à porteuse commune desservis par radiotéléphonie mobile, le marché prévu est évalué à environ \$62 millions (US) en 1985, mais on s'attend à ce qu'il connaisse une croissance rapide au cours des 5 à 10 prochaines années.

Certaines statistiques canadiennes sont disponibles [19].

Dans les régions urbaines et aménagées du Canada, l'utilisation des communications mobiles terrestres est comparable à celle des Etats-Unis. Toutefois, au Canada on compte 10 terminaux mobiles pour 1000 habitants, tandis qu'aux Etats-Unis, on en compte 20.

Pour 1975, le marché canadien pour l'équipement privé de répartition des communications était évalué à \$78 millions; le marché du téléphone public en système mobile terrestre était d'environ \$7 millions et celui de l'équipement de téléappel, de \$5 millions approximativement.

5.8.1. Marché possible pour les satellites

Le marché possible constitue la fraction du marché global que pourrait desservir efficacement la technologie des satellites, par exemple, fournir un service nécessaire dans les régions où il y a peu de routes, à un prix abordable si on le compare au prix des systèmes terrestres concurrentiels. Les genres d'utilisateurs éventuels sont expliqués dans l'introduction du présent chapitre; il n'y aurait donc pas lieu de répéter le tout ici.

D'après un échantillon d'enquête sur les abonnés de téléphones mobiles et les propriétaires de stations de base, la demande de services par habitant est à peu près la même dans les régions à forte population (urbaines) et dans les régions peu habitées (rurales) [21].

Par conséquent, on peut supposer un modèle de demande pour le système de communications mobiles, cette demande étant fondée sur la densité de population. D'ici 1986, la radiotéléphonie mobile sera utilisée par environ 0.1% de la population des E.-U., si l'on peut en croire les extrapolations relatives à la croissance de la population et de la demande d'équipement mobile.

La figure 9, établie à partir de paramètres typiques sur l'utilisant actuelle de la communication mobile, démontre la répartition de la demande. On y indique la superficie qui peut être desservie, selon le taux de disponibilité précisé (blocage de canaux de 2%), comme une fonction de la densité des systèmes mobiles. Le paramètre des courbes est le nombre de canaux requis pour desservir une région donnée.

5.8.2. Répartition et proportion de la population desservie par satellite

Les systèmes cellulaires terrestres sont efficaces par rapport au coût dans les régions urbaines à forte densité de population et ne le sont pas dans les régions peu habitées. On estime que les systèmes terrestres répondront aux besoins des régions métropolitaines où 80% de la population est établie, mais qui comprend seulement 10% de la superficie des Etats-Unis contigue.

La proportion de 20% de la population qui ne profitera pas des services d'un système terrestre représente plus de 40 millions de personnes.

On a effectué une évaluation état par état de la population des régions continues. Pour se faire, tout centre de plus de 200,000 habitants a été soustrait de la population de chaque état. Le reste de la population a été divisé en fonction de la superficie de chaque état afin de déterminer la densité de population, D_p , en termes du nombre de personnes.

Un facteur d'utilisation, P_s , pour les régions non métropolitaines a été déterminé pour chaque état. Ce facteur tient compte des différences de superficie, de densité de population et de répartition de la population pour chaque état. Il est établi à partir de modèles de disponibilité du système terrestre à la grandeur de l'état.

Si la moyenne de la densité de population non urbaine d'un état excède 200 habitants par mille carré, on suppose que l'état entier est desservi par un système terrestre et la probabilité qu'un appel soit transmis par satellite est nulle. Donc $P_s = 0$.

Si la densité de la population diminue, la probabilité qu'elle soit complètement desservie par des systèmes terrestres diminue également; par conséquent, il y a une augmentation du facteur d'utilisation, P_s . Il n'y a pas de diminution linéaire par rapport à la population puisque les services d'un système terrestre s'étendent habituellement au-delà des concentrations de population qui sont assez fortes pour susciter l'investissement dans un système terrestre.

A la grandeur d'un état, [4]

$$P_s \left\{ \begin{array}{l} = \left(\frac{200 - D_p}{200} \right)^n \\ = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} n = 2 \quad \text{si } D_p \leq 200 \\ \text{si } D_p \geq 200 \end{array}$$

La densité moyenne de la population qui sera desservie par l'entremise d'un satellite (par opposition à la population de résidents non métropolitaines) est obtenue en multipliant P_s par D_p . Si on fait la somme de ces résultats pour toutes les régions contigues, on obtient une population de 44 millions.

5.8.3. Coûts du système

5.8.3.1. Analyse Générale

La référence 29 donne les détails des coûts du système lorsque le nombre de faisceaux varie de 8 à 200 et que le nombre d'utilisateurs augmente de 6,000 à 150,000 (voir tableau 5.1 ci-dessous)

TABLEAU 5.1 - Nombre de faisceaux par rapport à la population d'utilisateurs

Nombre de faisceaux	Nombre d'utilisateurs
8	6,000
18	13,000
32	24,000
72	54,000
200	150,000

Note: Il s'agit de faisceaux de la formule $2N^2$; on suppose qu'il y aura 25 utilisateurs par canal, que la séparation entre les canaux

sera de 33.3 KHz, que le facteur de réutilisation des fréquences sera de 4 et enfin, que 4 MHz sont alloués pour les liaisons terre-satellite, la même chose pour la communication satellite-terre.

La méthode d'établissement des coûts utilisée et les prévisions de coûts données manquent d'exactitude, mais constituent les meilleures estimations disponibles.

Voici les éléments précis de l'engin spatial pour lesquels les coûts ont été établis:

1. lancement en orbite géostationnaire;
2. déploiement de l'antenne, y compris sa source d'alimentation;
3. le transpondeur et le dispositif de commutation;
4. le système d'alimentation; et
5. la structure de l'engin spatial

Lancement par la navette spatiale

Le lancement par navette spatiale qui comprend une fusée additionnelle pour placer le satellite en orbite géostationnaire est évalué à un montant fixe de \$35 millions pour tout satellite ne dépassant pas une certaine grandeur intermédiaire, puis augmente par tranches de \$35 millions, selon l'augmentation des dimensions du satellite.

Antenne à déploiement

Les coûts de l'antenne selon son diamètre sont indiqués à la figure 5.10. Ces coûts comprennent le prix estimatif du réflecteur de l'antenne et de la source d'alimentation à 1 GHz.

Transpondeur et dispositif de commutation

Le coût du transpondeur de base et du dispositif de commutation est estimé, pour 18 faisceaux et des niveaux de puissance inférieurs à 1W, à environ \$225,000 par faisceau et augmente linéairement par rapport au nombre de faisceaux.

Système d'alimentation

On estime que le coût du système d'alimentation du satellite varie entre \$1.5 et \$7.0 millions lorsque la capacité varie de 2 kVA à 60 kVA.

Structure de l'engin spatial

On estime que le coût du satellite augmente linéairement de \$13 millions à \$45 millions, lorsque le nombre de faisceaux augmente de 18 à 200.

En général, les frais de lancement du satellite ne dépendent pas du nombre de faisceaux ou d'utilisateurs. Les coûts relatifs à l'alimentation du satellite sont relativement peu élevés et n'exercent aucune influence sur ce paramètre, tandis que le coût de l'antenne augmente en fonction de la racine carrée du nombre d'utilisateurs.

Ainsi, comme le nombre de faisceaux ou d'utilisateurs augmente, le coût par utilisateur de l'élément spatial du système diminue, jusqu'à une valeur où le coût demeure constant.

Les coûts de l'émetteur-récepteur terrestre, y compris l'entretien pour une durée utile de l'appareil estimée à 7 ans sont d'environ \$4,500 par appareil.

En réunissant toutes ces estimations, on obtient un taux de \$91 par utilisateur, par mois, pour un système fonctionnant sur la bande 900 MHz et qui utilise 200 faisceaux (150,000 utilisateurs).

Les résultats généraux de cette étude sont indiqués à la figure 5.11, où le coût mensuel par utilisateur est donné comme une fonction du diamètre de l'antenne.

Les coûts par utilisateur semblent surtout dépendre du nombre de faisceaux (et par conséquent, du nombre d'utilisateurs) et non pas de la fréquence. Un système qui fonctionnerait au moyen d'une bande de 150 MHz constituerait une exception mais uniquement parce que les largeurs de bandes de 3 dB dépassent la portée de diamètre étudiée et donc, le nombre de faisceaux, ou d'utilisateurs, est limité.

A partir de cette observation, on a construit la figure 5.12 qui indique le coût par utilisateur, par mois, en tant que fonction du nombre de faisceaux fourni. D'après ce diagramme, on peut supposer que le choix de fréquences ne constitue pas un facteur critique dans les coûts pour l'utilisateur. De plus, on peut supposer que les réductions de coûts sont marginales lorsqu'on a recours à un système de plus de 100 faisceaux.

Le principal élément d'incertitude dans ces estimations est attribuable au manque de précision des estimations de coûts faites dans le cadre de l'étude. Pour comprendre l'effet du manque d'exactitude lorsqu'on considère les coûts, deux autres exercices ont été effectués avec des configurations de 900 MHz.

Premièrement, on a analysé l'effet sur les coûts pour l'utilisateur de doubler les coûts pour le secteur spatial et deuxièmement, on a examiné les incidences que comporte le fait de doubler les coûts des opérations terrestres. Ces résultats sont présentés à la figure 5.13. Ce graphique démontre que lorsque le nombre d'utilisateurs (faisceaux) est faible les coûts du secteur spatial ont tendance à dominer les coûts de l'utilisateur. Par contre, lorsque le nombre d'utilisateurs (faisceaux) est élevé, les coûts des opérations terrestres ont tendance à prédominer sur les coûts de l'utilisateur.

Même si les estimations de coûts pour le secteur spatial ou celui des opérations terrestres manquent d'exactitude, le coût mensuel par utilisateur demeure environ à \$150, lorsque le diamètre de l'antenne est de 50 à 60 m.

5.8.3.2. Autres estimations

On évalue à \$60 millions par année les coût de l'élément spatial du système à 69 faisceaux proposé à la référence 4 (décrit à la p. 5.19). Ces coûts comprennent deux satellites en orbite, un satellite de réserve sur la terre, l'amortissement de la mise au point du système, les frais d'aménagement et d'exploitation des installations terrestres, l'assurance et le coût d'obtention de fonds. Les abonnés, au nombre d'environ 200,000, paieraient environ \$25 par mois chacun. Ce montant ne comprend pas le coût de l'équipement de l'utilisateur, ni les autres coûts relatifs aux systèmes.

Le système T/LMSS proposé à la référence 30 et présenté à la page 5.20 comprend une étude détaillée des coûts de sept systèmes par satellite possibles, dont les antennes ont des diamètres variant de 9 à 64 mètres et qui desservent des populations d'utilisateurs différentes. Pour les utilisateurs dont le G/T est de -22 dB/K, le coût total du service serait d'environ \$100 par mois, pour 4 millions d'utilisateurs. Le coût du service comprend le coût des terminaux mobiles, des stations de contrôle terrestres, du satellite, des réparations et de l'entretien, ainsi que les frais d'exploitation. Il s'agit d'estimations provisoires qui devront subir certaines modifications à mesure que les concepts seront mis au point et que des données plus précises à l'égard des coûts seront disponibles.

5.9 Conclusions

La plupart des marchés urbains sont ou seront desservis de façon efficace au moyen de systèmes terrestres (cellulaire ou autre). La demande par habitant pour les téléphones mobiles est à peu près semblable dans les régions à forte densité de population (urbaines) et dans les régions peu habitées (rurales). Il existe donc un marché éventuel important, situé sur une vaste région géographique qui ne reçoit pas un service satisfaisant. On considère que les satellites constituent une possibilité efficace par rapport aux coûts, où leurs services s'ajouteront aux systèmes terrestres pour donner un réseau intégré qui utilise autant le système terrestre que le satellite pour fournir un

service à l'échelle du pays et qui coûte le moins cher possible.

De plus, les satellites possèdent une flexibilité qui leur est propre et qui leur permet la capacité de couverture requise pour répondre aux besoins du service mobile pour la sécurité publique (Public Safety) et les situations d'urgence.

Les expériences effectuées avec des satellites à capacité limitée et un petit nombre de véhicules ont démontré que les communications mobiles à l'aide de satellites constituent un système réalisable et ont exposé le concept et ses possibilités à divers utilisateurs éventuels. On a notamment démontré la délimitation automatique de la position des véhicules à quelques centaines de pieds près.

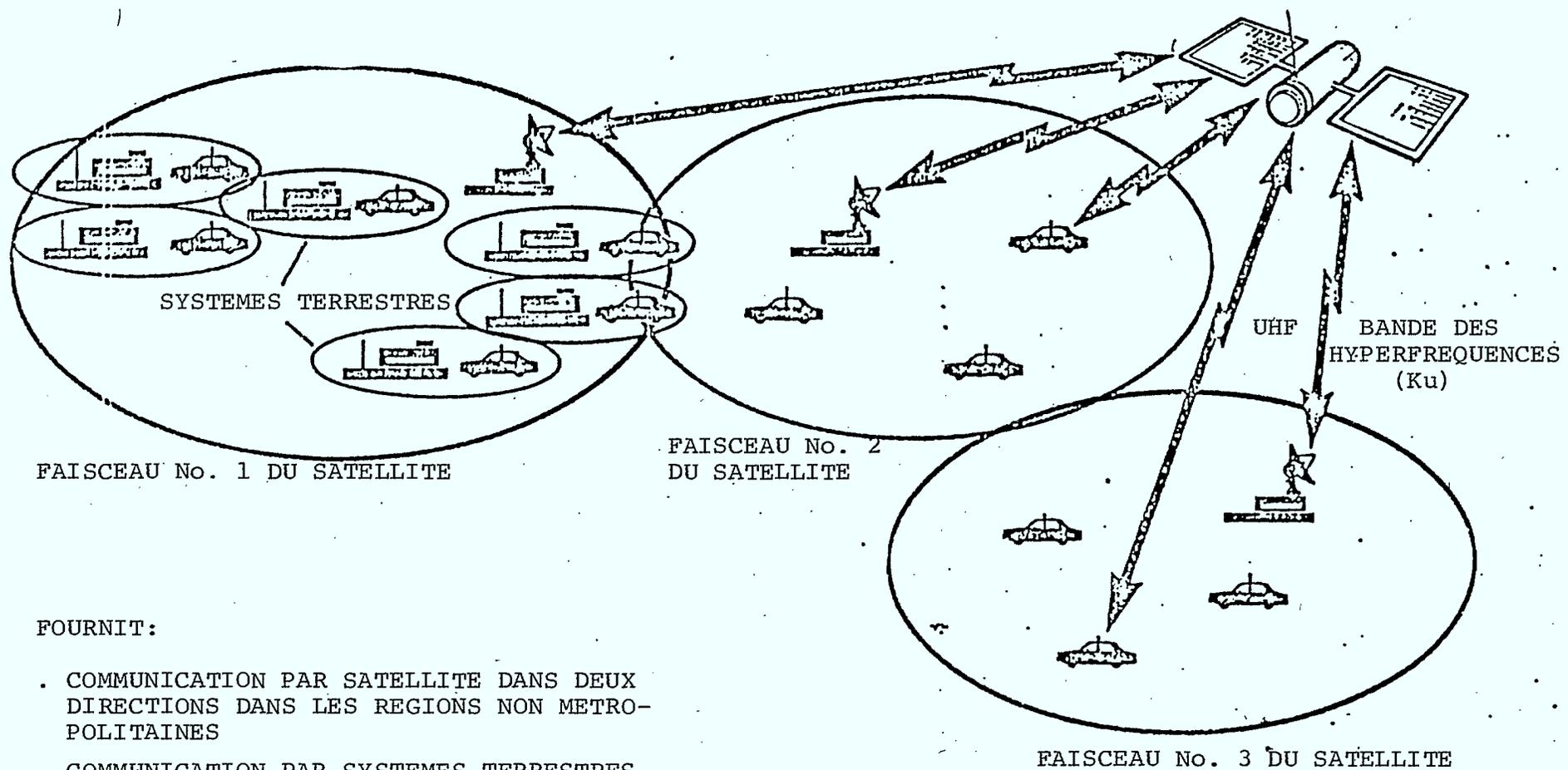
La réutilisation des fréquences et l'utilisation de lignes auxiliaires est possible avec un système comprenant des satellites dotés d'antennes à ouverture large et à faisceaux multiples. Ces caractéristiques assureront une efficacité d'utilisation des canaux, comme elles le font pour le système cellulaire terrestre.

La croissance des communications mobiles a été gênée par l'utilisation inefficace du spectre. Il faudra que le satellite fasse preuve de son efficacité en ce qui a trait à l'utilisation du spectre dans les régions éloignées et il faudra déterminer comment procéder à son intégration efficace au réseau terrestre.

La mise en oeuvre d'un système exploité par le secteur privé ne constitue pas une entreprise commerciale attrayante au moment actuel puisque plusieurs aspects technologiques importants nécessitent une mise au point et une mise à l'essai plus poussées [1].

La valeur possible des communications mobiles passant par satellite semble assez importante pour justifier la mise au point des techniques requises, ainsi que le lancement d'un engin afin de mettre à l'essai les techniques et permettre aux utilisateurs éventuels d'évaluer le système sur une assez longue période de temps.

Parmi les éléments techniques clés qu'il s'agit de mettre au point, il convient de mentionner des grands amplificateurs de puissance linéaires et des antennes à faisceaux multiples pour engins spatiaux qui sont plus complexes que celles mises au point jusqu'à présent. Il faudra aussi trouver un moyen d'effectuer la commutation de messages entre les faisceaux du satellite, bien que l'acheminement terrestre des appels entre les empreintes des faisceaux pourrait constituer une solution acceptable. Il est également d'une importance capitale de mieux comprendre le milieu de propagation espace-terrestre et de mettre au point des antennes simples pour les terminaux mobiles terrestres.



FAISCEAU No. 1 DU SATELLITE

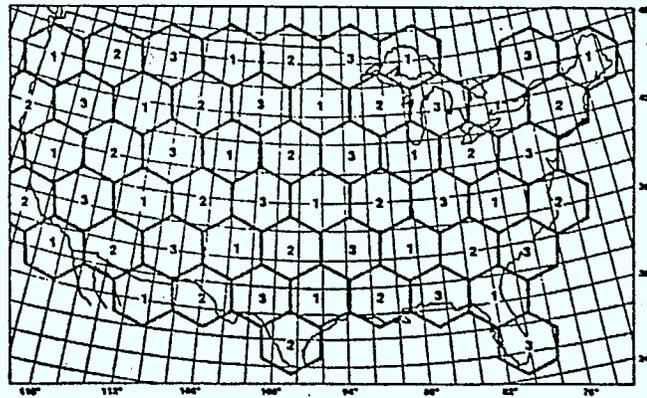
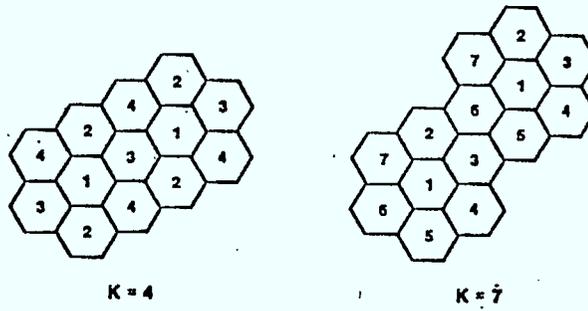
FAISCEAU No. 2
DU SATELLITE

FAISCEAU No. 3 DU SATELLITE

FOURNIT:

- COMMUNICATION PAR SATELLITE DANS DEUX DIRECTIONS DANS LES REGIONS NON METROPOLITAINES
- COMMUNICATION PAR SYSTEMES TERRESTRES DANS DEUX DIRECTIONS DANS LES REGIONS METROPOLITAINES
- LIAISON PAR SATELLITE ENTRE LES REGIONS

Fig. 5.1 Système de communication mobile intégré terrestre-satellite (T/LMSS)



Couverture avec 59 faisceaux

Fig. 5.2 Plans de Réutilisation des fréquences

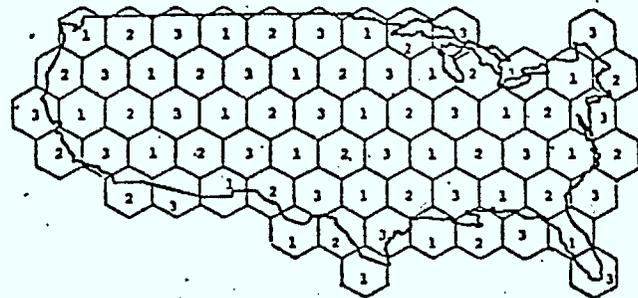


Fig. 5.3 Couverture avec 69 faisceaux

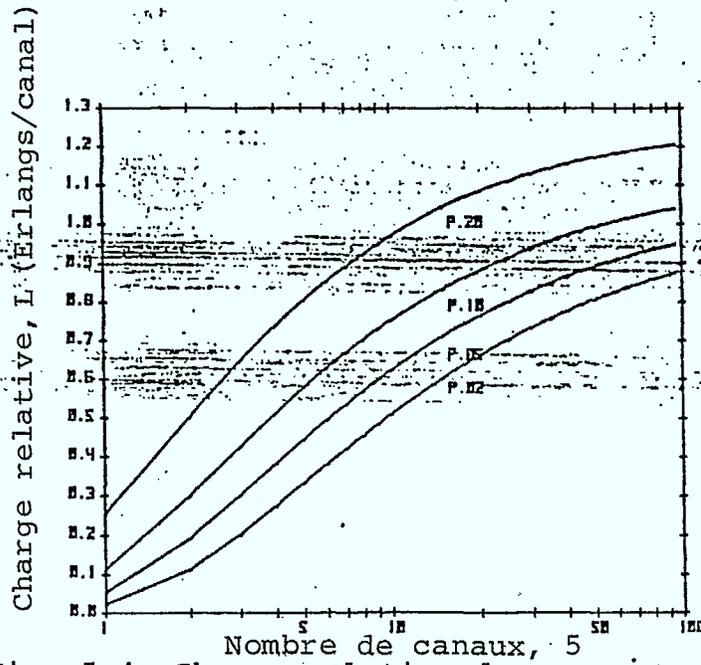


Fig. 5.4 Charge relative des canaux par rapport au nombre de canaux

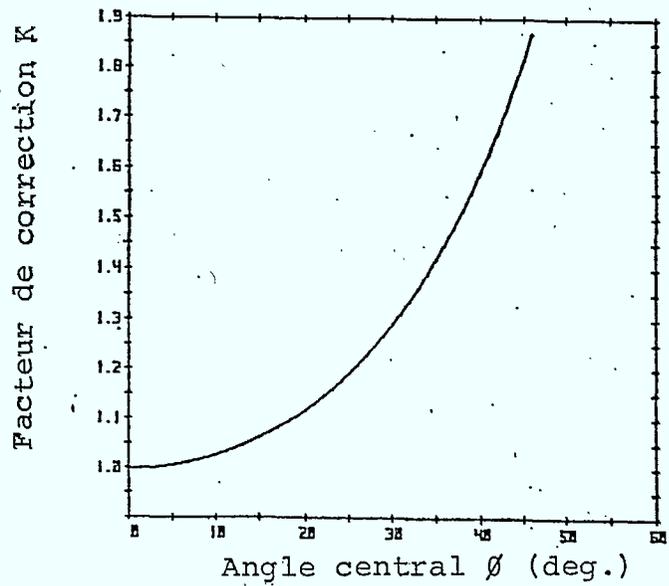


Fig. 5.5. Facteur de correction pour l'angle terrestre central

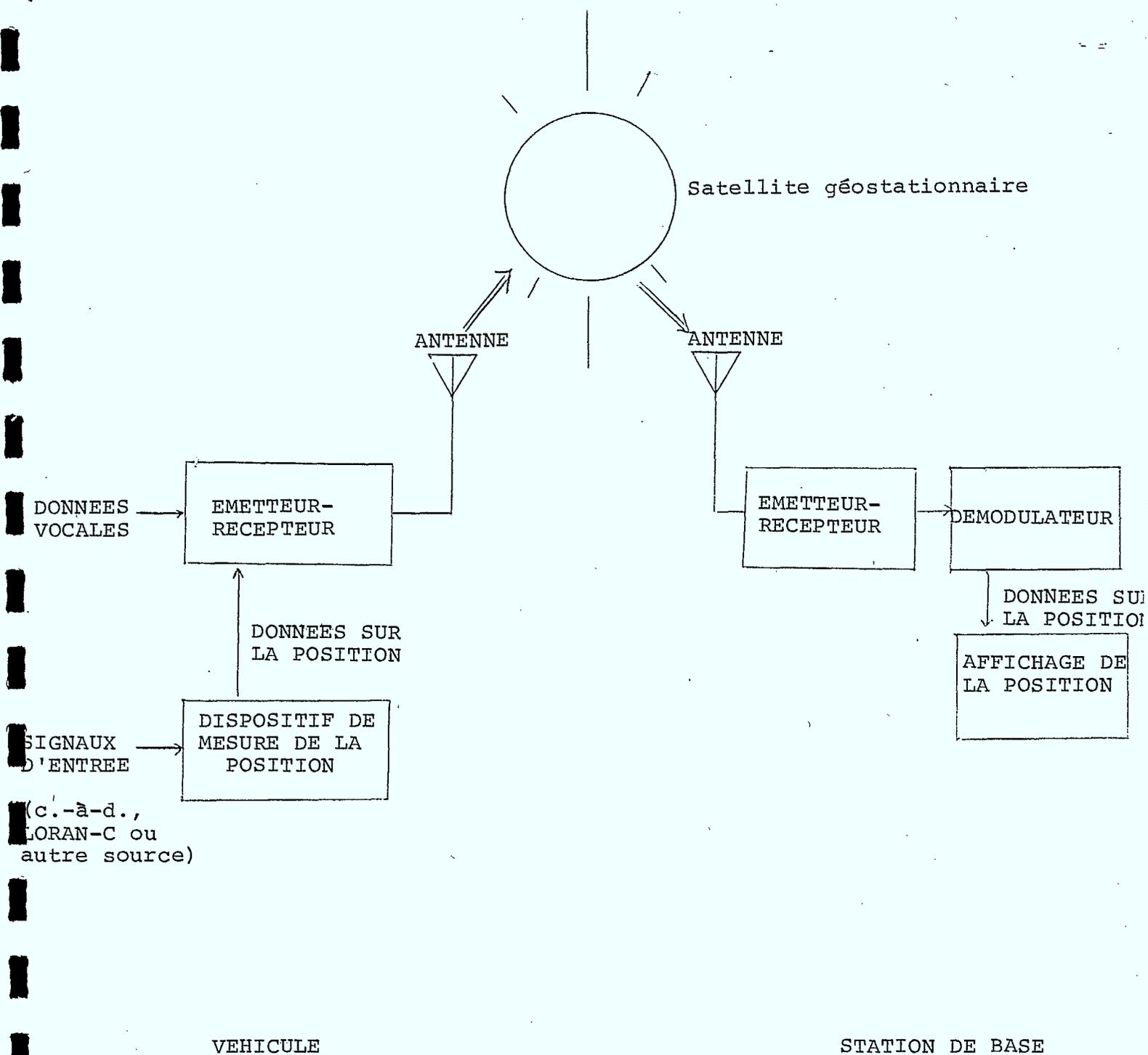


Fig. 5.6 Concept de base d'un système de localisation sur une vaste région

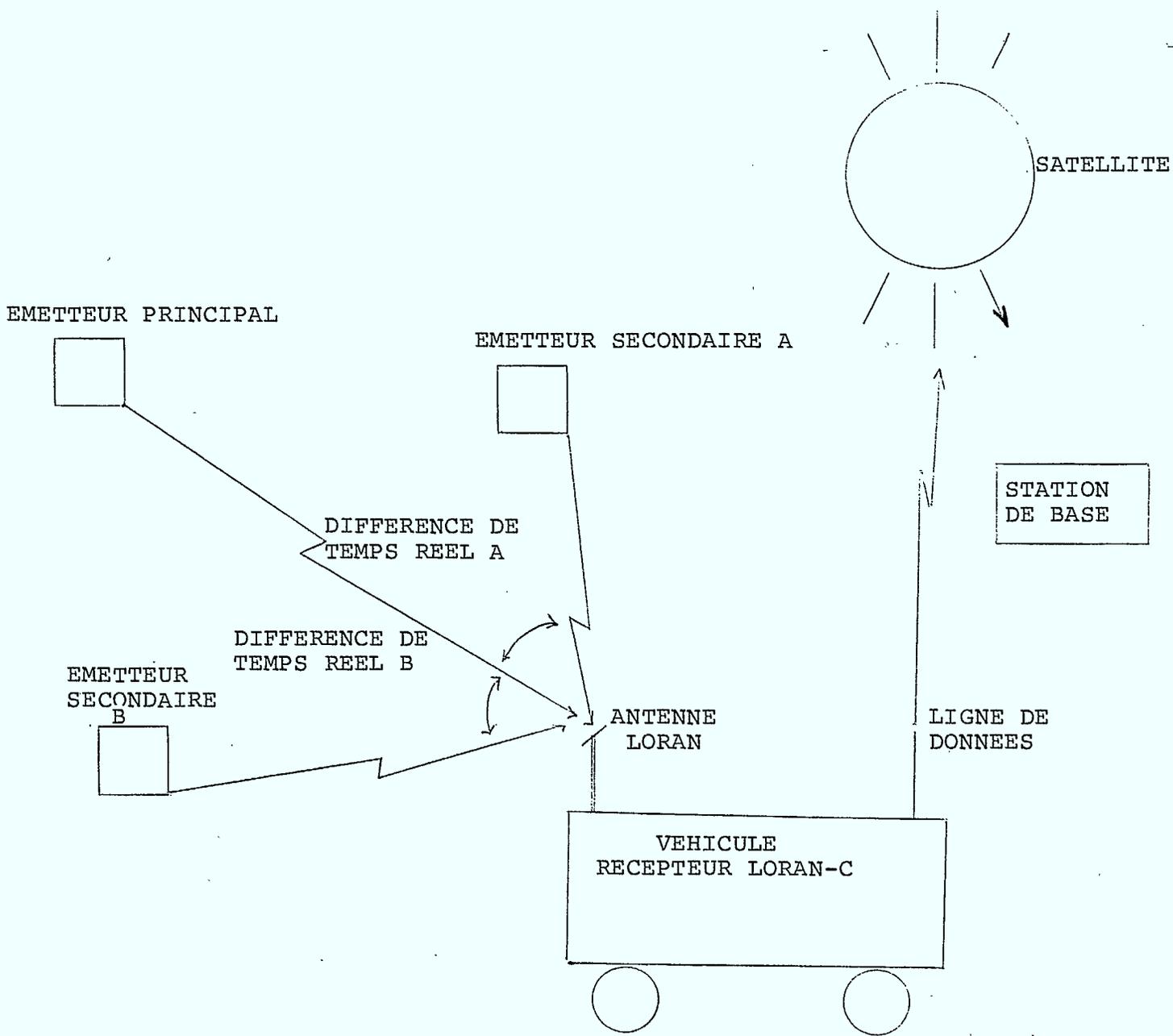


Fig. 5.7 Concept LORAN-C

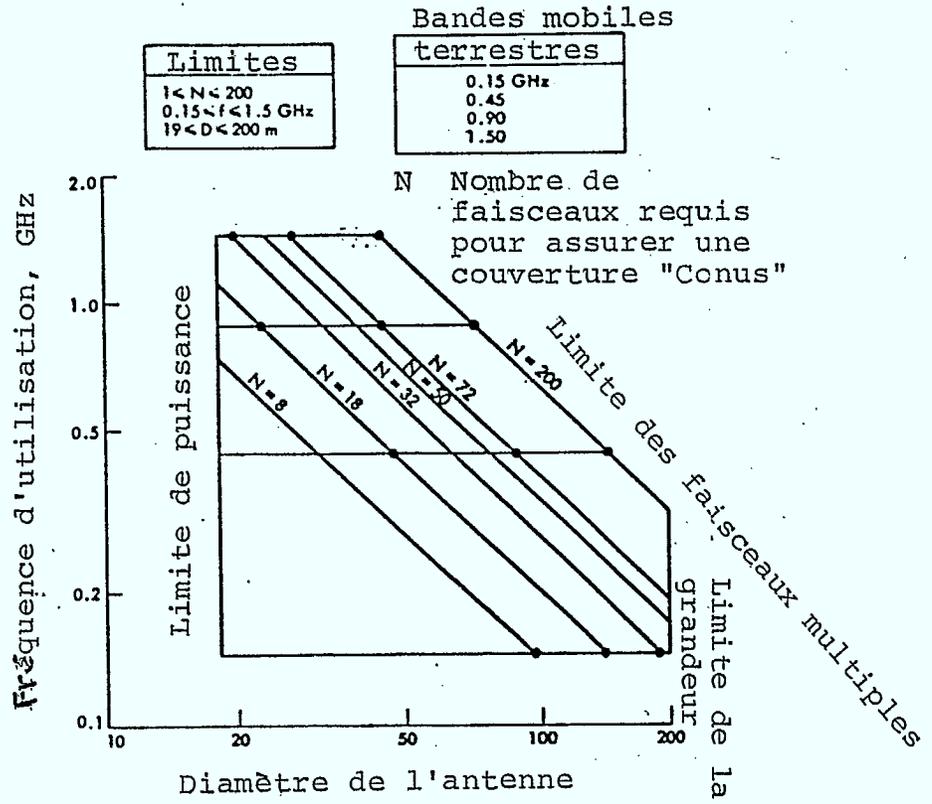
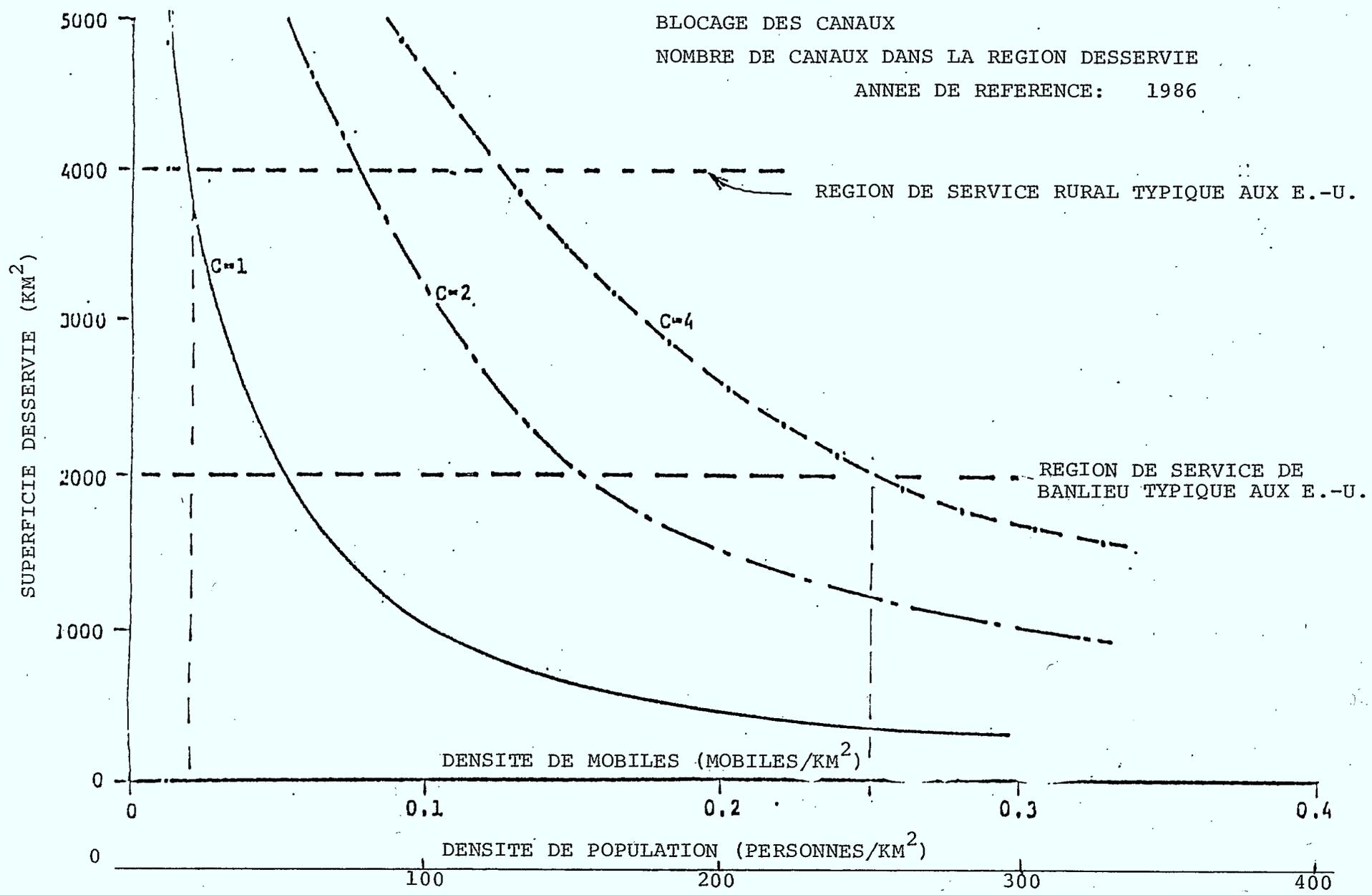


Fig. 5.8 Limites des paramètres

NOMBRE MOYEN DE MOBILES ACTIFS/NOMBRE TOTAL DE MOBILES =0.2
 NOMBRE MOYEN DE MOBILES ACTIFS/CANAL =20
 BLOCAGE DES CANAUX =2%
 NOMBRE DE CANAUX DANS LA REGION DESSERVIE = C
 ANNEE DE REFERENCE: 1986



5.64

Fig. 5.9 Superficie en fonction de densités de mobiles et de populations

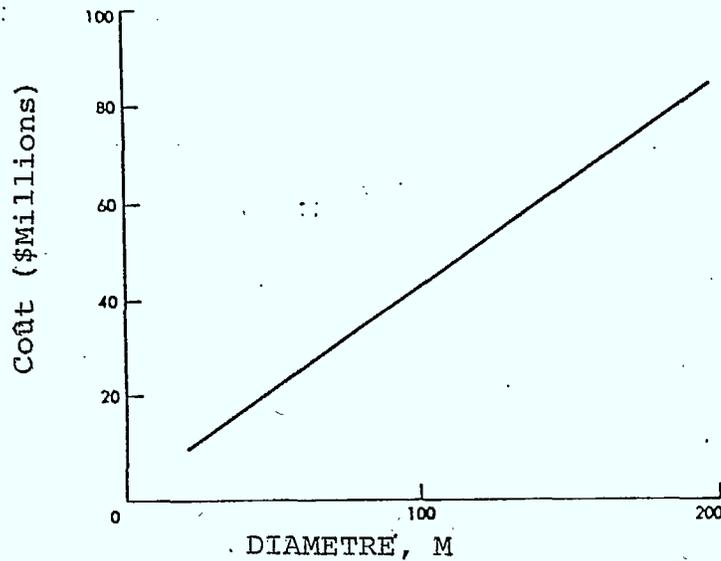


Fig. 5.10 Estimation du coût d'une antenne à déploiement (Dollars 1974) (US)

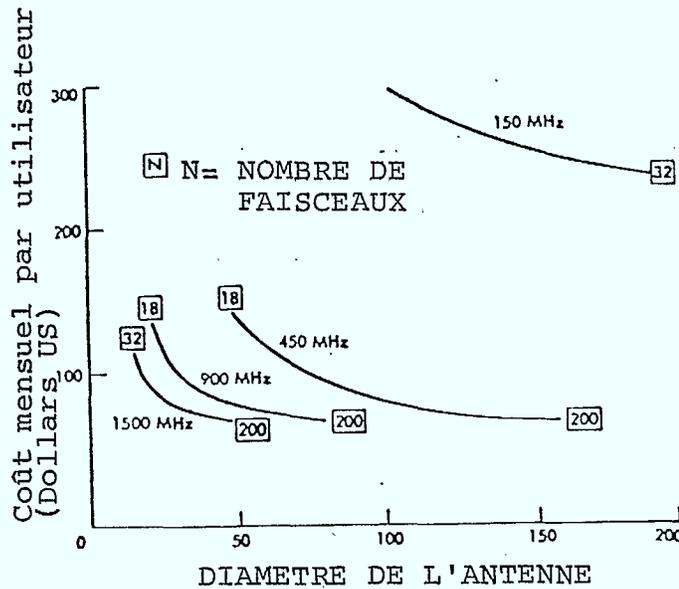


Fig. 5.11 Coûts de l'utilisateur par rapport au diamètre de l'antenne

Coût mensuel par utilisateur (Dollars US)

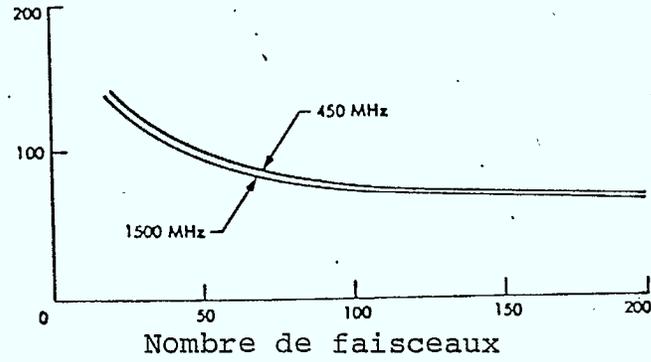


Fig. 5.12 Coûts de l'utilisateur en fonction du nombre de faisceaux

Coût mensuel par utilisateur (Dollars US)

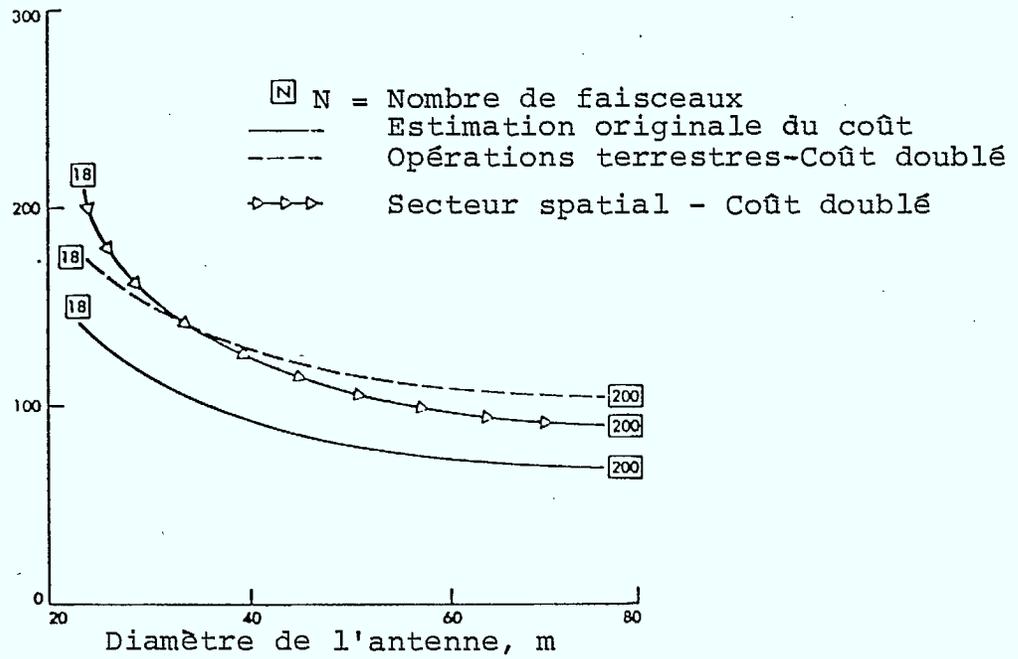


Fig. 5.13 Coût mensuel par utilisateur à 900 MHz dans trois situations différentes

5.9 References

- [1] Anderson, R.E. "Experiments and Problems in Satellite-Aided Mobile Communications", 1978 Wescon Technical Papers, Los Angeles, CA, U.S.A., 1978.
- [2] Anderson, R.E. "Position Surveillance Using One Active Ranging Satellite and Time of Arrival of a Signal from an Independent Satellite", Communication privée.
- [3] Anderson, R.E., Frey, R.L., Lewis, J.R., "Satellite-Aided Mobile Communications, Experiments, Applications and Prospects", ICC'80, International Conference on Communications, Seattle, WA., June 8-12, 1980.
- [4] Anderson, R.E., Mitton, R.T., Brown, J.P., "Potential of Satellite-Aided Mobile Telephone", IEEE International Conference on Cybernetics and Society, Denver, CO., U.S.A., 1979.
- [5] Bisignani, W.T., Parness, J.H., Roberts, J.S., "Cost-Benefit Study of Satellite-Based Law Enforcement Mobile Communications", IEEE Proceedings of the International Conference on Cybernetics and Society, Denver, CO, U.S.A., Oct. 8-10, 1979.
- [6] Brisken, A.F., "Automatic Continental Land Mobile Position Fixing via Satellite", Navigation, U.S.A. Vol. 25, No. 3, 1979.
- [7] Brisken, A.F., Anderson, R.E., Frey, R.L., Lewis, J.R., "Land Mobile Communications and Position Fixing Using Satellites", IEEE, Trans. Veh. Technol. USA, August 1979.
- [8] Brisken, A.F., Frey, R.L., "Continental Land Mobile Communications and Automatic Position Fixing via Satellite", IEEE, 1977 Carnahan Conference on Crime Countermeasures, April 1977.
- [9] Cardullo, M.W., Dorion, C., "Mobile Communications via Satellite Telecommunications Journal (Switzerland), vol. 36, No. 9, 1969.

- [10] Castruccio, P.A., "The Technical and Economic Role of Space Technology in Terrestrial Mobile Communications", paper 30.4.1, NTC Conference Record, vol. 2, November 1979.
- [11] Charas, P.H., Molker, A., "Development and Test of a Multi-beam Array Payload for Satellite Communications with Mobiles", ICC'80, International Conference on Communications, Seattle, WA., June 8-12, 1980.
- [12] Dion, A.R., Ricardi, L., "A Variable Coverage Satellite Antenna System", IEEE Proceedings, vol. 59, 1971.
- [13] Durani, S.H., "Narrowband System Activities in the NASA Communications Program", IEEE International Conference on Communications, 1979.
- [14] Eaves, R.E., "EHF Satellite Communication Systems for Mobile Users", IEEE Electronics and Aerospace Systems Conference, Arlington, VA., USA, 1979.
- [15] Engels, P.D., "A Channel Simulator for L-Band Satellite-Mobile Communications", AGARD Conference Proceedings, No. 239 Digital Communications in Avionics, 1978.
- [16] Freibaum, J., "The Application of Mobile Satellite Services to Emergency Response Communications", ICC'80, International Conference on Communications, Seattle, WA., June 8-12, 1980.
- [17] Goold, R.G., Miller, J.E., "The Increasing Demand for, and Specialization of, Communication Satellites", IEEE International Conference on Communications, Toronto, Canada, 1978.
- [18] Hirata, Y., Kyogoku, M., Isomura, E., "A Study on Satellite Communications for Mobiles", Paper 72-565, AIAA, 4th Communications Satellite Systems Conference, Washington, D.C., USA, 1972.
- [19] Jamieson, W.M., Peet, C.S., "Potential Markets for a Satellite-Based Mobile Communications System", Battelle, Columbus Laboratories, (Report No. BCL-0A-TFR-76-4), Columbus, Ohio, 1976.

- [20] Knoose, G.H., "Terrestrial/Land Mobile Satellite Considerations, NASA Plans and Critical Issues", Communication Privée.
- [21] Knoose, G.H., Castruccio, P.A., "The Concept of an Integrated Terrestrial Land Mobile Satellite System", ICC'80, International Conference on Communications, Seattle, WA., June 8-12, 1980.
- [22] Matthews, E.W., Cuccia, C.L., Rubins, M.D., "Technology Considerations for the Use of Multiple Beam Antenna in Communication satellites", IEEE, 1979 Microwave Symposium.
- [23] McGarty, T.D., Warner, T.H., "Multiple Beam Satellite System Optimization", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-13, No. 5, Sept. 1977.
- [24] McGarty, T.P., Schneider, K.S., "Processing Voice and Data in Mobile Satellite Communications", IEEE, International Conference on Communications, Chicago, ILL. USA, 1977.
- [25] Miller, J.E., "Spectrum Efficient Technology for the Land Mobile Satellite Service", Intelcom 79, Exposition Proceedings, Dallas, TX., USA, 1979.
- [26] Nagurney, F.K., Burge, C.D., "Evaluation of the Application of Mobile Satellite Communications in Emergency Medical Care", ICC'80, International Conference on Communications, Seattle, WA., June 8-12, 1980.
- [27] Parness, J.H., "Land Mobile Satellite Relay of Terrestrial Vehicle Positioning Data", ICC'80, International Conference on Communications, Seattle, WA., June 8-12, 1980.
- [28] Plemel, R.A., Copeck, J.A., Krukewich, K.L., "A Computer Simulation for the Analysis of Interference Problems Related to Mobile Satellite Communications Systems", IEE Maritime and Aeronautical Satellite Communication and Navigation, London, England, 1978.

- [29] Reilly, N.B., Smith, J.G., "A National Voice Network with Satellite and Small Transceivers", AIAA, 7th Communications Satellite Systems Conference.
- [30] Weiss, J.A., "Low Cost Satellite Land Mobile Service for Nationwide Applications", IEEE Vehicular Technology Conference, Denver, CO, USA, 1978.
- [31] White, B.E., Wilson, Q.C., Kota, S.L., "Satellite Communication Systems Netting Concepts for Mobile Terminals", IEEE National Telecommunications Conference, Birmingham, AL., USA, 1978.
- [32] Young, R.W., "Satellite Design Considerations", IEEE International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Surveillance, London, England, 1973.
- [33] Castruccio, P., "Status of Terrestrial Mobile Communications", presentation materials for session 30, The Emerging Need for a Terrestrial/Land Mobile Satellite System, National Telecommunications Conference, November 1979.
- [34] Hatfield, D.N., "Measures of Spectral Efficiency in Land Mobile Radio", 25th IEEE Vehicular Technology Conference, 1975.

